

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE ARREGLOS DE BARRAS E
INTERRUPTORES EN EXTRA ALTA TENSIÓN MEDIANTE ÁRBOLES DE
FALLA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

GUSTAVO ADOLFO MUÑOZ MARDONES

PROFESOR GUÍA:

GABRIEL OLGUÍN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

ARIEL VALDENEGRO

CLAUDIA RAHMANN

SANTIAGO DE CHILE

ABRIL 2012

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: GUSTAVO MUÑOZ MARDONES
FECHA: 25 DE ABRIL DEL 2012
PROF. GUÍA: SR. GABRIEL OLGUÍN P.

ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE ARREGLOS DE BARRAS E INTERRUPTORES EN EXTRA ALTA TENSIÓN MEDIANTE ÁRBOLES DE FALLA

En la presente memoria se estudia la confiabilidad de arreglos de barras e interruptores como el de barra simple, arreglo de doble barra, arreglo de barra principal con barra de transferencia y arreglo de interruptor y medio.

El estudio está orientado a interruptores en extra alta tensión por lo que se mencionan las diferentes tecnologías, tendencias futuras, modos de falla y confiabilidad para este nivel de voltaje. Además se da a conocer toda la teoría de confiabilidad y técnicas necesarias para cumplir con los alcances de la memoria.

Para conocer la confiabilidad de los arreglos de barra e interruptores se aplica la técnica de árboles de falla, desarrollando una metodología de modelación que incorpora las características de cada configuración o arreglo. Luego de construido el árbol, este se resuelve mediante un algoritmo programado en el software Matlab, el que es validado basándose en estudios de confiabilidad anteriores. El algoritmo entrega la probabilidad de falla del sistema y otros parámetros que permiten hacer un análisis exhaustivo de la confiabilidad de cada configuración a estudiar.

El análisis está orientado a la confiabilidad de sistemas como saber cuánto aporta la falla de cada componente a la falla total de un conjunto, modos de falla común que provocan indisponibilidad en más de un elemento simultáneamente, y la cuantificación de los diferentes modos de fallas de los interruptores. Por otra parte también se realiza un análisis enfocado en la normativa chilena actual incorporando el criterio N-1 y seguridad de suministro.

El análisis lleva a determinar qué arreglo de barra e interruptores es más confiable, haciendo recomendaciones sobre futuras inversiones bajo este punto de vista.

La aplicación del modelo se le puede dar a cualquier tipo de configuración, sin embargo se proponen trabajos futuros que permitirían una mejora en el modelo y mayor aproximación a resultados reales.

Agradecimientos

En primera instancia quiero hacer una dedicatoria del trabajo realizado y de todo lo que ha significado este proceso a mi familia, padres, hermanos por su apoyo incondicional.

Agradecer a los participantes del proceso de titulación, en especial a Gabriel Olgún por la oportunidad, la ayuda, su tiempo, motivación y disponibilidad absoluta.

Han sido seis largos años de mucho sacrificio, constancia y responsabilidad, una historia que ha tenido varios actores los que han aportado su grano de arena para mi formación, a cada profesor, compañero, tutor en mis prácticas, especialmente a Sergio Miranda, muchas gracias.

Contenidos

1	Capítulo 1: Introducción.....	12
1.1	Motivación.....	12
1.2	Objetivos Generales.....	13
1.3	Objetivos Específicos.....	13
1.4	Aportes.....	13
1.5	Organización de la Memoria.....	14
2	Capítulo 2: Arreglos de Barras e Interruptores en Extra Alta Tensión.....	15
2.1	Subestaciones Eléctricas y Arreglos de Interruptores.....	15
2.1.1	Arreglos de Barras e Interruptores.....	15
2.1.2	Tipos de Configuraciones de Barras e Interruptores.....	15
2.2	Interruptores en Extra Alta Tensión (EAT) y Tecnologías.....	19
2.2.1	Interruptor de Pequeño Volumen de Aceite.....	20
2.2.2	Interruptor de Aire Comprimido.....	21
2.2.3	Interruptor de Potencia SF6.....	21
2.2.4	Tendencias Futuras.....	25
2.2.5	Modos de Falla de Interruptores.....	25
2.2.6	Datos de Confiabilidad.....	26
3	Capítulo 3: Teoría de Confiabilidad de Sistemas.....	28
3.1	Confiabilidad.....	28
3.2	Falla.....	28
3.3	Densidad de Probabilidad.....	28
3.4	Tasa de Falla.....	29
3.5	Parámetros de Confiabilidad.....	30
3.6	Disponibilidad.....	31
3.7	Confiabilidad en Sistemas.....	31
3.7.1	Conexión Serie Paralelo.....	32
4	Capítulo 4: Teoría de Árboles de Falla.....	34
4.1	Introducción a Árboles de Falla.....	34
4.2	Conceptos y Simbología.....	34
4.2.1	Evento Superior.....	34

4.2.2	Evento Básico	35
4.2.3	Compuerta AND.....	35
4.2.4	Compuerta OR.....	35
4.2.5	Compuerta OR Exclusiva	35
4.2.6	Compuerta Negación	36
4.2.7	Compuerta de Transferencia.....	36
4.3	Bloque de Confiabilidad y Árbol de Falla	36
4.4	Construcción de un Árbol de Falla	37
4.4.1	Análisis Preliminar	37
4.4.2	Especificaciones	37
4.4.3	Construcción.....	38
4.5	Análisis Cualitativo.....	40
4.5.1	Método Directo.....	41
4.5.2	Método Ascendente	43
4.5.3	Método Descendente	43
4.6	Análisis Cuantitativo.....	43
4.6.1	Método Directo.....	44
4.6.2	Método de los Conjuntos de Corte Mínimo (MCS)	45
4.6.3	Método de Factorización	46
4.6.4	Método Recursivo	46
4.7	Análisis de Importancia	47
4.8	Métodos de Resolución a Implementar	47
4.8.1	Método de Resolución Análisis Cualitativo	47
4.8.2	Método de Resolución Análisis Cuantitativo	51
4.8.3	Método de Resolución Análisis de Importancia.....	52
5	Capítulo 5: Validación del Algoritmo para Estudio de Árboles de Falla.....	53
5.1	Modelo Arreglo Interruptor y Medio según referencia.	53
5.2	Comparación de Resultados.....	59
6	Capítulo 6: Implementación del Modelo.....	61
6.1	Consideraciones del Modelo.....	61
6.2	Metodología de Modelación	61

6.2.1	Metodología de Modelación para Arreglo de Barra Simple.....	62
6.2.2	Metodología de Modelación para Arreglo de Doble Barra	65
6.2.3	Metodología de Modelación para Arreglo de Barra Principal con Barra de Transferencia.....	68
6.2.4	Secuencia de Metodología de Modelación.....	72
6.3	Implementación Árbol Arreglo Barra Simple.....	73
6.4	Implementación Árbol Arreglo Doble Barra	78
6.5	Implementación Árbol Arreglo Barra Principal y Barra de Transferencia.....	85
6.6	Implementación Árbol Arreglo Interruptor y Medio.....	100
6.7	Resultados de Confiabilidad	110
7	Capítulo 7: Análisis e Interpretación de Resultados del Modelo	112
7.1	Análisis de Confiabilidad.....	112
7.2	Análisis de Importancia	117
7.3	Análisis Falla Modo Común	121
7.4	Análisis de Modos de Falla de Interruptores	123
7.5	Confiabilidad de Arreglos en Sistema de Transmisión Troncal	124
7.6	Seguridad de Suministro	126
8	Capitulo 8: Conclusiones	128
9	Referencias	130

Índice de Figuras

Figura 2.1 Arreglo de barra Sencilla	16
Figura 2.2 Arreglo de doble Barra.....	16
Figura 2.3 Arreglo de barra principal con barra de transferencia.....	17
Figura 2.4 Arreglo de doble barra con doble interruptor.....	18
Figura 2.5 Arreglo de interruptor y medio	18
Figura 2.6 Arreglo de anillo	19
Figura 2.7 Tiempos de apertura y cierre durante una falla.....	20
Figura 2.8 Característica de Diseño Interruptor Puffer [9].....	22
Figura 2.9 Característica de Diseño Interruptor Auto-Puffer [9]	23
Figura 3.1 Función de densidad de falla.....	28
Figura 3.2 Distribución de Fallas	29
Figura 3.3 Relación entre MTTF, MTTR y MTBF.....	30
Figura 3.4 Elementos Serie.....	32
Figura 3.5 Elementos Paralelos	32
Figura 3.6 Sistema complejo	33
Figura 3.7 Equivalente Serie Paralelo del sistema complejo.....	33
Figura 4.1 Evento Superior.....	34
Figura 4.2 Evento Básico	35
Figura 4.3 Compuerta AND	35
Figura 4.4 Compuerta OR	35
Figura 4.5 Compuesta OR Exclusivo	35
Figura 4.6 Compuerta Negación.....	36
Figura 4.7 Compuertas de Transferencias	36
Figura 4.8 Equivalencia en bloques serie y árboles de falla.....	36
Figura 4.9 Equivalencia en bloques paralelos y árboles de falla.....	36
Figura 4.10 Sistema de tres válvulas	38
Figura 4.11 Árbol de falla sistema tres válvulas indisponibilidad de flujo	39
Figura 4.12 Árbol de falla sistema tres válvulas disponibilidad de flujo	40
Figura 4.13 Árbol de falla para ejemplo método directo.....	42
Figura 4.14 Árbol de falla equivalente para ejemplo método directo	43
Figura 5.1 Arreglo interruptor y medio utilizado para validar modelo	53
Figura 5.2 Dirección de los flujos hacia La desde LA y LB por CB2	54
Figura 5.3 Dirección de los flujos hacia La desde LA y LB por CB3	54
Figura 5.4 Árbol de falla evento principal.....	54
Figura 5.5 Árbol de falla no flujo a través de CB2.....	55
Figura 5.6 Árbol de falla CB2 indisponible	55
Figura 5.7 Árbol de falla CB1 indisponible	56
Figura 5.8 Árbol de falla no flujo entrante a CB1	56
Figura 5.9 Árbol de falla CB4 indisponible	57

Figura 5.10	Árbol de falla CB5 indisponible	57
Figura 5.11	Árbol de falla no flujo a través de CB3.....	57
Figura 5.12	Árbol de falla CB3 indisponible	58
Figura 5.13	Árbol de falla CB6 indisponible	58
Figura 5.14	Árbol de falla no flujo entrante a CB6.....	58
Figura 5.15	Árbol de falla no flujo entrante a CB4.....	59
Figura 6.1	Sistema de dos entradas y dos salidas.....	61
Figura 6.2	Arreglo barra simple con una entrada y una salida.....	62
Figura 6.3	Flujos para arreglo barra simple con una entrada y una salida.....	62
Figura 6.4	Árbol de falla “No hay flujo a través de La” en arreglo barra simple con una entrada y una salida	63
Figura 6.5	Árbol de falla “No flujo entrando a CB1”en arreglo barra simple con una entrada y una salida	64
Figura 6.6	Árbol de falla “Indisponibilidad de CB1” en arreglo barra simple con una entrada y una salida	64
Figura 6.7	Árbol de falla “Indisponibilidad de CB2” en arreglo barra simple con una entrada y una salida	65
Figura 6.8	Flujos en arreglo de doble barra ocupando barra de respaldo.....	66
Figura 6.9	Arreglo de doble barra con interruptor de traspaso de carga.....	66
Figura 6.10	Subárbol “no hay flujo a través de La”	67
Figura 6.11	Subárbol indisponibilidad de CB1 con respaldo de Barra	68
Figura 6.12	Arreglo de barra principal con barra de transferencia para una entrada y una salida.....	68
Figura 6.13	Conexión del arreglo para respaldar a CB1	69
Figura 6.14	Conexión del arreglo para respaldar a CB2	69
Figura 6.15	Subárbol “no hay flujo a través de La”	70
Figura 6.16	Subárbol “no hay flujo entrando a CB1”	71
Figura 6.17	Subárbol indisponibilidad de CB1	72
Figura 6.18	Arreglo de barra simple dos entradas con dos salidas	73
Figura 6.19	Dirección de flujos para arreglo de barra simple	73
Figura 6.20	Subárbol “no hay flujo a través de La” arreglo de barra simple	74
Figura 6.21	Subárbol “no hay flujo entrando a CB1” arreglo de barra simple	75
Figura 6.22	Subárbol “indisponibilidad de CB1” arreglo de barra simple.....	76
Figura 6.23	Subárbol “indisponibilidad de CB2” arreglo de barra simple.....	76
Figura 6.24	Subárbol “indisponibilidad de CB4” arreglo de barra simple.....	76
Figura 6.25	Árbol de falla reducido arreglo de barra simple.....	77
Figura 6.26	Arreglo de doble barra con dos entradas con dos salidas	78
Figura 6.27	Flujos para arreglo doble barra en condición normal de operación.....	79
Figura 6.28	Flujos para arreglo doble barra utilizando barra de respaldo.....	79
Figura 6.29	Subárbol “No hay flujo a través de La” arreglo de doble barra.....	80
Figura 6.30	Subárbol “Indisponibilidad de CB1” arreglo doble barra.....	81

Figura 6.31 Subárbol “No hay flujo a través de B1” arreglo de doble barra	81
Figura 6.32 Subárbol “Indisponibilidad de CB2” arreglo de doble barra condición normal de operación.....	82
Figura 6.33 Subárbol “Indisponibilidad de CB4” arreglo de doble barra condición normal de operación.....	82
Figura 6.34 Subárbol “No hay flujo a través de B2” arreglo doble barra, condición de falla en B1	83
Figura 6.35 Subárbol “Indisponibilidad de CB2” arreglo de doble barra condición de respaldo.....	83
Figura 6.36 Subárbol “Indisponibilidad de CB4” arreglo de doble barra condición de respaldo.....	84
Figura 6.37 Árbol de falla reducido arreglo de doble barra	84
Figura 6.38 Arreglo barra principal con barra de transferencia con dos entradas con dos salidas	85
Figura 6.39 Respaldo a CB1 mediante CB5.....	85
Figura 6.40 Respaldo a CB2 arreglo mediante CB5	86
Figura 6.41 Respaldo a CB3 mediante CB5.....	86
Figura 6.42 Respaldo a CB4 mediante CB5.....	86
Figura 6.43 Flujos arreglo para condición normal de operación.....	87
Figura 6.44 Flujos para respaldo a CB1 mediante CB5	87
Figura 6.45 Flujos para respaldo a CB2, CB3 y CB4 mediante CB5	88
Figura 6.46 Subárbol “No flujo a través de La” arreglo de barra principal con barra de transferencia.....	89
Figura 6.47 Subárbol “Indisponibilidad CB1” arreglo de barra principal con barra de transferencia.....	90
Figura 6.48 Subárbol “No hay flujo entrando a CB1” arreglo de barra principal con barra de transferencia.....	91
Figura 6.49 Subárbol “No entrando a B1/con falla en CB2” arreglo de barra principal con barra de transferencia.....	92
Figura 6.50 Subárbol “Indisponibilidad de CB4” en condición de respaldo a CB2 arreglo de barra principal con barra de transferencia	92
Figura 6.51 Subárbol “Indisponibilidad de CB5” en condición de respaldo a CB2 arreglo de barra principal con barra de transferencia	93
Figura 6.52 Subárbol “No entrando a B1/con falla en CB3” arreglo de barra principal con barra de transferencia.....	93
Figura 6.53 Subárbol “Indisponibilidad de CB2” en condición de respaldo a CB3 arreglo de barra principal con barra de transferencia	94
Figura 6.54 Subárbol “Indisponibilidad de CB4” en condición de respaldo a CB3 arreglo de barra principal con barra de transferencia	94
Figura 6.55 Subárbol “No entrando a B1/con falla en CB4” arreglo barra principal con barra de transferencia.....	95

Figura 6.56 Subárbol “Indisponibilidad de CB2” en condición de respaldo a CB4 arreglo de barra principal con barra de transferencia	95
Figura 6.57 Subárbol “Indisponibilidad de CB5” en condición de respaldo a CB4 arreglo de barra principal con barra de transferencia	96
Figura 6.58 Subárbol “No entrando a B1/sin falla en interruptores” arreglo de barra principal con barra de transferencia.....	96
Figura 6.59 Subárbol “No hay flujo a través de B2” arreglo de barra principal con barra de transferencia.....	97
Figura 6.60 Subárbol “Indisponibilidad de CB5” en condición de respaldo a CB1 arreglo de barra principal con barra de transferencia	98
Figura 6.61 Subárbol “Indisponibilidad de CB2” en condición de respaldo a CB1 arreglo de barra principal con barra de transferencia	98
Figura 6.62 Subárbol “Indisponibilidad de CB4” en condición de respaldo a CB1 arreglo de barra principal con barra de transferencia	98
Figura 6.63 Árbol de falla reducido arreglo de barra principal con barra de transferencia	100
Figura 6.64 Arreglo de barra interruptor y medio	101
Figura 6.65 Reconfiguración arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de CB1 o CB4.....	101
Figura 6.66 Reconfiguración arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de CB2	101
Figura 6.67 Reconfiguración arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de CB3 o CB6.....	102
Figura 6.68 Reconfiguración arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de CB5	102
Figura 6.69 Subárbol “No flujo a través de La” interruptor y medio	103
Figura 6.70 Flujos arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de CB1 o CB4.....	103
Figura 6.71 Subárbol “No hay flujo entrando a La/ con falla en CB1” interruptor y medio	104
Figura 6.72 Subárboles “Indisponibilidad de interruptores/ con falla en CB1” interruptor y medio	105
Figura 6.73 Flujos arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de CB2	106
Figura 6.74 Flujos arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de CB3 o CB6.....	106
Figura 6.75 Flujos arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de CB5	106
Figura 6.76 Subárbol “No hay flujo entrando a La/ sin falla en interruptores” interruptor y medio	107
Figura 6.77 Árbol de falla reducido arreglo de interruptor y medio	109
Figura 7.1 Tasas de falla arreglos de barra.....	112

Figura 7.2 Disponibilidad arreglos de barra.....	113
Figura 7.3 Mean Time To Repair arreglos de barra.....	114
Figura 7.4 Mean Time To fail and Mean Time Between fail arreglos de barra.....	115
Figura 7.5 Disponibilidad vs Inversión.....	116
Figura 7.6 Importancia arreglo doble simple.....	118
Figura 7.7 Importancia arreglo doble barra.....	118
Figura 7.8 Importancia arreglo barra principal con barra de transferencia.....	119
Figura 7.9 Importancia arreglo interruptor y medio.....	120
Figura 7.10 Relación entre fallas independientes y fallas modo común.....	121
Figura 7.11 (a) Árbol de falla sin modo de falla común, (b) Árbol de falla con modo de falla común.....	122
Figura 7.12 Subárbol evento principal con criterio N-1.....	125

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Datos de confiabilidad Interruptores EAT [11].....	27
Tabla 5.1 Datos de confiabilidad arreglo interruptor y medio	53
Tabla 5.2 Comparación indisponibilidad Algoritmo vs Fuente, arreglo interruptor y medio.	59
Tabla 5.3 Comparación disponibilidad Algoritmo vs Fuente, arreglo doble interruptor doble barra.....	60
Tabla 6.1 Conjunto de corte mínimo arreglo de barra simple.....	77
Tabla 6.2 Conjunto de corte mínimo arreglo de doble barra.....	84
Tabla 6.3 Conjunto de corte mínimo arreglo de barra principal con barra de transferencia	99
Tabla 6.4 Conjunto de corte mínimo arreglo interruptor y medio.....	108
Tabla 6.5 Conjunto de corte mínimo arreglo interruptor y medio memoria de referencia [15].	108
Tabla 6.6 Datos de confiabilidad para eventos básicos	110
Tabla 6.7 Resultados de confiabilidad.....	110
Tabla 6.8 Resultados de confiabilidad en periodos de años	111
Tabla 6.9 MTTF, MTTR y MTBF	111
Tabla 7.1 MTTF, MTTR y MTBF	116
Tabla 7.2 Importancia arreglo barra simple.....	117
Tabla 7.3 Importancia arreglo doble barra	118
Tabla 7.4 Importancia arreglo barra principal con barra de transferencia.....	119
Tabla 7.5 Importancia arreglo interruptor y medio	120
Tabla 7.6 Indisponibilidad modo de falla común.....	122
Tabla 7.7 Aportes de fallas de interruptores a falla del sistema.....	123
Tabla 7.8 Aportes de modos de fallas a fallas de interruptores.....	123
Tabla 7.9 Aportes de modos de fallas a falla total de los arreglos de barra	124
Tabla 7.10 Confiabilidad para arreglos de barra aplicando criterio N-1	125

1 Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación

Los equipos y subsistemas de un sistema eléctrico pueden presentar fallas las cuales tienen impacto en la calidad y seguridad de suministro, y costos de operación en los sistemas de energía eléctrica. Estas falencias pueden repercutir en el desabastecimiento de consumos con altos costos de fallas por lo que se hace relevante evaluar a priori la probabilidad de ocurrencia de estos eventos. La salida de operación de un equipo puede llevar a una cadena de acontecimientos no deseados incluso hasta un black-out total del sistema. De acá surge la necesidad del estudio de la confiabilidad y sus respectivos componentes o subsistemas para así tener evaluaciones cuantitativas de la probabilidad de falla y adelantarse a los hechos mediante mantenimientos preventivos, planes de contingencias, cambios de equipos y ampliaciones, entre otras soluciones.

La presente memoria está orientada a arreglos de barras e interruptores de extra alta tensión donde la configuración de subestaciones se hace un tema relevante dado el impacto en la seguridad de suministro. El artículo 3-29 de la Norma Técnica de Calidad y Seguridad de servicio señala lo siguiente [1]:

“Las subestaciones del Sistema de Transmisión Troncal deberán tener una configuración de barras con redundancia suficiente para realizar el mantenimiento de cada interruptor asociado a líneas, transformadores u otros equipos pertenecientes al Sistema de Transmisión Troncal, sin alterar la configuración topológica del sistema.

La configuración específica que se adoptará en el caso de futuras subestaciones, tales como esquemas en anillo, barra principal y transferencia, interruptor y medio u otro, será definida en base a los criterios técnicos y económicos aplicados en el Estudio de Transmisión Troncal y sus revisiones periódicas.”

Los equipos más importantes dentro de una configuración o arreglo de barras son los interruptores, su rol principal es conectar y desconectar circuitos bajo carga eléctrica hasta niveles de corriente de cortocircuito. Su confiabilidad es fundamental para una correcta operación aportando significativamente en la confiabilidad total del sistema.

Una técnica para cuantificar la confiabilidad es el árbol de falla, más conocidos como FTA (Fault Tree Analysis), diseñados para encontrar la probabilidad de ocurrencia de una falla o indisponibilidad del sistema. En la presente memoria se usa esta técnica modelando los arreglos de barras como árboles y encontrando tasas de fallas, reparo e indisponibilidad.

1.2 Objetivos Generales

El objetivo principal de esta memoria es estudiar la confiabilidad de arreglos de interruptores en extra alta tensión mediante la técnica de árboles de falla. Esta técnica es muy aplicada hoy en día en disciplinas donde la seguridad es crucial como energía nuclear y aeronáutica. Los arreglos de interruptores a evaluar serán el de barra simple, barra principal con barra de transferencia, doble barra e interruptor y medio. Estos se deberán abordar matemáticamente mediante el uso de algoritmos de solución de árboles de fallas, de los cuales se obtendrán diversos parámetros que darán cuenta de la confiabilidad y disponibilidad de cada arreglo.

Para poder realizar el trabajo se debe estudiar aspectos de confiabilidad, disponibilidad, análisis de árboles de falla junto con conocer diversos tipos de arreglos de interruptores que cumplan con los objetivos de la memoria. En particular lo relevante será familiarizarse con los distintos modos de fallas en arreglos de interruptores y sus respectivas tasas de ocurrencia.

Para finalizar se analizarán resultados con la finalidad de ver cuál es el arreglo más confiable, además de un análisis de importancia de cada componente del árbol.

1.3 Objetivos Específicos

- Proponer una metodología genérica para modelar arreglos de interruptores mediante la técnica de árboles de falla.
- Proponer un modelo de árbol de falla para las configuraciones de interruptor con doble barra y barra de transferencia.
- Investigar, programar y validar los algoritmos que se requieren para llevar a cabo el análisis cuantitativo de confiabilidad mediante árboles de falla.
- Describir componentes de arreglos de interruptores y sus diversos tipos y aplicaciones.
- Realizar análisis de importancia de cada componente de los arreglos de falla.
- Analizar modelos aplicando técnicas de modo de falla común.

1.4 Aportes

Los modelos y técnicas de construcción de árboles de falla para estudios de arreglos de barras e interruptores, más los algoritmos de resolución, son la principal contribución de la presente memoria, siendo la base para estudios posteriores de una subestación eléctrica

cualquiera. Por otro lado conocer la confiabilidad de los diferentes arreglos de barra y sus componentes, resulta ser una variable importante en la planificación del sistema eléctrico.

1.5 Organización de la Memoria

En el capítulo 2 se hace una revisión bibliográfica partiendo por definir una subestación, sus aplicaciones y equipos asociados, luego las distintas configuraciones de barra e interruptores finalizando con la tecnología de interruptores en extra alta tensión, modos de falla y datos de confiabilidad.

El capítulo 3 muestra la teoría de confiabilidad de sistemas basándose en conceptos esenciales como indisponibilidad, tasa de falla, tasa de reparo, frecuencia de falla, tiempos medios de falla, de reparo y entre fallas.

En el capítulo 4 se dan a conocer la técnica de árboles de fallas describiendo su estructura, construcción y análisis, finalizando con los métodos de resolución implementados.

En el capítulo 5 se validan los algoritmos resolviendo el árbol para el arreglo de barra de interruptor y medio comparando resultados con los expuestos en la literatura.

En el capítulo 6 se desarrolla la metodología de modelación del árbol de falla y la aplicación de ésta a los casos de estudio.

En el capítulo 7 se analizan los resultados obtenidos desde el punto de vista de confiabilidad y seguridad de suministro.

En el capítulo 8 se concluye el trabajo de la memoria abordando objetivos y sugiriendo trabajos futuros.

2 Capítulo 2: Arreglos de Barras e Interruptores en Extra Alta Tensión

2.1 Subestaciones Eléctricas y Arreglos de Interruptores

Una subestación corresponde a un nodo del sistema eléctrico formado por un conjunto de equipos utilizados para dirigir el flujo de energía en un sistema de potencia y garantizar la seguridad de este por medio de dispositivos automáticos de control y protecciones.

En los sistemas eléctricos las subestaciones son fundamentales para la operación y seguridad de suministro, encontrándose diferentes tipos según las necesidades topológicas del sistema. Es así como se pueden encontrar subestaciones de generación, de transformación elevadora o reductora, y de maniobra, en las que se conectan varios circuitos para orientar o distribuir el flujo de potencia a diferentes áreas del sistema.

En cuanto a los equipos que forman una subestación se pueden encontrar principalmente transformadores de poder, interruptores, seccionadores, pararrayos y equipos de medida [2], los que dependiendo de sus disposiciones en conjunto con las barras del sistema, dan una topología definida con características de operación, mantenimiento, confiabilidad e inversión.

2.1.1 Arreglos de Barras e Interruptores

Se denomina configuración o arreglos de barras e interruptores, del inglés “station arrangement”, a la topología de conexión de los distintos equipos electromecánicos de una subestación permitiendo diferentes grados de confiabilidad, seguridad y flexibilidad de manejo para el sistema.

2.1.2 Tipos de Configuraciones de Barras e Interruptores

Existen diversas configuraciones de barras, por una parte la tendencia americana en donde los circuitos se conectan a las barras o entre ellas por medio de interruptores, hallándose configuraciones de anillo, interruptor y medio, y doble interruptor con doble barra. Por otro lado la tendencia europea en que cada circuito tiene un interruptor con la posibilidad de conectarse a una o más barras por medio de seccionadores, de esta forma se pueden encontrar disposiciones como barra de transferencia y doble barra [3]. Estas se detallarán a continuación enfatizando las características de operación de cada una.

2.1.2.1 Barra Sencilla

Arreglo que cuenta con una sola barra en la cual se conectan los diferentes equipos como se muestra en la figura 2.1. Esta configuración es muy económica, simple y no da mucha posibilidad para una incorrecta operación, sin embargo la confiabilidad es relativamente

baja, una falla en la barra o interruptores impide el servicio en la totalidad del sistema, además ante mantenimiento se requiere dejar totalmente fuera la línea correspondiente [4].

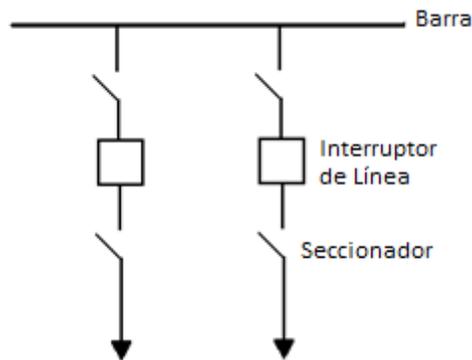


Figura 2.1 Arreglo de barra Sencilla

2.1.2.2 Doble Barra

Está constituido por dos barras principales que se acoplan entre sí mediante un interruptor de transferencia y sus seccionadores asociados según la figura 2.2. Esta configuración permite operar ambas barras al mismo tiempo o una como respaldo de la otra, sin embargo ante una falla en la barra en operación se requiere una desconexión total para trasladar los flujos a la barra de respaldo. Con esto se gana en confiabilidad ante fallas en las barras, por otro lado una falla en cualquier interruptor exige una apertura de todos los interruptores de la configuración sacando de servicio el sistema [4].

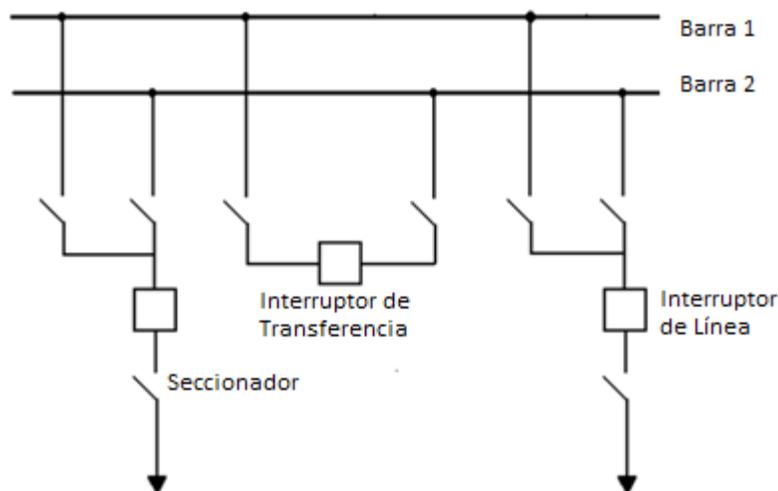


Figura 2.2 Arreglo de doble Barra

2.1.2.3 Barra principal con barra de transferencia

Esta configuración está constituida por una barra principal y otra de transferencia que solo se ocupa como respaldo en caso de mantenimiento o fallas de interruptor según la figura 2.3.

En operación normal se encuentra en estado cerrado I1, I2, D11, D12, D21 y D22. Se supone el caso que se quiera hacer mantenimiento al interruptor I1, el primer paso es cerrar los seccionadores DT1 y DT2 para luego cerrar T energizando la barra de transferencia. Posteriormente se cierra D13, lo que se puede hacer dado que en ambos extremos del desconectador existe el mismo potencial. Finalmente se abre I1 y luego los seccionadores D11 y D12, dejando al interruptor I1 apto para mantenimiento.

Para una situación de falla en un interruptor la maniobra es similar, esta vez desde un estado normal se pasa a un estado N-1. Ilustremos esto suponiendo una falla en I1, esto provoca una apertura de todos los interruptores desenergizando la barra, luego se abren los seccionadores D11 y D12 dejando acceso a I1 para reparación. Posteriormente se cierran D13, DT1 y DT2 para luego cerrar T haciendo pasar los flujos por la barra de transferencia.

En cuanto a confiabilidad esta configuración permite dar respaldo a cualquier interruptor mediante el interruptor de transferencia, sin embargo ante fallas de interruptor hay una apertura de todos los restantes dejando fuera de servicio al sistema, luego se hacen las maniobras necesarias para aislar el interruptor fallido volviendo rápidamente a una operación normal. Por otro lado este arreglo ante falla en la barra sale de servicio completamente.

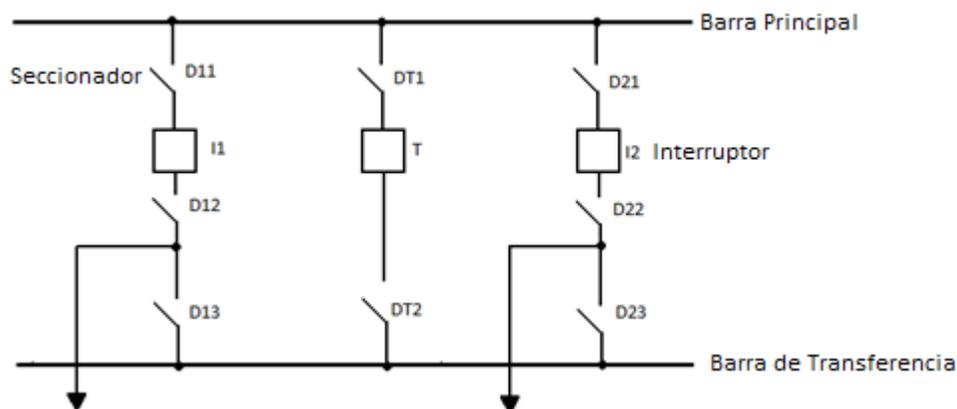


Figura 2.3 Arreglo de barra principal con barra de transferencia

2.1.2.4 Doble Barra con doble Interruptor

Arreglo en el cual cada línea es protegida mediante dos interruptores ubicados uno en cada lado ganando confiabilidad ante fallas de barra e interruptores (ver figura 2.4). En estado normal de operación, todos los interruptores y seccionadores se encuentran cerrados, ahora si falla una barra, por ejemplo barra 1, se abren todos los interruptores adyacentes que serían I1, I3 e I5, evitando la falta de flujo en todas las líneas, por otro lado si falla un interruptor como I1 operan todos los interruptores vecinos dejando fuera de servicio la línea correspondiente al interruptor fallido, para el caso abren I2, I3 e I5.

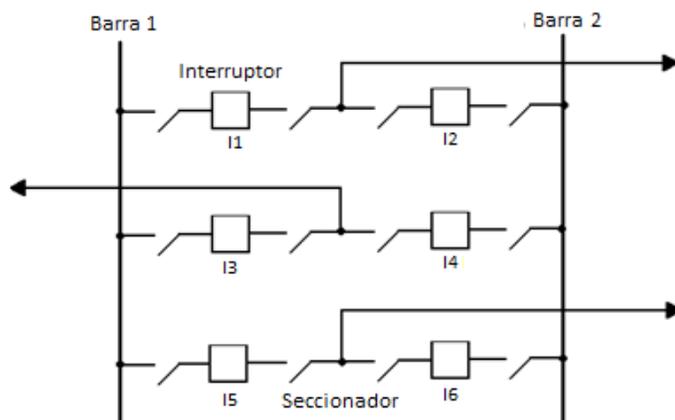


Figura 2.4 Arreglo de doble barra con doble interruptor

2.1.2.5 Interruptor y Medio

Arreglo constituido por dos barras que se conectan entre sí mediante tres interruptores entre los cuales se acoplan las líneas respectivas según la Figura 2.5, es decir por dos tramos de línea existen tres interruptores, de acá proviene el nombre de interruptor y medio. En estado normal de operación, todos los interruptores y seccionadores se encuentran cerrados. Para una falla en barra1 se abren los interruptores I1 e I4 aislando la falla sin impedir el flujo por las líneas, si falla un interruptor central como I2 operan los interruptores vecinos (I1 e I3) dejando fuera dos tramos de línea, por otro lado si falla un interruptor lateral como I1 opera el interruptor central del tramo y todos los adyacentes a la barra aledaña, para el caso I2 e I4, dejando fuera solo un tramo de línea.

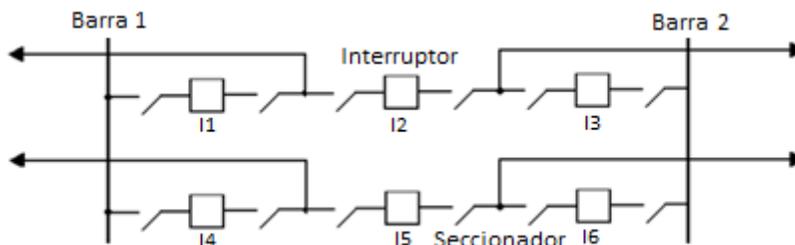


Figura 2.5 Arreglo de interruptor y medio

2.1.2.6 Anillo

Esta configuración consiste en que los interruptores y desconectadores forman un anillo para mejorar la confiabilidad (ver Figura 2.6). En estado normal de operación todos los interruptores y seccionadores se encuentran cerrados. Ante fallas de interruptor como I1 operan todos los adyacentes (I2 e I3) dejando fuera de servicio dos tramos, por otro lado, si falla una línea operan los interruptores respectivos aislando la falla permitiendo el funcionamiento normal del resto del sistema, como ejemplo abrirían I1 e I2 si falla la línea entre estos.

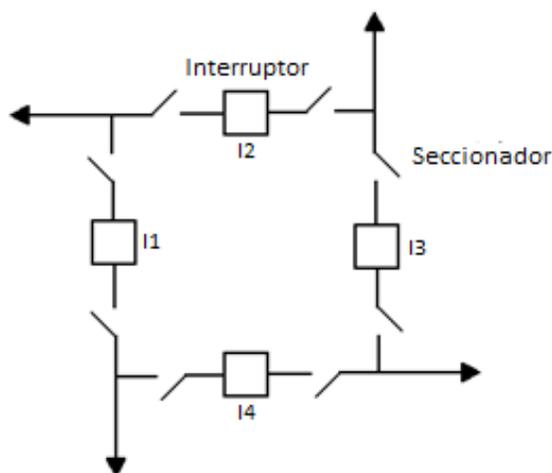


Figura 2.6 Arreglo de anillo

En estas tres últimas configuraciones permiten que el mantenimiento de un interruptor se puede realizar sin sacar de servicio ningún tramo de línea y sin realizar maniobras complejas, solo cerrando el interruptor y luego sus respectivos seccionadores.

2.2 Interruptores en Extra Alta Tensión (EAT) y Tecnologías

Para evaluar la confiabilidad de una subestación, es necesario llevar a cabo el estudio de interruptores en extra alta tensión y sus modos de fallas. Estos equipos se instalan en la subestación para realizar la acción de conmutación y así mantener o interrumpir el flujo de corriente en condiciones normales de operación y contingencias. La rápida respuesta y la interrupción total del flujo son esenciales para proteger y mantener la estabilidad del sistema.

Conceptualmente el interruptor es un sistema con una entrada y una salida, y dos estados de operación posible, que son; “Abierto” (aislador entre terminales de entrada y salida) y “Cerrado” (conductor). El equipo se diseña para poder cambiar de un estado al otro bajo niveles nominales de corriente e inclusive en magnitudes de falla. La acción del interruptor esta comandada por un sistema de control que obedece a la operación de las protecciones u

orden humana manual o remota. Si el interruptor abre a causa de la operación de protecciones, es porque el sistema acusa una falla, es así como se definen tiempos de apertura y cierre durante la falla según norma ANSI/IEEE [5].

