



**Universidad
Técnica de
Cotopaxi**

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMA ELÉCTRICOS DE
POTENCIA**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA QUE
PERMITA DETERMINAR INDICADORES DE CONFIABILIDAD CON
DIFERENTES ESCENARIOS DE OPERACIÓN”**

Autores:

Tigselema Gancino Mayra Leticia

Tipán Pilatasig Sergio David

Tutor:

Ing. Edwin Lema G. MsC.

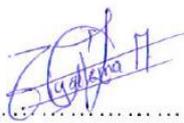
LATACUNGA - ECUADOR

Febrero 2019

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Tigselema Gancino Mayra Leticia y Tipán Pilatasig Sergio David , declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA QUE PERMITA DETERMINAR INDICADORES DE CONFIABILIDAD CON DIFERENTES ESCENARIOS DE OPERACIÓN**, siendo Msc. Edwin Marcelo Lema Guamán tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.



Tigselema Gancino Mayra Leticia
C.C.: 050348309-1



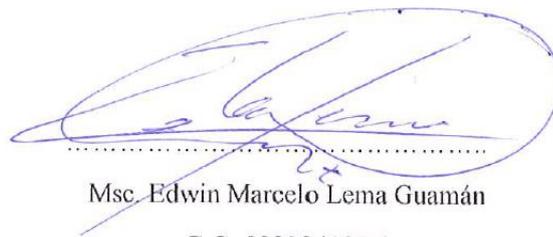
Tipán Pilatasig Sergio David
C.C.: 055005832-5

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA QUE PERMITA DETERMINAR INDICADORES DE CONFIABILIDAD CON DIFERENTES ESCENARIOS DE OPERACIÓN”, de Tigselema Gancino Mayra Leticia y Tipán Pilatasig Sergio David , de la carrera Ingeniería Eléctrica considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Febrero del 2019



Msc. Edwin Marcelo Lema Guamán

C.C: 030224135-1

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

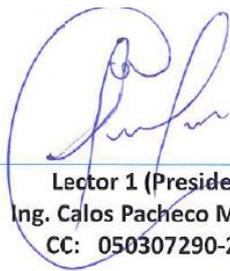
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la FACULTAD de **CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**; por cuanto, los postulantes: **TIGSELEMA GANCINO MAYRA LETICIA** y **TIPÁN PILATASIG SERGIO DAVID** con el título de Proyecto de titulación: **SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA QUE PERMITA DETERMINAR INDICADORES DE CONFIABILIDAD CON DIFERENTES ESCENARIOS DE OPERACIÓN** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

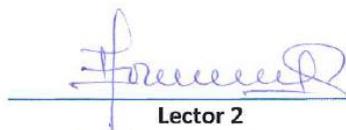
Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, 05 – 02 -2019

Para constancia firman:



Lector 1 (Presidente)
Ing. Carlos Pacheco M. MSc.
CC: 050307290-2



Lector 2
PhD. Iliana Gonzáles Palau
CC: 175707065-9



Lector 3
Ing. Marco León S. MSc
CC: 050230540-2

AGRADECIMIENTO

Saber valorar la voluntad que tiene Dios y lo que nos brinda la vida es un motivo más para esforzarnos y vivir agradecidos de todo lo que llega en un tiempo perfecto, donde se premia el esfuerzo la dedicación y la constancia por lograr cumplir cada uno de nuestros sueños.

Como no agradecer también a todos quienes fueron ese apoyo para hoy escribir estas palabras, nuestra infinita gratitud a todos los ingenieros quienes nos prepararon para la vida profesional en especial a nuestro tutor Ing. Edwin Lema, por apoyarnos en todo momento durante el desarrollo de nuestra tesis, al Ing. Vicente Quispe y al Ing. Xavier Proaño por haber estado presentes durante el transcurso de nuestra carrera.

A esas personas que están presentes en todo el tiempo alentándonos para llegar a ser profesionales y ante todo buenas personas a esos amigos y familia que nunca nos dejan de apoyar.

Mayra y Sergio.

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a todas esas personas que me han ayudado a ser cada día un mejor ser humano con integridad.

A mis padres, hermanos, hermanas por ese apoyo incondicional y sobre todo especialmente a mi pequeño hogar, a ti Pauleth que me enseñaste a prepararme en una carrera donde no existe mejor profesora que la vida misma, a ti que llenas mi vida de orgullo y valentía.

También a usted Diego Carrasco por haber sido quien yo elegí para llegar a viejitos porque haber creído en mí y por haber estado ahí pese a muchos contratiempos, por que espero de todo corazón que los esfuerzos por llegar a ser los padres que nuestra hija se merece no sean en vano.

Y a todos mis amigos, amigas que son esa familia que nos da la vida. Sergio Tipán porque quizá este sea el primero de muchos proyectos en nuestra vida profesional.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de investigación principalmente a Dios por permitirme llegar hasta este momento importante de mi formación profesional.

A mi familia en especial a mi madre por el apoyo constante e incondicional en todo momento.

A los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica quienes a lo largo de la carrera han sido de gran ayuda para adquirir nuevos conocimientos y a nuestro tutor el ingeniero Edwin Lema por sus aportes teóricos y el apoyo constante en el desarrollo del presente documento.

Y finalmente a mi compañera de tesis Mayra Tigselema por la ayuda durante toda esta etapa de formación profesional.

Sergio Tipán

ÍNDICE

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN.....	III
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
DEDICATORIA	VI
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	3
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	3
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	4
5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	4
Planteamiento del problema	4
Formulación del problema.....	5
6. OBJETIVOS	5
Objetivo General	5
Objetivos Específicos.....	5
7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS.....	6
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA	7
Generación distribuida (GD).....	7
Fuentes de generación distribuida	7
Que es la Generación Distribuida	8
Micro Redes y GD.	9
Flexibilidad.....	9
Confiabilidad.....	9
Calidad de la Energía.....	9
Reducir la Congestión de la Red	10
Beneficios Adicionales	10
Sistema Radial con Generación Distribuida	10

Fundamentos probabilísticos para el cálculo de la confiabilidad de los sistemas de generación distribuida.....	11
Generación de energía eléctrica	11
Los generadores eléctricos	12
Tecnologías de generación.	13
Eólica	14
Fotovoltaica	14
Aspectos de calidad considerados en el Ecuador.....	15
Definición de confiabilidad	16
Análisis de la confiabilidad	16
Confiabilidad en sistemas de potencia	16
Confiabilidad en generación	17
Modelo de confiabilidad de los componentes	17
Confiabilidad de un sistema eólico.....	21
Método de frecuencias para la obtención de la confiabilidad.	25
Confiabilidad topológica.	25
Software de simulación	26
Software ETAP	26
Calculo económico.	27
Índices orientados a carga y energía.....	27
9. HIPÓTESIS.....	27
10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL	28
Nivel de Investigación.....	28
Investigación Explicativa	28
Tipo de investigación.....	28
Investigación Experimental.	28
11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	28
Método de Markov	29
Métodos de reducción de redes.....	29
Transformación delta - estrella	29
Datos para el desarrollo de la simulación.....	30
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71

Conclusiones.....	71
Recomendaciones.....	72
13. BIBLIOGRAFÍA	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla de Objetivos.	6
Tabla 2. Fuente de energía.....	8
Tabla 3. Tecnología de generación.....	13
Tabla 4: Relación de tiempo en los estados de la máquina.	18
Tabla 5: Modelo de confiabilidad de un sistema fotovoltaico.	21
Tabla 6: Tasa de fallas de cada componente.	24
Tabla 7: Datos de falla de la turbina de viento.....	24
Tabla 8. Datos para el desarrollo de la simulación.....	30
Tabla 9: Confiabilidad en las barras de carga con diferente generación.....	33
Tabla 10: Confiabilidad en diferentes barras con el equivalente de red.....	34
Tabla 11: Confiabilidad en diferentes barras con generación fotovoltaica.	35
Tabla 12: Confiabilidad en diferente barras con el generador síncrono.....	36
Tabla 13: Confiabilidad en diferentes barras con generación eólica.....	37
Tabla 14: Resumen de confiabilidad con diferente tipo de generación en cada una de las barras.	38
Tabla 15: Confiabilidad en diferentes barras con generación completa.....	41
Tabla 16: Confiabilidad en diferentes barras con generación eólica, fotovoltaica y equivalente de red.	42
Tabla 17: Confiabilidad en diferentes barras con equivalente de red y generación fotovoltaica.	43
Tabla 18: Análisis desde el punto de vista del Generador Síncrono.	44
Tabla 19: Confiabilidad en diferentes barras con generación síncrona, fotovoltaica y Equivalente de red.	45
Tabla 20: Confiabilidad en diferentes barras con generación síncrona y Equivalente de red.	46
Tabla 21: Confiabilidad en diferentes barras con generación completa.....	47
Tabla 22: Confiabilidad en diferentes barras con generación eólica, síncrona y equivalente de red.	48

Tabla 23: Confiabilidad en diferentes barras con generación eólica, síncrona y equivalente de red.	49
Tabla 24: Confiabilidad en diferentes barras con generación completa.....	50
Tabla 25: Confiabilidad en diferentes barras con generación fotovoltaica, eólica y equivalente de red.	51
Tabla 26: Confiabilidad en diferentes barras con generación fotovoltaica y equivalente de red.	52
Tabla 27: Cuadro de resumen de confiabilidad.....	54
Tabla 28: Comparación de los dos métodos de cálculo.	58
Tabla 29: Energía no suministrada en cada barra en kWh.	64
Tabla 30: Costo de la energía no suministrada.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de distribución radial con GD	11
Figura 2: Modelo de los estados para las competencias.....	17
Figura 3: Tasa de fallas variables en tres etapas	19
Figura 4: Funciones de los medios en una secuencia de operación de un sistema reparable..	20
Figura 5: Esquema general de aerogeneradores marca goldwind.....	21
Figura 6: Diagrama unifilar de un sistema eléctrico de potencia.	25
Figura 7: Diagrama de bloques de un sistema.....	25
Figura 8: Diagrama de barras Alimentación a una carga desde una subestación.	26
Figura 9: Configuración de confiabilidad a) delta y b) estrella.....	30
Figura 10: Diagrama de barras de la confiabilidad de cada elemento.	31
Figura 11: Simulación de un sistema de generación radial en Etap.....	32
Figura 12: Diagrama de bloques del sistema radial para el cálculo de la confiabilidad.	32
Figura 13: Diagrama de barras de la confiabilidad de cada sistema de generación radial.....	33
Figura 14: Configuración en anillo de un sistema eléctrico de potencia con generación distribuida a 69 kV	34
Figura 15: Confiabilidad en las barras mediante el uso del equivalente de red.	35
Figura 16: Confiabilidad en diferentes barras con generación fotovoltaica.....	36
Figura 17: Confiabilidad en diferentes barras con el generador síncrono.....	37
Figura 18: Confiabilidad con generación eólica.	38
Figura 19: Confiabilidad de en cada barra con diferente tipo de generación.....	39

Figura 20: Sistema en anillo con GD para los diferentes escenarios de operación.....	40
Figura 21: Confiabilidad en diferentes barras con generación total.....	41
Figura 22: Confiabilidad en diferentes barras con generación eólica, fotovoltaica y equivalente de red.	42
Figura 23: Confiabilidad en diferentes barras con el equivalente de red y generación fotovoltaica.	43
Figura 24: Confiabilidad en diferentes barras con generación completa.....	44
Figura 25: Confiabilidad en diferentes barras con generación síncrona, fotovoltaica y Equivalente de red.	45
Figura 26: Confiabilidad en diferentes barras con generación síncrona y Equivalente de red	46
Figura 27: Confiabilidad en diferentes barras con generación completa.	47
Figura 28: Confiabilidad en diferentes barras con generación eólica, síncrona y equivalente de red.	48
Figura 29: Confiabilidad en diferentes barras con generación eólica y equivalente de red....	49
Figura 30: Confiabilidad en diferentes barras con generación completa.....	50
Figura 31: Confiabilidad en diferentes barras con generación fotovoltaica, eólica y equivalente de red.	51
Figura 32: confiabilidad en diferentes barras con generación fotovoltaica y equivalente de red.	52
Figura 33: Confiabilidad desde cada punto de referencia.	55
Figura 34: Comparación entre los dos métodos.	59
Figura 37: Energía no suministrada	65
Figura 38: Energía no suministrada en kWh escalado	66
Figura 39: Costo de energía no suministrada en cada barra.....	68
Figura 40: Costo de la energía no suministrada en USD escalado.....	69

ÍNDICE DE ECUACIONES

(Ecuación 1)	18
(Ecuación 2)	18
(Ecuación 3)	19
(Ecuación 4)	20
(Ecuación 5)	22
(Ecuación 6)	23

(Ecuación 7)	23
(Ecuación 8)	23
(Ecuación 9)	23
(Ecuación 10)	23
(Ecuación 11)	24
(Ecuación 12)	27
(Ecuación 13)	27
(Ecuación 14)	27
(Ecuación 15)	28
(Ecuación 16)	28
(Ecuación 17)	28
(Ecuación 18)	28
(Ecuación 19)	28
(Ecuación 20)	29
(Ecuación 21)	29
(Ecuación 22)	29
(Ecuación 23)	29
(Ecuación 24)	29
(Ecuación 25)	29
(Ecuación 26)	30
(Ecuación 27)	30
(Ecuación 28)	30

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA QUE PERMITA DETERMINAR INDICADORES DE CONFIABILIDAD CON DIFERENTES ESCENARIOS DE OPERACIÓN”

Autores: Tigselema Gancino Mayra Leticia
Tipán Pilatasig Sergio David

RESUMEN

Esta investigación fue desarrollada con el objetivo de demostrar como mejora los índices de confiabilidad de un sistema de potencia con generación distribuida interconectada en anillo, Para la verificación de estos indicadores se empleara una simulación en el software ETAP el cual calcula la confiabilidad equivalente del sistema.

Mediante el uso del método de cálculo de Markov se determina la confiabilidad del sistema simulado y se realiza un estudio en cada una de las barras acopladas al sistema desde un punto de vista de cada sistema de generación, y diferentes escenarios de operación. Se emplea el método de Markov de dos maneras la primera haciendo un análisis de forma radial para cada escenario utilizando la frecuencia de falla y tiempos de reparación y en el segundo método se usa generaciones interconectadas en paralelo y se calcula directamente con las disponibilidades de cada elemento y empleando la transformación triangulo - estrella. Los datos ingresados al simulador son propios de los autores y estos son aproximados a los reales. Por último, se plantean las conclusiones y recomendaciones del análisis realizado.

Palabras clave: Confiabilidad, Generación, Distribuida, Índices, escenario.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF APPLIED ENGINEERING SCIENCES

TOPIC: “SIMULATION OF A DISTRIBUTED GENERATION SYSTEM THAT ALLOWS DETERMINING RELIABILITY INDICATORS WITH DIFFERENT OPERATING SCENARIOS”

Autors: Tigselema Gancino Mayra Leticia

Tipán Pilatasig Sergio David

ABSTRACT

This research was developed with the objective to determinate how a power system with distributed generation ring interconnected, improves its reliability indices. A simulation in ETAP software which calculate the equivalent reliability of the system was developed in order to verify these indices. Using the Markov calculation method, the system reliability is determined and a study is made in each bar, from each point of generation, and different operating scenarios. The Markov method is used in both cases, the first one making a radial analysis for each scenario using the failure frequency and repair times and in the second one, it uses generations interconnected in parallel and it is calculated directly with the availabilities of each element and using the transformation delta - wye. The data used in the simulator are supposed by the authors and these are approximate to the real ones. Finally, conclusions and recommendations of the analysis are raised.

Key words: Reliability, Generation, Distributed, Indexes, Scenery.



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

CENTRO DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen de tesis al Idioma Inglés presentado por el señores Egresados de la Carrera de **INGENIERÍA ELÉCTRICA** de la Unidad Académica de **CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS, TIGSELEMA GANCINO MAYRA LETICIA Y TIPÁN PILATASIG SERGIO DAVID**, cuyo título versa **“SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA QUE PERMITA DETERMINAR INDICADORES DE CONFIABILIDAD CON DIFERENTES ESCENARIOS DE OPERACIÓN”**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, Enero del 2019

Atentamente,

LIDIA REBECA YUGLA LEMA
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS
C.C. 050265234-0



PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:

Simulación de un sistema de generación distribuida que permita determinar indicadores de confiabilidad con diferentes escenarios de operación

Fecha de inicio: Abril 2018

Fecha de finalización: febrero 2019

Lugar de ejecución:

Barrio Ejido-San Felipe-Latacunga-Cotopaxi-zona 3 Universidad Técnica de Cotopaxi

Facultad que auspicia

Ciencia de la Ingeniería y Aplicadas

Carrera que auspicia:

Ingeniería Eléctrica

Proyecto de investigación vinculado:

Proyecto de la Carrera

Equipo de Trabajo:**Tutor de Titulación:**

Nombres y Apellidos: Edwin Marcelo Lema Guamán

Lugar y fecha de nacimiento: Azogues, 06 de abril de 1988

Estado Civil: Soltero

Número de cedula: 030224135-1

Teléfono: 0959046477

e-mail: edwin.lema@utc.edu.ec

Datos personales (Postulante 1)

Nombres y Apellidos: Mayra Leticia Tigselema Gancino

Lugar y fecha de nacimiento: Pujilí, 21 de septiembre de 1989

Estado civil: Casada

Número de cedula: 050348309-1

Dirección: Salcedo; Barrio El Calvario.

Teléfono: 0999852439 / 032729633

E-mail: mayra.tigselema1@utc.edu.ec

Datos personales (Postulante 2)

Nombres: Sergio David Tipán Pilatasig

Lugar y fecha de nacimiento: Latacunga, 07 de agosto de 1995

Estado civil: Soltero

Número de cedula: 055005832-5

Dirección: Pujilí, Barrio San Vicente Centro

Teléfono: 0983080341

E-mail: sergio.tipan5@utc.edu.ec

Área de Conocimiento:

Sistemas Eléctricos, Confiabilidad de los Sistema Eléctricos de Potencia

Línea de investigación:

Explotación y diseño de sistemas eléctricos de potencia

Sub líneas de investigación de la Carrera:

Diseño de redes y explotación de sistemas eléctricos de potencia

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Dentro de los sistemas de generación eléctrica existen distintos tipos, entre los cuales en nuestro medio se conocen los sistemas hidráulicos, térmicos, bancos de baterías y los no convencionales como son eólicos y solares por tanto es necesario conocer la confiabilidad que va a tener cada uno de ellos durante su operación tanto individual como conectada a la red.

Los índices de confiabilidad de los sistemas solares, eólicos y bancos de batería son hasta ahora desconocidos por falta de estudio y porque es tecnología nueva que se está implementando dentro de los sistemas de generación en nuestro país, para lo cual se pretende realizar un estudio de confiabilidad y determinar la factibilidad de cada uno de ellos.

Es una síntesis corta y clara del propósito del problema de investigación seleccionado, debe dar una idea completa del trabajo enmarcado en el problema, los objetivos, la metodología a seguir, y de los aportes, importancia del proyecto, impactos y beneficiarios.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Esta investigación se desarrolla con la finalidad de determinar la confiabilidad que presentan la generación distribuida, compuesta por varios tipos, así como es el caso de la energía eólica, fotovoltaica y banco de baterías. Estableciendo su comportamiento en un Sistema Eléctrico de Potencia, ya que al ser fuentes que dependen de factores externos a su construcción y funcionamiento, esta indagación pretende proponer un método de cálculo.