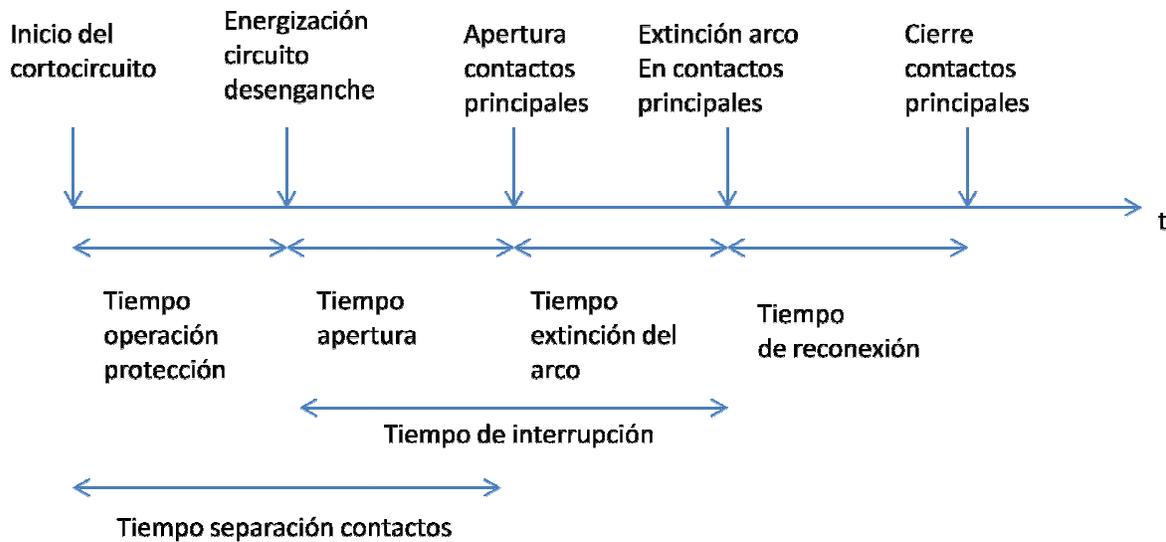


Figura 2.7 Tiempos de apertura y cierre durante una falla

Los interruptores se pueden clasificar bajo tres aspectos: mecanismo de operación, cámara de extinción y medio de extinción del arco. Los interruptores pueden operar con mecanismos de resorte, neumático, hidráulicos o una combinación entre estos. En cuanto a las cámaras de extinción estas pueden ser tanque muerto o tanque vivo. Finalmente según el medio de extinción del arco existen los interruptores de pequeño volumen de aceite, aire comprimido, SF₆ (hexafluoruro de azufre) y en vacío.

2.2.1 Interruptor de Pequeño Volumen de Aceite

En este tipo de interruptores se ocupa flujo de aceite como medio de extinción del arco y se utiliza el mismo arco para provocar dichos flujos. Acá acurren tres efectos [6]:

- Efecto del hidrógeno: El arco eléctrico separa el hidrógeno contenido en el aceite, el cual como buen conductor térmico enfría rápidamente el arco.
- Efecto de flujo de aceite: el arco genera altas temperaturas provocando que se eleve la presión en la cámara de extinción haciendo que el aceite fluya hacia esta.
- Efecto de la expansión: por la alta temperatura provocada por el arco eléctrico, se forma una cubierta de gas en el núcleo del arco. Al pasar la corriente por cero no se tiene la energía suficiente para mantener la temperatura en el núcleo del arco, por lo que en este punto este es envuelto por aceite extinguiendo el arco.

Este tipo de interruptor requiere de mantenimiento periódico, limpieza y cambio de aceite constante. Además su principal problema es que, dependiendo de la magnitud del cortocircuito, al inflamarse el aceite provoca un excesivo aumento de presión que podría dañar al equipo

2.2.2 Interruptor de Aire Comprimido

Interruptores que se ocupan principalmente en subestaciones al aire libre a tensiones de hasta 800 kV. Estos interruptores enfrían el arco eléctrico por medio de aire seco limpio a presión. La extinción del arco es rápida (hasta uno o dos semiciclos) dada la alta presión de aire comprendida entre 15 a 30 bar haciendo que este se mueva a gran velocidad [6].

Los interruptores de este tipo poseen una fuente externa de aire a presión (depósito), este aire se utiliza únicamente al momento de operar, y generalmente al extinguir el arco es devuelto a la atmosfera.

Para niveles superiores a 110kV se debe tener más de un solo par de polos o contactos de apertura y así interrumpir el arco por medio de dos o tres pares de contacto en serie.

2.2.3 Interruptor de Potencia SF₆

Interruptores que utilizan hexafluoruro de azufre como medio dieléctrico para extinguir el arco. SF₆, es uno de los materiales más controvertidos que se ha utilizado en la tecnología eléctrica; ofrece enormes ventajas, tales como la notable combinación de alto peso molecular (que proporciona alta capacidad y alta densidad), alta energía de enlace (que lo hace muy estable), y la alta simetría (que se traduce en baja fuerza intermolecular para garantizar el SF₆ en forma gaseosa), no es inflamable, es electronegativo (la fuerza de ruptura es tres veces mayor que la del aire) [7]. Esta combinación hace SF₆ un medio dieléctrico excelente, muy fiable y es ampliamente utilizado en interruptor en EAT. Sin embargo, es uno de los gases de efecto invernadero más potente, con un impacto 22.000 veces mayor que el CO₂ durante un periodo de 100 años [8].

Estos interruptores pueden ser diseñados para subestaciones encapsuladas (GIS - Gas Insulated Switchgear) o para subestaciones a la intemperie (AIS - Air Insulated Switchgear) del tipo tanque vivo y tanque muerto.

Los modos de funcionamiento principales con los que opera este tipo de interruptor son el tipo soplador (Puffer) o autosoplado [9]. A continuación se muestra cómo funcionan ambos mecanismos.

2.2.3.1 Modo de funcionamiento Puffer

La figura 2.8 muestra el funcionamiento de un interruptor Puffer durante su etapa de apertura a cierre.

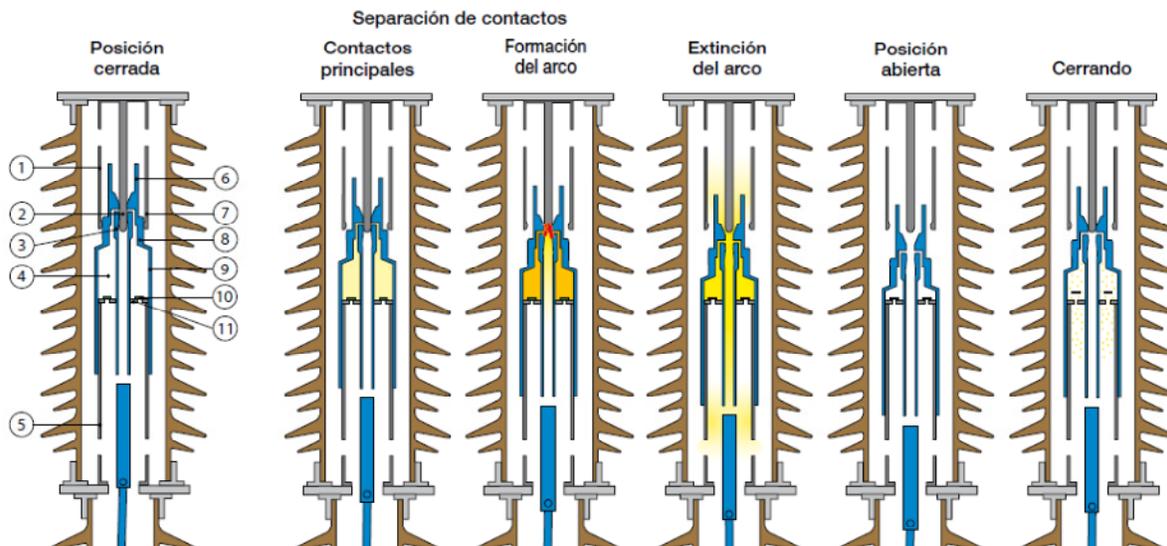


Figura 2.8 Característica de Diseño Interruptor Puffer [9]

Donde los números corresponden a:

- 1) Portador de corriente superior.
- 2) Contacto de arco fijo.
- 3) Contacto de arco móvil.
- 4) Volumen Puffer.
- 5) Portador de corriente inferior.
- 6) Boquilla.
- 7) Contacto principal fijo.
- 8) Contacto principal móvil.
- 9) Cilindro Puffer.
- 10) Válvula de relleno.
- 11) Émbolo fijo.

En su posición normal, los contactos del interruptor están cerrados y la corriente circula desde el portador de corriente superior al inferior a través de los contactos principales y el cilindro puffer.

Al abrirse los contactos principales y de arcos móviles, el cilindro puffer y la boquilla son empujados hacia la posición abierta. Todos estos elementos forman un conjunto móvil único.

Cuando el conjunto móvil es empujado hacia la posición abierta, la válvula de relleno es forzada a la posición de cierre en dirección contraria, y el gas SF₆ comienza a comprimirse entre el cilindro puffer móvil y el émbolo fijo. Los primeros contactos en separarse son los principales, luego los contactos de arco. Esto garantiza que sea en estos últimos donde se produzca el arco que será contenido por la boquilla.

Al separarse los contactos de arco, se forma un arco entre el móvil y el fijo. Al existir el arco se bloquea en cierto grado el flujo de gas SF₆ a través de la boquilla, por lo que la presión de gas en el volumen puffer continúa aumentando. Cuando la forma de onda de corriente atraviesa por cero, el arco se debilita. En ese momento, el gas SF₆ presurizado procede del volumen puffer a través de la boquilla, extinguiendo el arco.

En esta posición la distancia entre los contactos fijos y móviles es suficiente como para resistir los niveles dieléctricos nominales y evitar la aparición de un nuevo arco. Durante el cierre, la válvula de relleno se abre permitiendo que el gas SF₆ fluya hacia el volumen puffer.

La presión del gas SF₆ que se requiere para la interrupción es creada de forma mecánica. Por lo que se requieren de mecanismos de operación con suficiente energía para superar la presión acumulada en el volumen puffer, necesaria para interrumpir la corriente nominal de cortocircuito.

2.2.3.2 Modo de funcionamiento auto-puffer

La figura 2.9 muestra el funcionamiento de un interruptor Auto-Puffer durante su etapa de abertura a cierre.

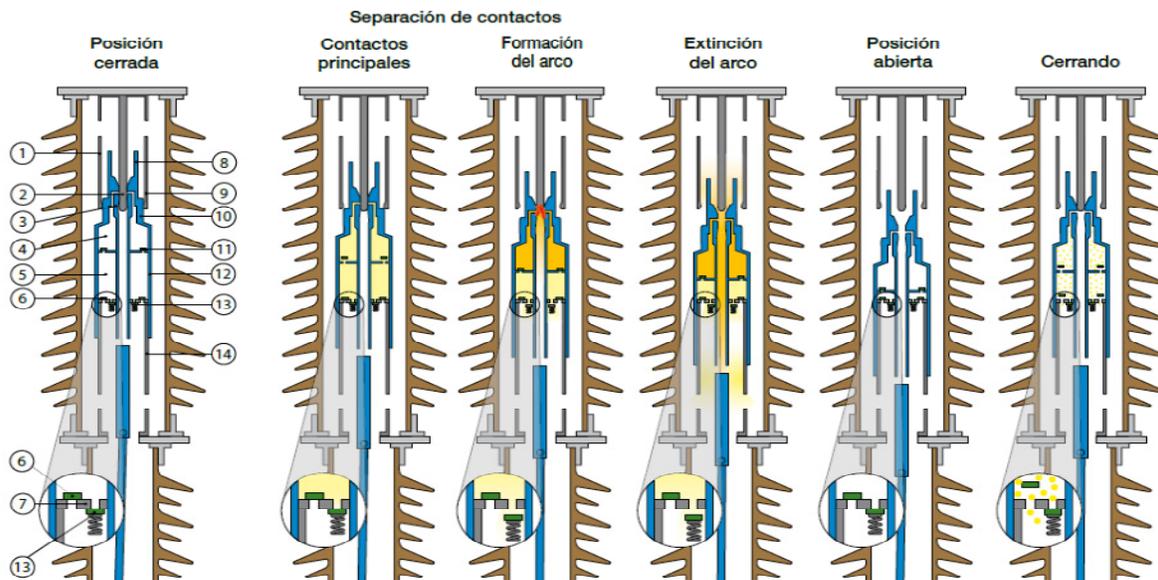


Figura 2.9 Característica de Diseño Interruptor Auto-Puffer [9]

Donde los números corresponden a:

- 1) Portador de corriente superior.
- 2) Contacto de arco fijo.
- 3) Contacto de arco móvil.
- 4) Volumen Auto-Puffer.
- 5) Volumen Puffer.
- 6) Válvula de relleno.
- 7) Émbolo fijo
- 8) Nozzle.
- 9) Contacto principal fijo.
- 10) Contacto principal móvil.
- 11) Válvula Auto-Puffer.
- 12) Cilindro Puffer.
- 13) Alivio de sobrepresión.
- 14) Portador de corriente inferior.

La apertura de un interruptor Auto-Puffer comienza de la misma manera que un interruptor tipo puffer.

Recién después de que se inicia el arco se observa una diferencia en el principio de operación entre ambos tipos de interruptores.

Se forma un arco al separarse los contactos respectivos. Cuando fluye el arco se bloquea el paso del gas SF₆. El arco que se forma es extremadamente caliente e irradia calor, con lo que se comienza a calentar el gas aumentando la presión en el interior de los volúmenes de Auto- Puffer y Puffer.

Debido a la alta presión de gas dentro del volumen Auto- Puffer se fuerza a la válvula Auto-Puffer a la posición de cierre. Se retiene todo el gas en el volumen Auto-Puffer fijo donde dado el aumento de calor aumenta la presión en el gas SF₆. Casi al mismo tiempo, la presión de gas en el volumen puffer alcanza un nivel suficiente para empujar y abrir la válvula de sobrepresión.

Cuando la onda de corriente atraviesa por cero, el gas SF₆ presurizado emana del volumen Auto-Puffer a través de la boquilla, extinguiendo el arco.

Durante el cierre, la válvula de relleno se abre permitiendo que el gas sea aspirado en los volúmenes puffer y Auto-Puffer.

Al interrumpir corrientes bajas, el interruptor Auto-Puffer se comporta de manera similar al interruptor puffer, dado que no existe suficiente presión de gas generada para forzar que la válvula Auto-Puffer se cierre. En este caso se requiere que la presión de gas se genere en

forma mecánica. Sin embargo para que la acción mecánica sea necesaria, la corriente a interrumpir debe estar por debajo un 20% a un 30% de la corriente de cortocircuito.

En posición de cierre la distancia entre los contactos fijos y móviles es suficiente como para resistir los niveles dieléctricos nominales y evitar la aparición de un nuevo arco

En el cierre, la válvula de relleno se abre permitiendo el paso del gas a los volúmenes Auto-Puffer y puffer.

Dado que la interrupción de alta corriente emplea el calentamiento del arco para generar la presión de gas necesaria en un volumen fijo, los interruptores Auto- Puffer requieren mucha menos energía de operación que los interruptores tipo Puffer.

2.2.4 Tendencias Futuras

Existe otra tecnología llamada interruptor en vacío donde los contactos se encuentran dentro de una cámara al vacío a presión entre 10 a 4 bar [6]. Esta tiene aplicación para niveles de tensión de 38kV, aunque el desarrollo tecnológico ha permitido llegar hasta 70kV. Para extra alta tensión hoy en día es imposible extinguir el arco eléctrico con esta tecnología, sin embargo se espera un mayor desarrollo en el futuro incrementando los voltajes en que se pueda aplicar pensando en rangos de 145kV [10].

Actualmente los interruptores en vacío ofrecen una alternativa a la tecnología SF₆ para niveles de voltaje adecuados, sin embargo a pesar de la alta contribución al calentamiento global estos se siguen implementando, y para alta tensión son la tecnología que presenta mejores propiedades para extinguir el arco eléctrico, por lo que como no existe tecnología que pueda remplazarlos se le da cada vez más énfasis a la reducción de las emisiones [10].

2.2.5 Modos de Falla de Interruptores

De acuerdo con el reporte de CIGRE [11] existen diferentes modos en que los interruptores fallan, estos se pueden clasificar en fallas mayores y menores. Las mayores son aquellas en que se requieren de una interrupción inmediata para ser reparado el equipo con las anunciadas a continuación.

- No cierra en comando.
- No abre en comando.
- Cierra sin comando.
- Abre sin comando.
- No conduce la corriente.
- No interrumpe la corriente.
- No soporta los niveles de amperaje.
- Cortocircuito a tierra.

- Cortocircuito entre polos.
- Cortocircuito a través de polos abiertos (externos).
- Cortocircuito a través de polos abiertos (internos).
- Bloqueo en posición abierta o cerrada.

Por otra parte existen las fallas menores asociadas a mantenimiento, operación, fabricación y otros efectos similares las que no requieren de una inmediata intervención. Esta clasificación se hace debido a que para los alcances de la memoria se considera que los interruptores fallan bajo un funcionamiento ideal del equipo, por lo que solo se considera el primer grupo para el análisis.

2.2.6 Datos de Confiabilidad

La tasa de falla de los interruptores fue extraída desde un reporte de CIGRE [11]. Este reporte entrega los resultados de una segunda investigación internacional de fallas y defectos en servicio de interruptores, observados durante un periodo de cuatro años (1988-1991) en 22 países distribuidos por todo el mundo, con un total de 132 compañías eléctricas [11].

Los datos de confiabilidad dependerán del nivel de voltaje, en particular interesa los datos para extra alta tensión. Primeramente se definen los siguientes conceptos [11]:

λ_{c1} : Fallas por no abrir tras 10.000 órdenes de aperturas.

λ_{c2} : Fallas por no interrumpir corriente tras 10.000 órdenes de aperturas.

λ_{c3} : Fallas por no cerrar tras 10.000 órdenes de cierra.

λ_{c4} : Fallas por no conducir corriente tras 10.000 órdenes de cierre.

$\lambda_c = \lambda_{c1} + \lambda_{c2} + \lambda_{c3} + \lambda_{c4}$: Fallas tras 10.000 órdenes de cierre o apertura.

C : Número promedio de ciclos por año.

$C\lambda_c$: Fallas mayores de interruptor por año durante apertura o cierre.

λ_s : Fallas mayores de interruptor por año fuera de apertura o cierre (cortocircuitos).

$\lambda_M = C\lambda_c + \lambda_s$: Fallas mayores totales por año.

Luego se puede construir la tabla 2.1 para los voltajes de interés:

Voltaje [kV]	λ_{c1}	λ_{c2}	λ_{c3}	λ_{c4}	λ_c	C	$C\lambda_c$	λ_s	λ_M
220<V<500	0,524	0,113	1,071	0,057	1,765	36	0,00635	0,00575	0,0121
500≤V	0,506	0,336	0,951	0,112	1,905	45	0,00857	0,01110	0,01967

Tabla 2.1 Datos de confiabilidad Interruptores EAT [11]

En consecuencia, es esperable que un interruptor de poder con niveles de tensión superiores a 500kV presente 0,01967 fallas por año, es decir falla una vez cada 50 años.

Nótese que esto es para un solo interruptor, en consideración a esto supongamos un sistema eléctrico con 100 interruptores de 500 kV, esto da cuenta de una tasa de 1,967 fallas de interruptores por año.

Este mismo análisis se puede hacer para interruptores en 220kV donde, considerando un universo de 500 interruptores, se obtiene una tasa de 6,105 fallas por año en interruptores de 220kV.

3 Capítulo 3: Teoría de Confiabilidad de Sistemas

En esta capítulo se presentan los conceptos de teoría de confiabilidad necesarios para realizar la memoria, abordando desde lo más general a lo particular, es así como se comienza dando la definición del concepto de confiabilidad.

3.1 Confiabilidad

La confiabilidad se define como la probabilidad de que un elemento realice su propósito adecuadamente por un período de tiempo bajo ciertas condiciones de operación [12]. Se entiende por “elemento” a una unidad funcional o estructural arbitraria que puede ser considerada como una entidad a investigar [13].

3.2 Falla

Se denomina falla de un elemento o equipo a la circunstancia que este deje operar adecuadamente, no realizando su propósito por un período de tiempo bajo ciertas condiciones de operación [12], dado esto, existe una probabilidad de que el dispositivo falle en un tiempo t , a lo que se le denomina Función de Distribución de Falla $F(t)$.

La confiabilidad será el inverso probabilístico de la función $F(t)$, esto es:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (3.1)$$

3.3 Densidad de Probabilidad

Dado lo anterior es posible definir la función de densidad de falla $f(t)$ como:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (3.2)$$

Así mismo la confiabilidad;

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (3.3)$$

La figura 3.1 muestra la forma típica de esta función:

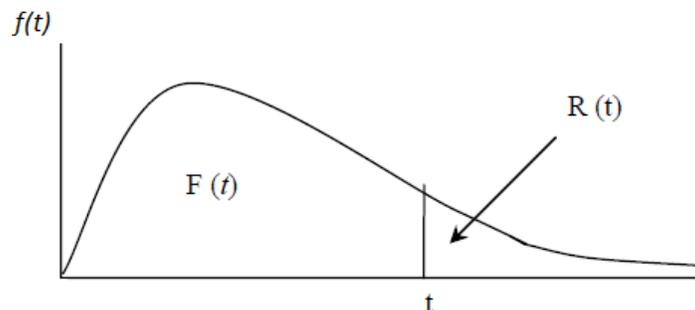


Figura 3.1 Función de densidad de falla

3.4 Tasa de Falla

La tasa de falla se puede definir como una proporción de fallas por unidad de tiempo. Matemáticamente este concepto viene dado por la expresión (3.4) [13]:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \quad (3.4)$$

Entonces se puede decir que $\lambda(t)$ corresponde al número de transiciones que un elemento realiza entre el estado normal y el estado de falla.

Modificando la ecuación (3.4):

$$\int \lambda(t) dt = -\int \frac{1}{R(t)} dR(t) \quad (3.5)$$

Así se puede obtener la función de confiabilidad en función de la tasa de falla.

$$R(t) = e^{\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (3.6)$$

La tasa de falla tiene su curva característica la que puede ser descrita bajo tres partes, la primera correspondiente a fallas tempranas (fabricación, montaje), luego viene el periodo en que el equipo se desempeña durante su vida útil y finalmente las fallas tardías correspondientes a los deterioros dado el cumplimiento de la vida útil.

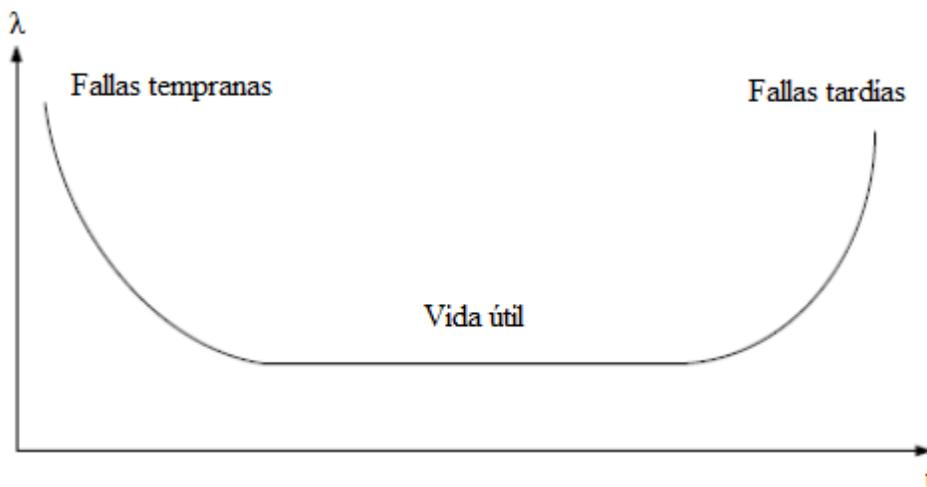


Figura 3.2 Distribución de Fallas

Supongamos que nos encontramos durante la vida útil del dispositivo, esto es $\lambda(t)$ se puede asumir como una constante:

$$\lambda(t) = \lambda \quad (3.7)$$

Para este caso la función de confiabilidad se puede expresar como:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.8)$$

3.5 Parámetros de Confiabilidad

El valor esperado del tiempo a fallar viene dado por:

$$E\{t\} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} t \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} dt = 1/\lambda \quad (3.9)$$

La expresión anterior se denomina tiempo medio en que falla un elemento y se conoce como MTTF (Mean Time To Failure) [13].

También se define el tiempo medio de reparación denominado MTTR (Mean Time To Repair) correspondiente al tiempo promedio que se tarda para que el dispositivo pase de un estado de falla a operar normalmente.

De la misma forma se tiene el tiempo medio entre fallas (MTBF: Mean Time Between Failures) que corresponde a la suma de los parámetros anteriores.

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (3.10)$$

En la figura 3.3 se muestra la relación entre estos tres parámetros.

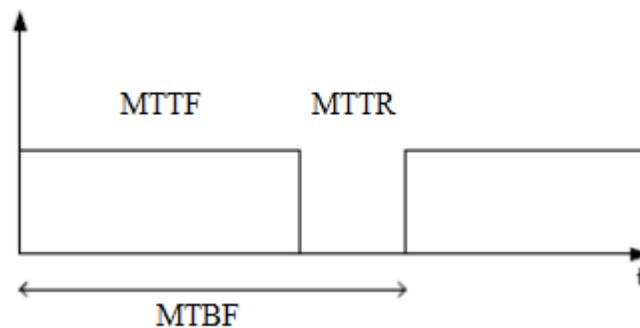


Figura 3.3 Relación entre MTTF, MTTR y MTBF

Cada uno de estos parámetros tiene un inverso el cual corresponde a una determinada tasa.

- Tasa de Falla:

$$\lambda = 1/MTTF \quad (3.11)$$

- Tasa de Reparación:

$$\mu = 1/MTTR \quad (3.12)$$

- Frecuencia de Falla:

$$f = 1/MTBF \quad (3.13)$$

3.6 Disponibilidad

La disponibilidad otorga una medida de confiabilidad del los elementos y sistemas, con la salvedad que es un parámetro independiente del tiempo, por lo que entrega un valor adimensional [12].

Consecuente con lo anterior la disponibilidad es la medida de la probabilidad de que un elemento esté en el estado “en servicio” en cualquier tiempo. Para su definición se considera una variable aleatoria $X(t)$ con valores $\{0,1\}$ para un lapso de tiempo fijo t [14].

$$X(t) = \begin{cases} 1, & \text{Si el sistema esta en servicio en el instante } t \\ 0, & \text{Si el sistema no esta en servicio en el instante } t \end{cases} \quad (3.14)$$

La disponibilidad instantánea se define como:

$$A(t) = P\{X(t) = 1\} \quad (3.15)$$

Esta última representa la probabilidad de observar el sistema en buen estado en el instante t .

Así mismo se define la indisponibilidad instantánea:

$$Q(t) = 1 - A(t) \quad (3.16)$$

En términos de estado estacionario se define la indisponibilidad asintótica:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) \quad (3.17)$$

También se puede expresar la disponibilidad en términos de los parámetros de confiabilidad como:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF+MTTR} \quad (3.17)$$

3.7 Confiabilidad en Sistemas

En un sistema eléctrico el objetivo es el traslado de flujos de energía a partir de puntos de generación hasta los consumos, desde un lado al otro los bloques se descomponen en cascada o serie, sin embargo existe más de un punto de generación, líneas paralelas, equipos de respaldo y otros componentes que dan mayor confiabilidad al sistema manifestándose como bloques paralelos en el diagrama.

Al descomponer el sistema y conocer la confiabilidad de cada bloque o conjunto, se puede obtener la confiabilidad total agrupando estas dependiendo de la conexión entre cada bloques.

3.7.1 Conexión Serie Paralelo

En el caso que se tengan dos elementos en serie como se muestra en la figura 3.4 la confiabilidad del sistema se puede expresar de la siguiente manera [13]:

$$R_s = p\{E_A, E_B\} = p\{E_A\} \cdot p\{E_B\} = R_A \cdot R_B \quad (3.18)$$

Donde $p\{E_i\}$ es la probabilidad de que i funcione adecuadamente.

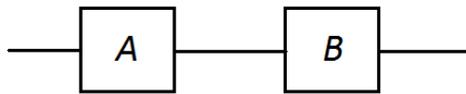


Figura 3.4 Elementos Serie

Para n elementos se tiene que:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (3.19)$$

Por otro lado para el caso en que dos elementos están en paralelo como la figura 3.5 R_s se expresa como sigue:

$$R_s = 1 - F_s \quad (3.20)$$

Donde F_s equivale a:

$$F_s = p\{\bar{E}_A, \bar{E}_B\} = p\{\bar{E}_A\} \cdot p\{\bar{E}_B\} = F_A \cdot F_B \quad (3.21)$$

Donde $p\{\bar{E}_i\}$ es la probabilidad de que i falle.

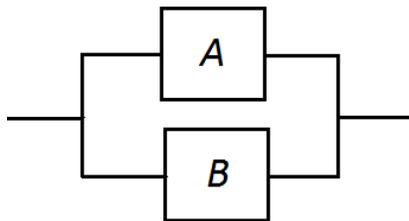


Figura 3.5 Elementos Paralelos

Para n elementos en paralelo:

$$F_s = \prod_{i=1}^n F_i \quad (3.22)$$

Nótese que en algunos casos no es directo distinguir entre serie o paralelo con es el caso de la figura 3.6

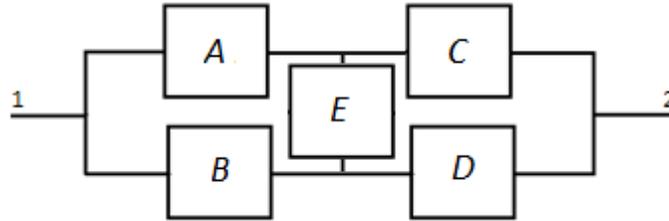


Figura 3.6 Sistema complejo

Sin embargo se puede obtener un sistema equivalente en el que se puede distinguir entre conexión serie y paralelo. Para esto introduciremos el concepto de conjuntos de corte, un conjunto de corte es una agrupación de elemento de un sistema donde la falla de estos provoca una falla en el sistema, esto se verá en más detalle en el capítulo 4.

Supongamos un sistema eléctrico de las características de la figura 3.6, en que se transmiten flujos de energía desde el extremo 1 al extremo 2, luego si falla A y B el flujo de energía se interrumpe provocando una falla en el sistema, luego $\{A, B\}$ es un conjunto de corte, el resto de los conjuntos serán $\{C, D\}$, $\{A, E, D\}$ y $\{B, E, C\}$. Con los conjuntos de corte se obtiene un sistema equivalente que recoge las características del sistema original según la función que este realice. El equivalente serie paralelo del sistema complejo se aprecia en la figura 3.7.

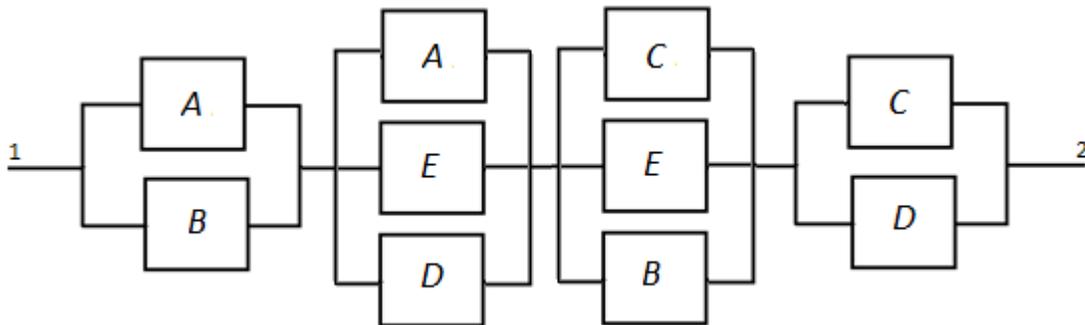


Figura 3.7 Equivalente Serie Paralelo del sistema complejo

4 Capítulo 4: Teoría de Árboles de Falla

Este capítulo está enfocado a árboles de falla pasando por sus conceptos esenciales y las diferentes técnicas de resolución y métodos de análisis.

Este método de análisis se desarrolla fuertemente en el ámbito de la energía nuclear, aeronáutica, aeroespacial, sistemas militares, entre otros [15].

4.1 Introducción a Árboles de Falla

El análisis de árboles de falla, que llamaremos FTA (Fault Tree Analysis) es una técnica analítica utilizada para evaluar la confiabilidad de los distintos sistemas de ingeniería. En FTA se busca determinar la probabilidad de un evento superior al que se le denominará “Top Event” (TE) donde para esto se determinan sus causas específicas construyendo así un diagrama lógico. El árbol muestra entonces gráficamente las relaciones lógicas entre los eventos que pueden desencadenar que ocurra el evento no deseado o Top Event.

Para realizar el análisis, el árbol se debe evaluar de manera cualitativa y cuantitativa, como se verá posteriormente, obteniendo así resultados que podrían significar ahorros de costos importantes, mejor planificación de mantenimiento, decisiones de inversión, etc.

A diferencia de otras técnicas de confiabilidad, un FTA evalúa la probabilidad de falla y no de éxito, en este sentido es un dual de otros métodos.

4.2 Conceptos y Simbología

A continuación se muestran las herramientas básicas para la construcción de un árbol, denotando su simbología y función. Cabe mencionar que existen otros elementos pero para efectos de esta memoria no son de mayor utilidad [14].

4.2.1 Evento Superior

Corresponde al Top Event o evento principal donde se especifica el estado no deseado para el sistema a partir del cual que se comienza a construir el árbol.



Figura 4.1 Evento Superior

4.2.2 Evento Básico

Evento en el que se define la falla o causa básica, asignando una tasa de falla y reparo. Posterior a este no hay más eventos.

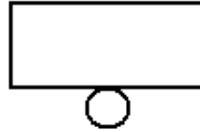


Figura 4.2 Evento Básico

4.2.3 Compuerta AND

La compuerta AND indica en su salida que el evento ocurre cuando todas las entradas ocurren.

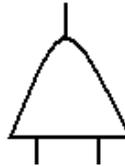


Figura 4.3 Compuerta AND

4.2.4 Compuerta OR

La compuerta OR indica en su salida que un evento ocurre si al menos una de las entradas ocurre.



Figura 4.4 Compuerta OR

4.2.5 Compuerta OR Exclusiva

La compuerta OR Exclusiva muestra en su salida que un evento ocurre si solo una de las entradas ocurre.

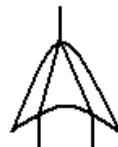


Figura 4.5 Compuerta OR Exclusivo

4.2.6 Compuerta Negación

Compuerta que entrega en su salida el recíproco probabilístico de la entrada.

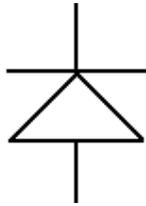


Figura 4.6 Compuerta Negación

4.2.7 Compuerta de Transferencia

Compuertas que se implementan para enlazar árboles, en el caso particular se parte de un árbol principal y luego este se divide en subárboles unidos mediante estas.

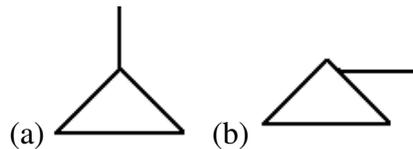


Figura 4.7 Compuertas de Transferencias

4.3 Bloque de Confiabilidad y Árbol de Falla

La confiabilidad del sistema se puede presentar mediante bloques de confiabilidad o un árbol de falla. A continuación se muestran la equivalencia en bloques de elementos serie y paralelo, y árboles de falla.

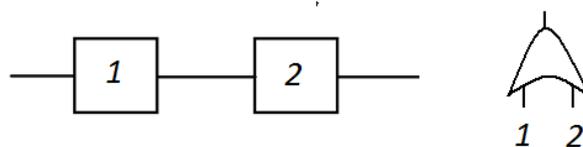


Figura 4.8 Equivalencia en bloques serie y árboles de falla

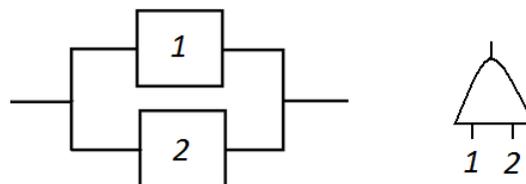


Figura 4.9 Equivalencia en bloques paralelos y árboles de falla

4.4 Construcción de un Árbol de Falla

La construcción comienza por definir un evento indeseable el cual se resuelve por eventos intermedios y estos a su vez se resuelven hasta llegar a un punto en el que se requieran los datos cuantitativos, como la probabilidad de los eventos finales, a estos se les llama eventos básicos.

A continuación se presentará un enfoque general para la construcción sistémica de un árbol de falla, éste consta de tres fases: análisis preliminar, las especificaciones y finalmente la construcción [14].

4.4.1 Análisis Preliminar

- a) Descomposición del sistema: se trata de una descomposición física donde los criterios que se utilizan generalmente son de tecnología, mantenimiento, datos sobre el estudio realizado.
- b) Identificación de componentes: se trata de la identificación de todos los dispositivos que están representados en el último nivel de resolución del sistema, dentro del marco de este análisis se les denominarán “componentes”.
- c) Definición de los modos de falla de los componentes: para cada componente el modo de falla debe ser definido.
- d) Reconstrucción de los sistemas a través de los componentes: es necesario reconstruir el sistema en modo funcional al subir por los niveles de descomposición.

4.4.2 Especificaciones

- a) Fases: se refiere a las especificaciones de los diferentes modos de trabajo de un sistema. Por ejemplo en el caso de un avión, éste tiene a simple vista tres modos de trabajo, como lo son el despegue, vuelo a gran altura y aterrizaje.
- b) Condiciones de entorno: se trata de identificar la interacción que tiene el sistema con el entorno.
- c) Hipótesis específicas: se busca especificar las convenciones del sistema en sí.
- d) Condiciones iniciales: es la especificación de las hipótesis consideradas al inicio de la fase de estudio.

4.4.3 Construcción

- a) Construcción del evento superior: el evento principal debe definirse sin ambigüedades y de manera coherente dadas las especificaciones anteriores.
- b) Resolución de los eventos: Se trata de encontrar las causas inmediatas del evento superior y luego cada uno de los eventos intermedios utilizando las compuertas lógicas descritas previamente.
- c) Finalización de la construcción: La construcción finaliza cuando los eventos a desarrollar corresponden a eventos básicos.

Durante la construcción hay que tener presente que se trata de un proceso netamente deductivo por lo que hay que abordar de lo general a lo particular.

A modo de ejemplo se considera un sistema de tres válvulas mostrado en la figura 4.10, donde el Top Event será la no disponibilidad de flujo desde el punto A al punto B [14].

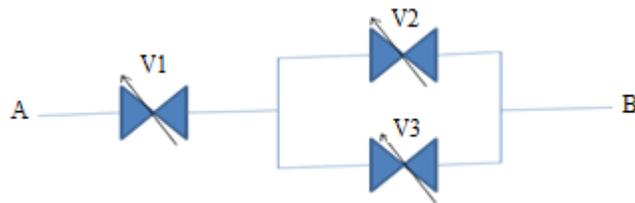


Figura 4.10 Sistema de tres válvulas

Dado el sistema se puede construir un árbol de manera simple ocupando los bloques de confiabilidad para elementos serie y paralelos.