En la actualidad la instalación de nueva tecnología como es el caso de los paneles fotovoltaicos, bancos de baterías y Aerogeneradores entre otras formas de generación de energía no convencional, hacen que todas estas al acoplarse a un Sistema Interconectado presenten diferentes comportamientos que alterarían la confiabilidad necesaria para mantener equilibrado el SEP.

Dichas implementaciones al encontrarse interconectadas con la red eléctrica presentan un índice de confiabilidad que en relación a las centrales convencionales de un Sistema Eléctrico de Potencia tradicional dependerán del tiempo que aporten energía al sistema y del recurso el cual se esté utilizando.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

Los beneficiarios son los estudiantes de la universidad técnica de Cotopaxi de la carrera de Ingeniería Eléctrica y todos quienes hagan uso del presente documento.

5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Planteamiento del problema

Cuando se hace el análisis de la confiabilidad de un sistema eléctrico de potencia (SEP) se pretende encontrar el tiempo de recuperación del sistema, a esto se lo denomina índice de confiabilidad para reponerse a las fallas presentadas en los SEP, basándose en métodos de estadística y probabilidad.

La confiabilidad de sistemas de generación se evalúa en base antecedentes históricos para determinar los índices de confiabilidad los cuales tienen dos orientaciones diferentes: el riesgo de sucesos pasados y la predicción de la confiabilidad, los índices comúnmente utilizados están relacionados con la frecuencia y la duración de las interrupciones.

La confiabilidad que presentan los sistemas de generación hidráulica y térmica presentes en nuestro medio pueden ser determinados por distintas metodologías que se encuentran prescritos y que son utilizados al momento de presentar una falla en el sistema, por el contrario, la generación distribuida en el sistema ecuatoriano no existe un análisis de confiabilidad por ser una implementación de tecnología nueva.

Cuando se habla de generación distribuida empleamos varias fuentes de diferente recurso como es solar, eólico, y bancos de baterías los cuales hoy en día se están empleando como medios alternos para a generación eléctrica, dentro de varios países, así como es el caso del Ecuador, estas fuentes están ingresando para crear energías alternativas que aporten a los anillos interconectados. Estos sistemas dependen de factores medioambientales y climáticos a las que se encuentran expuestos los generadores ya que de estos principios depende el funcionamiento continuo y eficaz de las mismas.

Los índices y metodologías de confiabilidad de los sistemas solares, eólicos y bancos de batería son hasta ahora desconocidos en nuestro medio y requieren de estudios por separados para la

determinación de sus comportamientos y su forma de actuar, para ello es necesario conocer la confiabilidad que presentan al momento de ser requerido, y es por esta razón que se propone efectuar el estudio de la confiabilidad en la generación distribuida.

Una vez determinada la confiabilidad individual debe realizarse un análisis combinado que nos entregue un equivalente para analizar cómo se comportan los generadores en el momento de una contingencia, dándonos un estudio completo del aporte que brinden los sistemas de generación distribuida existentes y los próximos a implementarse

Formulación del problema

Desconocimiento del método para determinar los indicadores de confiabilidad en sistemas de generación distribuida con diferentes escenarios de operación.

6. OBJETIVOS

Objetivo General

Simular un sistema de generación distribuida que permita determinar indicadores de confiabilidad con diferentes escenarios de operación mediante el uso de un software para comprobar el comportamiento y la variación de los índices.

Objetivos Específicos

- Indagar sobre los sistemas de generación distribuida para un posterior análisis de su confiabilidad.
- Determinar la confiabilidad estándar en cada sistema a ser usado en la configuración para su posterior simulación.
- Simular un modelo de generación distribuida para obtener su confiabilidad.
- Establecer las variaciones de confiabilidad que presente al usar diferentes escenarios de operación.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Tabla 1: Tabla de Objetivos.

Objetivo 1	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Indagar sobre los sistemas de generación distribuida para un posterior análisis de su confiabilidad.	Investigación de documentos físicos y virtuales	Se determinó las condiciones de cada sistema de generación.	Buscar información en libros y documentos de sitio web
Determinar la confiabilidad estándar en cada sistema a ser usado en la configuración para su posterior simulación.	Determinar la confiabilidad estándar de un sistema eólico, banco de baterías, generación tradicional y sistema fotovoltaico.	Se determinó la confiabilidad e cada uno de los elementos , pero al ser valores pequeños para la apreciación de resultados se opto por valores propios.	Buscar información en libros relacionados con sistemas eléctricos de potencia y análisis de confiabilidad. Investigar sobre la confiabilidad estándar de cada sistema.
Simular un modelo de generación distribuida para obtener su confiabilidad.	Simulación y diseño de una red en anillo con generación distribuida.	Mediante la simulación en el software ETAP se determino la confiabilidad equivalente del sistema	Simular un sistema con Generación Distribuida. Observación. Análisis.
Establecer las variaciones de confiabilidad que presente al usar diferentes escenarios de operación.	Determinar la confiabilidad de cada sistema de generación en diferentes escenarios de operación.	Con cada escenario de operación la confiabilidad varia en función del tipo de generación que este en funcionamiento	Establecer relaciones entre los índices de confiabilidad en un Sistema de Generación Distribuida (GD).

Fuente: [Autores]

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

Generación distribuida (GD)

La Generación Distribuida (GD) surge como una alternativa importante para la prestación del servicio de energía eléctrica, ya que puede aumentar la confiabilidad y seguridad en el suministro a corto, mediano y largo plazo.

La GD trae consigo muchos beneficios para la seguridad energética, dado que puede utilizar tecnologías de energías renovables (RETs _ Renewable Energy Technologies). Las RETs mitigan el riesgo de sufrir desbalances entre generación demandada y generada a largo, mediano y corto plazo, puesto que apoyan el sistema eléctrico en situaciones inesperadas que ponen en peligro el suministro de energía eléctrica y el buen funcionamiento del mercado. [1]

La GD, por ser conectada cerca de los centros de consumo, no necesita las redes de transmisión y en caso de un evento en que se desconecte, parcial o totalmente, el sistema de interconectado de potencia, la GD puede ser clave para mitigar las consecuencias económicas y sociales que trae consigo un apagón. Además, la GD puede aumentar la seguridad, calidad y confiabilidad a través de la provisión de servicios complementarios como el control de tensión y el arranque autónomo [2].

A pesar de todos los beneficios anteriores, es importante tener en cuenta que la instalación de GD sobre la red de distribución posee grandes desafíos técnicos que requieren un estudio detallado de la tecnología y la topología de la red, con el fin de evitar problemas relacionados con calidad de la potencia, entre los más comunes, están los problemas de armónicos y flickers según el tipo de tecnología y el lugar de ubicación donde se pretenda instalar.

Fuentes de generación distribuida

[3]Algunas tecnologías empleadas para la conversión de energía en la generación distribuida están Basadas en el uso de combustibles fósiles (motores de combustión interna, turbinas de combustión y algunas celdas de combustible), las cuales poseen emisiones contaminantes al medioambiente.

Tabla 2. Fuente de energía

TECNOLOGÍA	TAMAÑO TÍPICO DE DISPONIBLE POR MODULO
Turbinas a gas de ciclo combinado	35- 400 MW
Motores de combustión interna	5 kW – 10 MW
Turbina de combustión	1 – 250 MW
Micro-Turbinas	35 KW – 1 MW

Fuente: [3].

Que es la Generación Distribuida

No existe consenso, a nivel mundial ni latinoamericano, sobre qué es exactamente la Generación Distribuida (GD), puesto que son múltiples los factores que afectan a su definición: tecnologías empleadas, límite de potencia, conexión a red.

El DPCA (Distribution Power Coalition of América) la define como, cualquier tecnología de generación a pequeña escala que proporciona electricidad en puntos más cercanos al consumidor que la generación centralizada y que se puede conectar directamente al consumidor o a la red de transporte o distribución. Por otro lado, la Agencia Internacional de la Energía (IEA, International Energy Agency) considera como GD, únicamente, la que se conecta a la red de distribución en baja tensión y la asocia a tecnologías como los motores, mini y microturbinas, pilas de combustible y energía solar fotovoltaica. [4]

Se trata pues de un campo de actuación en el que se intentan aprovechar algunas nuevas tecnologías para acercar la producción de energía, electricidad y calor, al consumidor. Su definición se basa en la generación de energía cerca del punto de consumo, pero no implica el uso de una tecnología en particular. [4]

Considerando diversos rangos de potencia se habla de micro generación para instalaciones de potencia inferior a 5 KW-, mini generación entre 5 kW y 5 MW- y generación de media y gran escala para sistemas cuya potencia esté entre 5 y 50 MW y 50- 100 MW respectivamente.

Las aplicaciones de la GD van desde la generación en base, generación en punta, cogeneración, hasta la mejora de la calidad de suministro, respaldo y soporte a la red de transporte y distribución. Ninguna tecnología abarca todo el rango de beneficios por sí misma, sino que cada

una se ajusta mejor a unas aplicaciones que a otras. No existe consenso, a nivel mundial ni latinoamericano, sobre qué es exactamente la Generación Distribuida (GD), puesto que son múltiples los factores que afectan a su definición: tecnologías empleadas, límite de potencia, conexión a red, etc. [4]

El concepto de la generación distribuida es generar y distribuir hacia el punto de consumo, es por ello que este sistema se los construye cerca del punto de carga [Autores]

Micro Redes y GD.