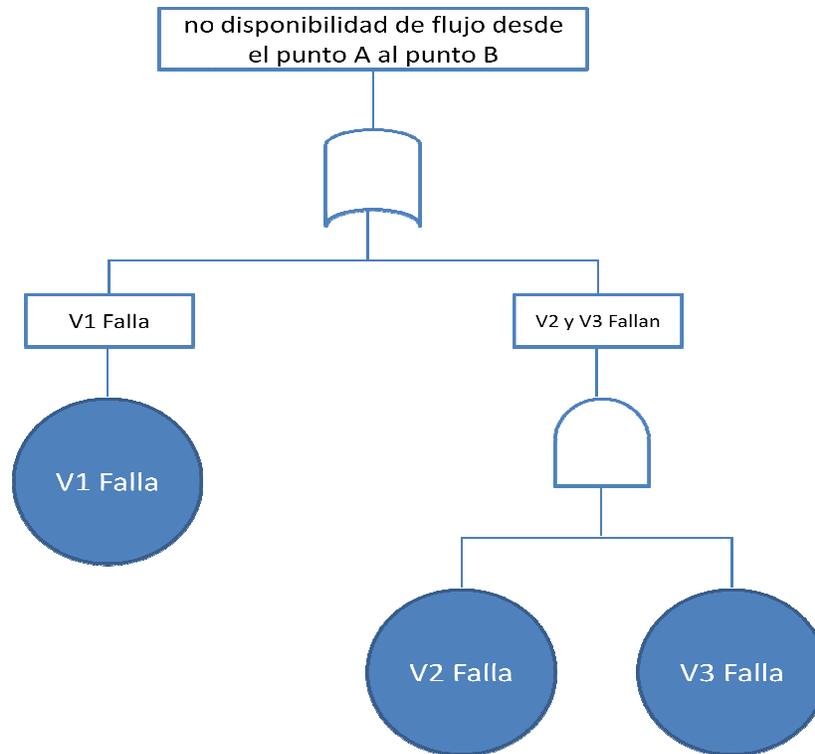


Figura 4.11 Árbol de falla sistema tres válvulas indisponibilidad de flujo

De la interpretación del árbol se deduce que no hay flujo desde *A* a *B* si falla la válvula *V1* o fallan *V2* con *V3*. Para el sistema descrito la falla se puede definir como un estado cerrado de la válvula impidiendo el paso del flujo.

La ventaja que tiene trabajar con árboles de falla es que se puede analizar diferentes eventos no deseados, lo que provoca un cambio en la estructura del árbol. Para ilustrar esto cambiemos el evento no deseado siendo este que haya flujo desde el punto *A* al punto *B*. En este caso el árbol se muestra en la figura 4.12.

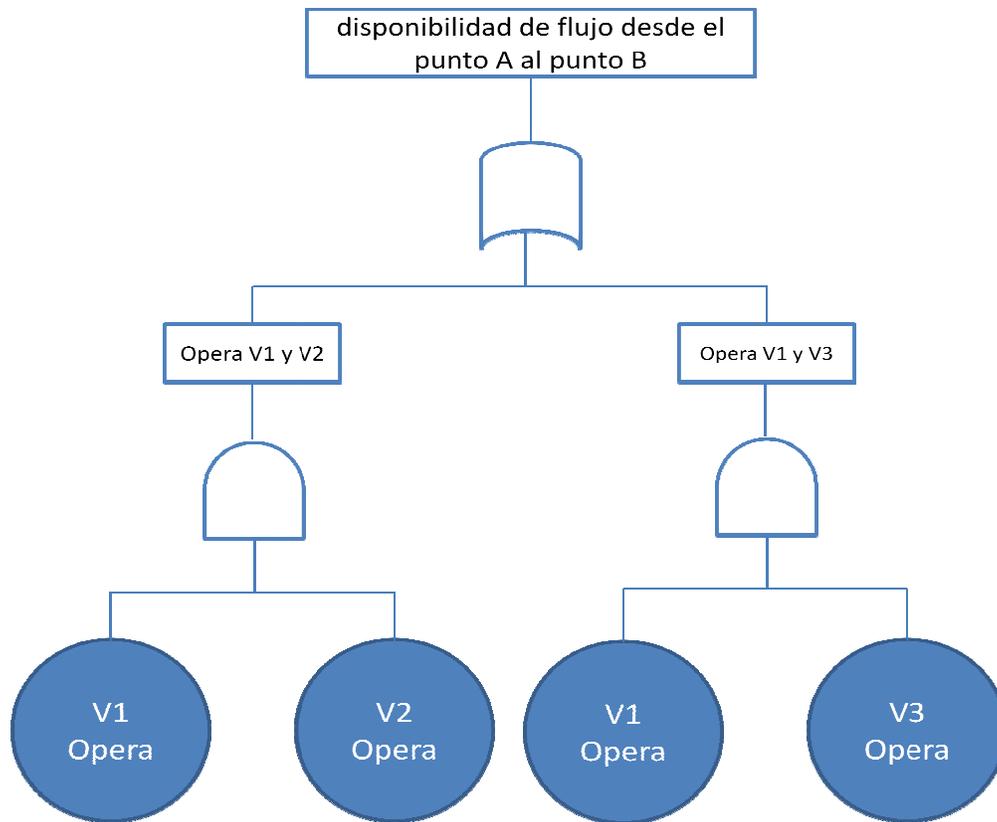


Figura 4.12 Árbol de falla sistema tres válvulas disponibilidad de flujo

En este árbol para que ocurra el evento no deseado debe operar $V1$ y $V2$, o $V1$ y $V3$, luego no lo cambia el evento principal, sino que también el árbol de falla y los eventos básicos.

4.5 Análisis Cualitativo

El concepto más relevante del análisis cualitativo de un árbol de falla corresponde al de conjuntos de corte. Un conjunto de corte es formado por elementos del sistema tal que cuando falla el conjunto se activa el evento principal. Estos conjuntos serán mínimos (MCS) siempre y cuando no contengan a otros conjuntos de corte. Los MCS se pueden clasificar como de primer orden si contienen un solo elemento, de segundo orden si contienen dos y así sucesivamente.

Una vez que se ha construido el árbol de falla, se debe realizar un análisis cualitativo siguiendo las reglas del álgebra booleana, es decir se determina la función estructura del árbol sobre el evento principal, o en general, ante cualquier acontecimiento intermedio. El estudio de lo anterior lleva a la determinación de los conjuntos de corte mínimo.

Para definir la función estructura supongamos un árbol que solo está compuesto por compuertas lógicas AND y OR (árbol coherente). Entonces sea x_i el evento básico i . La siguiente convención se adopta para los valores de x_i .

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{Si el evento } i \text{ ocurre} \\ 0 & \text{si el evento } i \text{ no ocurre} \end{cases} \quad (4.1)$$

Así se puede definir la función estructura como:

$$\varphi(X) = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} 1 & \text{Si } TE \text{ ocurre} \\ 0 & \text{Si } TE \text{ no ocurre} \end{cases} \quad (4.2)$$

Existen diversos métodos para encontrar los MCS [14], como el método directo y los métodos ascendentes y descendentes que se revisarán a continuación.

4.5.1 Método Directo

Este método se basa en la construcción de la función estructura $\varphi(X)$ basado en las siguientes relaciones:

Se define $E(A_1, A_2, \dots, A_n)$ como el evento de salida y A_1, A_2, \dots, A_n son los eventos de entrada del operador.

- Para un operador OR, se tiene que: $E = A_1 \cup \dots \cup A_n$,
- Para un operador AND, se tiene que: $E = A_1 \cap \dots \cap A_n$.

Dado lo anterior para las variables x_i se tiene que:

- Operador OR: $y_E = x_1 + \dots + x_s$,
- Operador AND: $y_E = x_1 \cdots x_s$.

Siendo y_E el evento intermedio E.

Las reducciones que se deben aplicar son las siguientes:

$$x^n = x \quad (4.3)$$

$$nx = x \quad (N \in \mathbb{N}^*) \quad (4.4)$$

$$x + xy = x \quad (4.5)$$

Para ilustrar un ejemplo de este método se considera el árbol de falla mostrado en la figura 4.13 [14]:

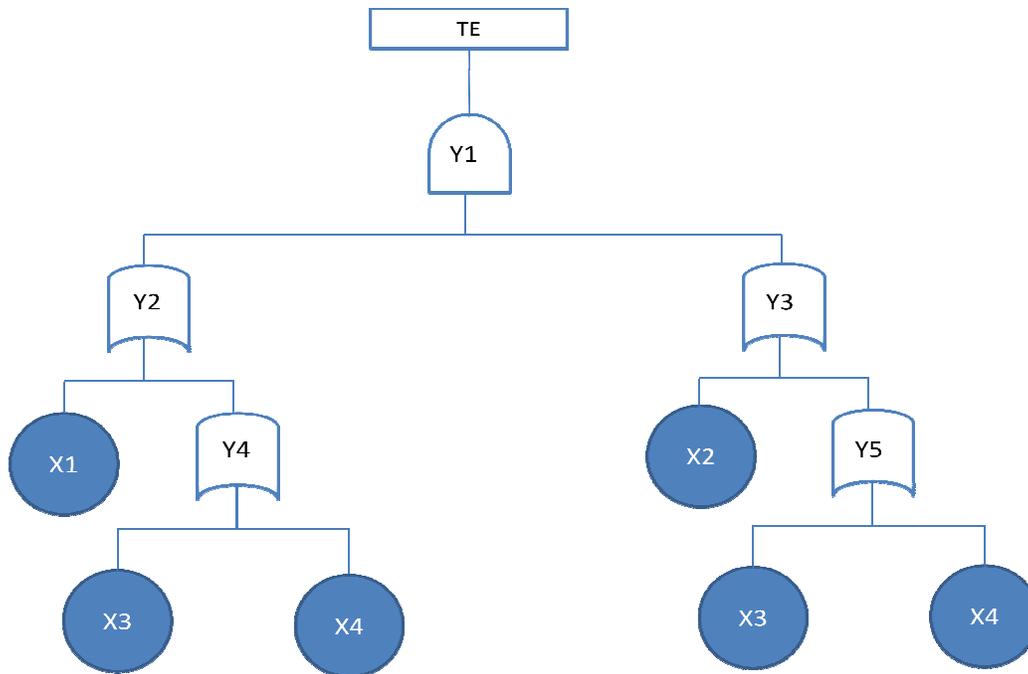


Figura 4.13 Árbol de falla para ejemplo método directo

La función estructura será:

$$\varphi(X) = TE = Y1 \quad (4.6)$$

El desarrollo en función del árbol de falla es el siguiente:

$$TE = Y1 = Y2 \cdot Y3 = (X1 + Y4)(X2 + Y5) = (X1 + X3 + X4)(X2 + X3 + X4) \quad (4.7)$$

Luego aplicando los operadores del método directo sobre el resultado anterior, la función estructura queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \varphi(X) &= (X1 + X3 + X4)(X2 + X3 + X4) \\ &= X1 \cdot X2 + X1 \cdot X3 + X1 \cdot X4 + X3 \cdot X2 + X3 + X3 \cdot X4 + X4 \cdot X2 + X4 \cdot X3 + X4 \\ &= X1 \cdot X2 + X3 + X4 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Con este resultado se puede apreciar que los eventos $X3$ y $X4$ son de primer orden, mientras que el evento $X1$ y $X2$ es de segundo orden.

Finalmente se puede concluir que al calcular los MCS se puede obtener un árbol equivalente y reducido con este conjunto, el que se muestra en la figura 4.14:

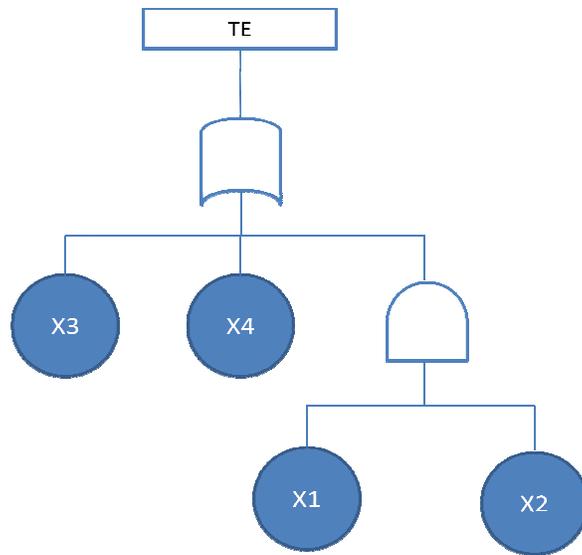


Figura 4.14 Árbol de falla equivalente para ejemplo método directo

Es importante obtener los MCS para poder llegar un árbol de falla reducido en donde la activación de cada conjunto provoca la indisponibilidad del sistema.

4.5.2 Método Ascendente

El método ascendente procede desde el evento básico escalando por el árbol hasta llegar al evento superior. En cada etapa la obtención de conjuntos de cortes es reducida, por lo que se obtienen los MCS en todos los eventos intermedios.

En primer lugar, se parte desde los eventos básicos, reemplazando los eventos intermedios correspondientes por la expresión booleana de sus operadores, luego se hace lo mismo para los eventos posteriores. El procedimiento termina cuando la expresión del top event queda reducida.

4.5.3 Método Descendente

Este método se basa en el algoritmo de MOCUS [14]. Se trata de inicializar una matriz B con el operador superior e ir resolviendo de manera descendente, es decir, los operadores de entrada serán resueltos en la etapa siguiente y así sucesivamente hasta que todos los elementos de B sean básicos. Cada fila de B obtenida en la última etapa representa un conjunto de corte donde la reducción de estos proporciona los MCS.

4.6 Análisis Cuantitativo

El análisis cuantitativo consiste en encontrar la probabilidad de ocurrencia del evento superior a partir de las probabilidades de los eventos básicos. Para realizar esto de manera directa debe ocurrir que el árbol no posea eventos repetidos lo que lleva a un enfoque

simple que consiste en ir escalando con las probabilidades siguiendo el álgebra booleana hasta llegar al top event, en caso contrario se debe llevar el árbol de falla a uno reducido con sus conjuntos de cortes mínimos o simplemente aplicar el método de recursión o factorización [14].

Al igual que para el estudio cualitativo existen distintos métodos para el análisis como el método directo, el de los conjuntos de corte mínimos, el método de factorización y el recursivo.

4.6.1 Método Directo

Cuando el árbol de falla no contiene ningún evento básico repetido, se puede obtener el cálculo de la probabilidad de manera directa, para esto es suficiente iniciar los operadores primarios y subir por el árbol calculando las probabilidades de los eventos intermedios cuyos operadores han sido resueltos con anterioridad. El proceso termina cuando se calcula la probabilidad del TE. Los cálculos se logran siguiendo las siguientes formulas:

a) Operador AND

Se considera A y B como entradas y E como salida donde la ecuación general que describe a este operador es:

$$E = A \cap B \quad (4.9)$$

- Si A y B son dependientes:

$$P(E) = P(A)P(B | A) = P(B)P(A | B) \quad (4.10)$$

Donde $P(A | B)$ se define como probabilidad condicional, y se interpreta como la probabilidad que ocurra A tal que ocurre B .

- Si A y B son independientes:

$$P(E) = P(A) \cdot P(B) \quad (4.11)$$

- Si A y B son mutuamente excluyentes:

$$P(E) = 0 \quad (4.12)$$

- Si A y B son dependientes y $A \subset B$:

$$P(E) = P(A) \quad (4.13)$$

- Cuando los datos de entrada son λ y τ :

$$\lambda_E = \frac{\lambda_A \lambda_B (\tau_A + \tau_B)}{1 + \lambda_A \tau_A + \lambda_B \tau_B} \quad (4.14)$$

$$\tau_E = \left(\frac{1}{\tau_A} + \frac{1}{\tau_B} \right)^{-1} \quad (4.15)$$

Donde:

$$\tau = \frac{1}{\mu} \quad (4.16)$$

b) Operador OR

La ecuación general que describe al operador OR es:

$$E = A \cup B \quad (4.17)$$

- Si A y B son dependientes:

$$P(E) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) = P(A) + P(B) - P(A)P(B | A) \quad (4.18)$$

- Si A y B son independientes:

$$P(E) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B) \quad (4.19)$$

- Si A y B son mutuamente excluyentes:

$$P(E) = P(A) + P(B) \quad (4.20)$$

- Si A y B son dependientes y $A \subset B$:

$$P(E) = P(B) \quad (4.21)$$

- Cuando los datos de entrada son la tasa de falla λ y la tasa de reparo τ :

$$\lambda_E = \lambda_A + \lambda_B \quad (4.22)$$

$$\tau_E = \frac{(\lambda_A \lambda_B \tau_A \tau_B + \lambda_A \tau_A + \lambda_B \tau_B)}{\lambda_A + \lambda_B} \quad (4.23)$$

4.6.2 Método de los Conjuntos de Corte Mínimo (MCS)

El método de los conjuntos de corte mínimos se puede aplicar una vez que estos son obtenidos, el cual se implementa de la siguiente manera.

Sea K_i el i -ésimo conjunto de corte y $K = \{K_1, K_2, \dots, K_k\}$ el conjunto de los conjuntos de corte mínimos del sistema. La probabilidad de ocurrencia del TE estará dada por:

$$P_{TE} = \{K_1 \cup K_2 \cup \dots \cup K_k\} \quad (4.24)$$

Para ejemplificar tomemos la figura 4.14 donde se determinó los MCSs del árbol de falla, los cuales fueron: $K_1 = \{3\}$, $K_2 = \{4\}$, $K_3 = \{1,2\}$, se suponen eventos independientes, así la probabilidad de ocurrencia del TE es:

$$P_{TE} = \{K_1 \cup K_2 \cup K_3\} = P\{K_1\} + P\{K_2\} + P\{K_3\} - (P\{K_1 \cap K_2\} + P\{K_1 \cap K_3\} + P\{K_2 \cap K_3\}) + P\{K_1 \cap K_2 \cap K_3\} \quad (4.25)$$

Desarrollando según notación vista anteriormente.

$$P_{TE} = P\{x_3 = 1\} + P\{x_4 = 1\} + P\{x_1 = 1, x_2 = 1\} - (P\{x_3 = 1, x_4 = 1\} + P\{x_3 = 1, x_1 = 1, x_2 = 1\} + P\{x_4 = 1, x_1 = 1, x_2 = 1\}) + P\{x_3 = 1, x_4 = 1, x_1 = 1, x_2 = 1\} \quad (4.26)$$

$$P_{TE} = P\{x_3 = 1\} + P\{x_4 = 1\} + P\{x_1 = 1\} \cdot P\{x_2 = 1\} - (P\{x_3 = 1\} \cdot P\{x_4 = 1\} + P\{x_3 = 1\} \cdot P\{x_1 = 1\} \cdot P\{x_2 = 1\} + P\{x_4 = 1\} \cdot P\{x_1 = 1\} \cdot P\{x_2 = 1\}) + P\{x_3 = 1\} \cdot P\{x_4 = 1\} \cdot P\{x_1 = 1\} \cdot P\{x_2 = 1\} \quad (4.27)$$

Finalmente la probabilidad del TE se puede escribir como:

$$P_{TE} = P_3 + P_4 + P_1 P_2 - P_3 P_4 - P_3 P_1 P_2 - P_4 P_1 P_2 + P_3 P_4 P_1 P_2 \quad (4.28)$$

4.6.3 Método de Factorización

Este método no requiere de un conjunto de corte mínimo. La metodología consiste en factorizar sucesivamente con respecto a los eventos repetidos. En cada factorización se reducen los eventos repetidos obteniendo finalmente un conjunto mínimo donde se aplica posteriormente el método directo.

4.6.4 Método Recursivo

El método recursivo permite evaluar directamente la probabilidad del árbol de falla sin pasar por la obtención de los conjuntos de corte mínimo.

El procedimiento es: se empieza desde el evento superior y se desciende por el árbol mediante las siguientes relaciones.

Para dos eventos independientes A y B se tiene que:

- Para un operador OR,

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A)P(B) \quad (4.29)$$

- Para un operador AND,

$$P(A \cap B) = P(A)P(B) \quad (4.30)$$

$$P\{(A \cup B) \cap C\} = P(A \cap C) + P(B \cap C) - P(A \cap B \cap C) \quad (4.31)$$

4.7 Análisis de Importancia

Este análisis se refiere a una técnica de evaluación cuantitativa que tiene como objetivo determinar la “importancia” que tiene la probabilidad de falla de un componente o de un conjunto de corte sobre el total del sistema.

Se define importancia del i -ésimo componente como:

$$e_i = \frac{\sum_{k \in K} Q_k}{Q_s} \quad (4.32)$$

Donde:

Q_k : indisponibilidad del i -ésimo conjunto de corte.

Q_s : indisponibilidad de sistema.

4.8 Métodos de Resolución a Implementar

En esta sección se darán a conocer las técnicas resolutivas para los distintos análisis en estudio, de modo de desarrollarlas mediante algoritmos y obtener los parámetros de confiabilidad deseados.

4.8.1 Método de Resolución Análisis Cualitativo

Como se conceptualizó, la evaluación cualitativa de árboles de falla consiste en encontrar los conjuntos de corte mínimos. Este proceso suele ser el paso más complicado y de mayor requerimiento de tiempo dependiendo de la magnitud y complejidad del árbol. En este trabajo, para la resolución se implementa el algoritmo de MOCUS descrito a continuación.

4.8.1.1 Algoritmo MOCUS

El algoritmo de MOCUS corresponde a un método descendente donde se comienza por resolver el evento superior y luego los eventos inferiores, hasta que solo se obtienen eventos básicos [14]. Esto se logra inicializando una matriz B de dimensiones 1×1 que contiene al operador de la compuerta superior denominado (Y_1). La matriz B se expandirá dependiendo del tipo de compuerta (AND o OR) y el número de entradas al operador Y_1 , luego si las entradas no son eventos básicos tendrán operadores lógicos asociados que deben ser resueltos en el siguiente paso volviendo a expandir B provocando un proceso iterativo que dura hasta que los elementos de la matriz B sean eventos básicos. Cada fila de B corresponderá a un conjunto de corte, luego mediante el método directo descrito en el punto 4.5.1 se generan los conjuntos de corte mínimos.

Los pasos del algoritmo se muestran a continuación [14]:

- a) Se inicializa el primer elemento de B con el operador del evento principal Y_1 .
- b) El operador Y_i con entradas A_1, \dots, A_s que ocupa el lugar (i, j) de la matriz B_k es resuelta en el paso k .
- c) Si el operador es AND , hay que remplazar sus entradas en la fila de B_k . En la posición (i, j) del operador Y_i se sobrepone la entrada A_1 y las restantes los lugares siguiente $(i, j + 1), (i, j + 2), \dots, (i, j + s - 1)$.
- d) Si el operador es OR se remplazan las entradas en la columna de B_k . En la posición (i, j) del operador Y_i se sobrepone la entrada A_1 y las siguientes en las posiciones $(i + 1, j), (i + 2, j), \dots, (i + s - 1, j)$.
- e) Si hay otro operador sin resolver en la matriz B_{k+1} se vuelve al paso b.

A modo de ejemplo se muestra la resolución del método para el árbol de la figura 4.13, en este el operador del evento principal es Y_1 , luego se inicializa la matriz B .

$$B_1 = [Y_1] \quad (4.33)$$

El operador Y_1 tiene una compuerta AND con entradas Y_2 e Y_3 .

$$B_2 = [Y_2 \ Y_3] \quad (4.34)$$

A su vez Y_2 tiene compuerta OR con entradas X_1 e Y_4

$$B_3 = \begin{bmatrix} X_1 & Y_3 \\ Y_4 & Y_3 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Luego X_1 corresponde a un evento básico por lo que busca el siguiente operador en la fila que en este caso es Y_3 .

$$B_4 = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 \\ X_1 & Y_5 \\ Y_4 & Y_3 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

El siguiente operador a resolver es Y_5 con compuerta *OR* y entradas X_3 y X_4 .

$$B_5 = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 \\ X_1 & X_3 \\ X_1 & X_4 \\ Y_4 & Y_3 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

El siguiente paso es resolver el Y_4 .

$$B_6 = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 \\ X_1 & X_3 \\ X_1 & X_4 \\ X_3 & Y_3 \\ X_4 & Y_3 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

Siguiendo con el método los pasos son los siguientes:

$$B_7 = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 \\ X_1 & X_3 \\ X_1 & X_4 \\ X_3 & X_2 \\ X_3 & Y_5 \\ X_4 & Y_3 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

$$B_8 = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 \\ X_1 & X_3 \\ X_1 & X_4 \\ X_3 & X_2 \\ X_3 & X_3 \\ X_3 & X_4 \\ X_4 & X_2 \\ X_4 & Y_3 \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

$$B_9 = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 \\ X_1 & X_3 \\ X_1 & X_4 \\ X_3 & X_2 \\ X_3 & X_3 \\ X_3 & X_4 \\ X_4 & X_2 \\ X_4 & X_3 \\ X_4 & X_4 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Cada fila de la matriz B_9 corresponde a un conjunto de corte, luego al reducir la matriz mediante el método directo se llega al mismo resultado de la ecuación (4.8) validando el algoritmo de MOCUS.

4.8.1.2 Implementación del algoritmo de MOCUS

El algoritmo se implementa mediante el lenguaje de programación de Matlab, donde las relaciones y dependencias de los eventos básicos, intermedios y el superior con sus compuertas lógicas se representan en la fila de una matriz de datos. El primer elemento de la fila es la etiqueta de la compuerta, el segundo será 1 si es OR o 0 si es AND, el siguiente es el número de entradas y los restantes las etiquetas de las entradas. Las etiquetas se representan con números enteros [16].

El algoritmo se basa en dos partes principales, en la primera se forma un vector fila o un vector columna según el tipo de compuerta del evento superior. En la segunda etapa se buscan compuertas para ser resueltas dentro de B aumentando la magnitud de esta cada vez que se encuentre con una compuerta y pidiendo los datos correspondientes a la matriz de datos [16].

El algoritmo entrega los conjuntos de corte para el árbol, luego se requiere implementar el método directo que entregue el conjunto de corte mínimo.

4.8.1.3 Implementación del algoritmo método directo

El método directo se basa en ir tomando las tasas de los eventos inferiores para ir obteniendo la de los superiores hasta llegar al evento principal, luego dependiendo de la compuerta habrá dos maneras de obtener los las tasas superiores.

- Cuando la compuerta es AND:

$$\lambda_E = \frac{\lambda_A \lambda_B (\tau_A + \tau_B)}{1 + \lambda_A \tau_A + \lambda_B \tau_B} \quad (4.42)$$

$$\tau_E = \left(\frac{1}{\tau_A} + \frac{1}{\tau_B} \right)^{-1} \quad (4.43)$$

- Cuando la compuerta es OR:

$$\lambda_E = \lambda_A + \lambda_B \quad (4.44)$$

$$\tau_E = \frac{(\lambda_A \lambda_B \tau_A \tau_B + \lambda_A \tau_A + \lambda_B \tau_B)}{\lambda_A + \lambda_B} \quad (4.45)$$

Las etapas que describen este algoritmo se muestran a continuación:

- a) Se inicializa un vector p y q con las tasas de falla y reparo de los eventos básicos.
- b) Se toma la matriz B donde cada fila corresponde a un conjunto de corte mínimo. Lo que implica que los elementos de cada fila se asocian a una compuerta AND, y las filas entre sí a una compuerta OR. Luego se crea un vector z correspondiente a la tasa de falla de cada fila.
- c) De z se obtienen la tasa de falla final asociando cada elemento a una compuerta OR.

Nótese que para la tasa de reparo se procede con la misma metodología.

4.8.2 Método de Resolución Análisis Cuantitativo

Como se mencionó el análisis cuantitativo consiste en encontrar la probabilidad de ocurrencia del evento principal a partir de las probabilidades de los eventos no deseados.

En el presente trabajo se implementarán el método de los productos inconexos y el método directo utilizando tasas de falla y tiempos de reparo mediante el lenguaje de programación Matlab.

4.8.2.1 Método de los productos inconexos

Este método se basa en la información de los conjuntos de corte mínimo donde, a partir de estos, se transforma la función estructura del árbol de fallas en la suma de productos inconexos.

Sea K_i el producto de las probabilidades de falla de los eventos básicos contenidos en el i –ésimo conjunto de corte. Se supone un árbol con n conjuntos de corte mínimo, luego la probabilidad del evento no deseado viene dada por:

$$E = K_1 \cup K_2 \cup \dots \cup K_n = K_1 + \overline{K_1}K_2 + \dots + K_1 \dots \overline{K_{n-1}}K_n \quad (4.46)$$

Donde $\overline{K_i} = 1 - K_i$.

4.8.2.2 Algoritmo productos inconexos

Las etapas que describen al algoritmo se muestran a continuación:

- a) Se crean dos vectores filas L y M de dimensiones $(n - 1) \times 1$, donde n corresponde al conjunto de corte mínimo del árbol. También se tiene el vector K donde cada elemento K_i corresponde al de las probabilidades de falla de los eventos básicos contenidos en el conjunto de corte i .
- b) Se hace $L_0 = K_1$ y $M_0 = 1$. Nótese que estos son escalares y no son parte de los vectores L y M .
- c) Para $i \in [1, n - 1]$, hacer:

$$M_i = M_{i-1} \overline{K_i} \quad (4.47)$$

$$L_i = M_i K_{i+1} \quad (4.48)$$

- d) Finalmente la probabilidad del evento principal será:

$$E = L_0 + L_1 + \dots + L_{n-1} \quad (4.49)$$

4.8.3 Método de Resolución Análisis de Importancia

Se realiza en Matlab un algoritmo que mide la importancia de los componentes básicos del sistema. Con esto se mide el aporte de cada elemento a la probabilidad de ocurrencia al evento principal.

5 Capítulo 5: Validación del Algoritmo para Estudio de Árboles de Falla

El algoritmo se valida tomando como referencia el modelo del arreglo “interruptor y medio” y que fue previamente abordado por Zongyu Liu en su memoria llamada “*Reliability Analysis of Breaker Arrangements in High Voltage Stations: A Fault Tree Approach*” [15].

5.1 Modelo Arreglo Interruptor y Medio según referencia.

El modelo nace de un arreglo de interruptor y medio compuesto por dos entradas y dos salidas. El evento no deseado será que no haya flujo en la salida La . Sin embargo nótese que para Lb se obtendría el mismo resultado por simetría. El unilineal a modelar se muestra en la figura 5.1 denominando CBi a los interruptores, LA y LB a las entradas, La y Lb a las salidas, y $B1$ con $B2$ las barras del sistema.

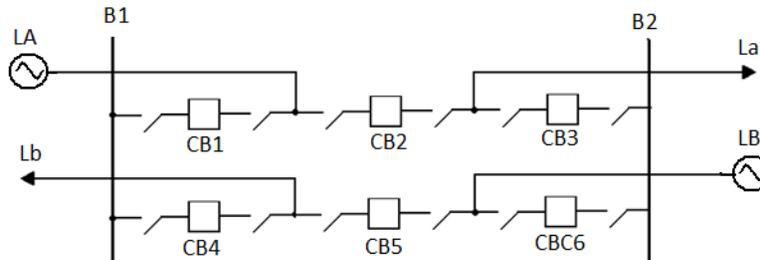


Figura 5.1 Arreglo interruptor y medio utilizado para validar modelo

Los datos de confiabilidad relevante se muestran en la tabla 5.1:

Componente	Tasa de falla λ [Fallas/hora]	Tiempo medio reparo MTTR [horas]
Interruptores	1×10^{-6}	12
Barras	$2,05 \times 10^{-7}$	12
Líneas Entradas	$9,13 \times 10^{-6}$	8
Líneas Salidas	$9,13 \times 10^{-8}$	8

Tabla 5.1 Datos de confiabilidad arreglo interruptor y medio

Un árbol de falla se construye a partir de un arreglo de barras siguiendo los caminos posibles de flujo desde las entradas a las salidas, identificando las fallas de los componentes durante el trayecto.

Al seguir la dirección flujo desde las entradas *LA* y *LB* hasta la salida *La* se pueden establecer caminos mostrados en la figura 5.2 y 5.3.

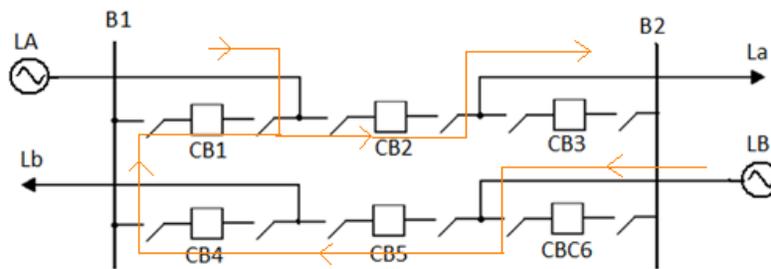


Figura 5.2 Dirección de los flujos hacia *La* desde *LA* y *LB* por *CB2*

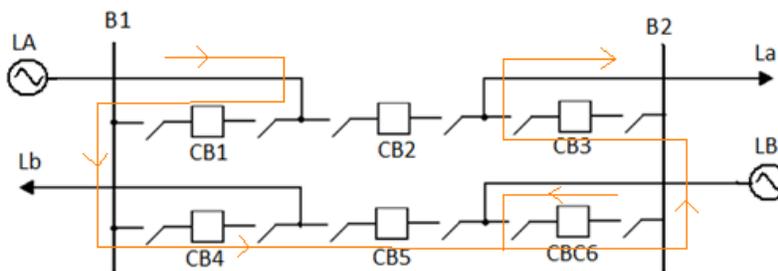


Figura 5.3 Dirección de los flujos hacia *La* desde *LA* y *LB* por *CB3*

Siguiendo los caminos de flujo establecidos se procede a modelar el árbol de falla de la siguiente manera:

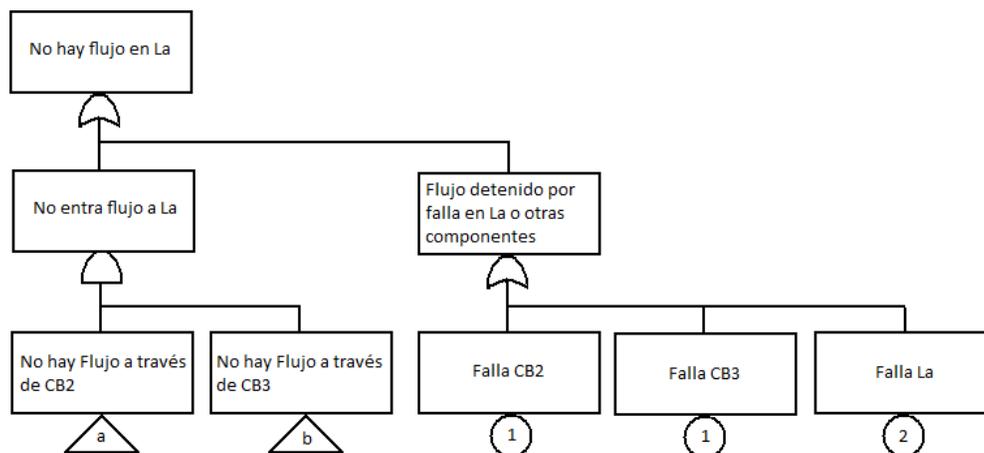


Figura 5.4 Árbol de falla evento principal

El árbol comienza describiendo el evento principal “No hay flujo en *La*”, éste es provocado por cualquiera de la siguientes causas, la primera es que se detenga el flujo por falla propia de la línea, o los elementos adyacentes *CB2* y *CB3*, la segunda posibilidad es que no entre

el flujo a la línea *La*. Desde este punto el árbol se puede dividir en dos subárboles, uno parte desde la compuerta de que no haya flujo a través de *CB2* mostrado en figura 5.5 y el segundo desde que no haya flujo a través de *CB3* mostrado en la figura 5.11.

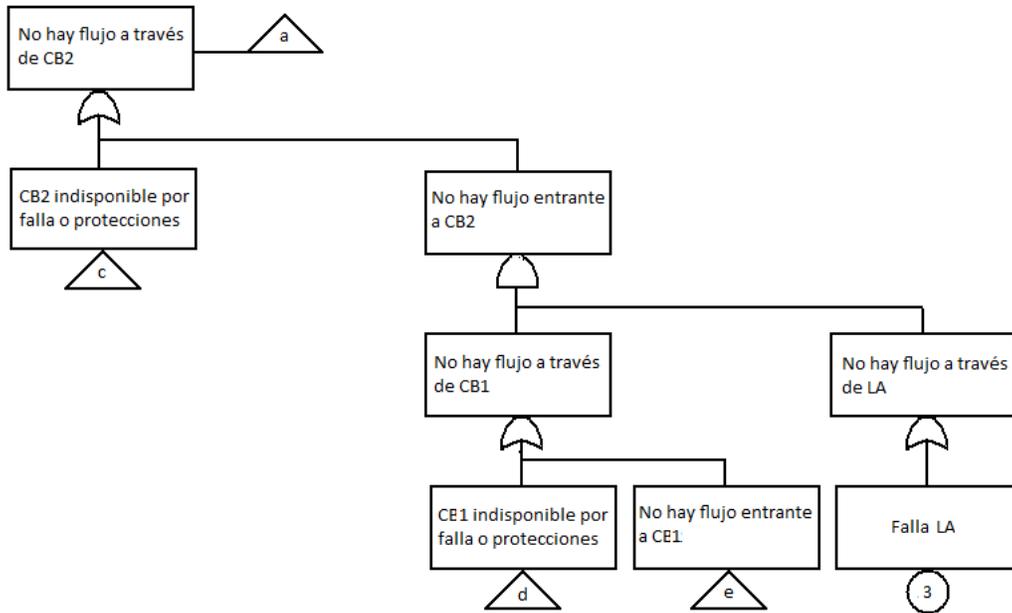


Figura 5.5 Árbol de falla no flujo a través de CB2

Mediante la compuerta de transferencia *a*, se tiene que la no existencia de flujo por *CB2* es debido a que el equipo falló, actuó por protecciones o no hay flujo entrando a este, lo mismo ocurre para *CB1* y la línea *LA*.

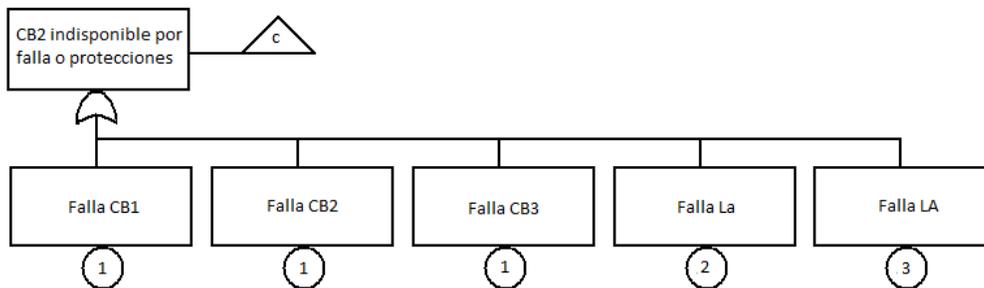


Figura 5.6 Árbol de falla CB2 indisponible

Para que *CB2* esté indisponible tiene que fallar este o cualquier elemento adyacente. Esto se ve claro al observar el subárbol de la figura 5.6.

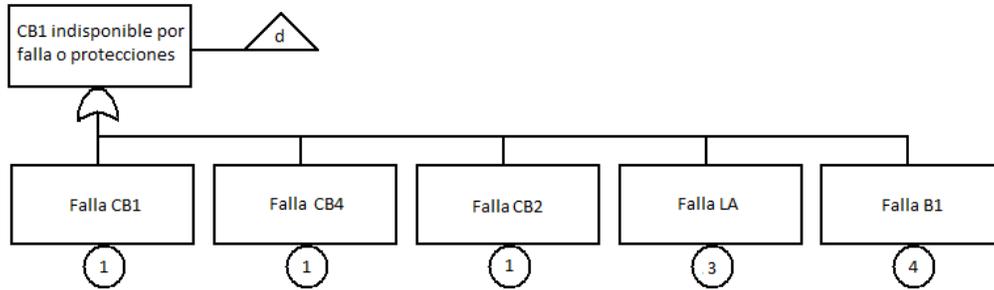


Figura 5.7 Árbol de falla CB1 indisponible

El análisis de este subárbol se hace de manera similar al de la figura 5.6 salvo que los elementos adyacentes a *CB1* son diferentes a los de *CB2*.

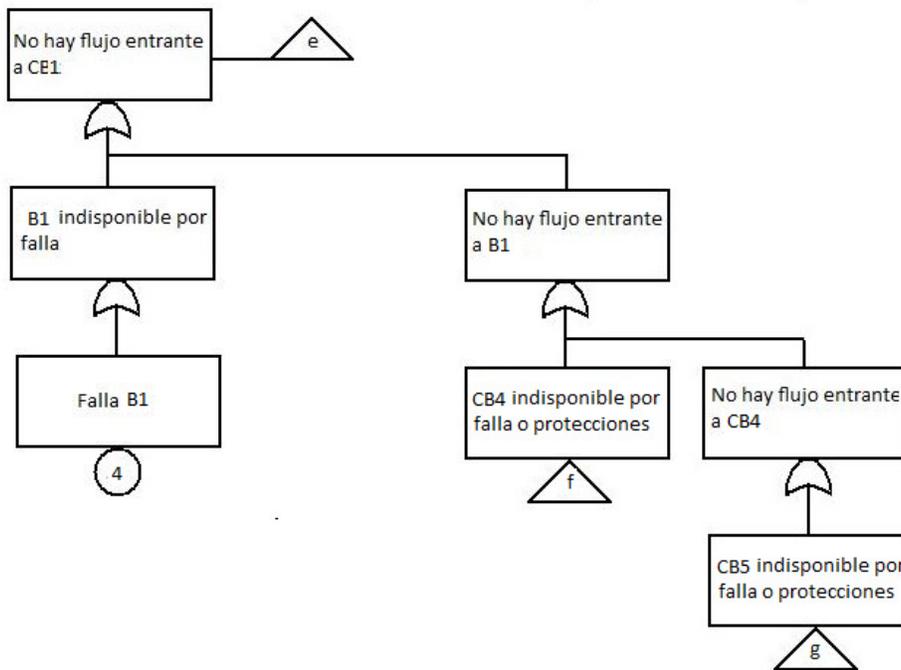


Figura 5.8 Árbol de falla no flujo entrante a CB1

Siguiendo la misma lógica si no hay flujo que entre a *CB1* es porque *B1* falla o no entra flujo a *B1* lo que se debe a indisponibilidad de *CB4* o no hay flujo entrando a este debido a indisponibilidad de *CB5*. El subárbol que muestra las causas de indisponibilidad para los interruptores mencionados se muestran en las figuras 5.9 y 5.10.

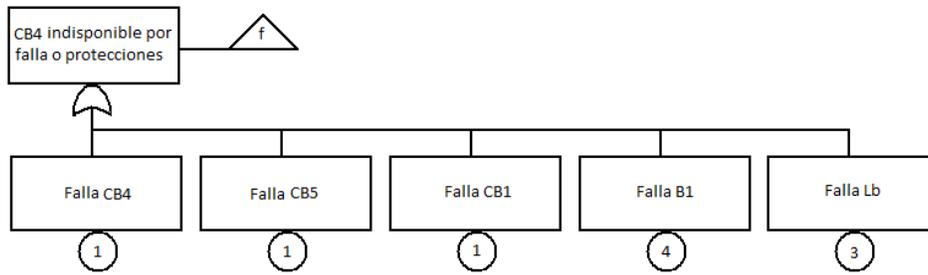


Figura 5.9 Árbol de falla CB4 indisponible

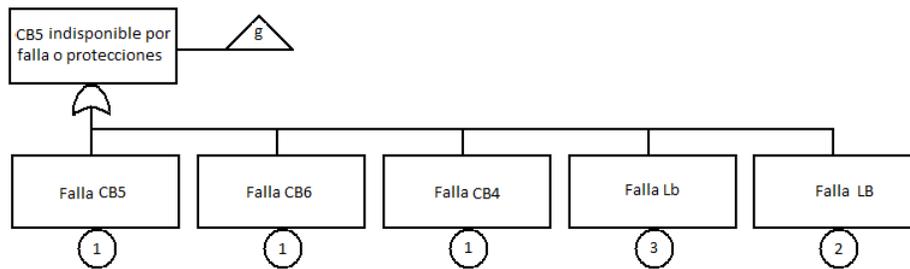


Figura 5.10 Árbol de falla CB5 indisponible

Ahora se modela el otro subárbol correspondiente a la dirección de los flujos mostrados en la figura 5.3, es decir desde compuerta de transferencia b . Este comienza con el hecho de que no haya flujo a través de CB3 desencadenando los eventos intermedios que se pueden apreciar en la figura 5.11.

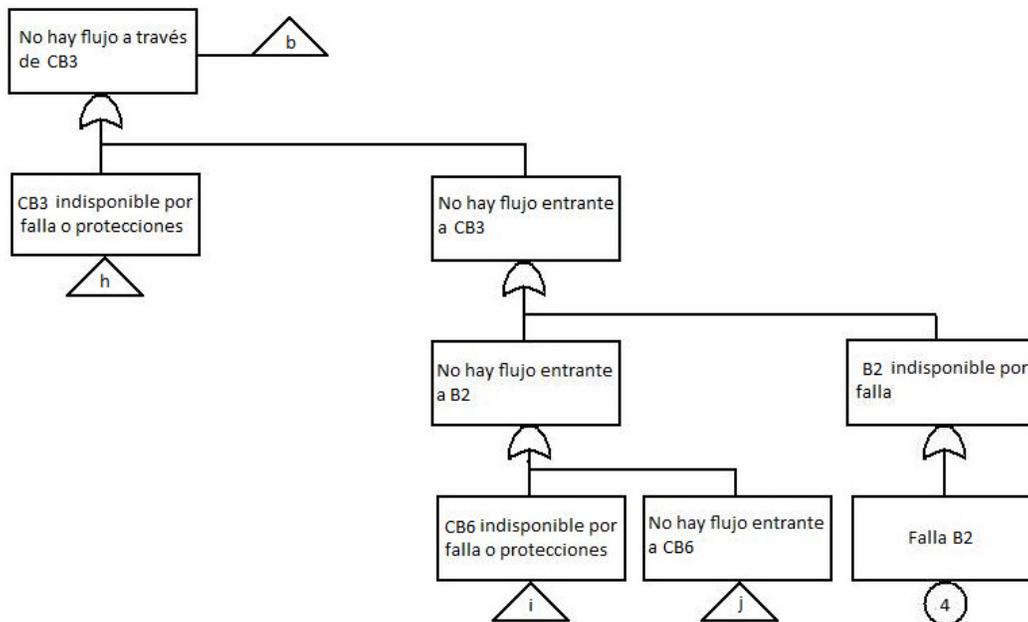


Figura 5.11 Árbol de falla no flujo a través de CB3

En las figuras 5.12 y 5.13 se muestra el subárbol con los eventos que causan la indisponibilidad de *CB3* y *CB6* respectivamente.

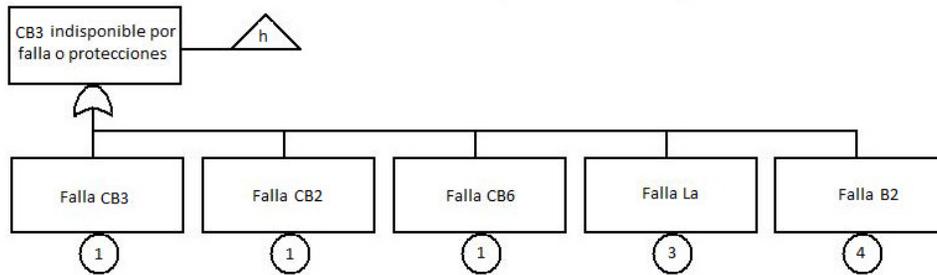


Figura 5.12 Árbol de falla CB3 indisponible

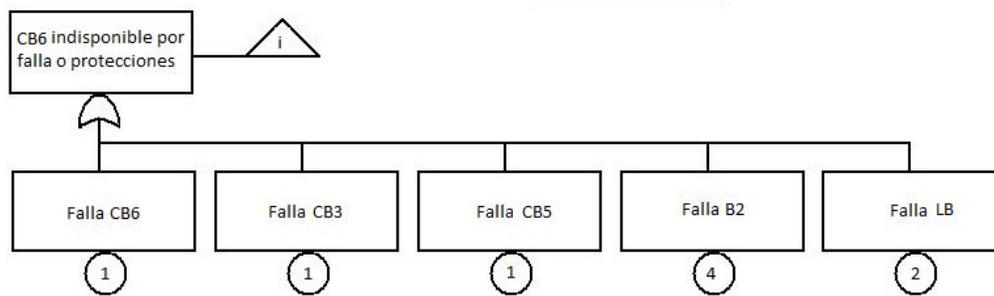


Figura 5.13 Árbol de falla CB6 indisponible

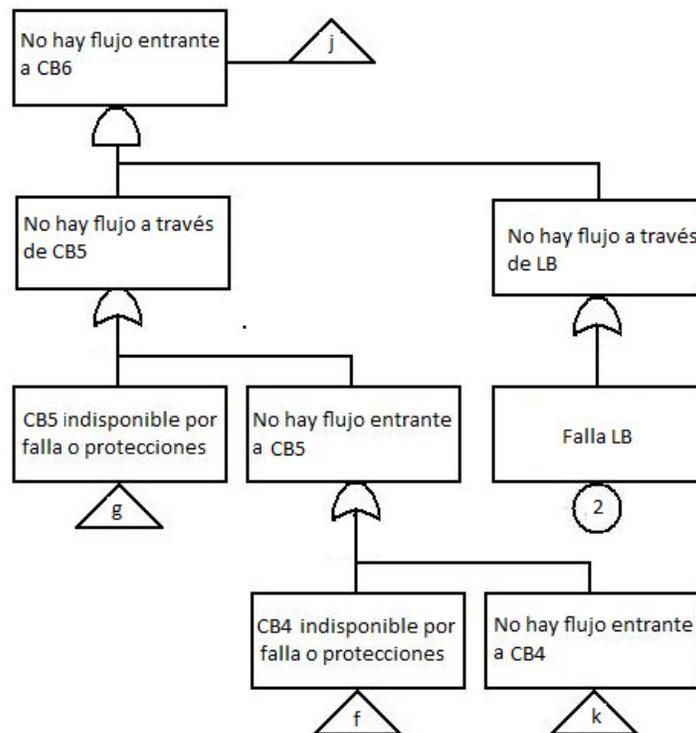


Figura 5.14 Árbol de falla no flujo entrante a CB6

Siguiendo con el árbol dada la compuerta de transferencia j , tiene como evento superior que no entre flujo a $CB6$, lo que se produce porque no haya flujo por $CB5$ ni tampoco por la línea LB , los cuales provocan otros eventos intermedios llegando al subárbol final, que comienza con el evento que no exista flujo por $CB4$ el cual se desarrolla hasta llegar a la indisponibilidad de $CB1$, la que incluye falla en LA , terminando así la segunda línea de flujo.

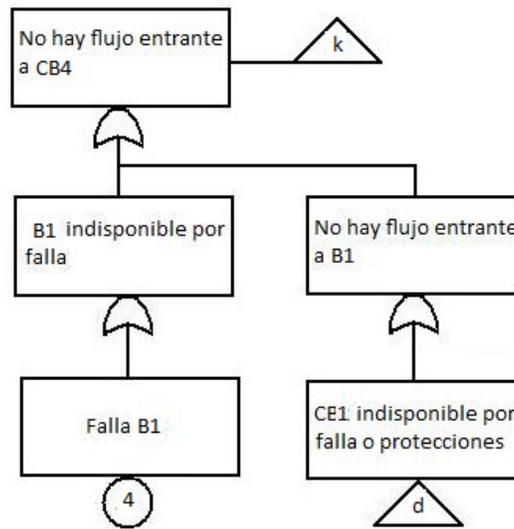


Figura 5.15 Árbol de falla no flujo entrante a CB4

Nótese que los eventos básicos se enumeran, donde 1 corresponde a la falla en interruptor, el 2 a falla en LA o LB , 3 a falla en las salidas La o Lb , y el número 4 se refiere a falla de las barras.

De la misma manera se modela para la línea Lb donde dado el supuesto que los interruptores, líneas y barras son equivalentes, se obtiene un árbol simétrico.

5.2 Comparación de Resultados

Para comparar los resultados del algoritmo con los de la fuente, se muestra una tabla con los valores respectivos.

	<i>Algoritmo implementado</i>	<i>Fuente [15]</i>
	Indisponibilidad	Indisponibilidad
No entra flujo a La	$2,4738 \times 10^{-5}$	$2,47 \times 10^{-5}$
No entra flujo a Lb	$2,4738 \times 10^{-5}$	$2,47 \times 10^{-5}$

Tabla 5.2 Comparación indisponibilidad Algoritmo vs Fuente, arreglo interruptor y medio.

También se hizo el análisis para el arreglo de doble barra doble interruptor cuyo modelo se elaboró en trabajos previos [15]. Los resultados comparativos se muestran en la tabla 5.3.

	<i>Algoritmo implementado</i>	<i>Fuente [15]</i>
	Indisponibilidad	Indisponibilidad
No entra flujo a La	$2,473394 \times 10^{-5}$	$2,47 \times 10^{-5}$
No entra flujo a Lb	$2,473394 \times 10^{-5}$	$2,47 \times 10^{-5}$

Tabla 5.3 Comparación disponibilidad Algoritmo vs Fuente, arreglo doble interruptor doble barra.

Basado en los resultados obtenidos se da por validado el algoritmo para obtener la disponibilidad, tasa de falla y de reparo de un árbol de falla cualquiera.

6 Capítulo 6: Implementación del Modelo

En este capítulo se presenta la metodología de construcción de un árbol de falla a partir de un arreglo de barra. Luego se aplicara esta metodología para los arreglos de barras e interruptores a estudiar.

6.1 Consideraciones del Modelo

Por simplificación no se considerará dentro del análisis de confiabilidad el aporte de las líneas de transmisión asignándoles una tasa de falla pequeña asociada al tramo desde la subestación hasta la primera torre de la línea, también se desprecia la componente de los desconectores.

En cuanto a los modos de falla de los equipos, en los interruptores se considerarán los clasificados en la sección 2.2.5 como fallas mayores, estos corresponderán a cortocircuitos equilibrados, desequilibrados, y no respuesta ante comando de apertura o cierre. Las fallas mayores son las que requieren de una desconexión inmediata del equipo.

6.2 Metodología de Modelación

Antes de la construcción del árbol se debe establecer una metodología de modelación. Se estudiará una configuración típica del sistema de transmisión troncal, que consta de dos entradas y dos salidas según la figura 6.1. Tanto las entradas como salidas corresponden a líneas de transmisión, entre estas se haya la configuración de barras e interruptores a estudiar.



Figura 6.1 Sistema de dos entradas y dos salidas

Veamos el caso de una configuración de barra simple compuesta por una barra, interruptores, línea de entrada y de salida según figura 6.2.

6.2.1 Metodología de Modelación para Arreglo de Barra Simple

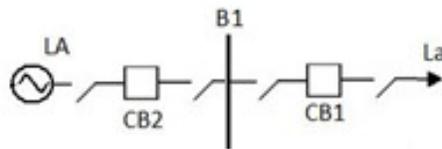


Figura 6.2 Arreglo barra simple con una entrada y una salida

El primer paso es definir el evento no deseado, el cual corresponde a que no haya flujo por la salida *La*. El segundo paso será determinar las causas por las que el top event puede ocurrir, para lo cual se analizan la línea de flujo desde la entrada a la salida según figura 6.3.

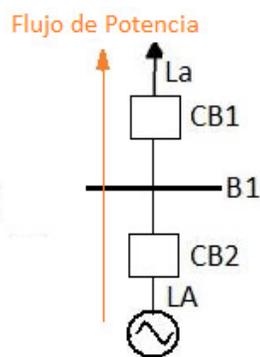


Figura 6.3 Flujos para arreglo barra simple con una entrada y una salida

Con esto se procede a la construcción del árbol de falla siguiendo la dirección del flujo e identificando las componentes que afectan a la continuidad de este. A continuación se describe el árbol para esta configuración.

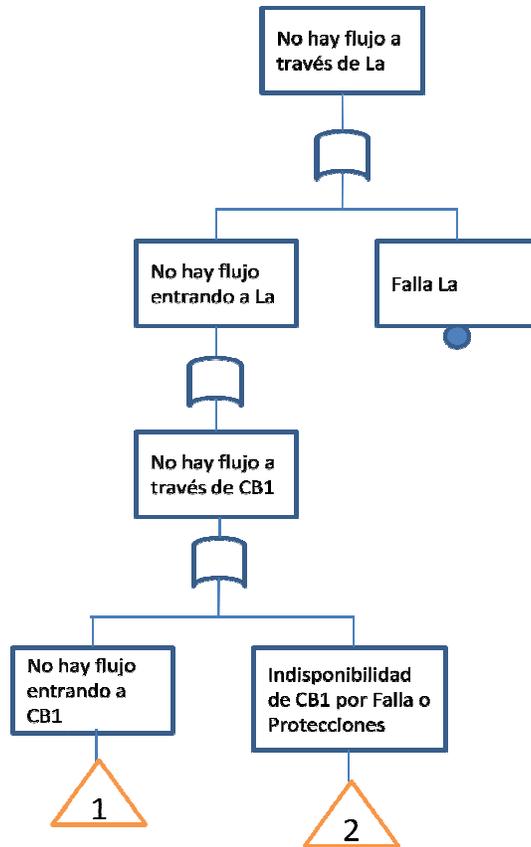


Figura 6.4 Árbol de falla “No hay flujo a través de La” en arreglo barra simple con una entrada y una salida

El evento superior es “no hay flujo a través de *La*”, esto es a consecuencia de que *La* falló o no hay flujo entrando a esta, lo que puede ocurrir por indisponibilidad en *CB1* o una falla que impida el flujo a través del interruptor.

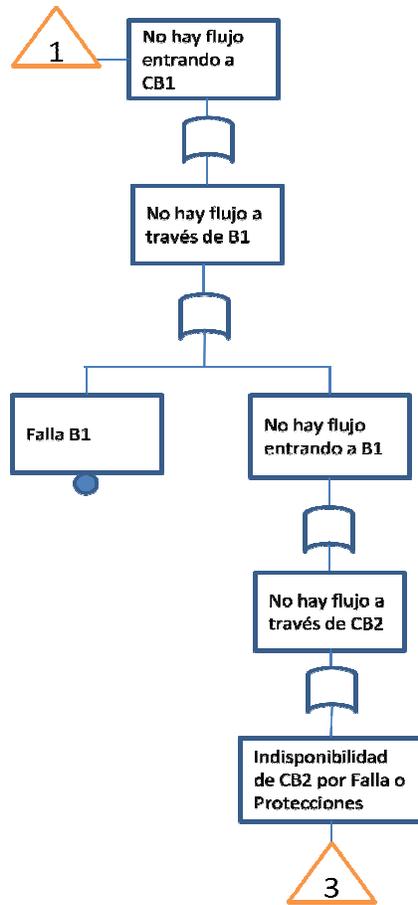


Figura 6.5 Árbol de falla “No flujo entrando a CB1” en arreglo barra simple con una entrada y una salida

Que no entre flujo a *CB1* va a depender de que no haya flujo a través de *B1* lo que se produce por falla en la barra o bien indisponibilidad de *CB2*.

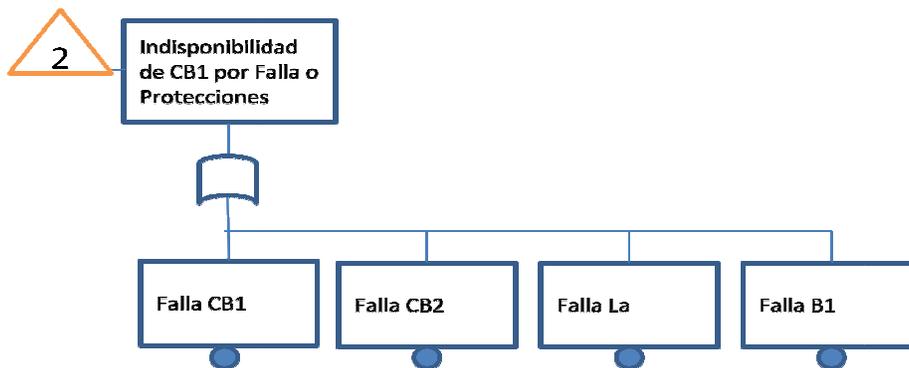


Figura 6.6 Árbol de falla “Indisponibilidad de CB1” en arreglo barra simple con una entrada y una salida

El subárbol de la figura 6.6 muestra las causas que producen la indisponibilidad de *CB1* por falla o actuación de protecciones.

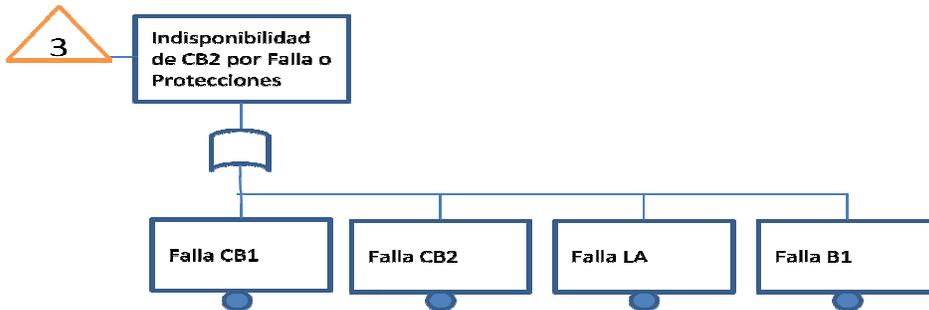


Figura 6.7 Árbol de falla “Indisponibilidad de CB2” en arreglo barra simple con una entrada y una salida

Análogamente que para el caso de *CB1* se muestra en la figura 6.7 el subárbol de falla para la indisponibilidad de *CB2*.

Nótese que la última componente de falla del sistema es *LA*, si embargo esta se encuentra incluida en la indisponibilidad de *CB2* por lo que no se muestra en el árbol por redundancia y simplificación del modelo.

En resumen, lo que se hizo fue definir el evento superior de árbol, identificar el camino del flujo de potencia, e ir desde el top event recorriendo el camino del flujo identificando los eventos que provocan su interrupción.

6.2.2 Metodología de Modelación para Arreglo de Doble Barra

El arreglo de barra simple es sencillo de modelar ya que no tiene elementos adicionales que respaldan el sistema. Para el arreglo de doble barra la situación cambia ya que en este se le da respaldo a la barra en caso que la principal falle como se ilustró en la sección 2.1.2.2.

En condición normal de operación el sistema opera con la barra principal de igual manera que el arreglo de barra simple, por lo que los árboles de falla son simétricos. En caso de que falle la barra *B1* como en el arreglo de barra simple, operan los interruptores *CB1* y *CB2* sacando al sistema y activando el evento principal, luego se debe modificar el árbol para que el evento principal no se active bajo la condición de falla en *B1* y así dar cuenta del respaldo que brinda *B2*. Para esto lo primero que hay que hacer es cambiar la filosofía de activación del evento no deseado, donde en vez de que no haya flujo por las líneas de salida se debe agregar la condición de que ocurra la misma situación tal que no exista respaldo para la rápida reconexión del sistema en condición normal de operación. Para el caso del arreglo doble barra, al fallar *B1*, mediante una rápida acción de los seccionadores se puede llevar al sistema a operar con condiciones óptimas, ocupando la barra de respaldo como muestra la figura 6.8.

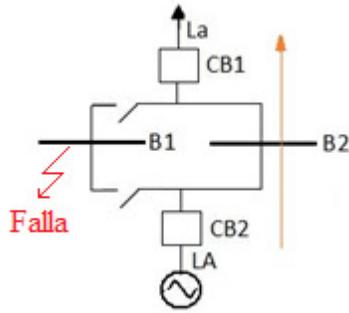


Figura 6.8 Flujos en arreglo de doble barra ocupando barra de respaldo.

Nótese que en la disposición real de los equipos de una configuración de doble barra aparece un tercer interruptor *CB3* (ver figura 6.9) que se utiliza para trasladar las cargas desde una barra a otra sin interrumpir la operación. Este interruptor se ocupa en caso de querer hacer mantenimiento a las barras, sin embargo este no contribuye al análisis de confiabilidad ya que no participa en casos de falla a menos que la falla ocurra justo en el proceso de traspaso de carga entre las barras, situación que se excluye del modelo.

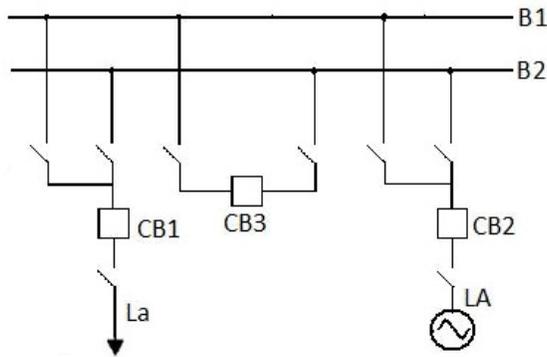


Figura 6.9 Arreglo de doble barra con interruptor de traspaso de carga.

El respaldo a las barras se asigna al árbol considerando los flujos en caso de falla (figura 6.8) y no falla de *B1* (figura 6.3). Con esto se procede a la construcción del árbol de falla.

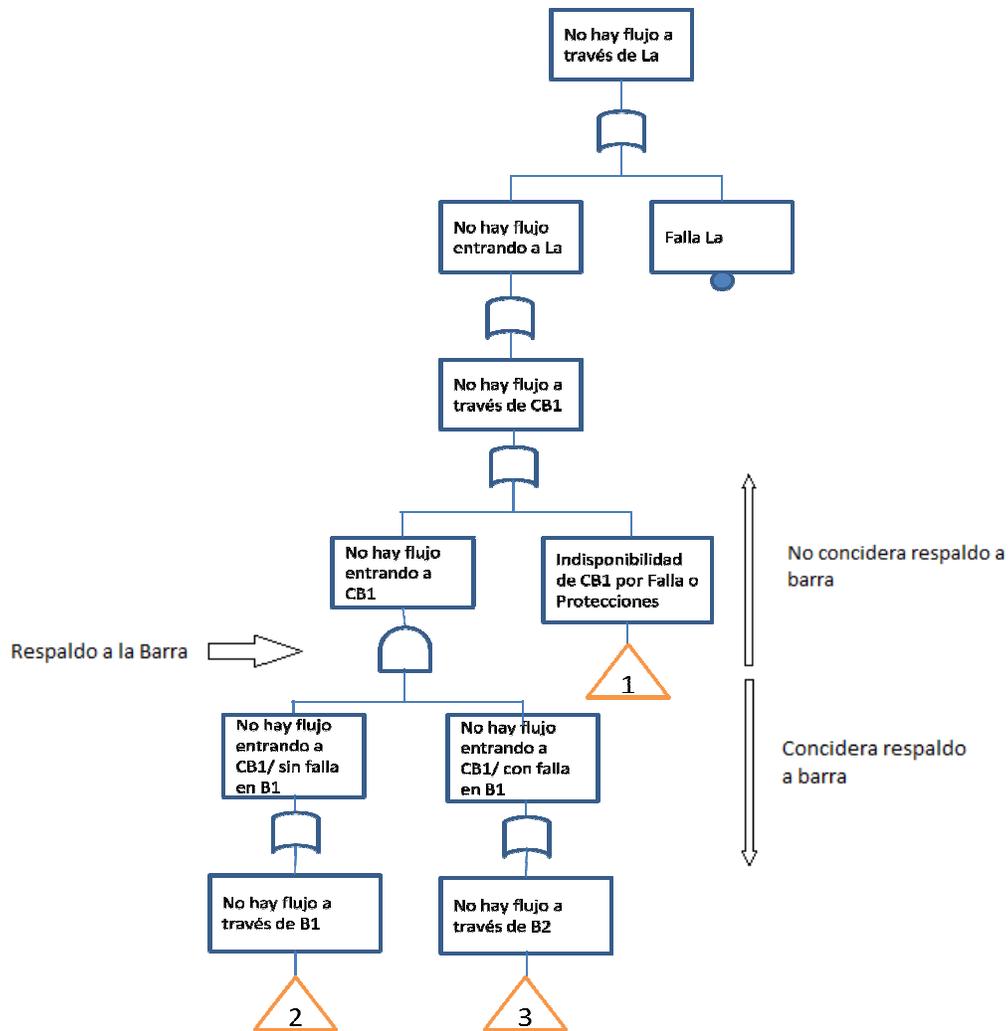


Figura 6.10 Subárbol “no hay flujo a través de La”

En este caso, para que no haya flujo entrando a *CB1* se debe cumplir que no haya flujo desde *B1* en caso de que este no haya fallado, y que no haya flujo desde *B2* en caso de que *B1* este indisponible. Al considerar lo anterior se estaría agregando la confiabilidad que entrega el respaldo *B2*, como ya se consideró, en lo que sigue del arreglo no se debe tomar en cuenta el respaldo. Por otro lado por la ubicación del interruptor *CB1* en el árbol, éste no ve el respaldo de la barra, por lo que se deben considerar la falla de ambas barras para su indisponibilidad como muestra la figura 6.11.

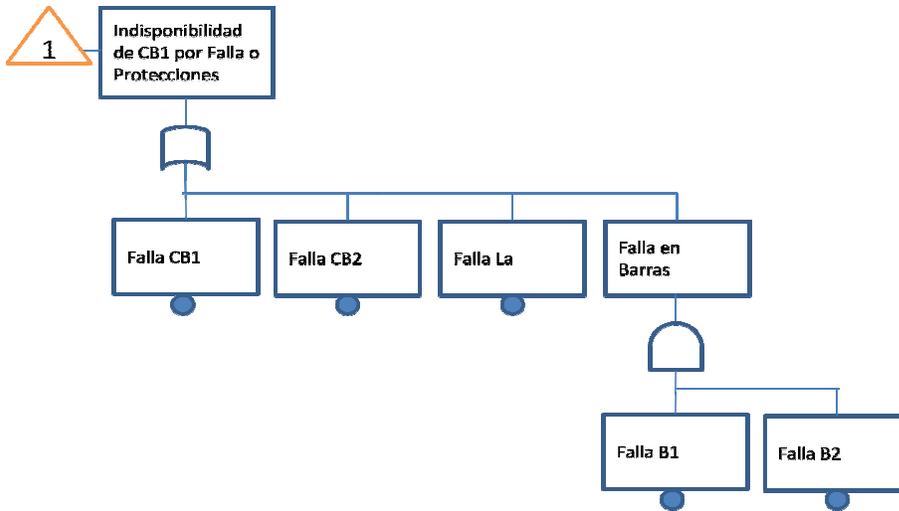


Figura 6.11 Subárbol indisponibilidad de CB1 con respaldo de Barra

Esto da cuenta que en la etapa del árbol en que se incluye el respaldo a un elemento (ver figura 6.10), toda componente del árbol que está por sobre esta etapa no visualiza el respaldo, luego se debe agregar el efecto en los modos de falla (ver figura 6.11). Posteriormente a incorporar el respaldo este no debe ser considerado nuevamente.

El método de modelado para el arreglo de doble barra es similar al expuesto para el arreglo de barra simple, diferenciándose solo en la incorporación del respaldo a la barra que brinda esta configuración.

6.2.3 Metodología de Modelación para Arreglo de Barra Principal con Barra de Transferencia

Para el arreglo de barra principal con barra de transferencia el análisis es similar al hecho para el arreglo de doble barra, salvo que en esta oportunidad en vez de dar respaldo a la barra se le da a los interruptores *CB1* y *CB2* mediante *CB3*. Las disposiciones de las barras, interruptores, línea de entrada y salida se aprecian en la figura 6.12.

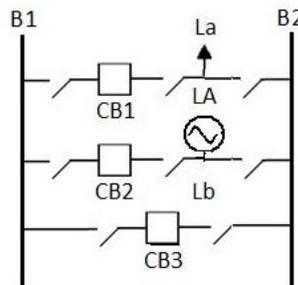


Figura 6.12 Arreglo de barra principal con barra de transferencia para una entrada y una salida

Como se dijo en la sección 2.1.2.3, en condición normal de operación el arreglo opera de la misma manera que el arreglo de barra simple, viendo la figura 6.12 esto se refiere a *CB1* y *CB2* cerrados al igual que los seccionadores adyacentes a estos, mientras que *CB3* y el resto de los seccionadores abiertos, quedando una conexión como la de la figura 6.3.

En caso de falla de un interruptor, por maniobras en los seccionadores se aísla el interruptor dañado trasladando los flujos al interruptor de respaldo. Si falla *CB1* el respaldo ocurre mediante *CB3* según la figura 6.13.

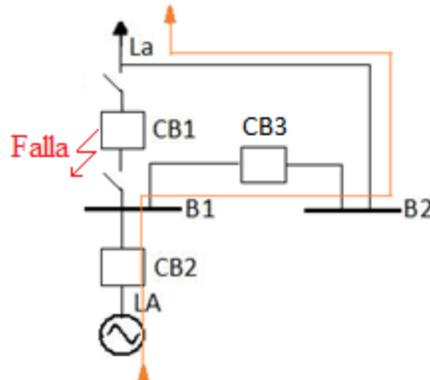


Figura 6.13 Conexión del arreglo para respaldar a *CB1*

Si falla *CB2* el respaldo ocurre mediante *CB3* según la figura 6.14.

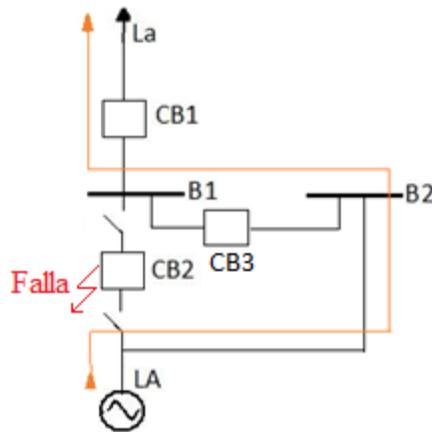


Figura 6.14 Conexión del arreglo para respaldar a *CB2*

Luego de haber identificado los caminos del flujo para los diferentes estados del arreglo (estado normal de operación, indisponibilidad de *CB1* e indisponibilidad de *CB2*) se procede a la construcción del árbol de falla partiendo por identificar el top event que será “No hay flujo a través de *La*”, en seguida se ramifica el árbol con los eventos posteriores.

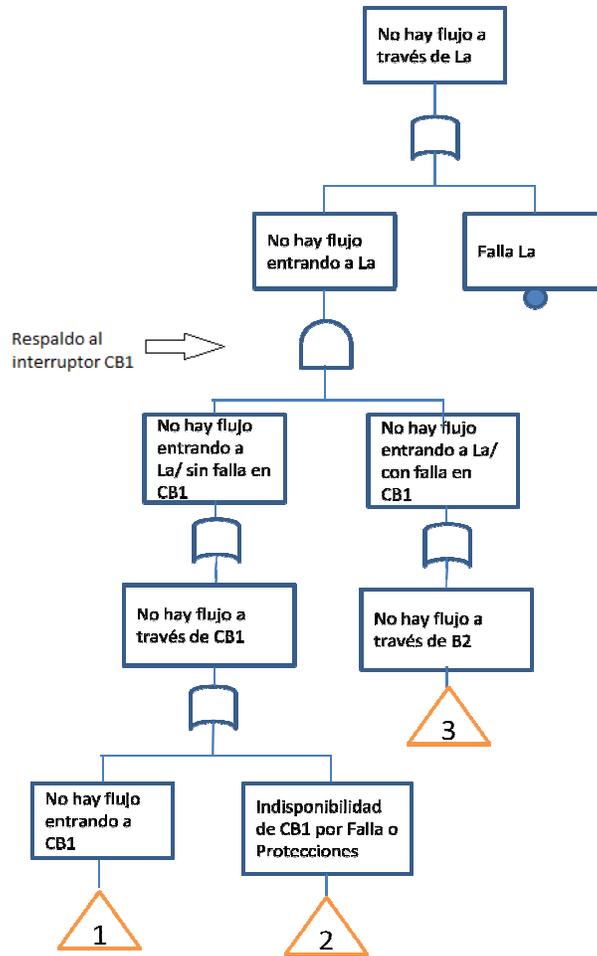


Figura 6.15 Subárbol “no hay flujo a través de La”

Para que se active el top event debe fallar *La* o que no haya flujo entrando a esta, flujo que proviene desde *CB1* si este está disponible y desde *B2* si *CB1* esta indisponible (ver figura 6.13). De esta manera se incorpora al modelo el respaldo de *CB1* mediante *CB3*.

El árbol continua con la compuerta de transferencia 1, para esta dirección de flujos se asume que *CB1* no fallo, luego el respaldo de que brinda *CB3* se le asigna al interruptor *CB2*. Veamos el subárbol de la figura 6.16, para que no haya flujo entrando a *CB1* debe fallar *B1* o que no haya flujo entrando a esta barra, flujo que proviene de *CB2* en caso de que éste esté disponible, o desde *CB3* en caso de *CB2* indisponible (ver figura 6.14).

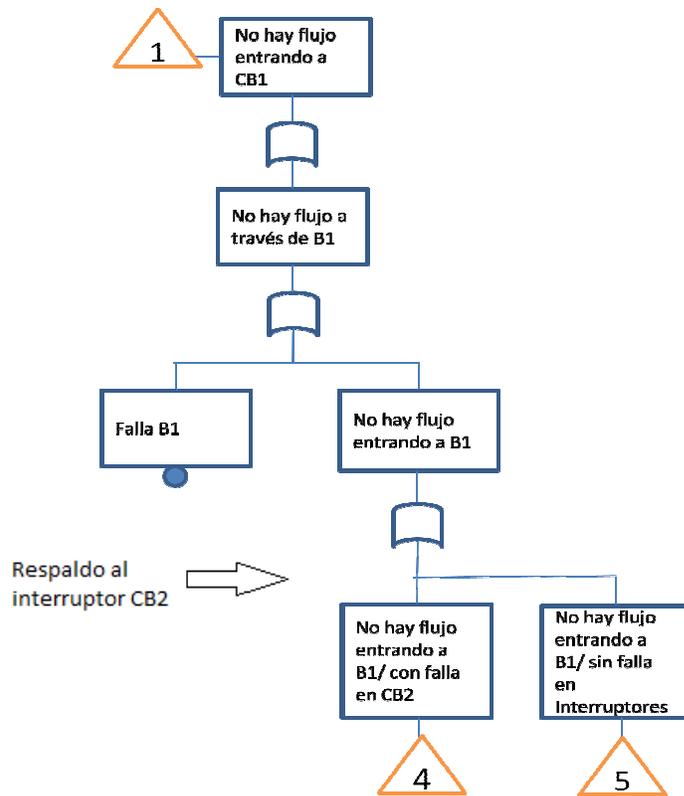


Figura 6.16 Subárbol “no hay flujo entrando a CB1”

En el subárbol anterior se incorporó el respaldo para el interruptor *CB2* mediante *CB3*. Para la compuerta de transferencia 4 “No hay flujo entrando a *B1*/ con falla en *CB2*” el camino del flujo es según la Figura 6.14, por otro lado para la compuerta de transferencia 5 “No hay flujo entrando a *B1*/ sin falla en interruptores” el camino del flujo es según la Figura 6.3.