Se predice que la creciente demanda de energía será altamente devastadora para nuestro medio ambiente ya que la potencia de generación es el mayor contribuyente a las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el rápido agotamiento de los recursos energéticos convencionales y el aumento de los precios del combustible están paralizando la economía de muchos países. Con los avances tecnológicos, muchas energías renovables compiten ahora como alternativa fuentes de energía a los combustibles fósiles convencionales. La generación de energía convencional era altamente centralizada debido a la concentración geográfica de las fuentes de energía. También enfrentó muchos problemas como necesidad de infraestructura de extracción de energía generada, pérdidas en transmisión y distribución y carecía de la flexibilidad de establecerse en los lugares deseados. Los beneficios de las GD se enumeran a continuación: [5].

Flexibilidad: las GD son flexibles en planificación, instalación, operación y modularidad. Ellos pueden también se inició y detuvo mucho más fácilmente en comparación con las plantas convencionales que necesita tiempo y costos de inicio y apagado. Por lo tanto, se pueden modular fácilmente según normas del mercado [5].

Confiabilidad: en sistemas de energía eléctrica, simplemente significa suministro interrumpible a los consumidores. Esto requiere un alto mantenimiento de la red de transmisión con mayores costos para la red pública. Los consumidores industriales demandan un poder ininterrumpido y por lo tanto son más dispuesto a invertir en respaldo y / o generadores locales. Celdas de combustible y microturbinas son ampliamente vistos como excelentes generadores de pequeña escala para mejorar la confiabilidad del sistema [5].

Calidad de la Energía: en muchos países en desarrollo, la energía de la red todavía se empaña con el número de problemas de calidad de energía como huecos de tensión y

desviaciones de frecuencia. Estos problemas necesitan Sistemas de almacenamiento de energía para la gestión energética de energías renovables en sistemas de generación distribuida que sean confiables y mejorados. Las DG pueden ser llevadas fácilmente a juego para mejorar la calidad de la energía y entregar potencia confiable al consumidor [5].

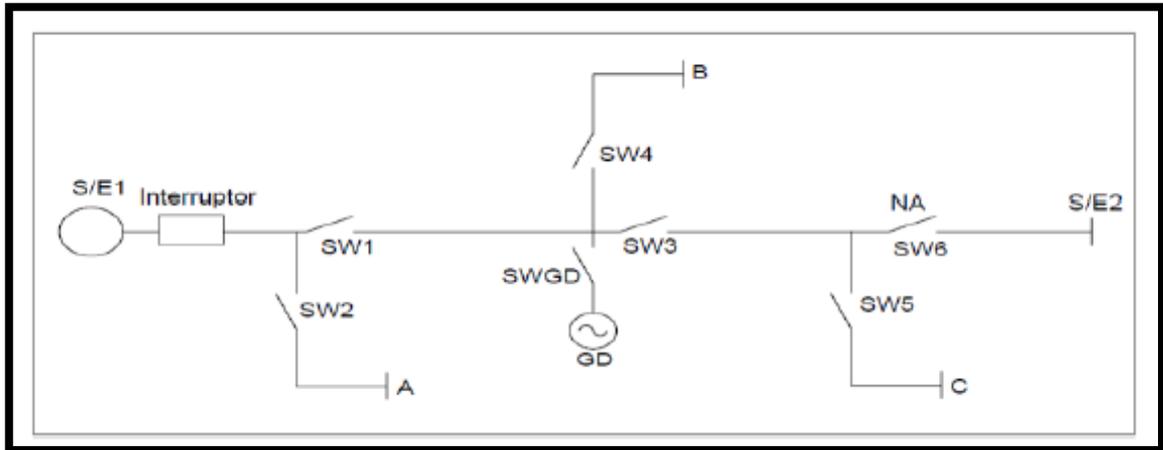
Reducir la Congestión de la Red: para proporcionar energía a áreas remotas que están ubicadas lejos desde las instalaciones de generación conduce a una fuerte congestión de las líneas de transmisión. De ahí el establecimiento de las GD cercanas a dichas áreas evita la carga de la red y evita la inversión los costos para la creación de nuevas líneas.

Beneficios Adicionales: GD también sirve para algunos propósitos adicionales, como el aplazamiento de las actualizaciones de frecuencia y duración, reducción de pérdidas en líneas de transmisión, soporte de red y servicios auxiliares. Por lo tanto, la GD puede beneficiar la entrega del sistema de energía y movilizar nuevos mercados. Pueden ser completamente descentralizados, sirviendo a un consumidor localizado independiente de la red operando con la red para abordar una parte de la carga local. Por lo tanto, cualquier GD que muestre confiabilidad en su interfaz de conectividad puede actuar como una microrred. El control de la microrred plantea muchas dificultades y necesita estrategias extensas para ordenar la operabilidad en base a las condiciones de la red. También necesitan estrategias de protección únicas para abordar cualquier problema que surja internamente para no afectar la red eléctrica. Por lo tanto, una GD puede implementarse a 69 kV. [5].

Sistema Radial con Generación Distribuida

[6] El sistema radial de la Fig. 1, con la alimentación desde la S/E1, y con la alternativa de alimentación desde S/E 2, se puede mejorar la confiabilidad si se añade a la red una fuente de generación distribuida.

Figura 1. Sistema de distribución radial con GD



Fuente: [6].

En caso de una falla en S/E1 se dispondría de dos fuentes alternativas: S/E2 y GD, para suplir el requerimiento de energía de los consumidores. De esta manera se mejora la continuidad y la calidad de servicio/energía.

Fundamentos probabilísticos para el cálculo de la confiabilidad de los sistemas de generación distribuida [7]

La teoría de las probabilidades se introduce en estos cálculos para:

- Evaluar la probabilidad de salida forzada de una unidad de generación.
- Establecer el modelo estructural de las unidades en el sistema.

Generación de energía eléctrica

Se produce en alternadores o generadores, en términos generales, consiste en transformar alguna clase de energía, ya sea esta química, mecánica, térmica o luminosa, entre otras, en energía eléctrica.

De todos los tipos de energía, la que mayor uso ha recibido es la energía eléctrica. Esta popularidad está dada por su difusión tanto en la economía de las naciones como en el uso doméstico.

La energía eléctrica tiene las cualidades de fácil generación y distribución hasta los consumidores. También por su fácil transformación a otras formas de energía, tales como la térmica, luminosa, mecánica entre otras. El rápido desarrollo del aprovechamiento de la energía eléctrica estimuló a la construcción de grandes plantas generadoras capaces de convertir la

energía mecánica, obtenida mediante otras fuentes de energía primaria en energía eléctrica, constituyendo el primer escalón del Sistema de suministro eléctrico.

La mayor parte de la energía eléctrica generada a nivel mundial proviene de los tres primeros tipos de centrales reseñados: Termoeléctricas, Hidroeléctricas y Eólicas.

Todas estas centrales, excepto las Fotovoltaicas, tienen en común el elemento generador, constituido por un alternador, movido mediante una turbina que será distinta dependiendo del tipo de energía primaria utilizada. La demanda de energía eléctrica de una ciudad, región o país tiene una variación a lo largo del día. La generación de energía eléctrica debe seguir la curva de demanda y a medida que aumenta la potencia demandada, se debe incrementar el suministro. [4]

Los generadores eléctricos

El polo positivo que se caracteriza por su permanente falta de electrones

- El polo negativo que es el opuesto, caracterizado por un exceso de electrones permanente

Si desea utilizar generadores eléctricos para alimentar determinados equipos, existe una oferta muy diferenciada, y para diferentes tipos de necesidades. Puede encontrar generadores de corriente eléctrica de acuerdo con el tipo de funcionamiento, en particular:

- **Generadores mecánicos:** que recurren a la energía mecánica para colocar el generador en funcionamiento. Son los generadores más comunes en el sector de la industria y son también los que presentan, en relación con los demás, una capacidad de transformación de energía superior, así como los más eficientes y diversificados. Las empresas industriales normalmente utilizan este tipo de generadores.
- **Generadores solares:** tienen como función captar la energía solar, para transformarla en energía eléctrica y pueda ser utilizada en los más diversos equipos. Las placas solares de silicio son un ejemplo de generador solar.
- **Generadores térmicos:** son generadores que transforman la energía térmica en eléctrica. Convierte directamente la energía proveniente del calor, utilizándolo para la creación de energía. [8]

Tecnologías de generación.

Se presenta a continuación en la Tabla 3 se muestra una descripción de las tecnologías de generación que existen en la actualidad, ordenadas teniendo en cuenta su madurez y grado de penetración en el mercado, de mayor a menor. También es importante resaltar que, si bien algunas de las tecnologías se utilizan principalmente para generación a gran escala, se dan casos en que su aprovechamiento a pequeña escala puede ser una solución viable.

En función de la energía primaria que utilicen, estas tecnologías se pueden clasificar en dos grandes categorías: GD no renovable y GD renovable. El primer grupo comprende aquellas tecnologías que utilizan como energía primaria combustibles fósiles: motores alternativos, turbinas de gas, pilas de combustible y micro turbinas, en la Tabla 3 se puede observar la tecnología de generación.

Tabla 3. Tecnología de generación

Tecnologías	Energía primaria	Potencia (MW)	Rendimiento eléctrico (%)	Coste inversión (\$/kw)	Disponibilidad comercial
Motor alternativo	Gas natural, diésel, biogás, propano	0.08 – 20	28- 42% (gas natural) 30-50% (diésel) 80-85% (cogeneración)	625-1 125	Actual
Turbinas de gas	Gas natural, biogás, propano	0.25 - 500	25 -60 % 70-90% (Cogeneración)	750 – 1750 (CHP)	Actual
Mini hidráulica	Agua	0.01 - 10	80 -90%	1 250 – 2 250	Actual
Eólica	Viento	0.005 – 5	43%	1 375 – 2 125	Actual
Solar térmica	Sol	0.0002 – 200	13 – 21 %	4 375 – 10 000	Actual

Fotovoltaica	Sol	<0.001- 0.1	14%	6 250 – 8 750	Actual
Biomasa	Biomasa		32%	1 875 – 3 125	Actual
Microturbinas	Gas natural, Hidrogeno, Propano, Diésel, biogás	0.025 – 0.4	25 30 % Hasta 85% (cogeneración)	1 125 – 2 500	Actual (limitada)

Fuente: [9]

Se considera como rendimiento eléctrico la relación entre energía eléctrica que se genera y la energía primaria aportada. Esta magnitud tiene más relevancia a la hora de comparar tecnologías de generación en las que la energía primaria aportada no sea renovable.