El subárbol desde la compuerta de transferencia 2 muestra la indisponibilidad de *CB1*. Nótese que en esta etapa del árbol (ver figura 6.15) el flujo pasa por *CB1*, luego la indisponibilidad de este interruptor por falla o protecciones se incorpora el respaldo al interruptor *CB2* como se muestra en el subárbol de la figura 6.17. La idea es incorporar todos los estados posibles del arreglo en que *CB1* está disponible, esto es *CB2* con falla (ver figura 6.14) o *CB2* sin falla (ver figura 6.3).

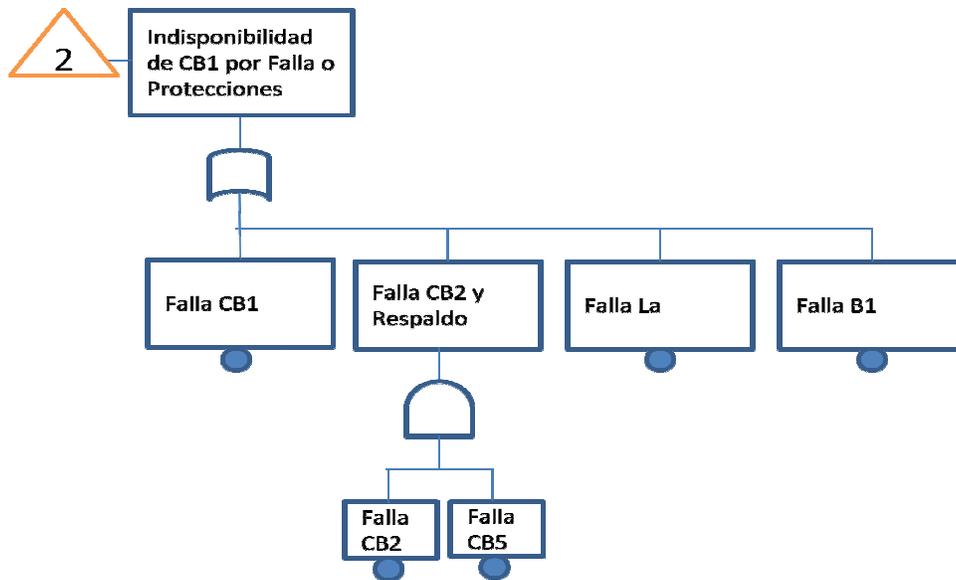


Figura 6.17 Subárbol indisponibilidad de CB1

Así se obtiene una metodología de modelación para los diferentes arreglos, todos basados en la filosofía de incorporar los respaldos que vienen de las características propias de cada arreglo.

6.2.4 Secuencia de Metodología de Modelación

Para formalizar la metodología se incorpora una secuencia de los pasos a realizar para la construcción del árbol.

1. Definir la hipótesis del evento principal: “no hay flujo por la línea de salida tal que una rápida reconexión del sistema no permita al sistema volver a un estado de operación normal, es decir que, algunas de las entradas y salidas estén fuera de servicio.
2. Identificar los eventos básicos del sistema, parámetros de confiabilidad y modos de falla.
3. Identificar los respaldos a barras o interruptores característicos del arreglo a modelar.
4. Visualizar los diferentes caminos de flujo hacia el elemento que condiciona al top event (líneas de salidas) para todos los estados de operación posibles del arreglo.
5. Construir el árbol incorporando los respaldos a los equipos según la lógica mostrada anteriormente.
6. Finalizar la construcción teniendo en la parte inferior del árbol solo eventos básicos con la precaución de incorporar todos los respaldos y direcciones de flujos existentes.

6.3 Implementación Árbol Arreglo Barra Simple

El arreglo de barra simple a modelar consta de dos entradas y dos salidas como se muestra en la figura 6.18:

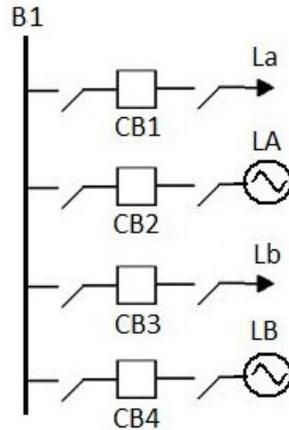


Figura 6.18 Arreglo de barra simple dos entradas con dos salidas

Los flujos de energía provienen desde LA y LB llegando hasta La y Lb. Para comenzar solo se estudiarán los flujos hacia la salida La según la figura 6.19.

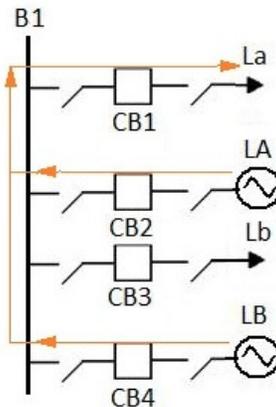


Figura 6.19 Dirección de flujos para arreglo de barra simple

Al considerar *La* se tiene como evento principal “No flujo a través de *La*”, luego se aplica la metodología propuesta en la sección 6.2.1. La figura 6.20 muestra la parte superior del arreglo partiendo desde el top event.

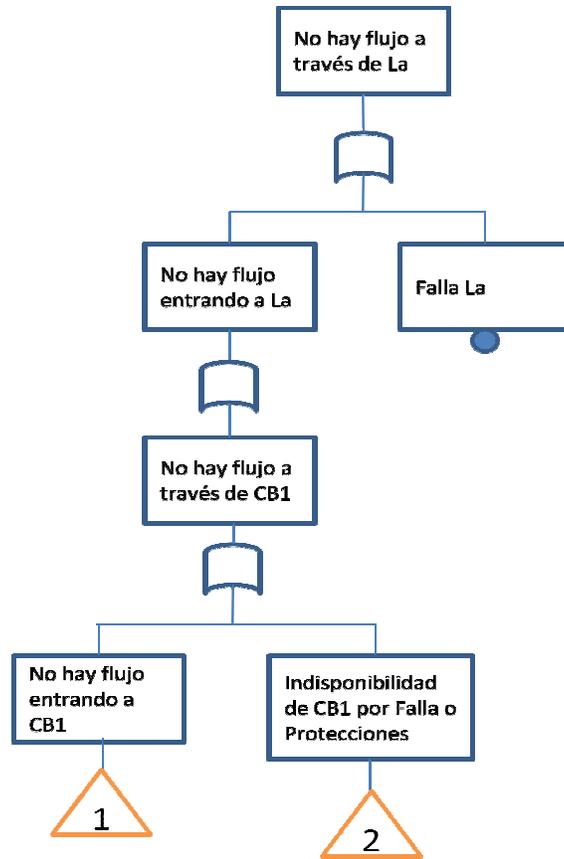


Figura 6.20 Subárbol “no hay flujo a través de La” arreglo de barra simple

“No flujo a través de *La*” se debe a que falla *La* o no hay flujo a través de *CB1*, lo que pasa por falla del interruptor, apertura por protecciones, o no hay flujo proveniente desde *B1*.

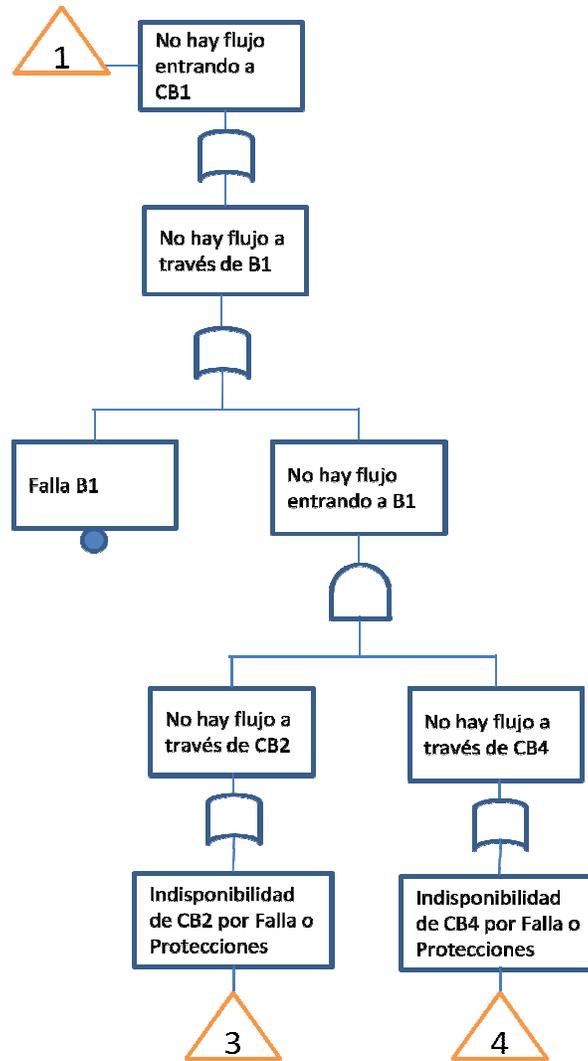


Figura 6.21 Subárbol “no hay flujo entrando a CB1” arreglo de barra simple

Que no haya flujo entrando a *CB1*, dependerá de que sí haya o no haya flujo por *B1* lo que se produce por falla en la misma barra o que no provenga flujo desde *CB2* y *CB4* .

A continuación se muestran los subárboles donde se aprecian la indisponibilidad de los interruptores por falla o protección, esta disponibilidad depende del equipo en sí y de las componentes aledañas donde se requiere de su intervención para despejar la falla.

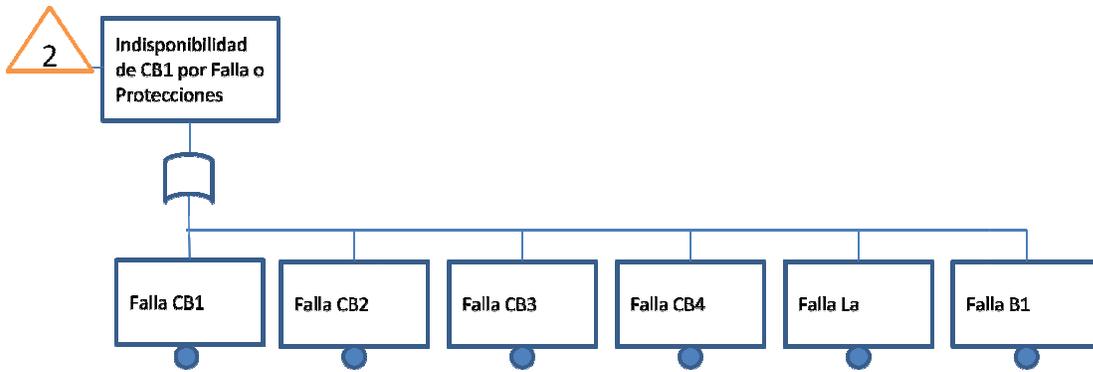


Figura 6.22 Subárbol “indisponibilidad de CB1” arreglo de barra simple

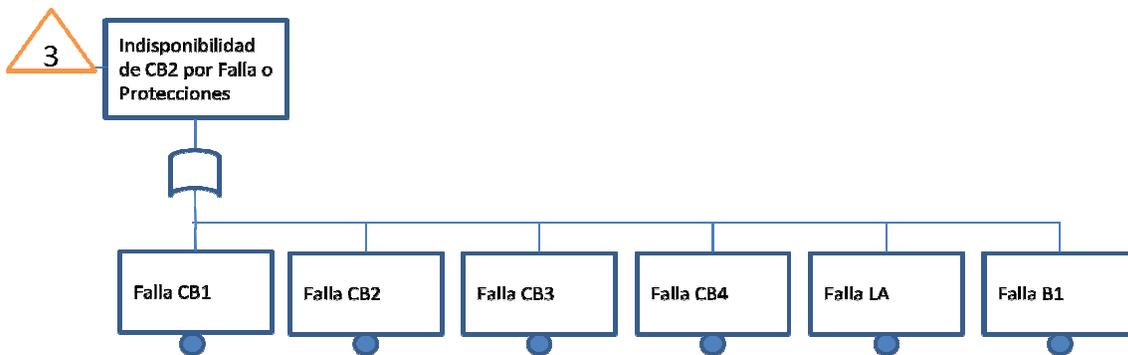


Figura 6.23 Subárbol “indisponibilidad de CB2” arreglo de barra simple

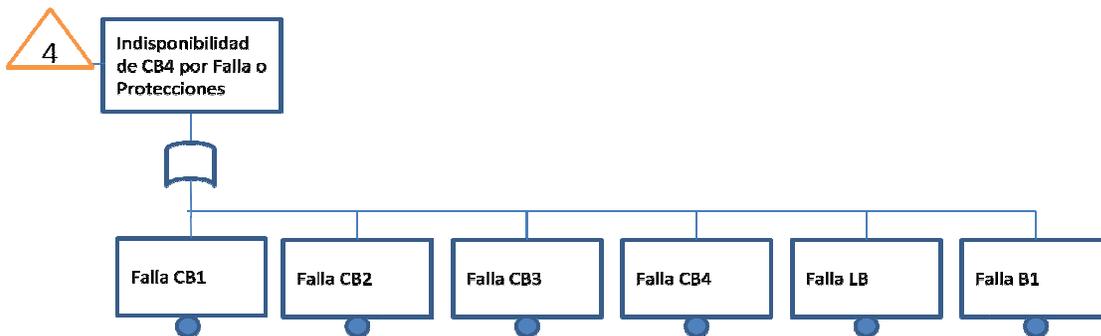


Figura 6.24 Subárbol “indisponibilidad de CB4” arreglo de barra simple

Dejando solo eventos básicos en cada evento inferior culmina la construcción del árbol de falla para la indisponibilidad de *La*. Nótese que cada evento básico corresponde a la falla de un elemento del sistema del cual se conocen sus parámetros de confiabilidad y modos de falla descritos en la sección 6.1.

Luego de construido el árbol se obtienen los conjuntos de cortes mínimos que definen la confiabilidad del sistema. La falla de cada conjunto de corte activa al evento principal. El

árbol de falla se puede reducir a una compuerta AND entre todos los elementos del conjunto de corte y luego una compuerta OR entre ellos como se muestra en la figura 6.25.

Para el arreglo de barra simple se obtiene la siguiente tabla para el conjunto de corte mínimo:

Conjunto de Corte Mínimo Barra Simple	
<i>La</i>	
<i>CB1</i>	
<i>CB2</i>	
<i>CB3</i>	
<i>CB4</i>	
<i>B1</i>	
<i>LA</i>	<i>LB</i>

Tabla 6.1 Conjunto de corte mínimo arreglo de barra simple

Esto permite reducir el árbol de falla al que se ilustra en la figura 6.25.

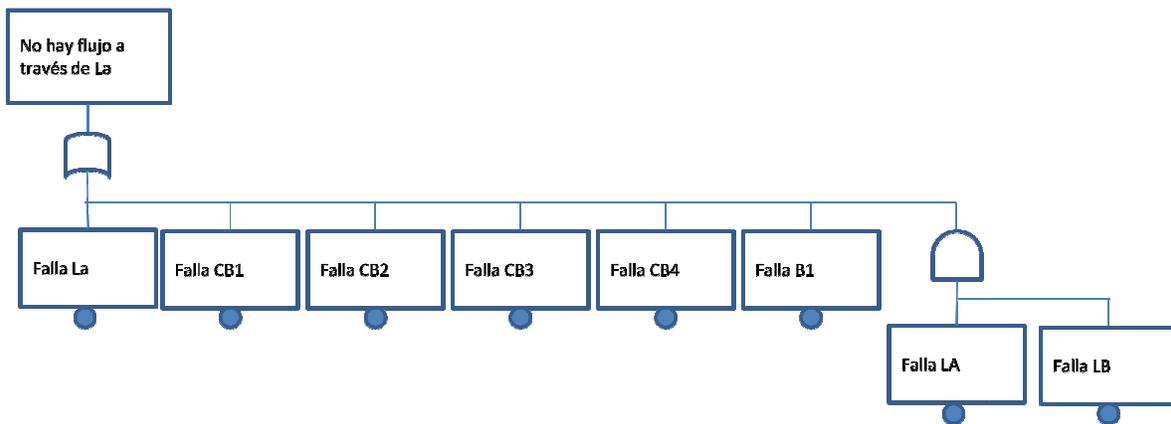


Figura 6.25 Árbol de falla reducido arreglo de barra simple

Se observa que para que no haya flujo por La basta con que esta falle, cualquier interruptor o ambas entradas de manera simultaneas.

6.4 Implementación Árbol Arreglo Doble Barra

El arreglo de doble barra a modelar consta de dos entradas y dos salidas según se muestra en la figura 6.26.

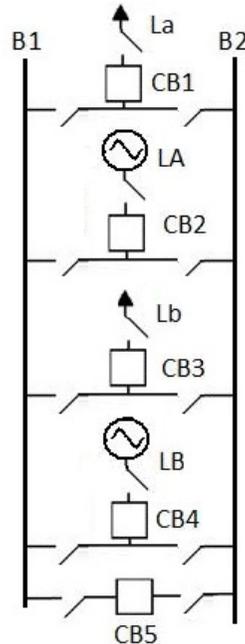


Figura 6.26 Arreglo de doble barra con dos entradas con dos salidas

Como se describió en la sección 6.2.2 el interruptor *CB5* solo se ocupara para trasladar las cargas de una barra a otra estando el sistema energizado, sin embargo en estado normal de operación permanece sin uso, luego no se considera en el análisis de confiabilidad.

Al igual que en el arreglo de barra simple, se partirá por analizar solo la confiabilidad en la salida *La*, dado lo anterior, para el modelo se deben considerar las siguientes dos situaciones:

La primera es para el caso en que la barra principal *B1* esta disponible, la estructura del arreglo y la dirección de los flujos serán según muestra la figura 6.27

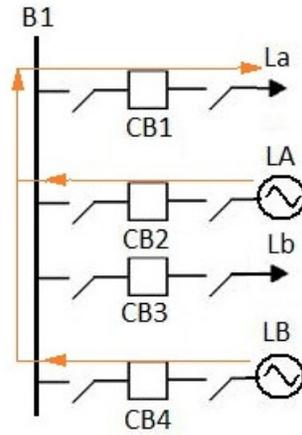


Figura 6.27 Flujos para arreglo doble barra en condición normal de operación

La segunda situación a modelar es para el caso en que falla la barra principal, por lo que se debe reconectar el sistema para utilizar la barra de respaldo, en este caso la estructura del arreglo y dirección del flujo será según la figura 6.28:

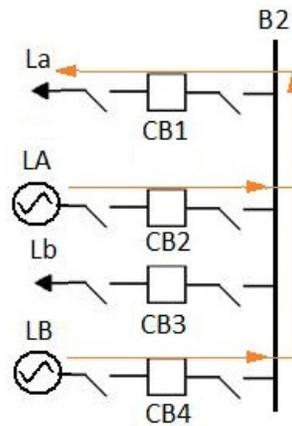


Figura 6.28 Flujos para arreglo doble barra utilizando barra de respaldo

Identificado el top event “no hay flujo a través de La ” y los caminos posible de flujos, se procede a la construcción del árbol de falla.

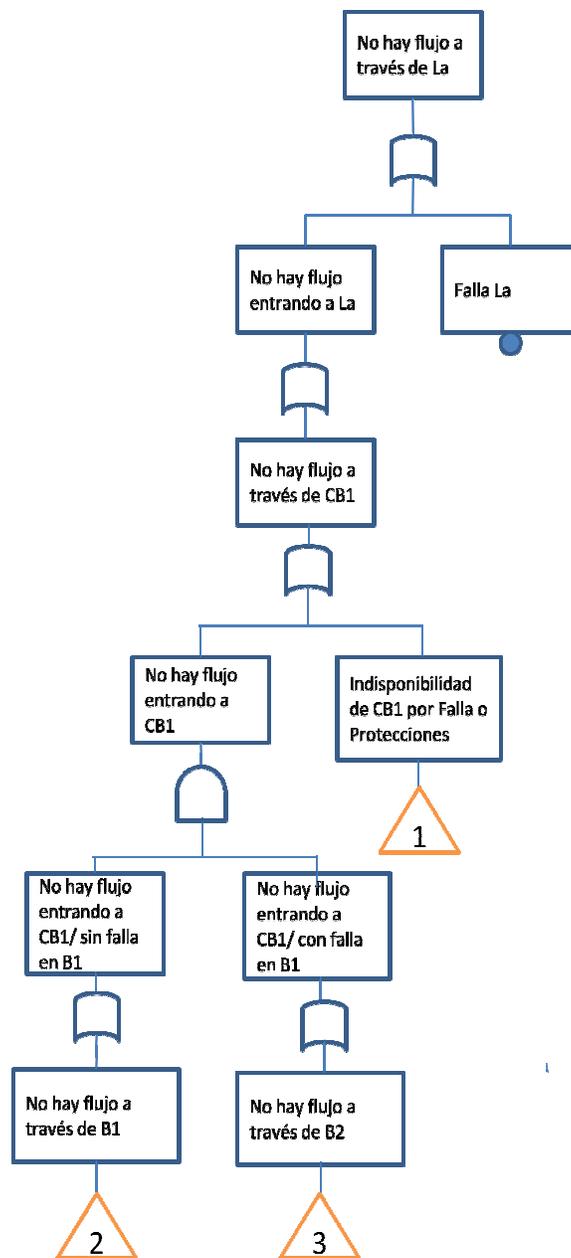


Figura 6.29 Subárbol “No hay flujo a través de La” arreglo de doble barra

Que no haya flujo a través de *La* se produce por falla en la misma línea o que no provenga flujo desde *CB1*, situación que es provocada por falla del interruptor, indisponibilidad por protecciones, o que no provenga flujo desde *B1* y desde *B2* en caso de que *B1* falle.

El subárbol de la compuerta de transferencia 1 muestra las causas de indisponibilidad de *CB1*. En esta etapa, el árbol de falla por el recorrido de los flujos aún no incorpora el respaldo para la barra, por lo tanto, se debe considerar este efecto, asumiendo las barras como un conjunto independiente, donde deben fallar ambas para una indisponibilidad del interruptor.

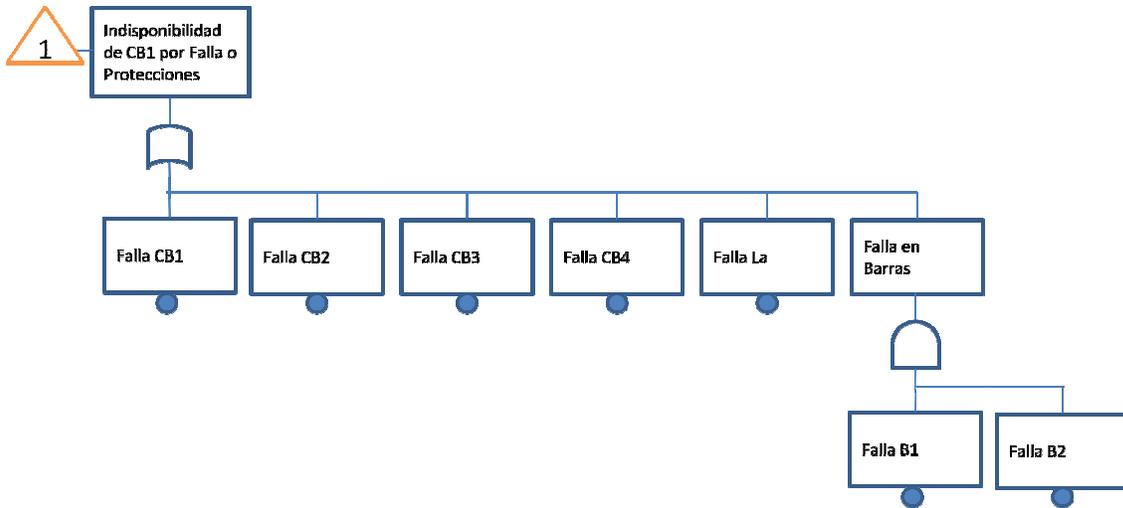


Figura 6.30 Subárbol “Indisponibilidad de CB1” arreglo doble barra

La compuerta de transferencia 2 parte en el evento “No hay flujo a través de B1”, causado por falla en la barra o no flujo proveniente desde las entradas.

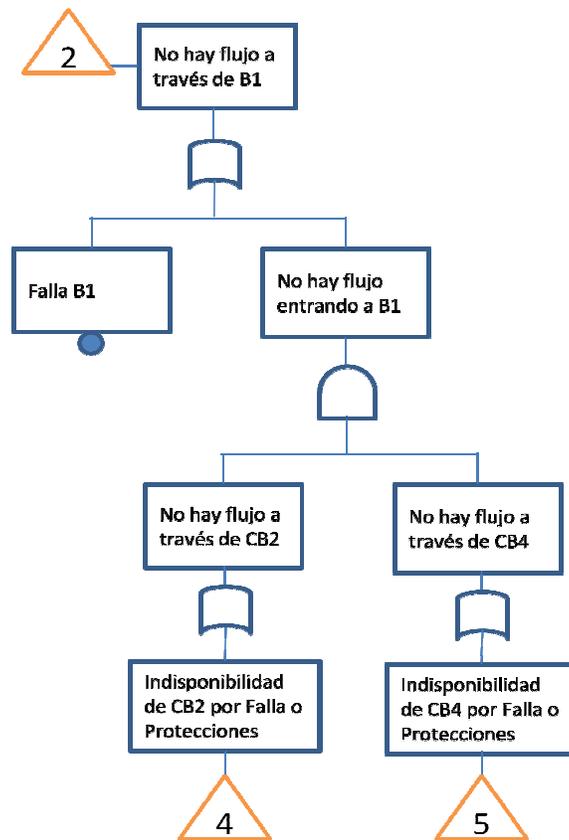


Figura 6.31 Subárbol “No hay flujo a través de B1” arreglo de doble barra

Los subárboles 4 y 5 muestran las causas de indisponibilidad de *CB2* y *CB4* respectivamente. La indisponibilidad dependerá del equipo propiamente tal y de los elementos adyacentes como se aprecia a continuación.

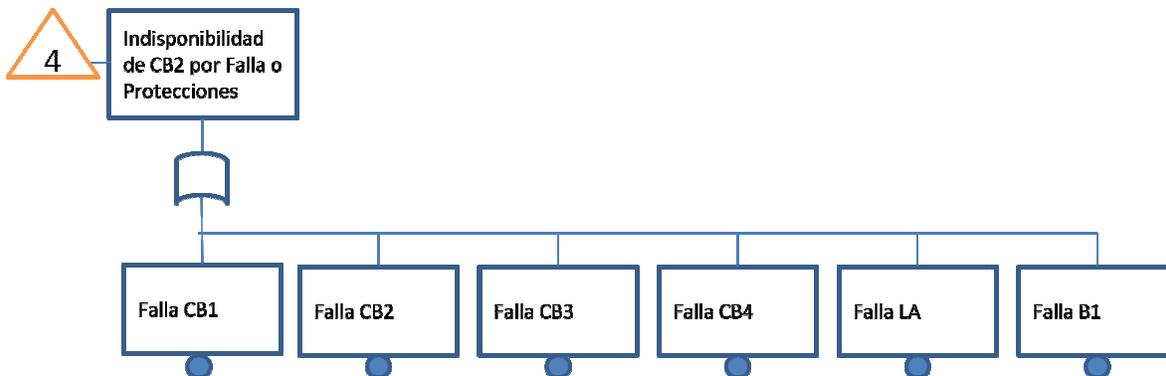


Figura 6.32 Subárbol “Indisponibilidad de CB2” arreglo de doble barra condición normal de operación

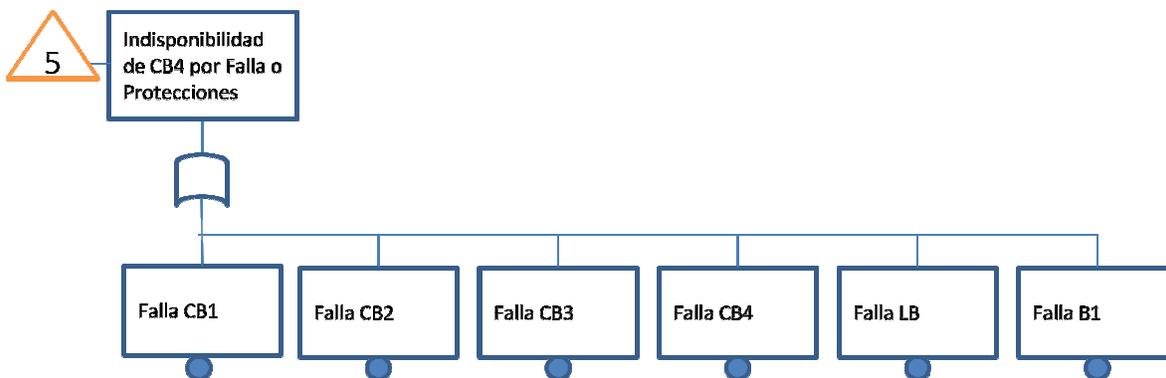


Figura 6.33 Subárbol “Indisponibilidad de CB4” arreglo de doble barra condición normal de operación

Mismo escenario para la situación de falla en *B1*, donde se modela el árbol considerando que los flujos provenientes desde *LA* y *LB* llegan a *La* pasando por *B2* (ver figura 6.28). Esto queda modelado en el subárbol de la figura 6.34 que parte desde la compuerta de transferencia 3.

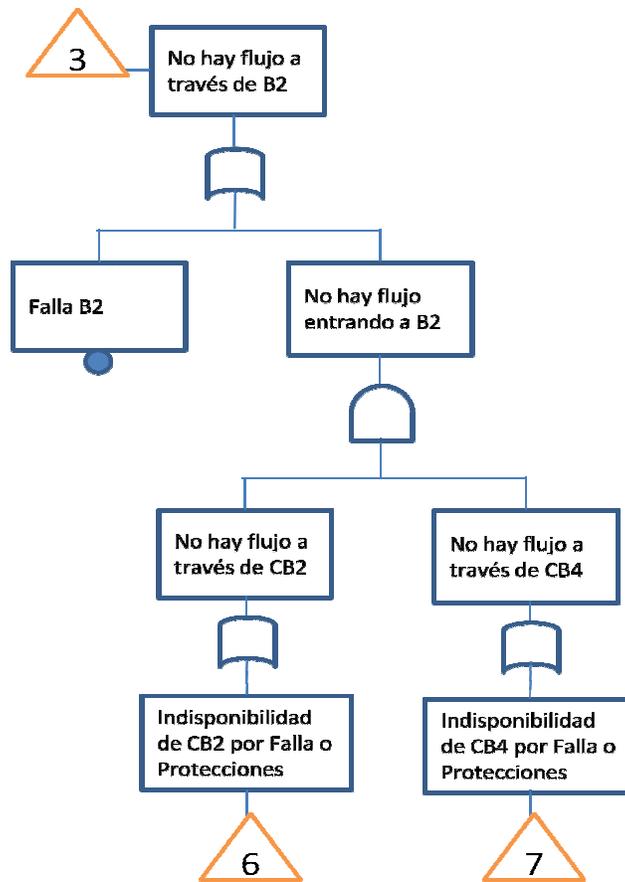


Figura 6.34 Subárbol “No hay flujo a través de B2” arreglo doble barra, condición de falla en B1

Los subárboles con compuerta de transferencia 6 y 7 muestran las causas de indisponibilidad de *CB2* y *CB4* respectivamente, donde a diferencia del 4 y 5 la indisponibilidad viene dada por *B2* y no por *B1*.

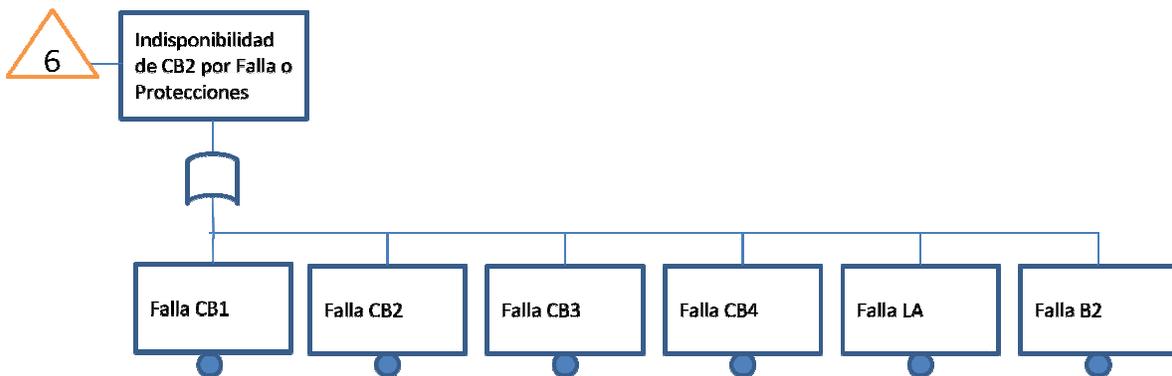


Figura 6.35 Subárbol “Indisponibilidad de CB2” arreglo de doble barra condición de respaldo

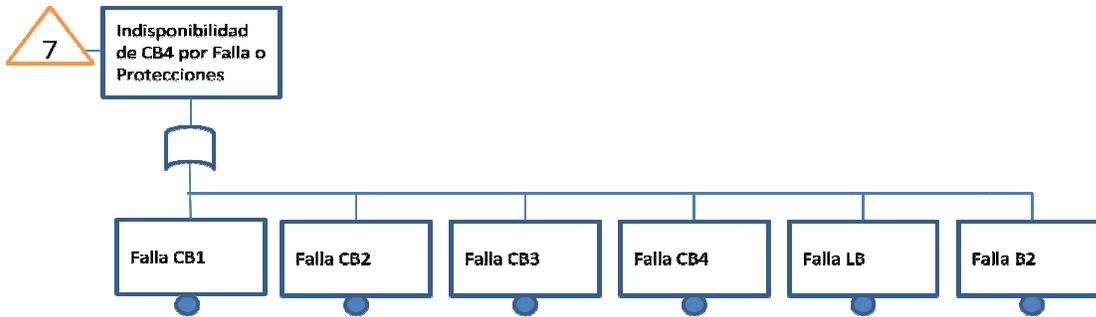


Figura 6.36 Subárbol “Indisponibilidad de CB4” arreglo de doble barra condición de respaldo

Al igual que el arreglo de barra simple, en el arreglo de doble barra se obtienen conjuntos de corte semejantes con la diferencia que hay respaldo para la barra, luego deben fallar B1 y B2 para que no haya flujo por La aumentando la confiabilidad al sistema.

Conjunto de Corte Mínimo Doble Barra	
<i>La</i>	
<i>CB1</i>	
<i>CB2</i>	
<i>CB3</i>	
<i>CB4</i>	
<i>B1</i>	<i>B2</i>
<i>LA</i>	<i>LB</i>

Tabla 6.2 Conjunto de corte mínimo arreglo de doble barra

Luego el árbol modelado en queda reducido queda de la siguiente manera:

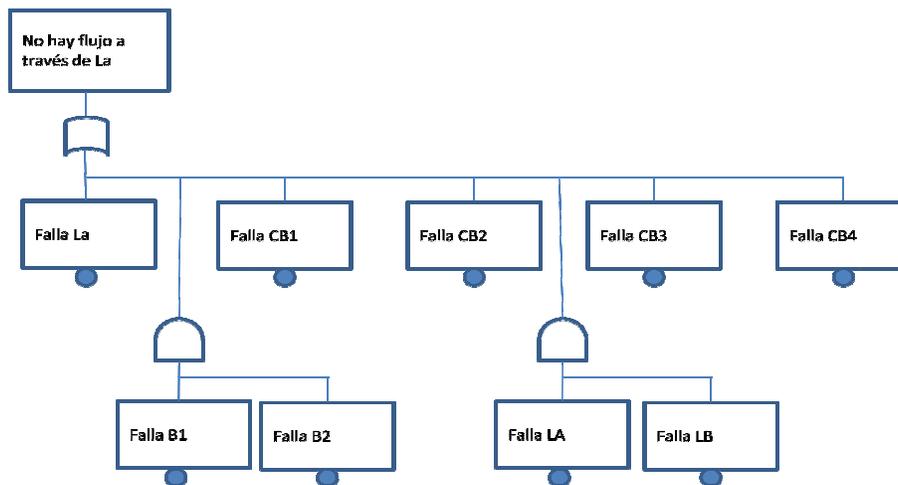


Figura 6.37 Árbol de falla reducido arreglo de doble barra

6.5 Implementación Árbol Arreglo Barra Principal y Barra de Transferencia

Como se vio en la metodología de modelación este arreglo tiene la característica de dar respaldo a los interruptores, en este caso a los circuit breakers 1, 2, 3 y 4 mediante *CB5*.

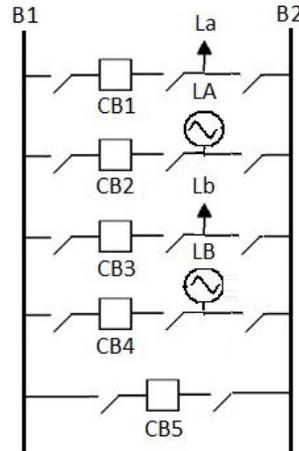


Figura 6.38 Arreglo barra principal con barra de transferencia con dos entradas con dos salidas

Lo primero es identificar el top event que al igual que los modelos anteriores será “No hay flujo a través de *La*”.

Luego hay que identificar los posibles estados de operación del arreglo. En estado normal de operación la configuración corresponde a la del arreglo de barra simple mostrado en la figura 6.18. Al fallar un interruptor la disposición del arreglo cambiará según los siguientes casos:

- Caso 1: Falla *CB1* y se respalda con *CB5*.

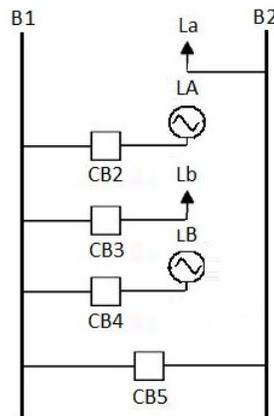


Figura 6.39 Respaldo a *CB1* mediante *CB5*

- Caso 2: Falla *CB2* y se respalda con *CB5*.

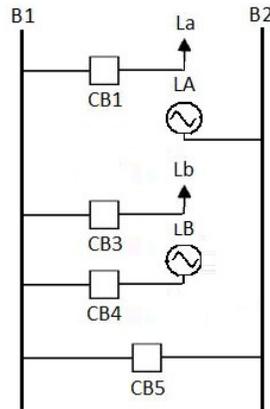


Figura 6.40 Respaldo a *CB2* arreglo mediante *CB5*

- Caso 3: Falla *CB3* y se respalda con *CB5*.

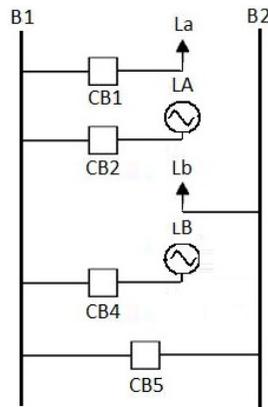


Figura 6.41 Respaldo a *CB3* mediante *CB5*

- Caso 4: Falla *CB4* y se respalda con *CB5*.

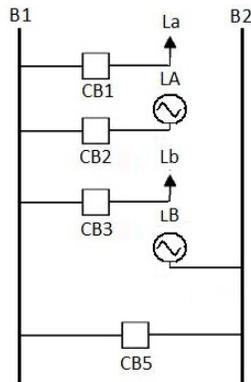


Figura 6.42 Respaldo a *CB4* mediante *CB5*

El siguiente paso es identificar la dirección y camino del flujo para los diferentes estados del arreglo. Para el caso normal de operación esto se muestra en la figura 6.43.