Eólica

En las instalaciones de aprovechamiento de la energía eólica, la fuente primaria de energía es el viento, aire en movimiento originado por la diferencia de presión provocada por el calentamiento desigual de la superficie terrestre por efecto del Sol.

Al incidir sobre las palas del aerogenerador (elementos móviles), la energía cinética del viento se transforma en energía de presión, transmitiendo un giro al eje. Finalmente, un generador transforma esta energía mecánica en energía eléctrica.

Hoy en día, la gran mayoría de las aplicaciones de la energía eólica son consideradas generación centralizada -por tratarse de grandes parques eólicos- o generación remota por estar situados lejos del punto de consumo.

Fotovoltaica

El Efecto Fotovoltaico (FV) es la base del proceso mediante el cual una célula FV convierte la luz solar en electricidad. La luz solar está compuesta por fotones, o partículas energéticas. Estos fotones son de diferentes energías, correspondientes a las diferentes longitudes de onda del espectro solar. Cuando los fotones inciden sobre una célula FV. Pueden ser reflejados o absorbidos, pueden pasar a su través. Únicamente los fotones absorbidos generan electricidad. Cuando un fotón es absorbido, la energía del fotón se transfiere a un electrón de un átomo de la

célula. Con esta nueva energía, el electrón es capaz de escapar de su posición normal asociada con un átomo para formar parte de una corriente en un circuito eléctrico. Las partes más importantes de la célula solar son las capas de semiconductores, ya que es donde se crea la corriente de electrones. Estos semiconductores son especialmente tratados para formar dos capas diferentes dopadas (tipo p y tipo n) para formar un campo eléctrico, positivo en una parte y negativo en otra. Cuando la luz solar incide en la célula se liberan electrones que pueden ser atrapados por el campo eléctrico, formando una corriente eléctrica. Es por ello que estas células se fabrican partir de este tipo de materiales, es decir, materiales que actúan como aislantes a baja temperatura y como conductores cuando se aumenta la energía [10]

Aspectos de calidad considerados en el Ecuador

Las instalaciones de transmisión tendrán el equipamiento para atender los requerimientos operativos del SNI, así como también aquellos equipos que son necesarios para mantener la seguridad de sus sistemas ante perturbaciones externas. [11]

La calidad de la potencia y del servicio de transmisión y conexión en el SNI, se evaluarán considerando los parámetros siguientes:

Calidad de la potencia:

- Nivel de voltaje.
- Contenido armónico de voltaje.
- Balance de voltajes.
- Contenido armónico de corriente.
- Balance de corrientes.
- Factor de potencia de la carga.

Calidad del servicio de transmisión y conexión:

- Duración de las interrupciones.

Frecuencia de interrupciones. Las instalaciones de transmisión tendrán el equipamiento para atender los requerimientos operativos del SNI, así como también aquellos equipos que son necesarios para mantener la seguridad de sus sistemas ante perturbaciones externas. [11]

La calidad de la potencia y del servicio de transmisión y conexión en el SNI, se evaluarán considerando los parámetros siguientes:

Calidad de la potencia:

- Nivel de voltaje.
- Contenido armónico de voltaje.
- Balance de voltajes.
- Contenido armónico de corriente.
- Balance de corrientes.
- Factor de potencia de la carga.

Calidad del servicio de transmisión y conexión:

- Duración de las interrupciones.
- Frecuencia de interrupciones.

Definición de confiabilidad

Es la probabilidad para que un aparato o sistema funcione sin fallar durante un periodo de tiempo especificado. De otra forma, la confiabilidad se puede definir también como la probabilidad en que un sistema realizará su función prevista sin incidentes por un período de tiempo especificado y bajo condiciones indicadas. [12]

Análisis de la confiabilidad

La ejecución de un análisis de la confiabilidad en un producto o un sistema debe incluir muchos tipos de exámenes para determinar cuan confiable es el producto o sistema que pretende analizarse. Una vez realizados los análisis, es posible prever los efectos de los cambios y de las correcciones del diseño para mejorar la confiabilidad del ítem. Los diversos estudios del producto se relacionan, vinculan y examinan conjuntamente, para poder determinar la confiabilidad del mismo bajo todas las perspectivas posibles, determinando posibles problemas y poder sugerir correcciones, cambios y/o mejoras en productos o elementos. [13]

Confiabilidad en sistemas de potencia

[14] El sistema eléctrico de potencia es el conjunto de instalaciones y equipos para producir, transportar y distribuir energía eléctrica a los usuarios de una zona, ciudad, región o país

El sistema eléctrico de potencia está conformado por muchos componentes interconectados entre sí, los cuales dependen el uno del otro para un funcionamiento óptimo y una mayor confiabilidad.

Confiabilidad en generación

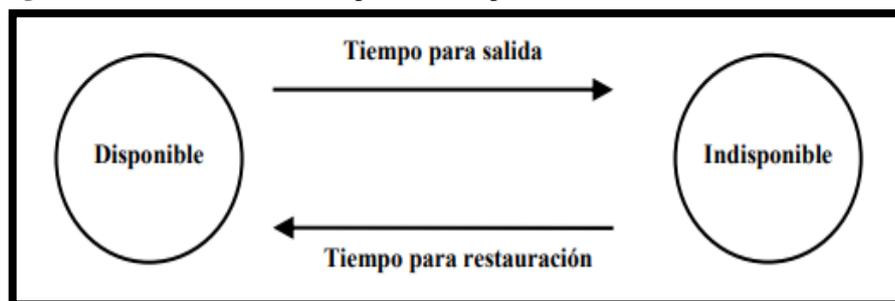
[15] Un sistema de generación de energía eléctrica está compuesto por instalaciones y equipos de sistemas de potencia cuya función es producir energía eléctrica a partir de fuentes primarias de energía.

La confiabilidad de un sistema de generación se define como la habilidad que tiene el sistema para atender la demanda y su análisis a largo plazo es desarrollado bajo condiciones estacionarias de operación, despreciando la influencia de los subsistemas de transmisión y distribución.

Modelo de confiabilidad de los componentes

Para todos los componentes del SG se utiliza el modelo de dos estados mostrado en la Figura 4. La construcción del modelo se hace ajustando los datos operativos de tiempos para salida y tiempos para restauración del componente a una función de probabilidad dada, se puede identificar los modelos de los estados para las competencias. [16]

Figura 2: Modelo de los estados para las competencias



Fuente: [16].

Dos tipos de modelo de dos estados pueden implementarse para cada uno de los componentes:

- Modelo para análisis de disponibilidad: Incluye salidas planeadas (mantenimiento preventivo, inspecciones) y no planeadas (fallas, vandalismo, accidentes, etc). Se habla entonces de tiempos para salida y para restauración.
- Modelo para análisis de fallas: Solo considera las salidas no planeadas que corresponden a fallas propias del componente. En este caso se habla de tiempo para falla y tiempo para reparación.

Confiabilidad de los sistemas de generación tradicional.

Dentro de este tipo de generación se toma en cuenta las disponibilidades y las indisponibilidades de las máquinas. Los tiempos de funcionamiento, en la Tabla 4, se presenta la relación de tiempo en los estados de la máquina.

Tabla 4: Relación de tiempo en los estados de la máquina.

Horas del periodo de análisis (HPA) (Número de horas la unidad estuvo en el estado activo)					
Horas Disponibles (HD) (Número de horas la unidad estuvo en el estado de disponibilidad)		Horas indisponibles (HID) (Número de horas la unidad estuvo en el estado de indisponibilidad)			
Horas en servicio (HS)	Horas en reserva en frío (HR)	Horas en salida planeada (HSP)	Horas en salida no planeada (HSNP)		
			<table border="1"> <tr> <td>Horas en salida forzada (HSF)</td> <td>Horas en manto (HM)</td> </tr> </table>	Horas en salida forzada (HSF)	Horas en manto (HM)
Horas en salida forzada (HSF)	Horas en manto (HM)				

Fuente: [17]

En función a la Tabla anterior se puede determinar la indisponibilidad (FOR)

$$FOR = \frac{HSF}{HS+HSF} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Dentro del análisis se debe considerar las probabilidades de operación (P_c) y falla (Q_c) se determinan mediante la ecuación 2.

$$P_c = \frac{\mu_c}{\lambda_c + \mu_c}, \quad Q_c = \frac{\lambda_c}{\lambda_c + \mu_c} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

λ_c : Tasa de fallos

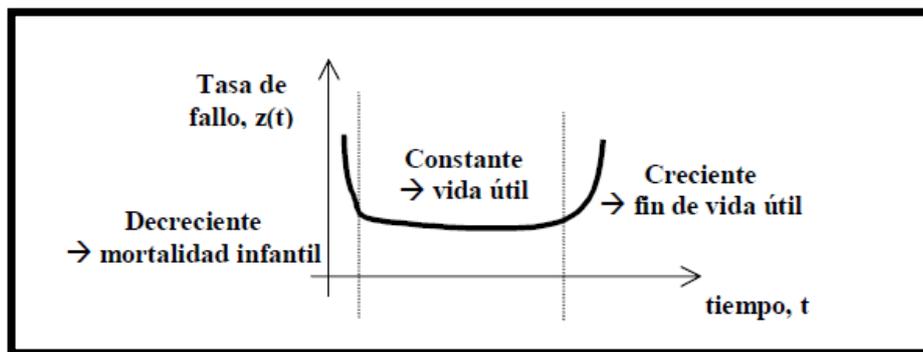
μ_c : Tiempo de reparación

Esto permite evaluar el índice de la confiabilidad.

Confiabilidad de un sistema fotovoltaico

En la Fig. 5 se observa la tasa de fallos variable en tres etapas. Dentro de los sistemas fotovoltaicos se puede determinar su confiabilidad analizando la tasa de fallas λ .

Figura 3: Tasa de fallas variables en tres etapas



Fuente: [15]

En la etapa final la tasa de fallos aumenta λ por el desgaste del material.

MTTF o MTFF (Tiempo medio hasta la falla o Tiempo promedio hasta la primera falla)

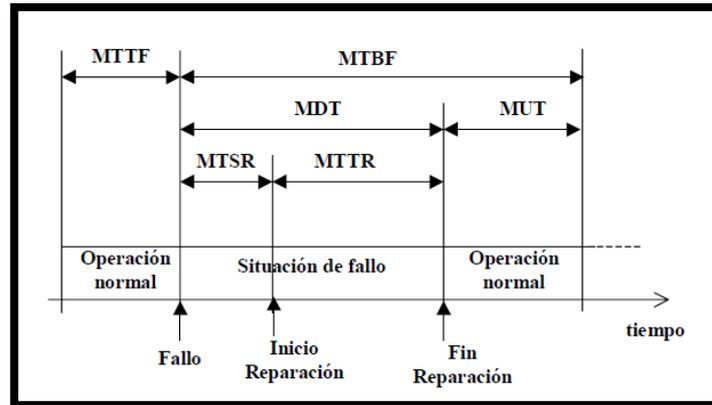
El tiempo medio hasta en primer fallo de un elemento se obtiene de la integración de la función de confiabilidad en la ecuación:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Este parámetro es importante ya que refleja el tiempo de funcionamiento sin problemas de un componente o de un sistema.

A continuación se muestra la localización temporal de cada una de las variables de valor medio dentro de la secuencia de operación de un sistema:

Figura 4: Funciones de los medios en una secuencia de operación de un sistema reparable.



Fuente: [8].

MTBF: Tiempo Medio entre las fallas

El tiempo medio entre fallos es el tiempo medio que transcurre entre la aparición de un fallo

MTTR: Tiempo mínimo de reparación

Es el tiempo de recuperación propiamente dicho, una vez que se tienen los repuestos necesarios y el técnico se encuentra en el lugar.

La potencia de salida de una célula fotovoltaica está determinada por la cantidad de radiación solar en un sitio particular. Muchos lugares en todo el mundo rara vez han registrado datos de radiación solar.

La salida de la matriz de un sistema fotovoltaico SF se calcula utilizando la ecuación 4.

Energía solar disponible:

$$P_{fv} = f_{fv} Y_{fv} \left(\frac{I_T}{I_S} \right) \quad \text{(Ecuación 4).}$$

Donde:

f_{fv} : Factor de reducción del SF

Y_{fv} : Capacidad de la matriz SF

I_T : Radiación solar fotovoltaica incidente en la matriz SF.

I_S : 1 kW/m².

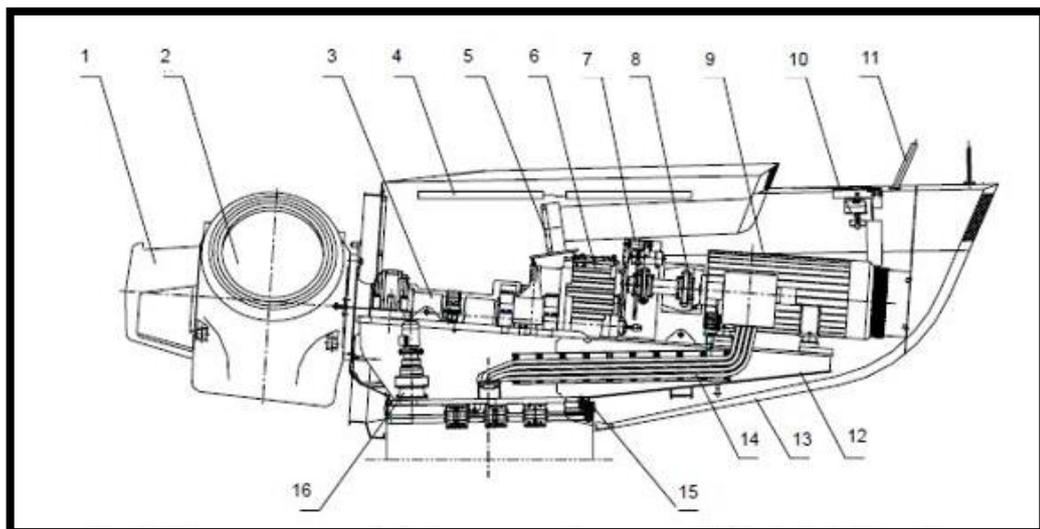
Tabla 5: Modelo de confiabilidad de un sistema fotovoltaico.

Estado	Cap. (MW)	Prob.	Estado	Cap. (MW)	Prob.
1	29,80	0,0688	11	8,80	1,2E-39
2	26,40	0,1229	12	7,73	1,0E-10
3	22,90	0,108	13	7,63	1,0E-39
4	19,87	1,2E-10	14	6,00	6,6E-40
5	18,00	0,0689	15	5,90	0,0476
6	17,60	2,1E-10	16	3,93	8,1E-11
7	15,27	1,8E-10	17	3,87	5,7E-40
8	12,00	1,2E-10	18	1,97	4,6E-40
9	11,60	5,9E-02	19	0	0,5248
10	9,93	6,6E-40			

Fuente: [18].

Confiabilidad de un sistema eólico.

Las energías renovables, en particular la eólica, ocuparán un lugar importante en las próximas décadas, marcadas por el agotamiento de las fuentes de combustible fósil, en la Fig. 5 se detalla [19].

Figura 5: Esquema general de aerogeneradores marca goldwind.

Fuente: [19]

Descripción de la figura 5:

1. Soporte.
2. Rotor.
3. Eje principal.
4. Sistema de luces.
5. Sistema de refrigeración.
6. Caja multiplicadora.
7. Frenos.
8. Enganche.
9. Generador.
10. Elevador de cadena.
11. Veleta, Anemómetro.
12. Bastidor de base.
13. Góndola.
14. Cable de alimentación.
15. Corona de orientación.
16. Mecanismo de orientación.

El estudio queda limitado al análisis de sistemas por separado, sin incluir el análisis de las posibles secuencias accidentales. Las salidas principales son la determinación de las probabilidades de fallas de componentes, sus combinaciones de fallos y la probabilidad de fallo del sistema.

Para el cálculo de la tasa de fallo se usa la ecuación 6:

$$\lambda_{\text{anual}} = \frac{NF}{T_{\text{observ}}} \quad \text{(Ecuación 5).}$$

Dónde:

λ_{anual} .- Es la tasa anual de fallos específica.

NF.- Es cantidad de fallos reportados en el período.

T_{observ} .- Es el tiempo de observación (en horas).

Finalmente, de la comparación entre las tasas de fallo genérica y específica, se dedujo la mayor, que fue la utilizada en el análisis.

La Siguiete ecuación 6, se la utilizada para los análisis de indisponibilidades por mantenimientos, eventos externos y asociadas al sistema eléctrico, o sea por causas externas, donde Q es la indisponibilidad y $T_{\text{indisponible por maquina}}$ es el tiempo de indisponibilidad por máquina:

$$Q = \frac{T_{\text{indisponible por maquina}}}{T_{\text{observ}}} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

$T_{\text{indisponible por maquina}}$ - Tiempo de indisponibilidad por máquina

T_{observ} - Es el tiempo de observación (en horas).

Modelo de los aerogeneradores

Una vez conocida la velocidad del viento en el lugar donde se pretende instalar el parque eólico, se puede estimar a partir de la relación funcional mostrada en la ecuación (8) la potencia que puede entregar cada aerogenerador, para luego conocer la del parque mediante la ecuación que se detalla a continuación. La relación no lineal entre la velocidad del viento y la potencia del aerogenerador considerado está dada por,

$$P(SW_t) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 \leq SW_t < V_{ci} \\ (A + B \times (SW_t) + C \times (SW_t)^2) \times P_r & \text{si } V_{ci} \leq SW_t < V_r \\ P_r & \text{si } V_r \leq SW_t < V_{co} \\ 0 & \text{si } SW_t \geq V_{co} \end{cases} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde, P_r , V_{ci} , V_r y V_{co} son la potencia nominal de salida, la velocidad del viento necesaria para el arranque, la velocidad del viento para la cual el aerogenerador alcanza su potencia nominal y la velocidad de viento de corte del aerogenerador respectivamente. Las constantes A, B, y C dependen de V_{ci} , V_r y V_{co} tal como se expresa en las ecuaciones siguientes.

$$A = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left\{ V_{ci}(V_{ci} + V_r) - 4V_{ci}V_r \left[\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right]^3 \right\} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

$$B = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left\{ 4(V_{ci} + V_r) \left[\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right]^3 - (3V_{ci} + V_r) \right\} \quad \text{(Ecuación 9)}$$

$$C = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left\{ 2 - 4 \left[\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right]^3 \right\} \quad \text{(Ecuación 10)}$$

La potencia que entrega el parque PwtWtg está dada por la ecuación siguiente,

$$P_{wtWtg} = \sum_{i=1}^N [P(SW_i)]_i \quad (\text{Ecuación 11})$$

Tabla 6: Tasa de fallas de cada componente.