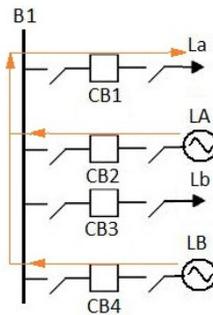


Figura 6.43 Flujos arreglo para condición normal de operación

En los estados de respaldo el flujo se transmite por CB5 dejando fuera el interruptor fallido.

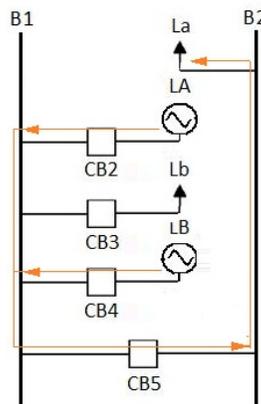


Figura 6.44 Flujos para respaldo a CB1 mediante CB5

En el caso de la figura 6.44 el interruptor que falla es *CB1*, este se saca de operación y se aísla mediante maniobra de los seccionadores, luego se conecta *CB5* y se vuelve a energizar el sistema. Lo mismo ocurre en caso de falla de otros interruptores mostrándose la dirección de los flujos en la figura 6.45.

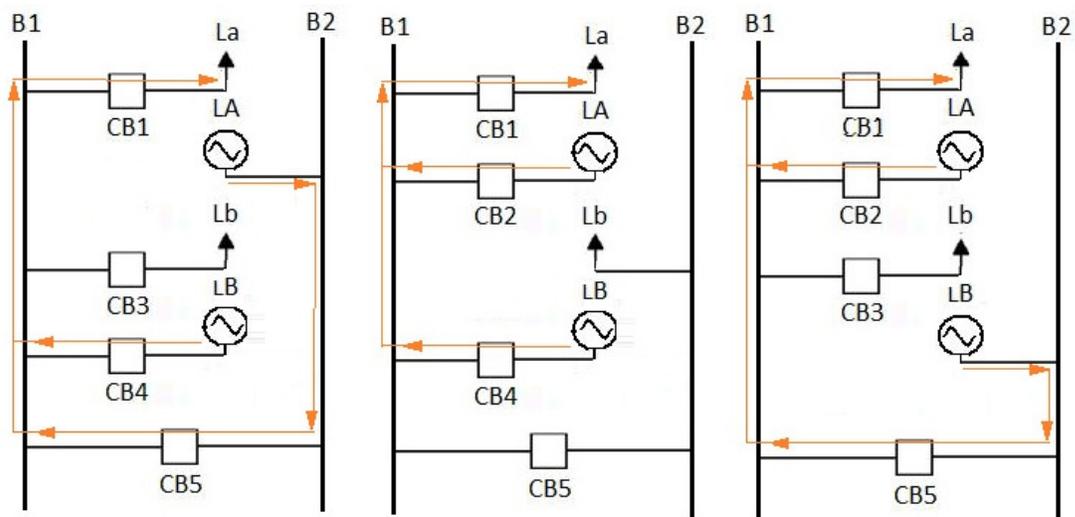


Figura 6.45 Flujos para respaldo a CB2, CB3 y CB4 mediante CB5

Finalmente viene la construcción del árbol de falla que se aprecia en la figura 6.46. Como se mencionó “No hay flujo a través de La ” es el top event, que ocurre a consecuencia de falla en la línea o que no provenga el flujo desde $CB1$ en caso de que este no falle, y desde $B2$ en caso que $CB1$ falle.

Si $CB1$ no ha fallado la interrupción del flujo se debe a que no entra flujo a este, o está indisponible por falla u operación de protecciones.

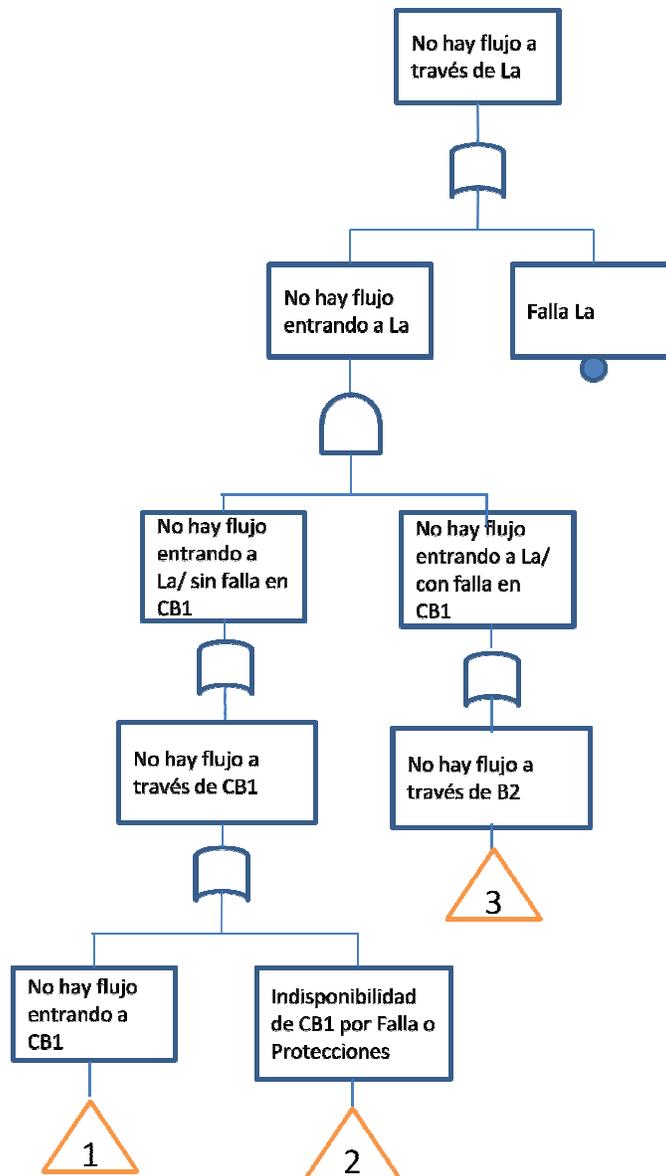


Figura 6.46 Subárbol “No flujo a través de La” arreglo de barra principal con barra de transferencia

La indisponibilidad de *CB1* por falla o protección se debe a una falla del elemento o los aledaños que activan la protección, sin embargo para esta etapa del árbol solo se ha implementado el respaldo para *CB1*, luego se debe agregar para el resto de los interruptores mediante la operación de *CB5* según la figura 6.47.

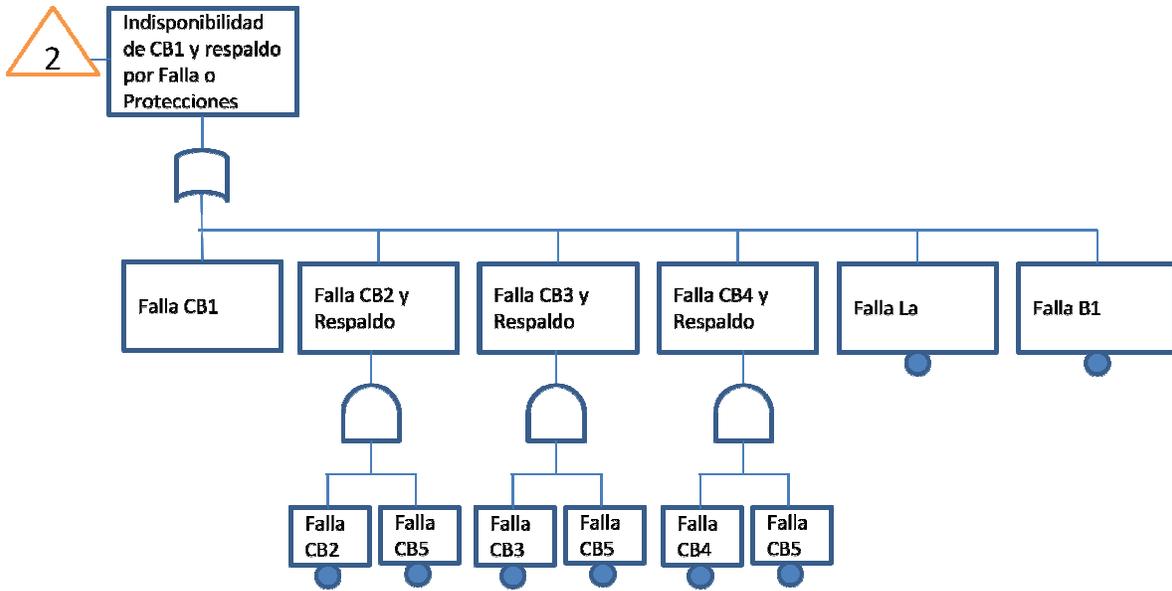


Figura 6.47 Subárbol “Indisponibilidad CB1” arreglo de barra principal con barra de transferencia

Continuando con el árbol de falla, la compuerta de transferencia 1 muestra que no hay flujo entrando a CB1, el cual proviene desde la barra B1. Si no hay flujo a través de B1 es por falla de la barra o no hay flujo ingresando a esta que puede provenir desde CB2, CB4 y/o CB5 en caso de que los anteriores hayan fallado, luego en esta etapa del árbol se da cuenta del respaldo que aporta CB5 al sistema. En este caso que no entre flujo a B1 está bajo la condición de falla de los interruptores donde también se debe considerar el caso en que no falle ningún interruptor como muestra la figura 6.48.

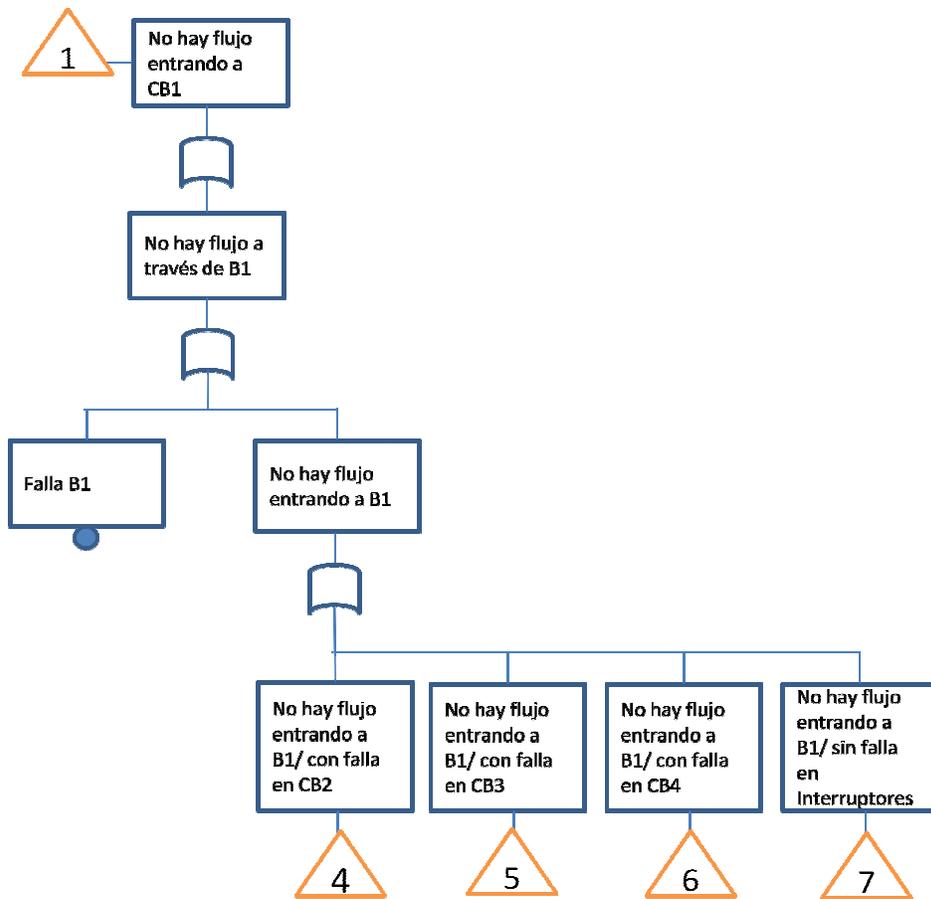


Figura 6.48 Subárbol “No hay flujo entrando a CB1” arreglo de barra principal con barra de transferencia

No hay flujo entrando a *B1* con falla en *CB2*, corresponde al caso 2 (ver figura 6.40) donde el flujo hacia la salida pasan por *CB4* y *CB5* el cual se cierra para respaldar la falla, luego para que se cumpla el evento superior del subárbol ambos flujos deben interrumpirse como se muestra en la figura 6.49.

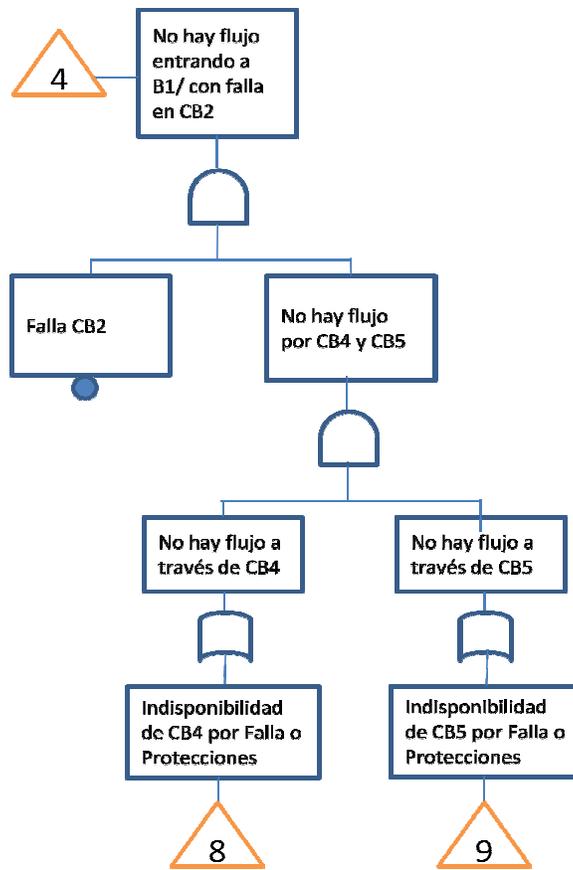


Figura 6.49 Subárbol “No entrando a B1/con falla en CB2” arreglo de barra principal con barra de transferencia

Los subárboles 8 y 9 muestran las componentes que provocan la indisponibilidad de *CB4* y *CB5* para el caso 2.

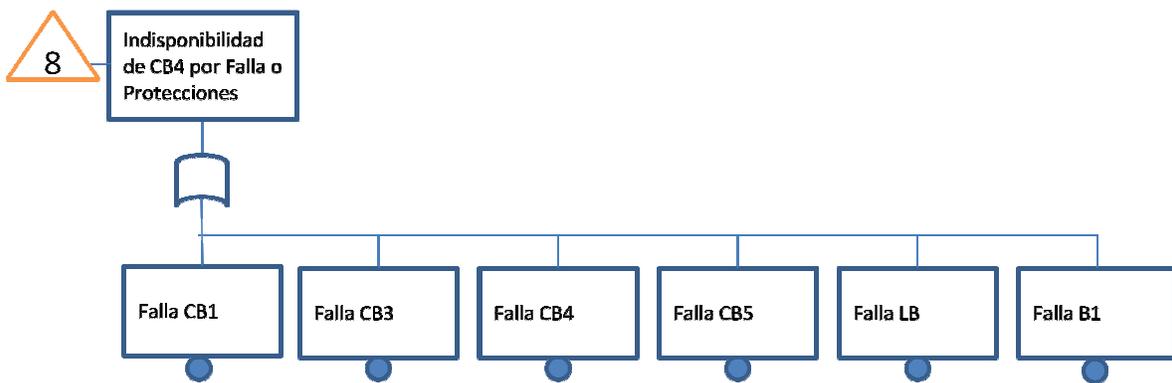


Figura 6.50 Subárbol “Indisponibilidad de CB4” en condición de respaldo a CB2 arreglo de barra principal con barra de transferencia

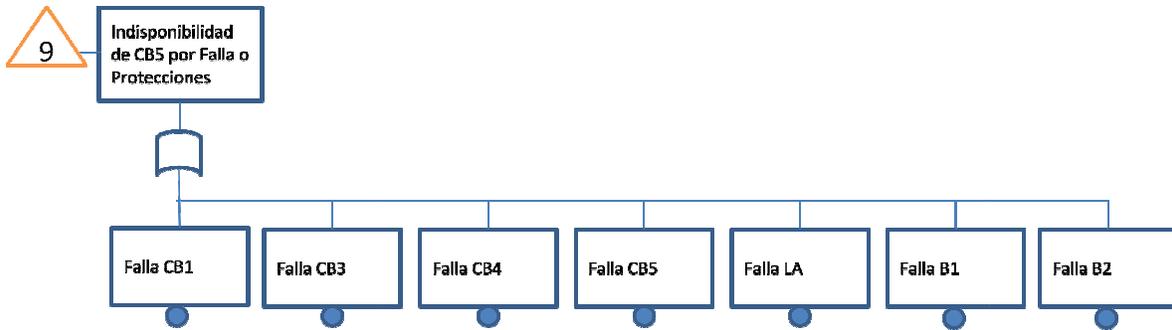


Figura 6.51 Subárbol “Indisponibilidad de CB5” en condición de respaldo a CB2 arreglo de barra principal con barra de transferencia

No hay flujo entrando a *B1* con falla en *CB3*, corresponde al caso 3 (ver figura 6.41) donde los flujos hacia la salida pasan por *CB2* y *CB4*, en esta oportunidad *CB5* respalda a *CB3* provocando la continuidad de los flujos hacia *Lb*.

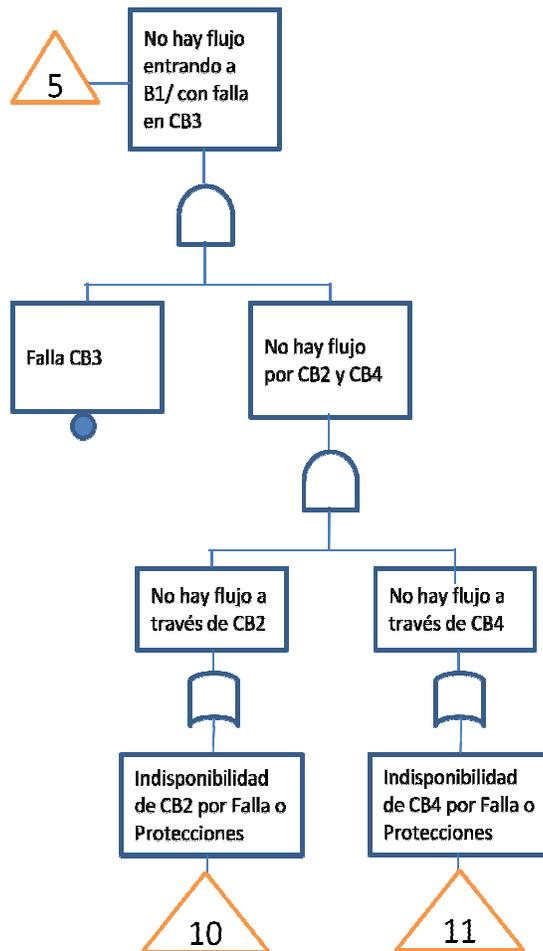


Figura 6.52 Subárbol “No entrando a B1/con falla en CB3” arreglo de barra principal con barra de transferencia

Los subárboles 10 y 11 muestran las componentes que provocan la indisponibilidad de *CB2* y *CB4* para el caso 3.

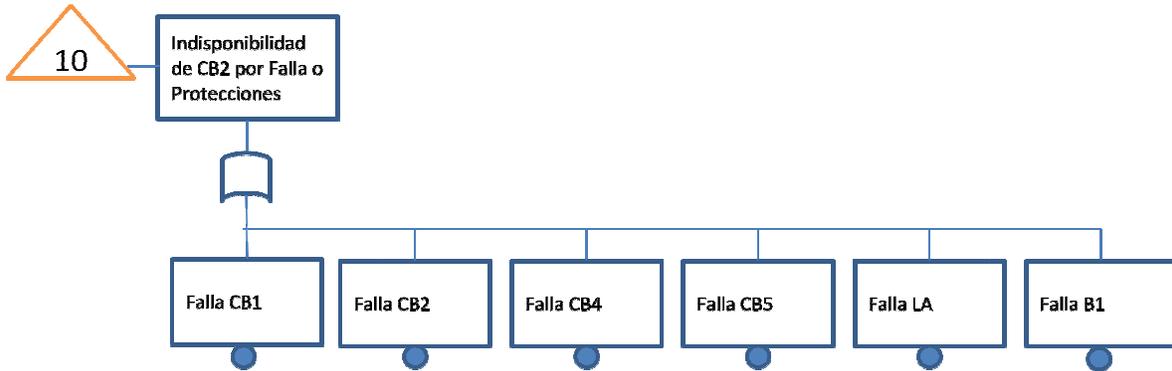


Figura 6.53 Subárbol “Indisponibilidad de CB2” en condición de respaldo a CB3 arreglo de barra principal con barra de transferencia

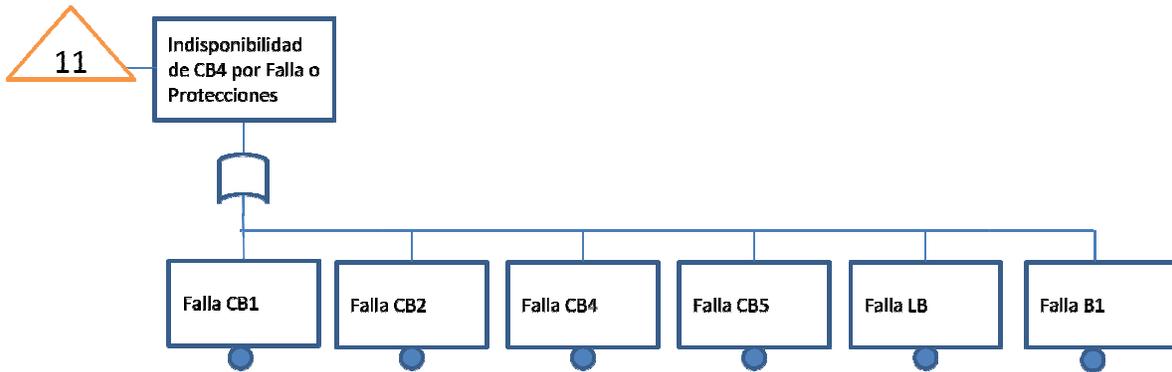


Figura 6.54 Subárbol “Indisponibilidad de CB4” en condición de respaldo a CB3 arreglo de barra principal con barra de transferencia

No hay flujo entrando a *B1* con falla en *CB4*, corresponde al caso 4 (ver figura 6.42) donde los flujos hacia la salida pasan por *CB2* y *CB5* el cual se cierra para respaldar la falla, luego para que se cumpla el evento superior del subárbol con compuerta de transferencia 6, ambos flujos deben interrumpirse como se muestra la figura 6.55.

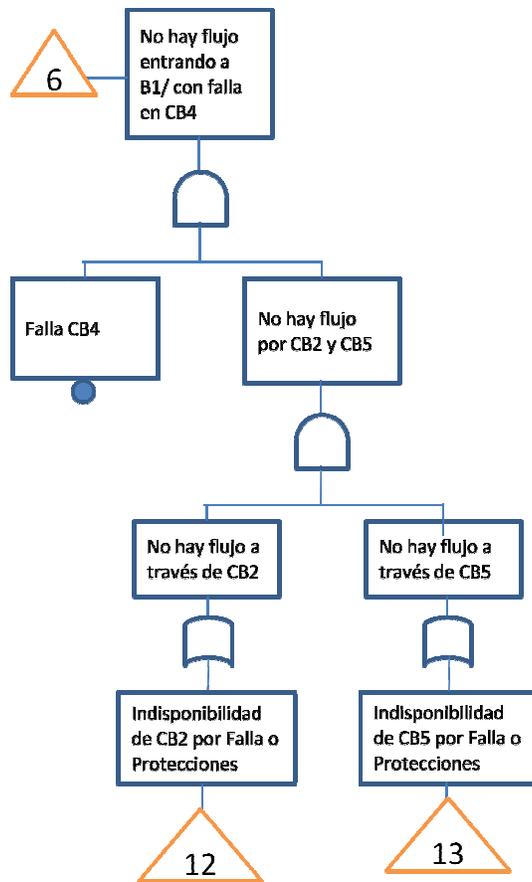


Figura 6.55 Subárbol “No entrando a B1/con falla en CB4” arreglo barra principal con barra de transferencia

Los subárboles 12 y 13 muestran las componentes que provocan la indisponibilidad de *CB2* y *CB5* para el caso 4.

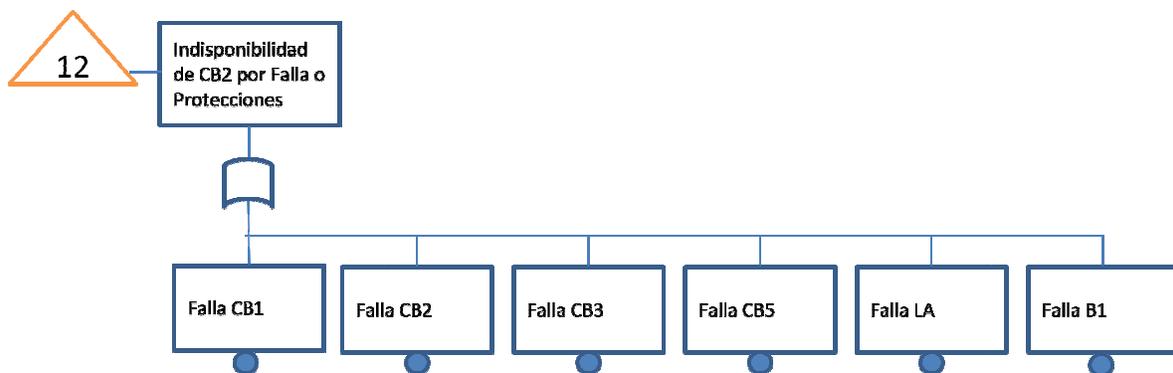


Figura 6.56 Subárbol “Indisponibilidad de CB2” en condición de respaldo a CB4 arreglo de barra principal con barra de transferencia

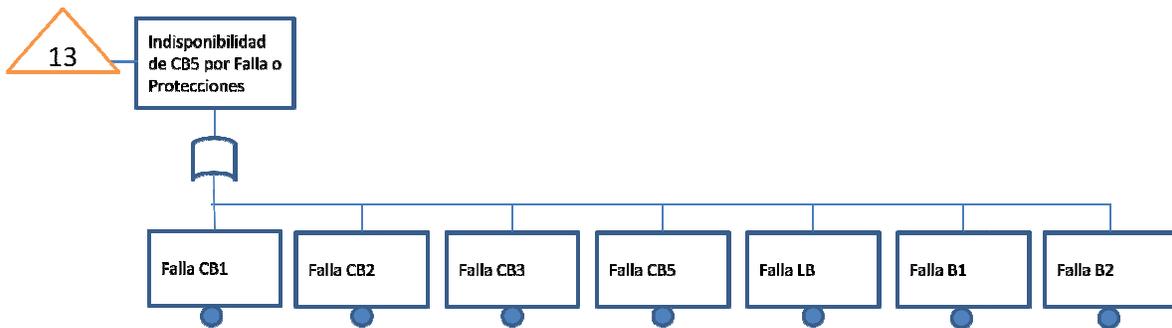


Figura 6.57 Subárbol “Indisponibilidad de CB5” en condición de respaldo a CB4 arreglo de barra principal con barra de transferencia

Falta incorporar la situación en que en que no fallan los interruptores, en este caso la discontinuidad de los flujos viene directamente desde la falla de las líneas de entrada *LA* y *LB*.

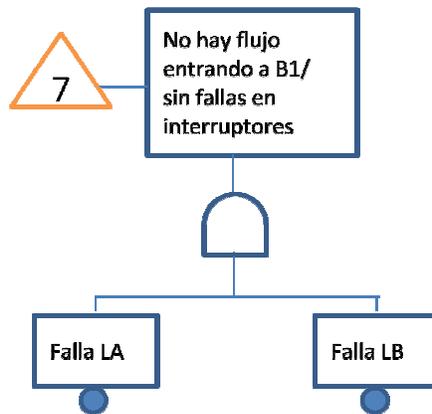


Figura 6.58 Subárbol “No entrando a B1/sin falla en interruptores” arreglo de barra principal con barra de transferencia

Volvamos al caso 1 en el cual falla *CB1*, los flujos hacia la salida *La* vienen desde *B2*, luego la continuidad depende de que si falla *B2* o no hay suministro desde *CB5*, lo que puede producirse por indisponibilidad del interruptor o no hay flujo desde *B1* que se origina por indisponibilidad de interruptores *CB2* y *CB4*. Lo anterior se muestra en la figura 6.59.

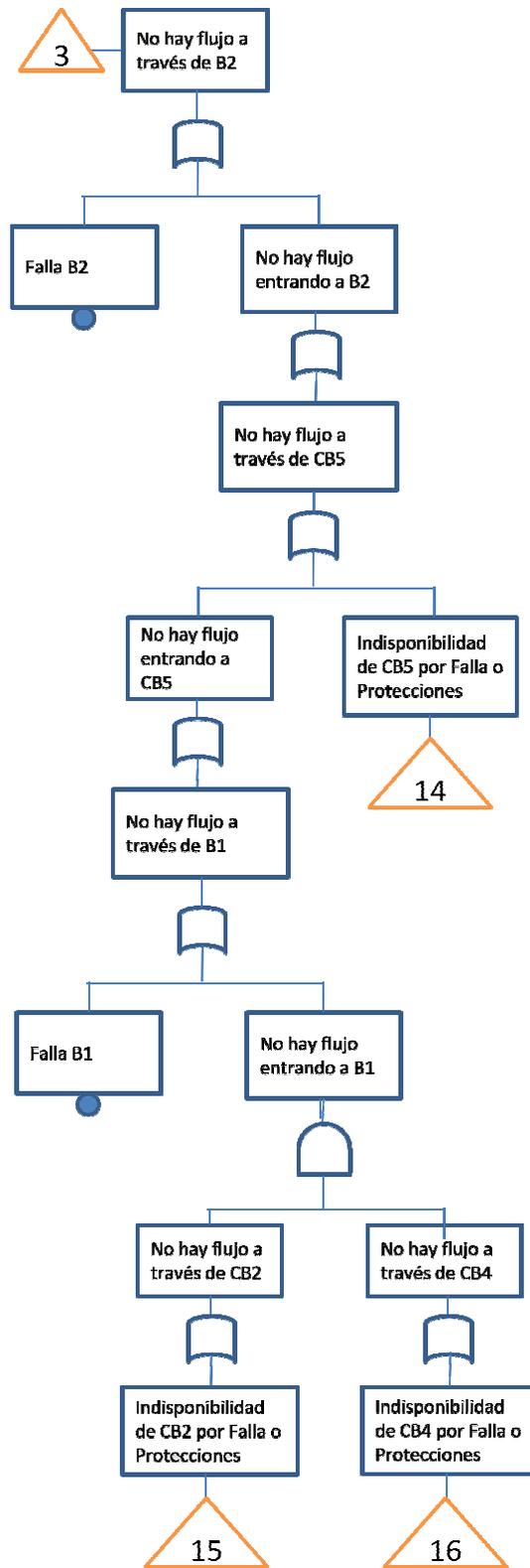


Figura 6.59 Subárbol “No hay flujo a través de B2” arreglo de barra principal con barra de transferencia

Los subárboles 14, 15 y 16 muestran las componentes que provocan la indisponibilidad de *CB5*, *CB2* y *CB4* respectivamente para el caso 1.

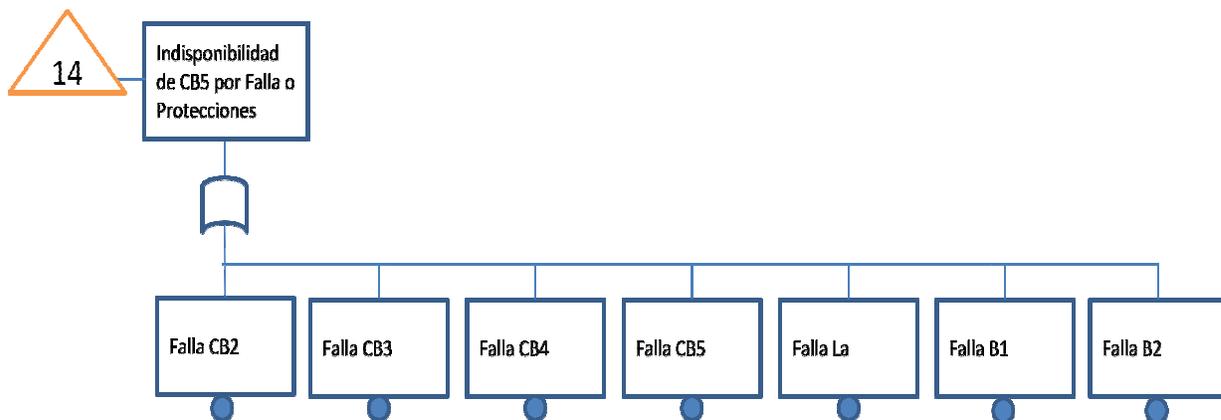


Figura 6.60 Subárbol “Indisponibilidad de CB5” en condición de respaldo a CB1 arreglo de barra principal con barra de transferencia

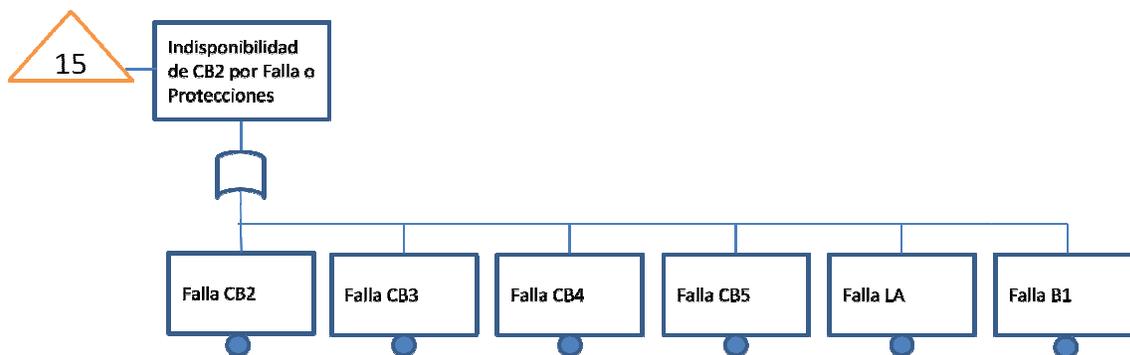


Figura 6.61 Subárbol “Indisponibilidad de CB2” en condición de respaldo a CB1 arreglo de barra principal con barra de transferencia

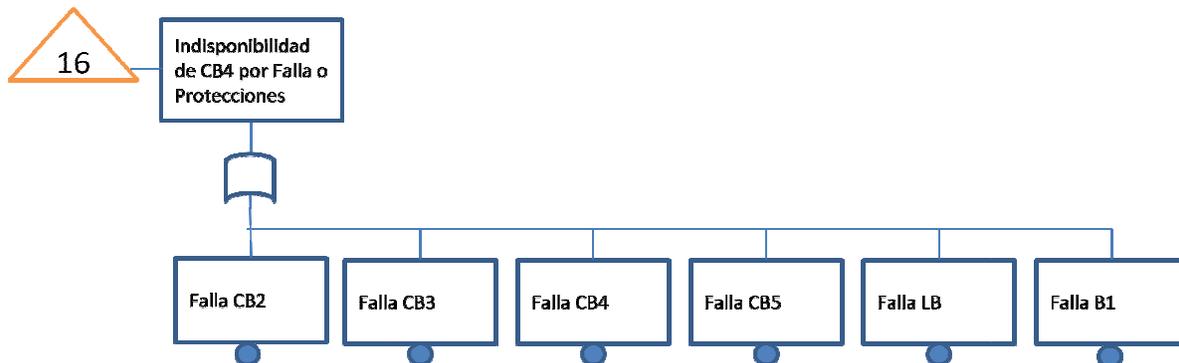


Figura 6.62 Subárbol “Indisponibilidad de CB4” en condición de respaldo a CB1 arreglo de barra principal con barra de transferencia

El sistema no estará indisponible por la falla de un interruptor dada la rápida recuperación usando la barra de transferencia, después de esto el sistema queda sin respaldo, expuesto a indisponibilidad por falla de cualquier interruptor. Esto se aclara al observar los conjuntos de corte mínimo mostrados en la tabla 6.3

Conjunto de Corte Mínimo Barra Principal con Barra de Transferencia		
<i>La</i>		
<i>B1</i>		
<i>CB2</i>	<i>CB3</i>	
<i>CB2</i>	<i>CB4</i>	
<i>CB1</i>	<i>CB2</i>	
<i>CB2</i>	<i>CB5</i>	
<i>CB3</i>	<i>CB4</i>	
<i>CB1</i>	<i>CB3</i>	
<i>CB1</i>	<i>CB5</i>	
<i>CB3</i>	<i>CB5</i>	
<i>CB4</i>	<i>CB1</i>	
<i>CB4</i>	<i>CB5</i>	
<i>CB1</i>	<i>B2</i>	
<i>LB</i>	<i>LA</i>	
<i>CB4</i>	<i>LA</i>	<i>B2</i>
<i>CB3</i>	<i>LB</i>	<i>B2</i>

Tabla 6.3 Conjunto de corte mínimo arreglo de barra principal con barra de transferencia

En consecuencia el árbol de falla queda reducido a un árbol equivalente ilustrado en la figura 6.63.