No	Componentes principales	Código genérico	Tasa de fallo horaria o Indisponibilidad (Q)
1	Rotor + Buje	R -B	2,85E-06
2	Tren de Potencia	TRENPOT	1,14E-06
3	Palas	PALA	5,70E-05
4	Sistema Hidráulico	SIST-HID	1,71E-04
5	Caja Multiplicadora	CM	9,51E-05
6	Sistema Eléctrico (otros)	SIST-ELECT	1,9E-05
7	Electrónica de Control	ELE-CONT	4,8E-03
8	Generador	GENER	2,28E-06
9	Sensores	SENSOR	5,71E-06
10	Góndola	GOND	2,28E-06
11	Sistema de Frenos	FRENO	2,28E-06
12	Sistema de Orientación	ORIENT	1,90E-05
13	Mantenimiento	MTTO	Q=2,4E-3
14	Manipulación o afectación de red	RED	Q=1,7E-2
15	Meteorológicos	METEORO	Q=4,2E-2

Fuente: [20]

Tabla 7: Datos de falla de la turbina de viento.

Componentes de la Unidad de Viento	Tasa de Falla	Tiempo promedio de reparación
Torre	0.006	104.1
Aspas y sistema de control de paso	0.052	91.6
Sistema de desviación	0.026	259.4
Sistema de Frenado	0.005	125.4
Caja de cambios	0.045	256.7
Generadores	0.021	210.7
Convertidores	0.067	106.6
Sistema de Control	0.050	184.6
Sensores	0.054	49.4
Transformadores	0.020	200
Sistema Equivalente	0.346	51.8

Fuente: [21]

Método de frecuencias para la obtención de la confiabilidad.

Frecuencia y duración Es el método más difundido dada su simplicidad y la analogía existente con los circuitos eléctricos.

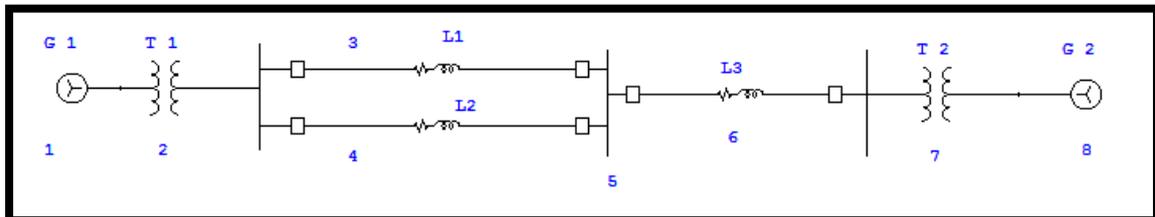
Cada componente del circuito primario se representa como un bloque definido por una tasa media de salidas o fallas (λ) y un tiempo medio de restauración o reparación (μ).

Los índices de confiabilidad de los puntos de carga se obtienen haciendo reducción consecutiva de los componentes ubicados entre la fuente y el punto de carga utilizando fórmulas definidas para las combinaciones serie y paralelo de componentes

Confiabilidad topológica.

El comportamiento funcional de la mayor parte de los sistemas realizables puede ser representado por un diagrama (circuito) cuyos nodos representan los elementos o subsistemas y las uniones la relación funcional entre uno y otros. Para mayor claridad consideración el siguiente ejemplo con el diagrama unifilar de un Sistema Eléctricos de Potencia:

Figura 6: Diagrama unifilar de un sistema eléctrico de potencia.

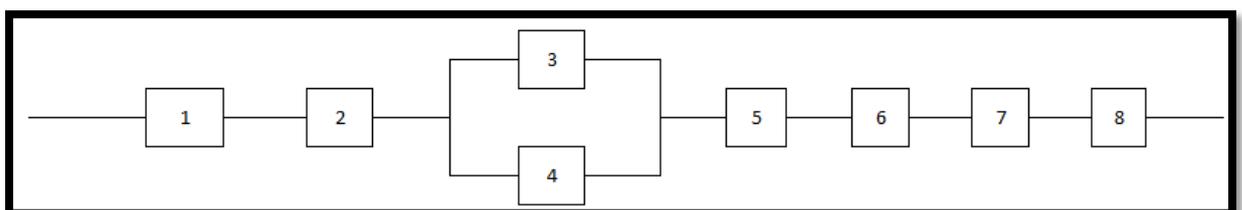


Fuente: [22].

El sistema está compuesto por dos centrales generadoras, dos subestaciones de transformación, de maniobras y tres líneas de transmisión.

El diagrama topológico que toma en cuenta estos subsistemas:

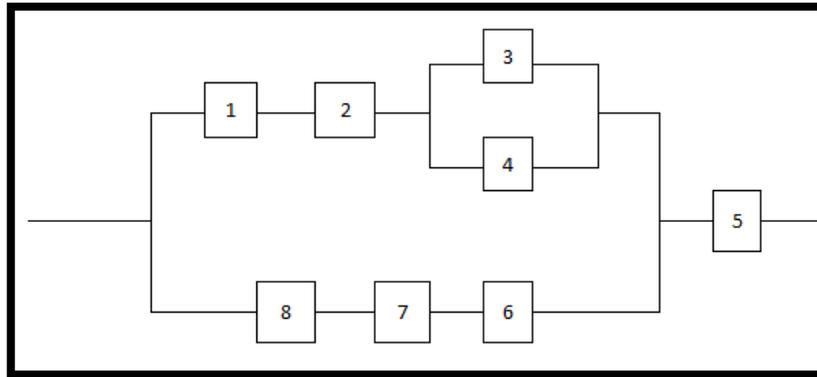
Figura 7: Diagrama de bloques de un sistema.



Fuente: [22]

La relación funcional entre los elementos puede ser diferente según el concepto que se tenga de su funcionamiento correcto, así por ejemplo si se quiere alimentar una carga desde la subestación N° 2 y esta carga puede ser alimentada por cualquiera de las dos centrales, el circuito representativo será:

Figura 8: Diagrama de barras Alimentación a una carga desde una subestación.



Fuente: [22]

Se debe observar que la falla de los elementos que están en paralelo no produce una falla del cumplimiento del objetivo establecido, los que no pasan cuando falla la subestación S_2 , (nodo 5); si falla esta última la carga ya no puede ser alimentada. [22]

Software de simulación

Software ETAP

ETAP es la herramienta más completa de análisis y control para el diseño, simulación y operación de sistemas de potencia eléctricos de generación, distribución e industriales.

ETAP ofrece una serie de programas totalmente integrados incluyendo flujo de carga, cortocircuito, coordinación y selectividad de protecciones, dimensionado de cables, estabilidad transitoria, flujo de potencia óptimo y más. Su diseño modular permite que sea configurado de acuerdo a las necesidades de cualquier empresa, desde sistemas de potencia pequeños, a los más grandes ETAP es la herramienta más completa de análisis y control para el diseño, simulación y operación de sistemas de potencia eléctricos de generación, distribución e industriales [23].

ETAP ofrece una serie de programas totalmente integrados incluyendo flujo de carga, cortocircuito, coordinación y selectividad de protecciones, dimensionado de cables, estabilidad transitoria, flujo de potencia óptimo y más. Su diseño modular permite que sea configurado de

acuerdo a las necesidades de cualquier empresa, desde sistemas de potencia pequeños, a los más grandes [23].

Calculo económico.

Índices orientados a carga y energía.

Uno de los parámetros importantes requeridos en la evaluación de los índices es la demanda promedio en cada punto de carga. La demanda media, C_m , está dada por:

Siendo f_c Factor de carga y D_{max} la demanda máxima.

$$C_m = \frac{\text{Energía Total}}{\text{tiempo}} = f_c \times D_{max} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

Índice de energía no suministrado (ENS): definido como energía total no suministrada por el sistema.

$$ENS = \sum C_m \times U_i \quad \text{(Ecuación 13)}$$

Energía promedio no soportada (ENSM):

$$C_m = \frac{\sum C_m \times U_i}{\sum N_i} = f_c \times D_{max} \quad \text{(Ecuación 14)}$$

[24]

9. HIPÓTESIS

Como cambia los índices de confiabilidad en un Sistema Eléctrico de Potencia usando generación distribuida con diferentes escenarios de operación.

10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL

Nivel de Investigación.

Investigación Explicativa

Para el desarrollo del proyecto se empleara este tipo de investigación, mismo que analizara mediante la simulación del sistema eléctrico de potencia con generación distribuida se obtendrá índices de confiabilidad con diferentes escenarios de operación.

Tipo de investigación.

Investigación Experimental.

Se optó por este tipo de investigación ya que se analizará la simulación del sistema eléctrico de potencia con generación distribuida en Etap ya que el mismo permite ingresar parámetros para determinar la confiabilidad y determinar sus índices para la propuesta.