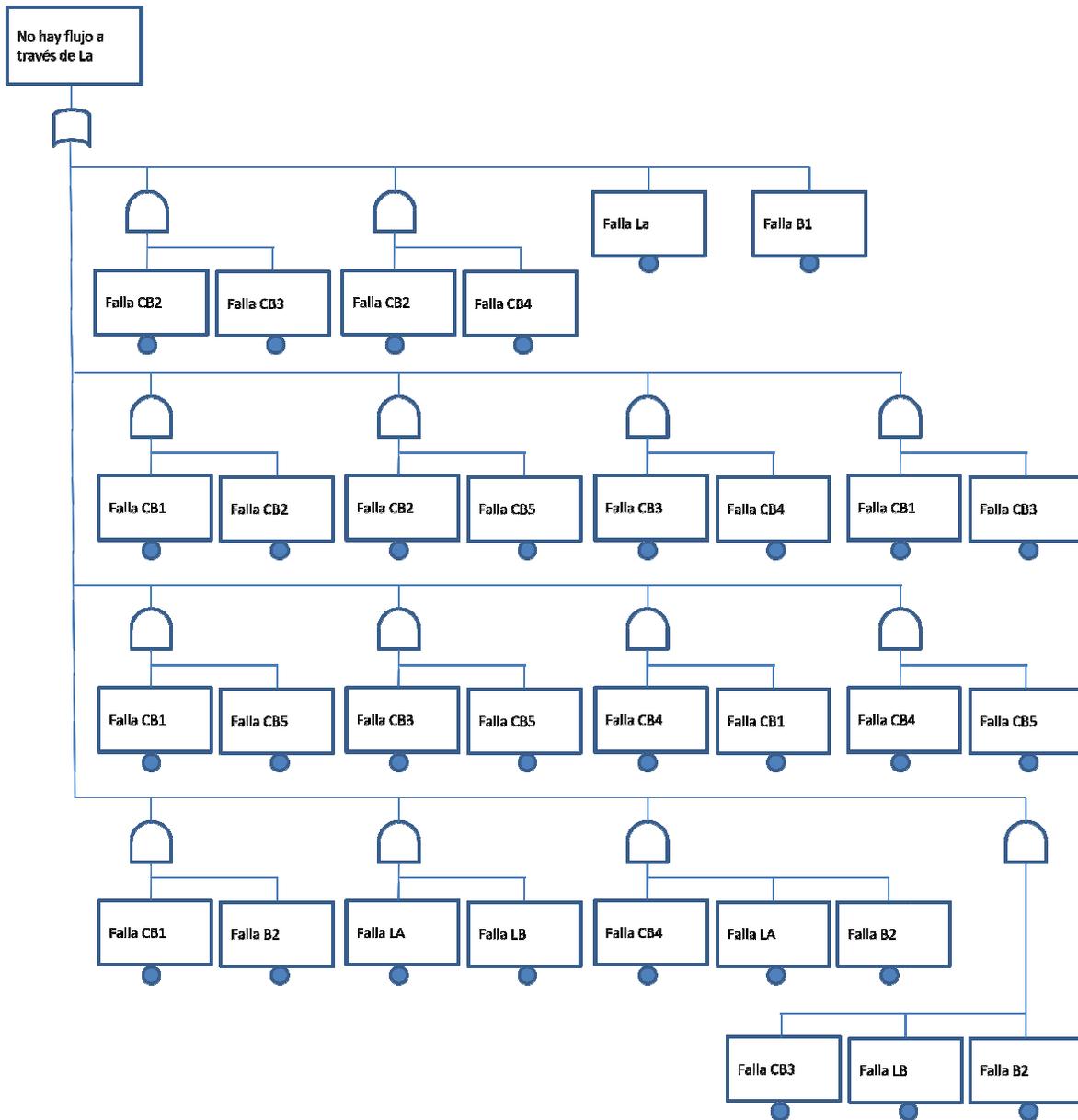


Figura 6.63 Árbol de falla reducido arreglo de barra principal con barra de transferencia

6.6 Implementación Árbol Arreglo Interruptor y Medio

En el capítulo 5 se muestra la validación del algoritmo mediante el modelo de árbol de falla para el arreglo de interruptor y medio realizado por Zongyu Liu [15]. Para poder comparar los resultados de confiabilidad de los arreglos vistos hasta ahora con el de interruptor y medio, es necesario modificar el árbol de falla de Zongyu por su diferente metodología de modelación. En la memoria de Zongyu, para que se cumpla el top event que es “No hay flujo por La ”, solo basta que el flujo por la línea sea interrumpido sin considerar los

respaldos que brindan los interruptores al sistema para que luego de una falla en un elemento con una maniobra de los seccionadores se vuelva a operación normal, es decir con todas las entradas y salidas energizadas.

El arreglo a modelar es el siguiente:

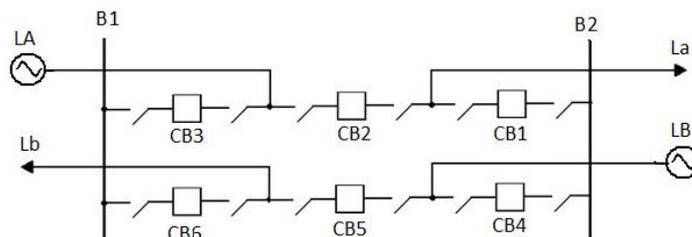


Figura 6.64 Arreglo de barra interruptor y medio

Este puede funcionar en condiciones normales dado la salida de ciertos interruptores, los que quedan fuera por mantenimiento o falla. En consecuencia el arreglo se debe reconfigurar según los casos mostrados en las figuras 6.65, 6.66, 6.67 y 6.68.

- Caso 1: fuera de servicio *CB1* o *CB4*.

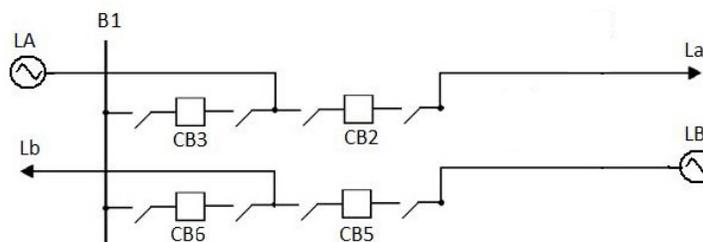


Figura 6.65 Reconfiguración arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de *CB1* o *CB4*

- Caso 2: fuera de servicio *CB2*.

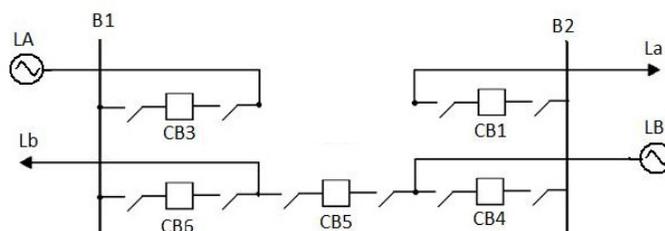


Figura 6.66 Reconfiguración arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de *CB2*

- Caso 3: fuera de servicio *CB3* o *CB6*.

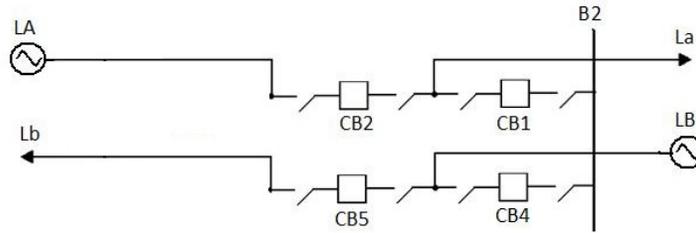


Figura 6.67 Reconfiguración arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de *CB3* o *CB6*

- Caso 4: fuera de servicio *CB5*.

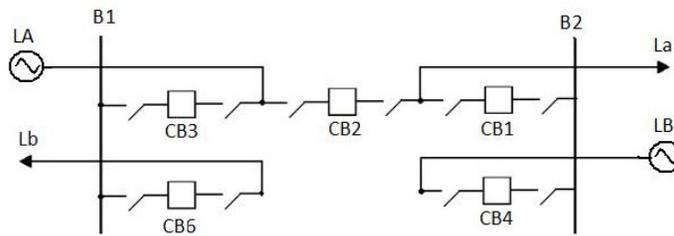


Figura 6.68 Reconfiguración arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de *CB5*

Nótese que tanto para la figura 6.65 y 6.67, al estar fuera uno de los interruptores aledaños a la barra, se deja fuera el otro interruptor dada su inutilidad, sin embargo para arreglos de más entradas y salidas esta condición cambia ya que existe circulación de flujo por los interruptores vecinos a la barra aledaña al interruptor fallido.

El árbol de falla comienza de la siguiente manera:

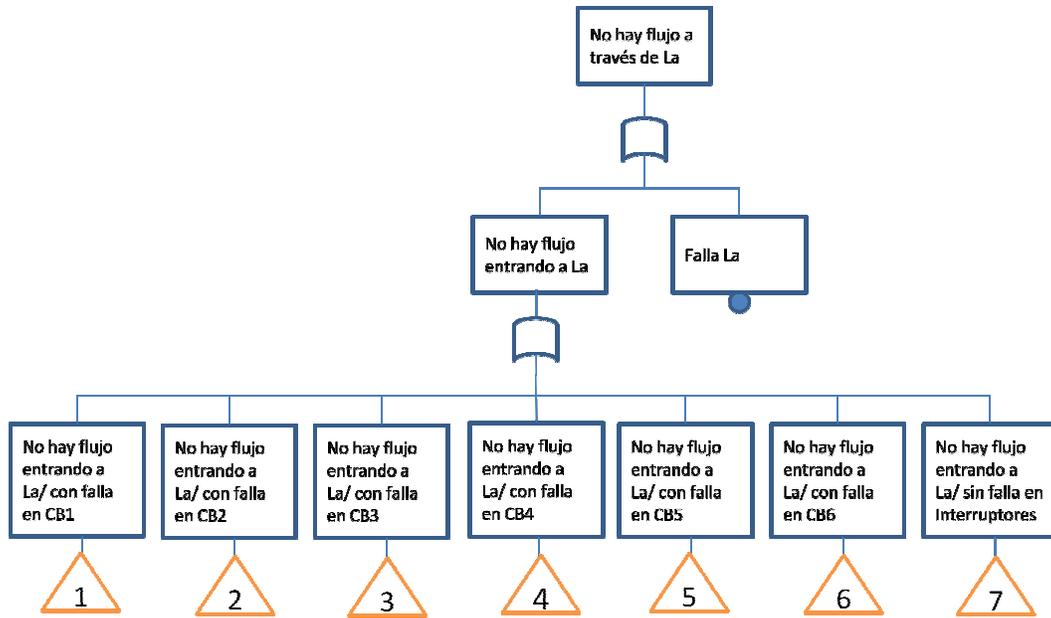


Figura 6.69 Subárbol “No flujo a través de La” interruptor y medio

En este caso se presentan todos los respaldos de manera simultánea dada la topología del arreglo.

El subárbol 1 muestra la condición en que falla *CB1*, luego el flujo recorre el camino mostrado en la figura 6.70.

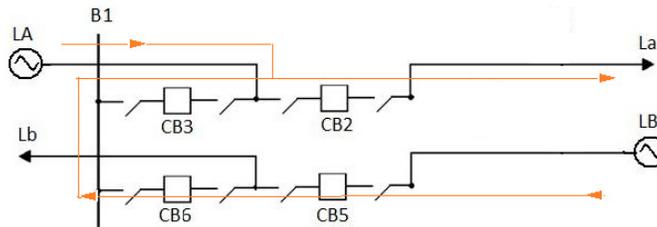


Figura 6.70 Flujos arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de *CB1* o *CB4*

Luego el subárbol 1 considera que el evento principal se activa si *CB1* falla más las condiciones que deben cumplirse dada la nueva topología del arreglo.

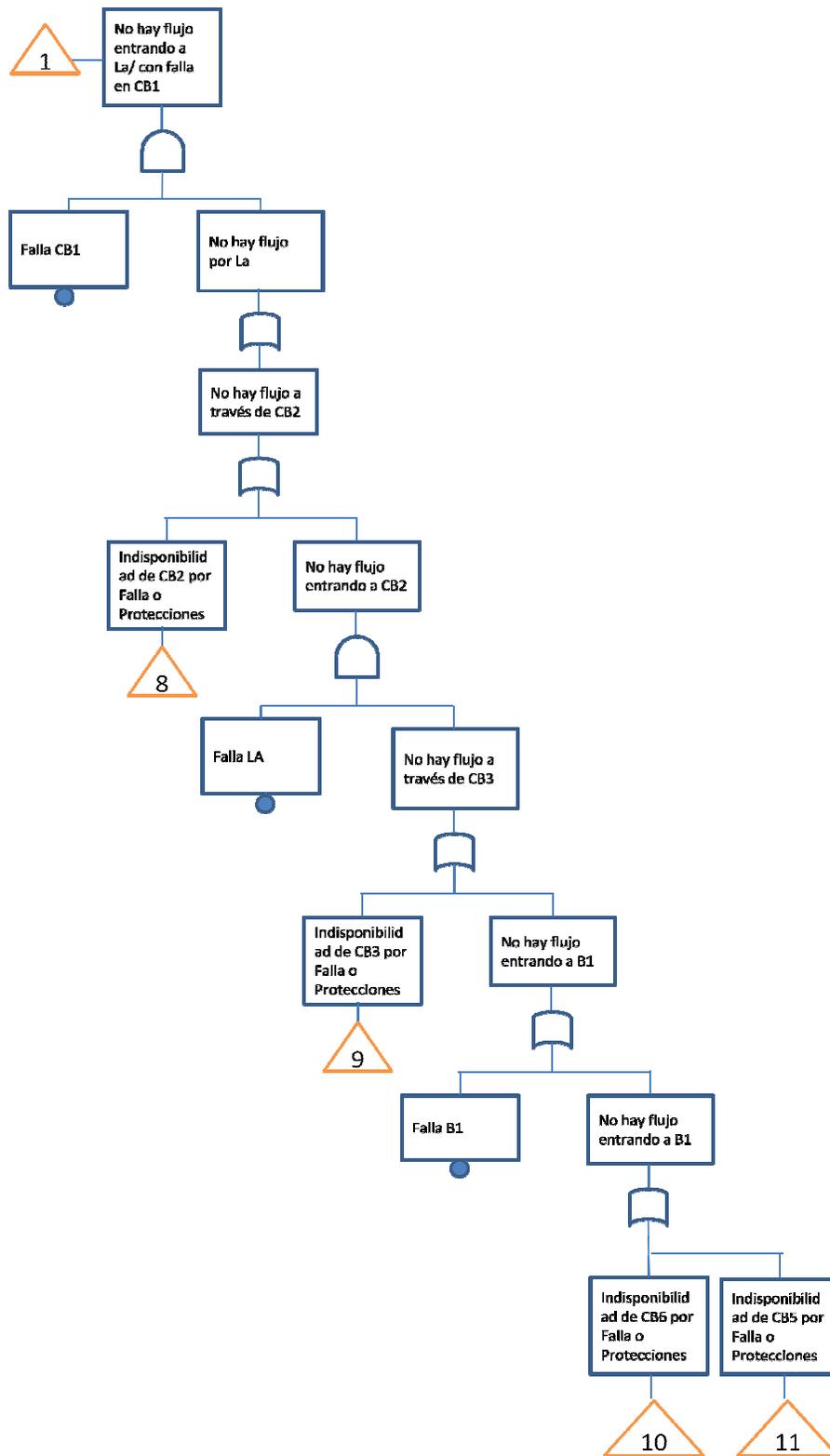


Figura 6.71 Subárbol “No hay flujo entrando a La/ con falla en CB1” interruptor y medio

El árbol sigue la secuencia de flujos definidas para el arreglo, luego las indisponibilidades de los interruptores se hacen en consideración a los elementos operantes para la configuración.

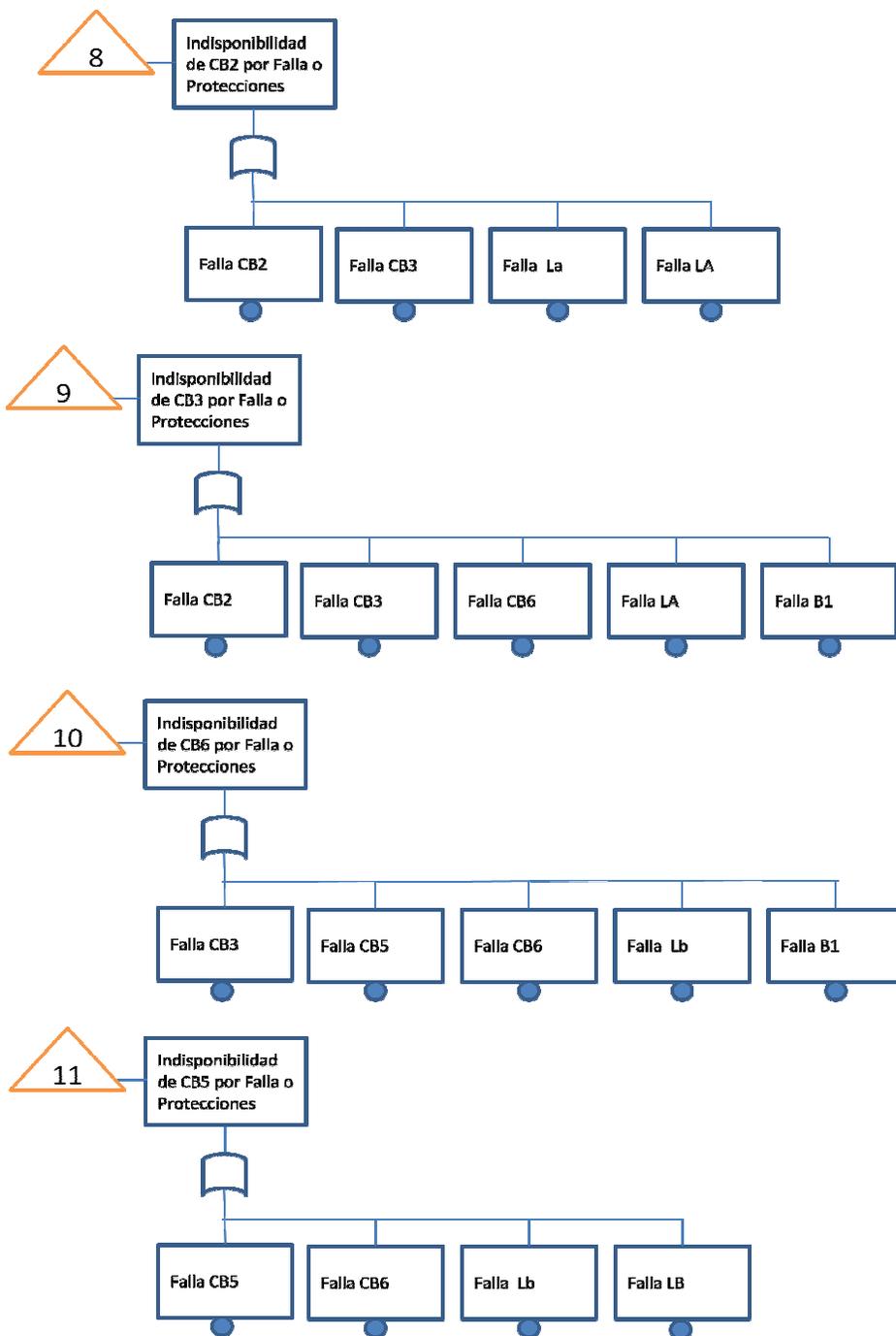


Figura 6.72 Subárboles “Indisponibilidad de interruptores/ con falla en CB1” interruptor y medio

Del mismo modo se cumple para la indisponibilidad de los otros interruptores, siguiendo para cada caso las siguientes direcciones de flujo.

- Caso 2: fuera de servicio *CB2*.

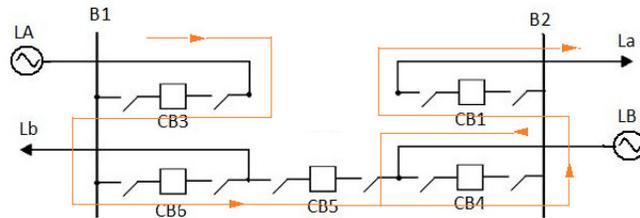


Figura 6.73 Flujos arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de *CB2*

- Caso 3: fuera de servicio *CB3* o *CB6*.

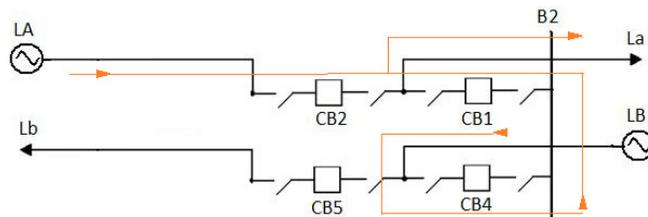


Figura 6.74 Flujos arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de *CB3* o *CB6*

- Caso 4: fuera de servicio *CB5*.

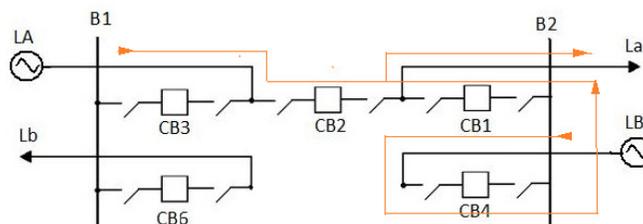


Figura 6.75 Flujos arreglo de barra interruptor y medio en caso de indisponibilidad de *CB5*

Siguiendo la metodología de modelación y los estados de operación del arreglo apropiados, se puede obtener de manera análoga al subárbol de compuerta de transferencia 1 de la figura 6.71, el resto de los subárboles de compuertas de transferencia 2, 3, 4, 5 y 6, con sus eventos superiores mostrados en la figura 6.69.

También se debe considerar el caso en que no fallan los interruptores, este se construye desde la compuerta de transferencia 7 cuyo desarrollo se muestra en la figura 6.76.

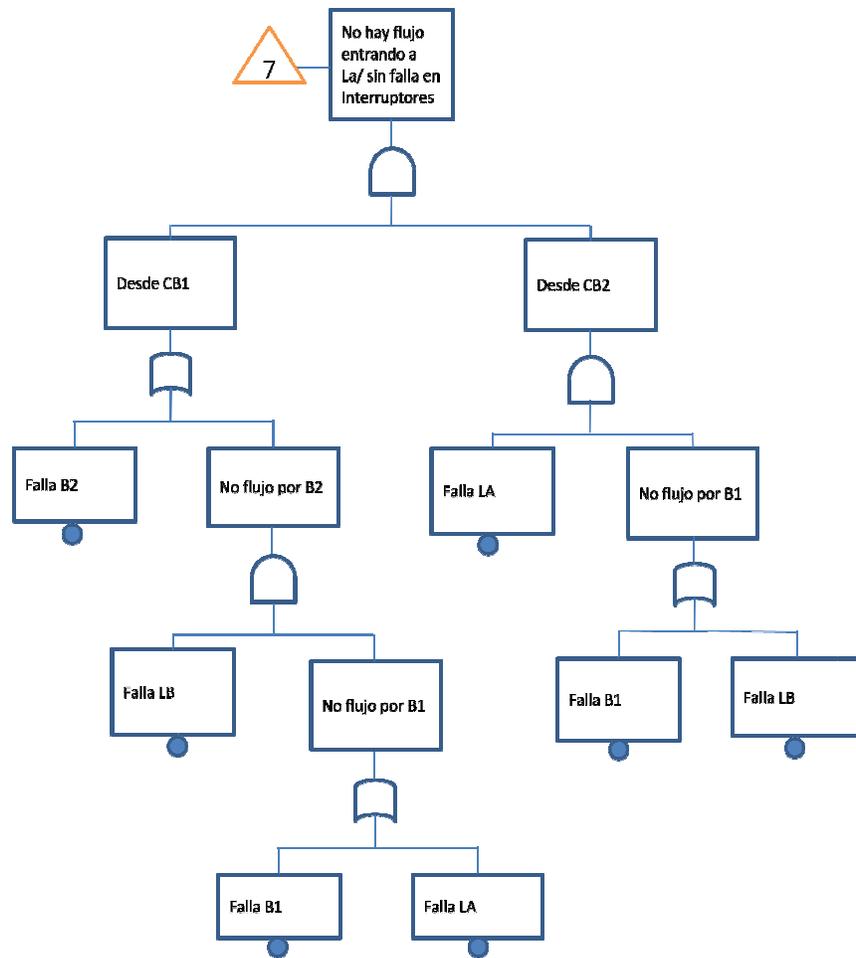


Figura 6.76 Subárbol “No hay flujo entrando a La/ sin falla en interruptores” interruptor y medio

Este último subárbol adiciona al análisis todas las condiciones de falla del arreglo en las que los interruptores no participan para así obtener todos los conjuntos de corte existentes del sistema.

Lo que se pretende con este último modelo es obtener la confiabilidad del arreglo de interruptor y medio con la misma metodología de modelación aplicada a los arreglos anteriores de manera de poder comparar resultados.

Finalmente la tabla 6.4 muestra el conjunto de corte mínimo para el arreglo de interruptor y medio.

Conjuntos de Corte Mínimo Interruptor		
1/2		
<i>CB1</i>	<i>CB2</i>	
<i>CB1</i>	<i>CB3</i>	
<i>CB1</i>	<i>LA</i>	
<i>CB2</i>	<i>CB4</i>	
<i>CB2</i>	<i>B2</i>	
<i>CB2</i>	<i>CB5</i>	
<i>CB2</i>	<i>LB</i>	
<i>CB3</i>	<i>CB2</i>	
<i>CB3</i>	<i>LA</i>	<i>CB5</i>
<i>CB4</i>	<i>CB3</i>	
<i>CB4</i>	<i>LA</i>	
<i>CB5</i>	<i>CB1</i>	
<i>CB5</i>	<i>CB3</i>	<i>B2</i>
<i>CB6</i>	<i>CB1</i>	
<i>CB6</i>	<i>CB2</i>	
<i>LA</i>	<i>LB</i>	
<i>B2</i>	<i>LA</i>	
<i>La</i>		

Tabla 6.4 Conjunto de corte mínimo arreglo interruptor y medio

Se puede comparar el conjunto de corte con el obtenido en el árbol anterior del Interruptor y medio.

Conjuntos de Corte		
Mínimo Interruptor ½		
caso base [15]		
<i>La</i>		
<i>CB2</i>		
<i>CB3</i>		
<i>CB1</i>	<i>B2</i>	
<i>CB1</i>	<i>CB6</i>	
<i>CB1</i>	<i>CB5</i>	
<i>CB1</i>	<i>LB</i>	
<i>B2</i>	<i>LA</i>	
<i>CB6</i>	<i>LA</i>	
<i>CB5</i>	<i>LA</i>	
<i>LA</i>	<i>LB</i>	

Tabla 6.5 Conjunto de corte mínimo arreglo interruptor y medio memoria de referencia [15].

Para este caso se nota que la indisponibilidad será mayor dado que posee tres conjuntos de corte de primer orden. En este árbol la falla es inmediata al identificar la no existencia de flujos en la salida.

El árbol de la figura 6.77 refleja la reducción equivalente del árbol de falla.

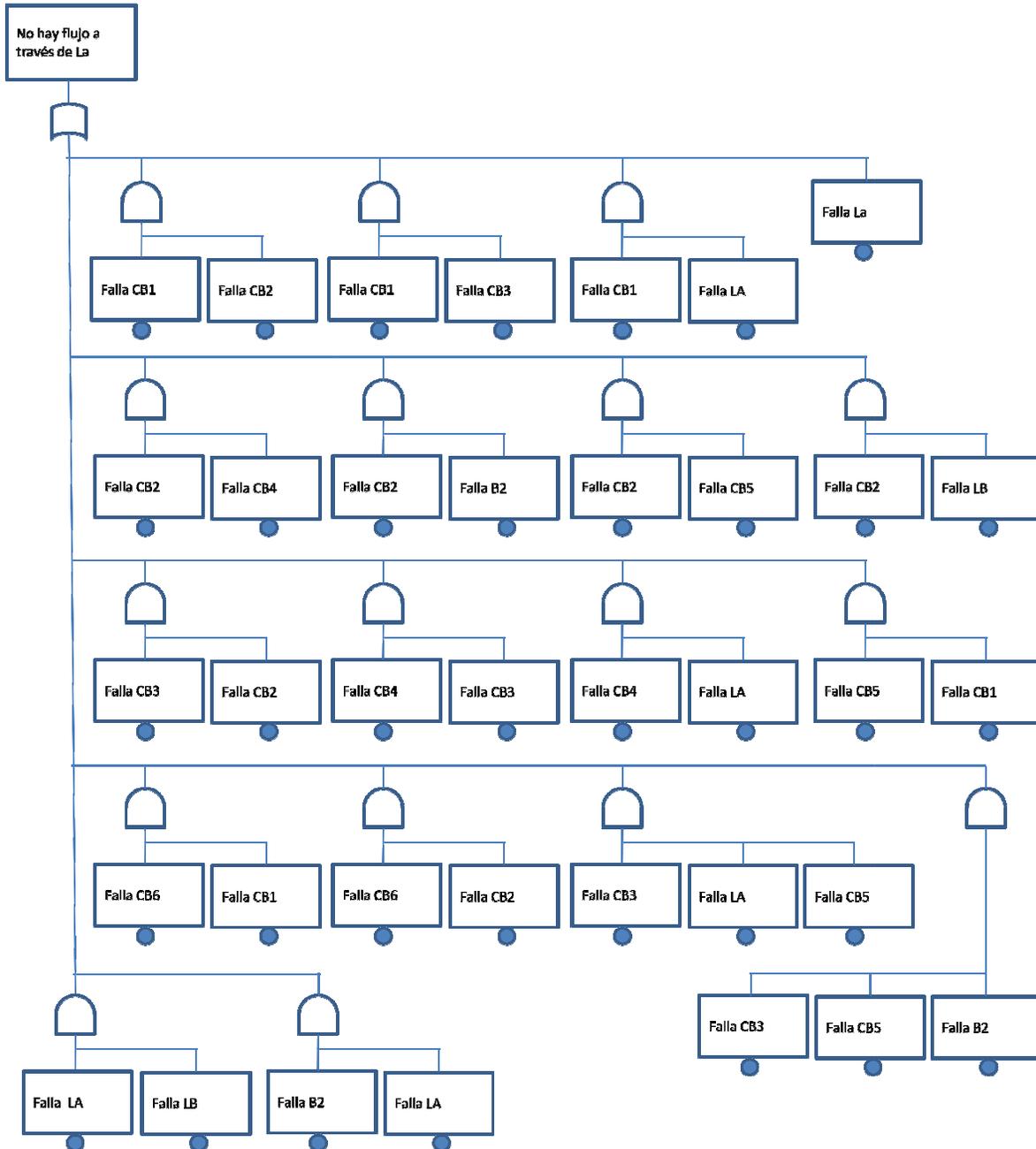


Figura 6.77 Árbol de falla reducido arreglo de interruptor y medio

6.7 Resultados de Confiabilidad

Se resolvieron los árboles de falla mediante el algoritmo programado en matlab, como parámetros de confiabilidad de entrada se tiene la siguiente tabla.

Datos de confiabilidad.

Parámetros	Tasa de falla λ [fallas/año] [15,11]	MTTR [horas] [15]
Interruptores	0,01967	12
Barras	0,0018	12
Líneas	0,008/km	8

Tabla 6.6 Datos de confiabilidad para eventos básicos

Para la tasa de falla de línea, se toma un largo de 100 metros estimativo a la distancia del marco de barra con la primera torre.

Es así como se obtuvieron los siguientes resultados de confiabilidad entregados directamente desde el algoritmo.

Arreglo de Barra	λ [fallas/Hora]	μ [reparos/Hora]	U (Indisponibilidad)
Barra Simple	$9,29 \times 10^{-6}$	$8,3603 \times 10^{-2}$	$1,11 \times 10^{-4}$
Doble Barra	$9,09 \times 10^{-6}$	$8,3609 \times 10^{-2}$	$1,08 \times 10^{-4}$
barra principal con barra de Transferencia	$2,97 \times 10^{-7}$	$9,304 \times 10^{-2}$	$3,19 \times 10^{-6}$
Interruptor y medio	$9,24 \times 10^{-8}$	$1,253 \times 10^{-1}$	$7,377 \times 10^{-7}$

Tabla 6.7 Resultados de confiabilidad

Con los resultados previos, se pueden inferir todos los parámetros de teoría de confiabilidad.

Generalmente dado el orden de magnitud de los parámetros de confiabilidad, se suele representar estos en periodos de años como se muestra en la tabla 6.8.

Arreglo de Barra	λ [fallas/año]	μ [reparos/año]	f [frecuencia de falla/Año]	U [Indisponibilidad /horas-año]
barra simple	0,0814	732,3665	0,0814	0,9739
Doble Barra	0,0796	732,4219	0,079631139	0,9524
barra principal con barra de Transferencia	0,0026	815,0487	0,002606321	0,0280
Interruptor y medio	0,0008	1098,3428	0,0008	0,0064

Tabla 6.8 Resultados de confiabilidad en periodos de años

También se pueden conocer los tiempos medios de falla, reparo y entre fallas.

Arreglo de Barra	MTTF/año	MTTR/hora	MTBF/año
barra simple	12,2796	11,9612	12,281
Doble Barra	12,5565	11,9603	12,5579
barra principal con barra de Transferencia	383,6814	10,7478	383,6826
Interruptor y medio	1235,2145	7,9756	1235,2154

Tabla 6.9 MTTF, MTTR y MTBF

7 Capítulo 7: Análisis e Interpretación de Resultados del Modelo

7.1 Análisis de Confiabilidad

Se desprende del análisis cuantitativo los conjuntos de corte mínimo para cada arreglo de falla, permitiendo una primera visualización de la confiabilidad de los arreglos. Mientras los conjuntos sean de menor orden la indisponibilidad será mayor. Al conocer dichos MCS se obtiene un árbol equivalente reducido que contiene todas las características del sistema.

El análisis cuantitativo da una medida numérica de los parámetros de confiabilidad del sistema obteniendo tasas de falla, reparo e indisponibilidad. La figura 7.1 muestra el cuadro comparativo para los diferentes arreglos:

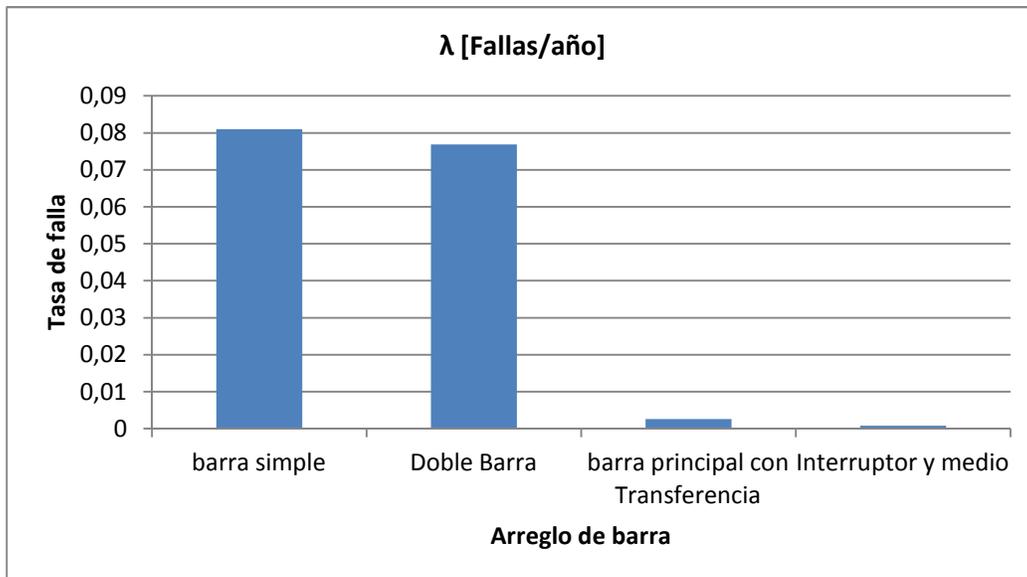


Figura 7.1 Tasas de falla arreglos de barra

El gráfico anterior describe la tasa de fallas por año de los diferentes arreglos de barra. Como se esperaba, el arreglo de barra simple es el que presenta más fallas por año, le sigue el arreglo de doble barra, luego el de barra principal con barra de transferencia y finalmente el arreglo de interruptor y medio.

La indisponibilidad del sistema viene dada por la tasa de falla, esto siguiendo la siguiente relación:

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (7.1)$$

La relación implica una proporción de $\frac{1}{\lambda + \mu}$ de la indisponibilidad con respecto a la tasa de falla, luego ambos gráficos debieran seguir la misma característica.

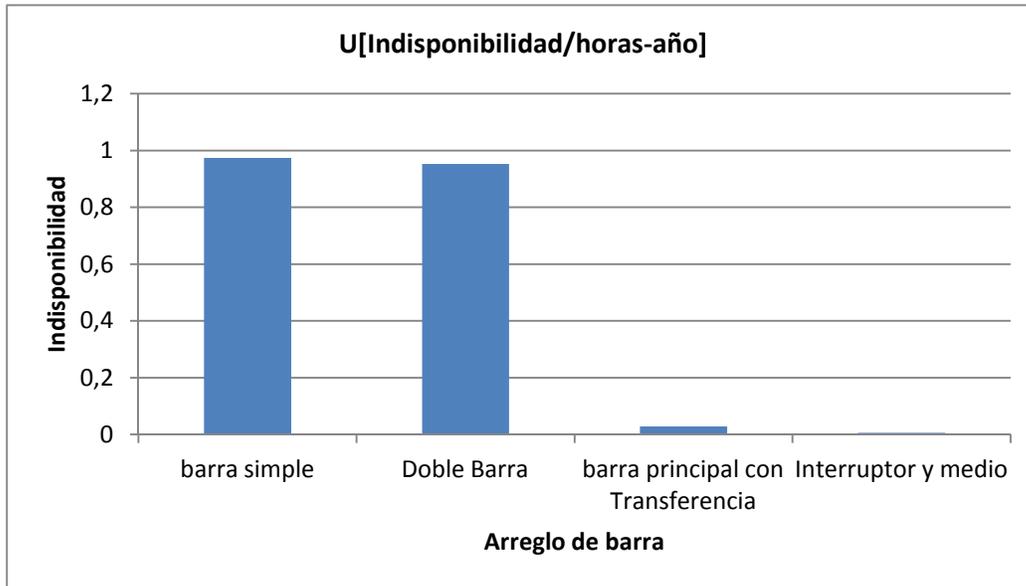


Figura 7.2 Indisponibilidad arreglos de barra

Expresar la disponibilidad en horas por año es una manera más significativa de analizar los resultados, del grafico se desprende que el arreglo de barra simple esta indisponible 0,9738 horas-año, es decir 58,42 minutos, el arreglo de doble barra 57,14 minutos, barra principal con barra de transferencia 1,68 minutos y el arreglo de interruptor y medio 23 segundos por año. Estos tiempos de indisponibilidad van tomando relevancia a medida que el subsistema en estudio sea un componente importante para el sistema global.

Para sistemas de media tensión se utilizan arreglos simples siendo el óptimo disminuir costos, salvo consumos complejos, en que los costos de falla sean significativos, se requiera mayor confiabilidad. A medida que aumentan los niveles de tensión y potencia van apareciendo las diferentes configuraciones de arreglos de barra. Para los sistemas de extra alta tensión, dada su importancia, lo lógico sería encontrar disposiciones de interruptor y medio o otras de superior confiabilidad, como el de doble barra con doble interruptor, sin embargo la indisponibilidad del sistema es solo uno de los factores que aportan a la solución del problema de inversión en subestaciones, donde existen diversos factores como ingresos, costos de falla, multas, tasas de fallas reales, componentes que aportan a la indisponibilidad, etc. Es en este contexto donde se pueden encontrar subestaciones de primordial importancia para el sistema en configuración de doble barra (en Chile subestaciones Ancoa 500kV y Charrúa 500kV) e incluso barra simple.

Otro parámetro a analizar es el tiempo medio de reparo, se observa que este es similar para todos los arreglos de barra.

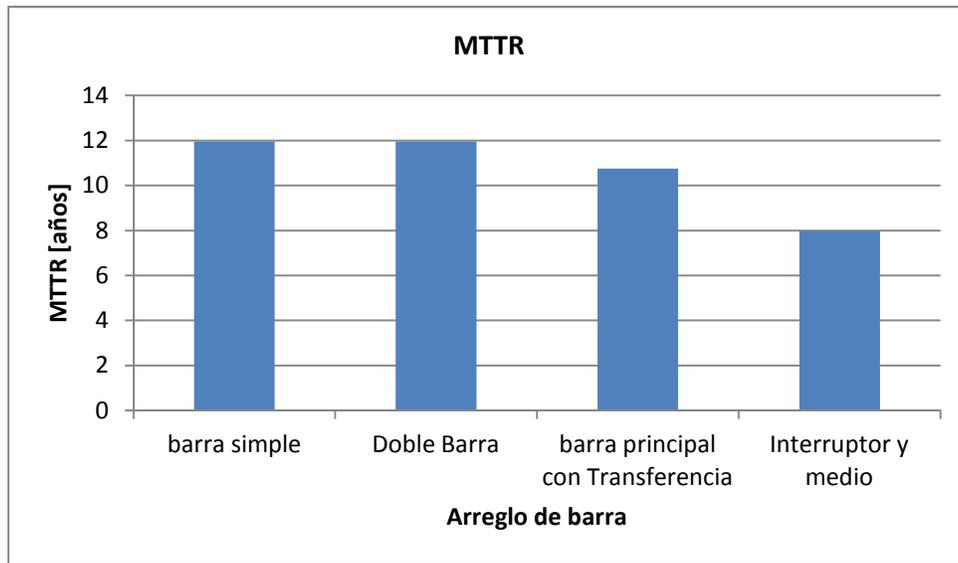


Figura 7.3 Mean Time To Repair arreglos de barra

El MTTR para la barra simple, es el de mayor valor, muy cercano a 12 horas que corresponde al tiempo de reparo de los interruptores y líneas siendo estos los principales aportadores a la confiabilidad del sistema. A medida que los conjuntos de corte mínimos sean de mayor orden, la tasa de reparo comienza a aumentar dado que corresponde a la suma de las que tiene cada MCS, esto hace que el tiempo medio de reparo disminuya, lo que justifica los resultados obtenidos reduciendo el tiempo de 12 a 8 horas a medida que se aumenta en confiabilidad.

Del recíproco de la tasa de falla resulta el tiempo medio de falla, lo que sumado al tiempo medio de reparo, entrega el tiempo que existe entre fallas.

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (7.2)$$

Para sistemas confiables MTTF es mucho mayor a MTTR luego se puede hacer la siguiente aproximación:

$$MTBF \approx MTTF \quad (7.3)$$

Esto se aprecia con mayor claridad en el gráfico de la figura 7.4.

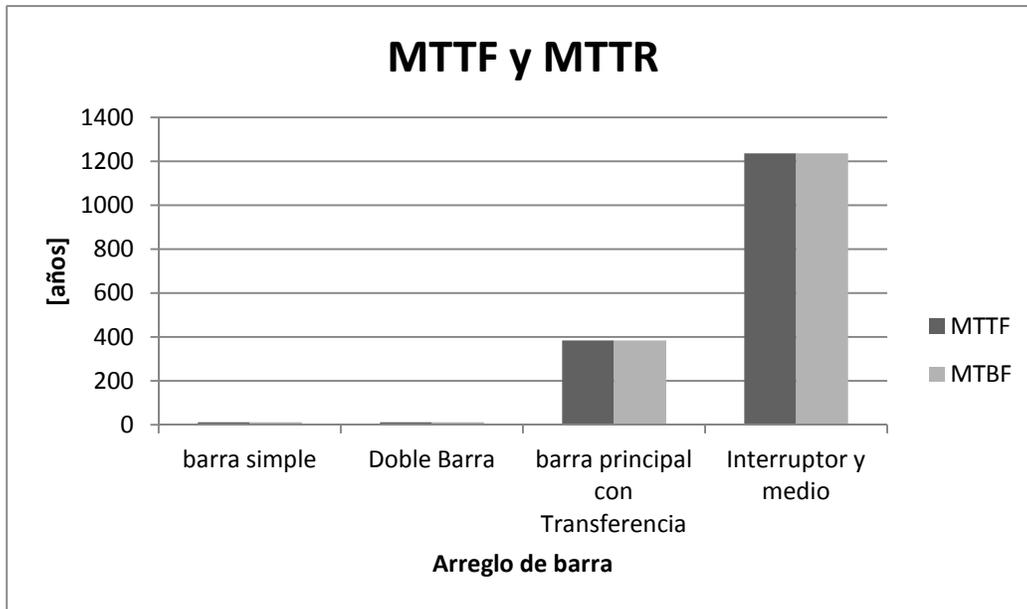


Figura 7.4 Mean Time To fail and Mean Time Between fail arreglos de barra

Se habla de órdenes de magnitud de 12 años para arreglos de barra simple y doble barra, 380 años para arreglo de barra principal con barra de transferencia, y cerca de 1200 años para la configuración del interruptor y medio. Cuando los conjuntos de cortes son de mayor orden la indisponibilidad disminuye, esto debido a que al fallar un elemento lo más probable es que este se repare antes de que falle otro del conjunto de corte. Esto es lo que hace que configuraciones como el arreglo de interruptor y medio sea prácticamente imposible su falla, sin embargo se recalca que hay componentes que no se han considerado en el análisis, como fallas en desconectores, errores humanos, protecciones, operación, diseño, entre otros que aumentarían la indisponibilidad del sistema y disminuyendo así el MTBF. Nótese también que la metodología de modelación empleada permite que los MTTF y MTBF sean elevados.

Si se hubiera sido más estricto ante la condición de activación del evento principal, siendo solo por percibir el no flujo en la salida, es decir sin tomar en consideración los respaldos, se hubiera llegado a un MTBF para los arreglos más confiables, similar a la configuración de barra simple con orden de 10 a 100 años.

En términos de costo para más confiabilidad se requiere de mayor inversión. Para el análisis se utilizan los precios bases de interruptores y seccionadores de la base de datos de la CNE para el estudio del “Informe Técnico para la determinación del Valor Anual y Expansión de los Sistemas de Transmisión Troncal” [17], en particular los equipos son el Interruptor tripolar 525 kV y 3150 A nominales con 40 kA de ruptura, y el Desconector trifásico PaT 525 kV.

Arreglo de Barra	Interruptores	Precio Base Unitario USD\$	Seccionadores	Precio Base Unitario USD\$	Precio Base Total USD\$
barra simple	4	207.000	8	21.250	998.000
Doble Barra	4	207.000	12	21.250	1.083.000
barra principal con barra de Transferencia	5	207.000	14	21.250	1.332.500
Interruptor y medio	6	207.000	12	21.250	1.497.000

Tabla 7.1 MTTF, MTTR y MTBF

Con esto se puede hacer un análisis costo vs confiabilidad del sistema, se observa una curva decreciente de la indisponibilidad a mayor inversión.

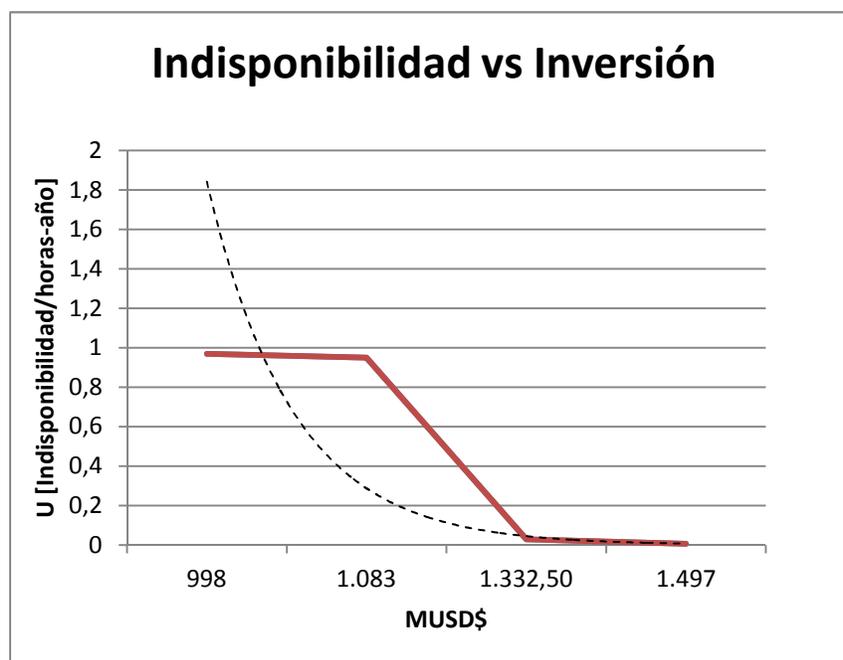


Figura 7.5 Indisponibilidad vs Inversión

La curva continua muestra la relación real, mientras que la curva punteada una tendencia exponencial. Se debe considerar que en la inversión de los arreglos solo se consideraron interruptores y desconectores, dejando fuera otros gastos relevantes como superficie de construcción, sistemas de protecciones, equipos de medida, barras, líneas eléctricas, y otros factores que encarecen la inversión, por otra parte la operación y mantenimiento se hace más costoso a medida que aumenta la complejidad del arreglo.

7.2 Análisis de Importancia

La importancia de cada una de las componentes, viene dada por el aporte de estas a la indisponibilidad del sistema. Esto se desprende de sumar las probabilidades de cada conjunto de corte mínimo en que participa el elemento para luego ser dividida por la indisponibilidad total del sistema. Es así como se obtienen los siguientes resultados para cada arreglo de barras.

- Arreglo de barra simple.

Para el arreglo de barra simple la importancia de cada componente se muestra en la tabla 7.2.

Componente	Importancia
<i>CB1</i>	0,2419
<i>CB2</i>	0,2419
<i>CB3</i>	0,2419
<i>CB4</i>	0,2419
<i>B1</i>	0,0221
<i>La</i>	0,0065
<i>LA</i>	$4,793 \times 10^{-9}$
<i>LB</i>	$4,793 \times 10^{-9}$

Tabla 7.2 Importancia arreglo barra simple

En el arreglo de barra simple son los interruptores los que aportan prácticamente toda la indisponibilidad al sistema. Como los conjuntos de corte son principalmente de primer orden la importancia dependerá directamente de la indisponibilidad de cada elemento, en el caso que la barra *B1* tenga una frecuencia de falla mayor a los interruptores, esta aparecerá como aportador principal a la falla del sistema.

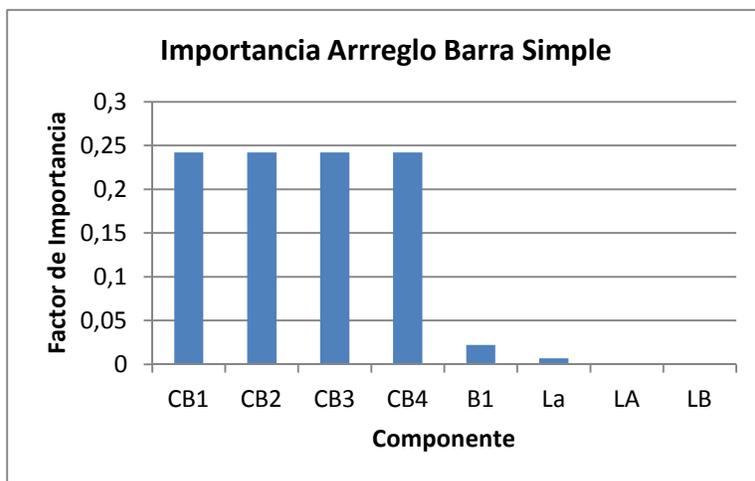


Figura 7.6 Importancia arreglo doble simple

- Arreglo de doble barra.

Para el arreglo de doble barra la importancia de cada componente se muestra en la tabla 7.3.

Componente	Importancia
CB1	0,2474
CB2	0,2474
CB3	0,2474
CB4	0,2474
La	0,0067
B1	$5,56 \times 10^{-8}$
B2	$5,56 \times 10^{-8}$
LA	$4,9 \times 10^{-9}$
LB	$4,9 \times 10^{-9}$

Tabla 7.3 Importancia arreglo doble barra

Al igual que el arreglo de barra simple los interruptores son los principales contribuyentes a la indisponibilidad. La diferencia está en que *B1* disminuye considerablemente su importancia, esto debido la condición de respaldo a *B1* mediante *B2*.

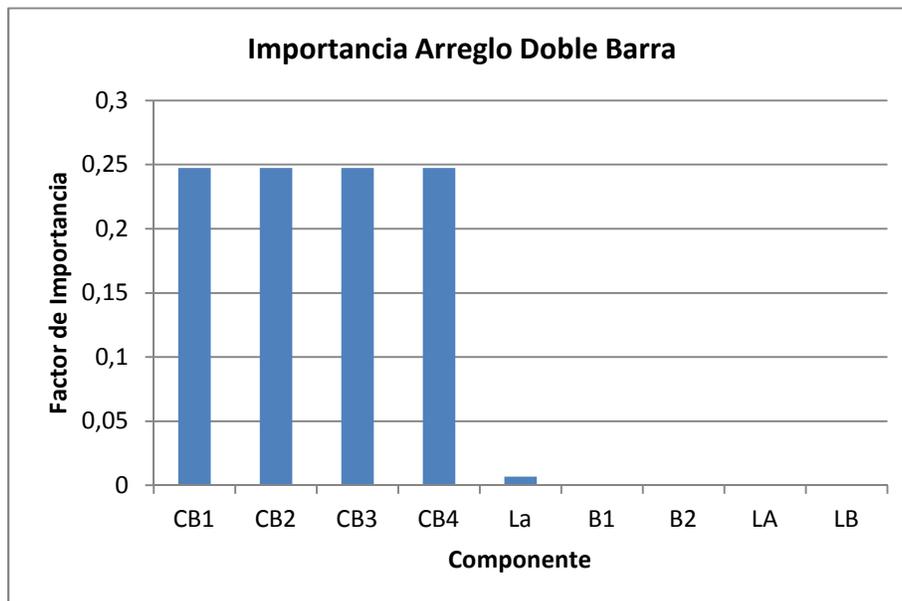


Figura 7.7 Importancia arreglo doble barra

- Arreglo de barra principal con barra de transferencia.

Para el arreglo de barra principal con barra de transferencia la importancia de cada componente se muestra en la tabla 7.4.

Componente	Importancia
B1	0,7692
La	0,2282
CB1	0,0009
CB3	0,0009
CB4	0,0009
CB2	0,0009
CB5	0,0009
B2	$2,069 \times 10^{-5}$
LA	$1,66 \times 10^{-7}$
LB	$1,66 \times 10^{-7}$

Tabla 7.4 Importancia arreglo barra principal con barra de transferencia

El respaldo a los interruptores hace que el aporte a la indisponibilidad de cada uno de estos disminuya. Para que se produzca una falla en el sistema no basta con solo la indisponibilidad de un interruptor, también debe fallar el respaldo o cualquier otro luego de ya haber fallado uno. Por otro lado los conjuntos de corte de primer orden corresponden a *B1* y *La* que en definitiva son los que aportan la mayor fracción a la indisponibilidad del sistema.

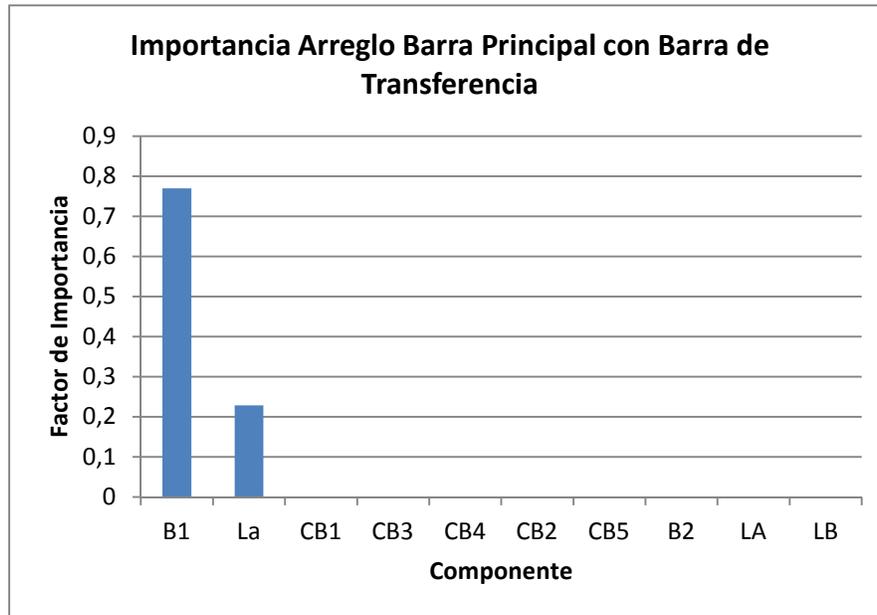


Figura 7.8 Importancia arreglo barra principal con barra de transferencia

- Arreglo interruptor y medio.

Para el arreglo de interruptor y medio la importancia de cada componente se muestra en la tabla 7.5.

Componente	Importancia
<i>La</i>	0,9903
<i>CB2</i>	0,0050
<i>CB1</i>	0,003
<i>CB3</i>	0,0029
<i>CB4</i>	0,0019
<i>CB5</i>	0,0019
<i>CB6</i>	0,0019
<i>B2</i>	$9,22 \times 10^{-5}$
<i>LA</i>	$5,64 \times 10^{-5}$
<i>LB</i>	$2,73 \times 10^{-5}$

Tabla 7.5 Importancia arreglo interruptor y medio

Por su particularidad el arreglo de interruptor y medio puede operar bajo la condición de falla de cualquier componente interna, refiriéndose a barras e interruptores, luego indirectamente cada una de estas tiene un respaldo. Al ser así el único conjunto de corte de primer orden es *La*, el cual entrega prácticamente toda la indisponibilidad al sistema.

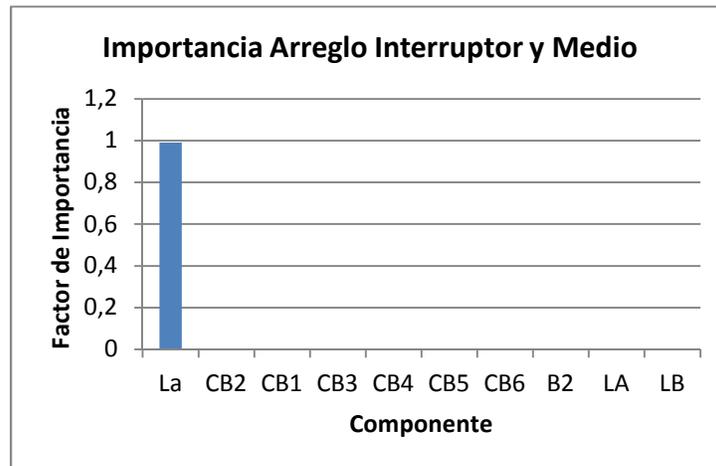


Figura 7.9 Importancia arreglo interruptor y medio

De los gráficos se desprende que una medida confiable de la indisponibilidad del sistema resulta de inferir los conjuntos de corte de primer y segundo orden que son los más significativos, despreciando los de orden superior asumiendo un error pequeño en el resultado. Mientras menos precisión se requiera resulta más fácil estimar la confiabilidad.

Esta técnica se aplica en mantenimientos eficientes de sistemas, en que se le da mayor énfasis a las componentes de mayor importancia, por lo que es importante conocer las características de cada arreglo de barra.

7.3 Análisis Falla Modo Común

Hasta ahora las tasas de falla de los diferentes componentes han sido consideradas como independientes entre sí, sin embargo en la práctica existe la posibilidad de fallas simultáneas entre dos o más componentes del sistema a consecuencia del mismo efecto, esto se conoce como “falla modo común” que puede ser producto de diversos factores como temperatura, terremotos u otros factores que llevan a falla común [14] [18]. Es sumamente importante identificar estos factores y tomar las precauciones necesarias para prevenir el evento.

El modelo más usado para estudiar este efecto es del factor β , donde un porcentaje de la indisponibilidad o a la misma tasa de falla de un elemento o subsistema se le asigna a la falla modo común. Con esto la tasa de falla se puede definir como la suma de dos componentes:

$$\lambda = \lambda_i + \lambda_c \quad (7.4)$$

Donde λ_i es la tasa de falla independiente que solo afecta al equipo en particular, y λ_c es la tasa de falla común.

Se define factor de falla común como:

$$\beta = \frac{\lambda_c}{\lambda_i} \quad (7.5)$$

El factor β representa el porcentaje de causa de falla modo común entre las fallas independientes de un componente.

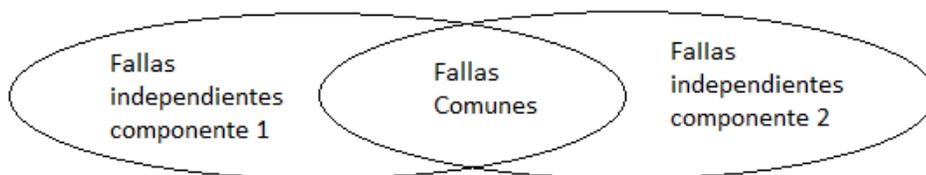


Figura 7.10 Relación entre fallas independientes y fallas modo común.

Para incorporar la falla común en un árbol se debe anteponer una compuerta *OR* previa a la compuerta *AND* entre dos componentes o subárboles, adhiriendo el aporte de la falla común a la indisponibilidad del sistema.

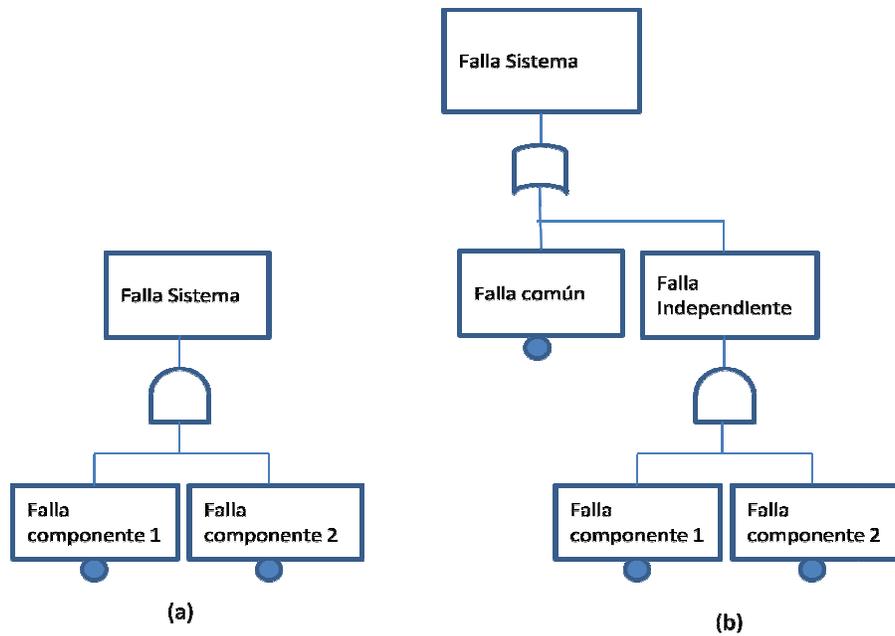


Figura 7.11 (a) Árbol de falla sin modo de falla común, (b) Árbol de falla con modo de falla común.

Luego la componente de falla común corresponde a un porcentaje de la indisponibilidad de falla independiente donde usualmente se usa un 30% [15]. En consecuencia la indisponibilidad de los diferentes árboles de falla para los respectivos arreglos debería aumentar según la siguiente tabla:

Arreglo de Barra	U (Indisponibilidad)	U (Indisponibilidad)
Barra Simple	0,00011	0,00014
Doble Barra	0,00010	0,00014
barra principal más barra de Transferencia	0,0000032	0,0000042
Interruptor y medio	0,00000074	0,00000095

Tabla 7.6 Indisponibilidad modo de falla común

La incorporación del modelo de falla común al árbol se hace de manera directa en el equivalente reducido de los conjuntos de corte mínimo, con esto se le da simplicidad al análisis ya que el porcentaje que se le asigne a la falla común es en cuanto aumentará la indisponibilidad del sistema, en este caso un 30%, sin embargo no es directo que a todos los conjuntos de corte mínimo se le asigne el mismo porcentaje de la indisponibilidad, esto puede depender del orden del conjunto dado que para uno de segundo orden la probabilidad de falla común puede ser equivalente a la de un conjunto de tercer orden en consideración de factores ambientales como terremotos, clima, etc.

7.4 Análisis de Modos de Falla de Interruptores

En la sección 7.2 se vio el aporte de cada componente a la indisponibilidad de dos arreglos, en particular se puede desprender el porcentaje de la tasa de falla de los interruptores con respecto a la tasa de falla total del arreglo, lo que se muestra en la tabla 7.7.

Arreglo de Barra	λ_a Arreglo [fallas/año]	λ_i Interruptores [fallas/año]	Porcentaje λ_i / λ_a [%]
barra simple	0,0814	0,0787	96,76
Doble Barra	0,0796	0,07877216	98,96
barra principal con barra de Transferencia	0,0026	0,0000117	0,45
Interruptor y medio	0,0008	0,00001328	1,66

Tabla 7.7 Aportes de fallas de interruptores a falla del sistema

Recordar que los interruptores tienen sus propios modos de fallas donde a cada uno se le asocia una tasa de falla que luego sumadas dan la tasa total para el interruptor.

λ_{c1} : Tasa de falla por no abrir tras orden de apertura.

λ_{c2} : Tasa de falla por no interrumpir corriente orden de apertura.

λ_{c3} : Tasa de falla por no cerrar tras orden de cierre.

λ_{c4} : Tasa de fallas por no conducir corriente tras orden de cierre.

λ_s : Tasa de fallas por cortocircuitos.

Desde el estudio de CIGRE se puede obtener el aporte de cada modo de falla a la falla total del interruptor [11], esto es lo mostrado en la tabla 7.8.

Tasa de Falla	Porcentaje Modo de Falla/Falla Interruptor [%]
λ_{c1}	7,97
λ_{c2}	5,29
λ_{c3}	14,98
λ_{c4}	1,765
λ_s	69,97

Tabla 7.8 Aportes de modos de fallas a fallas de interruptores

Es así como se puede construir la tabla 7.9 que muestra el aporte de cada modo de falla a la tasa de falla total de cada arreglo de barra.

Arreglo de Barra	λ_{c1}	λ_{c2}	λ_{c3}	λ_{c4}	λ_s
barra simple	7,71%	5,12%	14,5%	1,71%	67,71%
Doble Barra	7,89%	5,24%	14,83%	1,74%	69,25%
barra principal con barra de Transferencia	0,035%	0,024%	0,067%	0,0079%	0,315%
Interruptor y medio	0,132%	0,087%	0,248%	0,029%	1,161%

Tabla 7.9 Aportes de modos de fallas a falla total de los arreglos de barra

De la tabla anterior se desprenden resultados importantes como por ejemplo que tanto para el arreglo de barra simple como para el arreglo de doble barra, cerca de un 70% de las fallas es por cortocircuito en los interruptores. A medida que los interruptores se respaldan el aporte de falla de estos a la indisponibilidad del sistema es baja, como el caso del arreglo de barra principal con barra de transferencia donde el modo de falla de máxima contribución de falla solo alcanza el 0,32%.

7.5 Confiabilidad de Arreglos en Sistema de Transmisión Troncal

Hasta ahora solo se ha analizado la indisponibilidad de los arreglos para la falla de uno de sus circuitos de salida. Cuando las líneas y subestaciones están en el sistema de transmisión troncal, cuyas características se detallan en el artículo 74° de la LGSE (Ley General de Servicios Eléctricos [19]), las exigencias de seguridad del sistema aumentan, una de estas es la obligación de aplicar el criterio N-1 (Artículo 5-5 de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio [1]) que se define como un criterio de planificación para el desarrollo y operación del sistema interconectado, con el fin de enfrentar la ocurrencia de una contingencia simple sin que ésta se propague a las restantes instalaciones del sistema interconectado [1].

Desde este punto de vista la visión del sistema cambia ya que se tienen dos líneas de salida hacia un mismo consumo en donde la indisponibilidad de una se respalda con la otra cumpliendo con el criterio N-1.

De la construcción de los árboles de falla para la falta de flujo por La , al querer hacer el análisis para Lb , se debe notar que los equipos que integran al arreglo son equivalentes, luego en términos de confiabilidad, la indisponibilidad de no flujo por La es la misma que para no flujo por Lb .

Por exigencias del criterio N-1 deben fallar ambas líneas de salida para que no se alimente el consumo, lo que indica que el evento principal cambia según la figura 7.12.

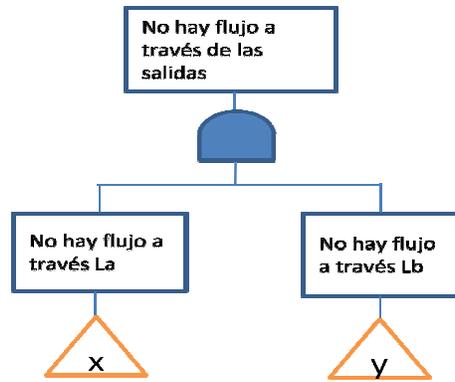


Figura 7.12 Subárbol evento principal con criterio N-1

La compuerta de transferencia x enlaza a los árboles de falla modelados dependiendo del arreglo en estudio, mientras que la compuerta de transferencia y , enlaza al árbol de falla para la indisponibilidad de Lb .

En esta condición la ocurrencia del evento principal se une con una compuerta *AND* a la indisponibilidad de los flujos por la línea. Luego la indisponibilidad total del sistema viene dada por $P(Ls)$.

$$P(Ls) = P(La) \cdot P(Lb) \quad (7.6)$$

Por otro lado la tasa de falla del sistema sigue la siguiente ecuación:

$$\lambda_s = \frac{\lambda_a \lambda_b (\tau_a + \tau_b)}{1 + \lambda_a \tau_a + \lambda_b \tau_b} \quad (7.7)$$

La tabla 7.10 muestra los resultados de confiabilidad para los arreglos de barra aplicando el criterio N-1.

Arreglo de Barra	λ [fallas/Hora]	U [Indisponibilidad/horas-año]
barra simple	0,0807	0,948
Doble Barra	0,0789	0,907
barra principal con barra de Transferencia	0,0021	0,000784
Interruptor y medio	0,00051	0,000041

Tabla 7.10 Confiabilidad para arreglos de barra aplicando criterio N-1

Esto muestra el aumento en la confiabilidad de los arreglos al aplicar el criterio N-1. Por otra parte la tendencia de la confiabilidad de los arreglos de barra sigue siendo la misma, por lo que para un sistema troncal es recomendable el uso de la configuración de interruptor y medio dada la importancia que la subestación tiene en el sistema, sin embargo en

términos de confiabilidad vs costos el arreglo de barra principal con barra de transferencia es un opción a considerar.

7.6 Seguridad de Suministro

Se define seguridad de suministro como la capacidad de un sistema eléctrico o parte de él, para soportar contingencias y minimizar la pérdida de consumos, a través de respaldos y servicios complementarios [1]. Se ve que no todos los arreglos tienen este atributo dependiendo de cuál sea la falla. Siguiendo los casos de estudio en que se tenían arreglos con dos salidas y dos entradas, si las salidas alimentan consumos diferentes, para un arreglo de barra simple la falla en barra o interruptor provoca pérdidas de al menos un consumo completo después de maniobras de reconexión, el arreglo de doble barra es suficiente ante fallas de barra y el barra principal con barra de transferencia suficiente ante falla de un interruptor, por otro lado la configuración de interruptor y medio presenta suficiencia para cualquier tipo da falla.

Los estados de operación de un SEP entran en juego al momento de hablar de seguridad de suministro según las siguientes definiciones [1]:

- a) Estado Normal: Estado del sistema interconectado en que se satisfacen simultáneamente las siguientes condiciones:
 - Inexistencia de energía no suministrada.
 - Las tensiones en todas las barras del sistema se encuentran dentro de los rangos definidos para estado normal.
 - La frecuencia se encuentra dentro del rango definido para estado normal.
 - Las reservas de potencia en giro y de capacidad de transmisión y aporte de reactivos están dentro de los valores programados.
 - En estado normal el sistema debe ser capaz de superar sin pérdida de sincronismo las contingencias.

- b) Estado de Alerta: Estado que se alcanza luego de una o más contingencias encontrándose el sistema previamente en estado normal, en el cual no existe energía no suministrada y se superan sin pérdida de sincronismo contingencias simples de severidad 1 y 2 [1], estando el sistema estable sin estar disgregado en islas, caracterizado por la existencia de alguna de las siguientes condiciones:
 - Existen barras del sistema cuyas tensiones se encuentran fuera de los rangos de estado normal, pero no se encuentran fuera de los rangos establecidos para el estado de alerta.
 - Se ha perdido reserva en giro de modo que frente a cambios en la demanda, la frecuencia del sistema excursiona fuera de los rangos de estado normal, pero no fuera de los rangos definidos para el estado de alerta.

- c) Estado de Emergencia: Estado que se alcanza luego de una o más contingencias encontrándose el sistema previamente en estado normal o en estado de alerta y en el cual se presentan alguna de las siguientes condiciones:
- El sistema se encuentra disgregado en islas o existe energía no suministrada.
 - Existen barras del sistema cuyas tensiones se encuentran fuera de los rangos de estado normal y alerta.
 - Se ha perdido la reserva en giro de modo que frente a cambios en la demanda la frecuencia del sistema excursiona fuera de los rangos de estado normal y alerta con riesgo de que el sistema o algunas islas pierdan sincronismo.
- d) Estado de Recuperación: Estado que alcanza el sistema cuando se produce algún apagón total o apagón parcial, en el cual se inician las acciones para la reconexión de las instalaciones y la recuperación de la demanda.

Entonces dependiendo de donde sea la falla, un arreglo de interruptor y medio puede pasar de estado normal de operación a estado de alerta en que no existe energía no suministrada y el sistema no se encuentra disgregado en islas, o a estado de emergencia, mientras que el resto de las configuraciones al fallar un componente van desde estado normal directamente a estado de emergencia y luego a estado de restauración, esto porque la falla provoca que el sistema se divida en islas independiente del respaldo y tiempos de reconexión.

Los modelos propuestos consideran que el sistema falla al pasar de estado normal a estado de emergencia no pudiéndose recuperar mediante acciones correctivas de control lo que marca la diferencia en comparaciones a metodologías de otros estudios donde si es posible llegar rápidamente a estado de recuperación y volver a operación normal.

8 Capítulo 8: Conclusiones

En este trabajo se desarrollaron y cumplieron todos los objetivos planteados, en primer lugar, se cumplió con la modelación de los diferentes arreglos de barras e interruptores mediante árboles de fallas, modelo basado en la indisponibilidad de flujos en la salida y respaldos que se dan a los distintos componentes productos de la arquitectura del arreglo. El modelo fue aplicado al algoritmo implementado en Matlab desarrollando métodos de resolución, obteniendo los parámetros de confiabilidad de los sistemas en estudio.

El otro objetivo fue comparar los diferentes arreglos desde la interpretación de resultados, analizando la confiabilidad para distintos puntos de vista, como tasas de falla, tasas de reparo, tiempos medios, importancia, fallas de modo común y factores económicos.

Los modelos descritos pueden ser aplicados para diferentes subestaciones, los cuales se pueden desarrollar en más detalles agregando elementos que aporten confiabilidad al sistema y características particulares que presente la subestación.

En comparación con otros estudios de árboles de falla la incorporación de los respaldos al análisis de confiabilidad da un valor agregado tanto para el modelo, como para obtener parámetros más reales.

El análisis entrega la confiabilidad para cada arreglo de barra, luego es posible enumerar estos de mayor a menor confiabilidad.

1. Arreglos de interruptor y medio.
2. Arreglo de barra principal con barra de transferencia.
3. Arreglo de doble barra.
4. Arreglo de barra simple.

Si el criterio de elección entre una configuración u otro solo es la confiabilidad, el arreglo a elegir sería el de interruptor y medio, no solo por su poca probabilidad de falla, sino también por su flexibilidad de operación y seguridad de suministro. Sin embargo existen otros factores a tomar en cuenta, como los costos de inversión, mantenimiento y operación, necesidad del sistema, tipos de mantenimiento por condiciones ambientales de los equipos, entre otros.

Los equipos de un sistema eléctrico pueden fallar simultáneamente por una causa común como desastres naturales, fallas humanas, condiciones ambientales entre otros, que se deben adherir al análisis de confiabilidad. Esto se mostró en el análisis de modo de falla común, donde se aplicó un factor de un 30% de la indisponibilidad de cada conjunto de corte para dar cuenta de este fenómeno, sin embargo esto se puede cuantificar de mejor

manera con un estudio más exhaustivo con base de datos estadísticos que permitirían estimar un factor β más real.

La memoria está orientada a interruptores de extra alta tensión, luego es lógico pensar en subestaciones ubicadas en el sistema de transmisión trocal, donde por normativa se debe aplicar el criterio N-1, agregando confiabilidad al sistema por el respaldo a las líneas de transmisión. Por otra parte esto hace más notoria la diferencia en la indisponibilidad entre cada arreglo de barra.

Finalmente, un trabajo a futuro sería modelar los arreglos de barra adicionando compuertas condicionales para incorporar de mejor manera los respaldos a los elementos del sistema. También agregar seccionadores al modelo y otros factores que aporten en confiabilidad como protecciones, elementos de control y fallas humanas entre otros.

Además se pueden modelar arreglos no abordados en esta memoria, como configuración de anillo, doble barra con doble interruptor y disposiciones que surgen de combinar doble barra con arreglo de barra principal con barra de transferencia para poder obtener una base de datos de todas las configuraciones con su respectiva confiabilidad y características.

9 Referencias

- [1] Comisión Nacional de Energía Gobierno de Chile, *Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio*. Santiago, 2009.
- [2] Palma B., Vargas D. Brokering C., *Ñom Lüfke (El Rayo Domado)*.: Prentice Hall - Pearson Educación, 2008.
- [3] Crowdis R., *Substation Configurations: A comparison of value and cost effectiveness.*, 1992.
- [4] D. Nack, *Reliability of Substation Configurations*, University of Iowa State University, Ed.: Department of Electrical and Computer Engineering, 2005.
- [5] Norma ANSI/IEEE C37.010-1979,.
- [6] Héctor Jorge Altuve Ferrer, *Protección de sistemas eléctricos de potencia*. México: Universidad Autónoma de Nueva León.
- [7] S. A. Boggs and H. Schramm, *Current Interruption and Switching in Sulphur Hexafluoride*, 611217th ed., 1990.
- [8] J. Maté, *How to limit HFC/PFC/SF6 emission? Eliminate them*. Luxemburg, 2000.
- [9] ABB, Ed., *Live tank circuit breaker buyer's guide.*, 2004.
- [10] John H. Brunke, *Circuit-Breakers: Past, Present and Future.*, 2003.
- [11] Final Report of the Second International Enquiry on High Voltage Circuitbreaker Failures and Defects in Service,., CIGRE, 1994.
- [12] Billinton y Ronald N., *Reliability Evaluation of Power Systems, Boston, Pitman Advanced Pub. Program.*, 1985.
- [13] Birolini A., *Reliability Engineering*, Springer, Ed. Berlin, 2007.
- [14] Limnios N., *Fault Trees*, Iste, Ed. London, 2007.
- [15] Zongyu Liu, *Reliability Analysis of Breaker Arrangements in High Voltage Stations: A Fault Tree Approach*. Göteborg, Sweden, 2008.
- [16] Rodrigo Rubio, *Análisis de confiabilidad de los servicios auxiliares de estaciones*

HVDC y su impacto en la disponibilidad del enlace., 2009.

- [17] Comisión Nacional de Energía Gobierno de Chile, *INFORME TÉCNICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL VALOR ANUAL Y EXPANSIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISIÓN TRONCAL*. Santiago, Chile, Abril de 2011.
- [18] U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research, *Common-Cause Failure Database and Analysis System: Event Data Collection, Classification, and Coding*, Idaho National Laboratory, 205550001st ed. Washington D.C.
- [19] Gobierno de Chile, *D.F.L. Núm. 4/20.018.- Ley General de Servicios Eléctricos*. Santiago, Chile, 2006.
- [20] Comisión Nacional de Energía Gobierno de Chile, *Decreto N° 327, Fija Reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos*. Santiago, Chile, 1997.