11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Ecuaciones a emplear para los cálculos correspondientes:

Calculo de la indisponibilidad (U o For) en función de las tasas de falla y tiempos de reparación.

$$For = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad \text{(Ecuación 15)}$$

Calculo de disponibilidad (A) en función de las tasas de falla y tiempos de reparación

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad \text{(Ecuación 16)}$$

$$A = \frac{1}{1 + (\lambda * r)} \quad \text{(Ecuación 17)}$$

Calculo de disponibilidad total en serie (A_T)

$$A_T = A_1 * A_2 * \dots * A_n \quad \text{(Ecuación 18)}$$

Calculo de la disponibilidad en paralelo

$$A_T = 1 - \prod_{\alpha=1}^n (1 - A_{\alpha}) \quad \text{(Ecuación 19)}$$

Calculo del tiempo medio de falla, (MTTF)

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = \text{año} \quad \text{(Ecuación 20)}$$

Calculo de tiempo medio de reparación (r)

$$r = \frac{1}{\mu} = \text{h} \quad \text{(Ecuación 21)}$$

Calculo de las tasas de falla en serie λ_s

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad \text{(Ecuación 22)}$$

Calculo de las tasas de falla en paralelo λ_p

$$\lambda_p = \lambda_1 * \lambda_2 (r_1 + r_2) \quad \text{(Ecuación 23)}$$

Calculo de los tiempos de reparación en serie

$$r_s = \frac{\sum(\lambda_i * r_i)}{\lambda_s} \quad \text{(Ecuación 24)}$$

Calculo de los tiempos de reparación en paralelo

$$r_p = \frac{r_1 * r_2}{r_1 + r_2} \quad \text{(Ecuación 25)}$$

Método de Markov

El método de Markov se utiliza para describir sistemas con elementos que pueden encontrarse en un número finito de estados pero que además funcionen en un espacio continuo en el tiempo; es decir, si un elemento falla y es reemplazado o reparado, se restablece la condición de operación normal del sistema. [25]

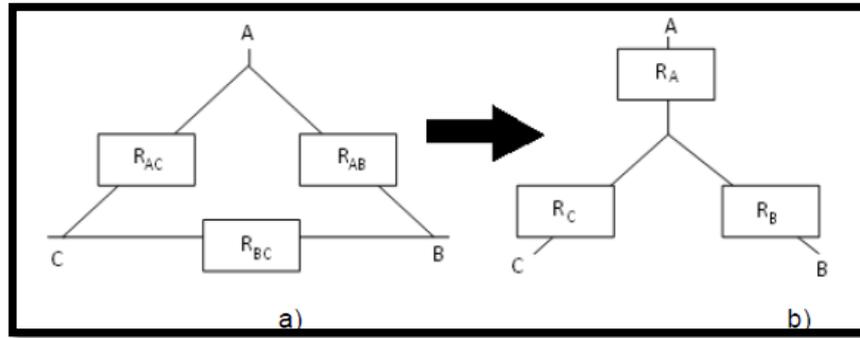
Métodos de reducción de redes

Muchos sistemas pueden representarse mediante bloques. Los elementos que conforman cada una de estas redes están conectados en serie, paralelo, mallados o en alguna combinación de estas configuraciones. No obstante, el sistema y su modelo de confiabilidad no necesariamente tienen la misma topología. [25]

Para la reducción de redes es necesario la utilización de las ecuaciones 21, 22, 23 y 24.

Transformación delta - estrella

Consiste en transformar una configuración en delta a estrella o viceversa con el objetivo de simplificar la configuración y obtener un sistema en serie o en paralelo [25]

Figura 9: Configuración de confiabilidad a) delta y b) estrella.

Fuente: [25]

A continuación se detallan las ecuaciones para la transformación a estrella:

$$R_A = \sqrt{\frac{[1-(1-R_{AC})(1-R_{CB}R_{AB})][1-(1-R_{CB})(1-R_{AC}R_{AB})]}{[1-(1-R_{AB})(1-R_{AC}R_{CB})]}} \quad \text{(Ecuación 26)}$$

$$R_B = \sqrt{\frac{[1-(1-R_{AB})(1-R_{AC}R_{CB})][1-(1-R_{CB})(1-R_{AC}R_{AB})]}{[1-(1-R_{AC})(1-R_{CB}R_{AB})]}} \quad \text{(Ecuación 27)}$$

$$R_C = \sqrt{\frac{[1-(1-R_{AC})(1-R_{CB}R_{AB})][1-(1-R_{AB})(1-R_{AC}R_{CB})]}{[1-(1-R_{CB})(1-R_{AC}R_{AB})]}} \quad \text{(Ecuación 28)}$$

Datos para el desarrollo de la simulación.

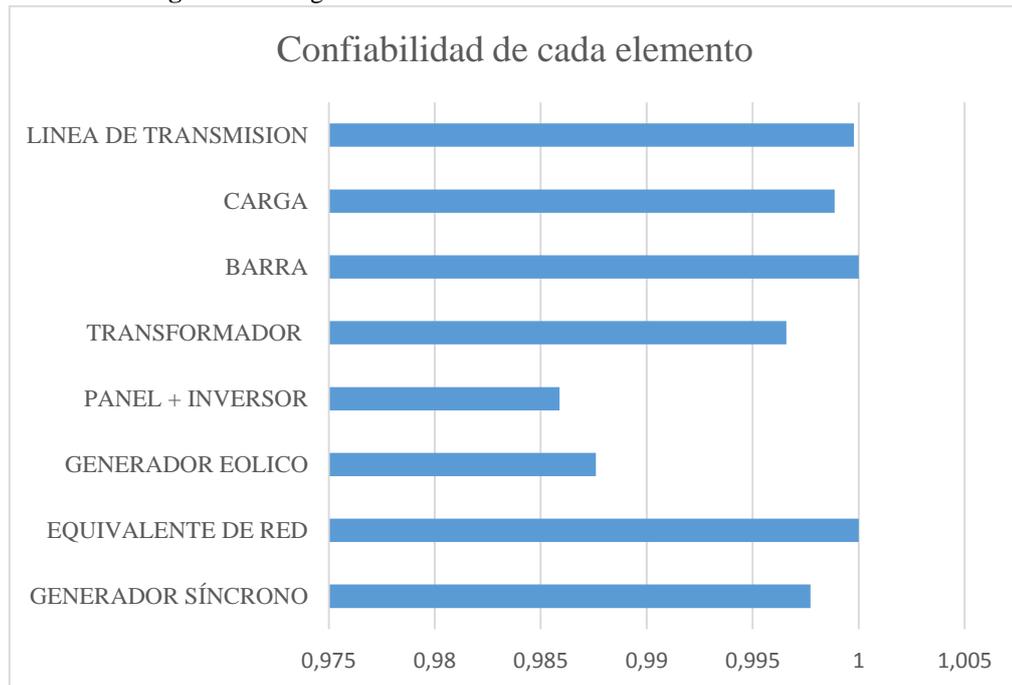
Tabla 8. Datos para el desarrollo de la simulación.

DATOS GENERALES DE LOS ELEMENTOS						
ELEMENTO	λ (f/año)	μ (r/año)	MTTF (AÑO)	MTTR (HORAS)	A	U (FOR)
GENERADOR SÍNCRONO	1	438	1	20	0,997722096	0,002277904
EQUIVALENTE DE RED	0	0	0	0	1	0
GENERADOR EÓLICO	5,5	438	0,181818182	20	0,987598647	0,012401353
PANEL + INVERSOR	12,54	876	0,079744817	10	0,985886961	0,014113039
TRANSFORMADOR	0,15	43,8	6,666666667	200	0,996587031	0,003412969
BARRA	0,001	4380	1000	2	0,999999772	2,2831E-07
CARGA	0,2	175,2	5	50	0,998859749	0,001140251
LINÉA DE TRANSMISIÓN	0,246	1095	4,06504065	8	0,999775393	0,000224607

Fuente: [Autores].

Para la generación de la Tabla 8 sus datos fueron emitidos de manera propia de los autores y aproximados a datos reales, una vez obtenidos se ingresó en cada elemento y mediante la utilización de la ecuación número 16 se obtuvo la confiabilidad de cada uno de los mismos para posteriormente graficarlos en un diagrama de barras el cual se detalla en la figura 10.

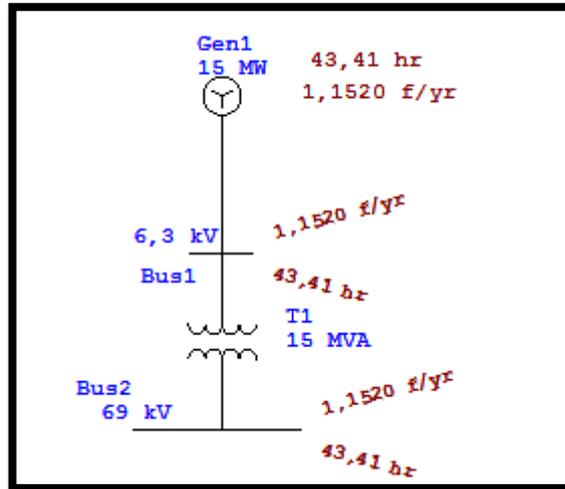
Figura 10: Diagrama de barras de la confiabilidad de cada elemento.



Fuente: [Autores]

Como primer análisis se desarrolló un sistema radial con cada uno de los elementos que van a emplearse en el sistema en anillo para determinar la confiabilidad de cada sistema de generación el mismo que constaba con generador, barra, transformador, barra, línea, barra y carga como se puede observar en la figura 11.

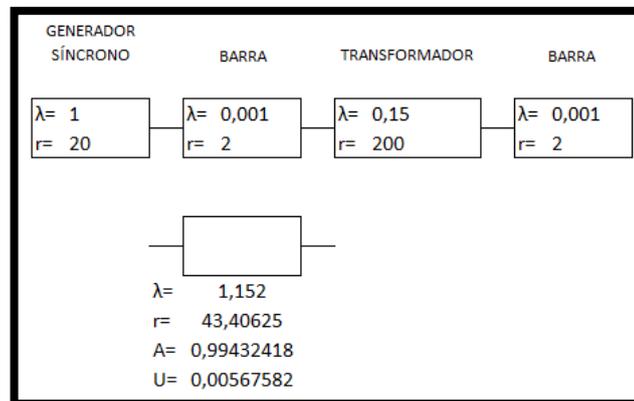
Figura 11: Simulación de un sistema de generación radial en Etap



Fuente: [Autores].

Aplicando el método de Markov y de reducción de red se obtuvo los dos parámetros requeridos para el análisis en un diagrama de bloques es así que al obtener la frecuencia de falla y el tiempo de reparación se obtuvo la confiabilidad del sistema radial, planteado como primer hecho.

Figura 12: Diagrama de bloques del sistema radial para el cálculo de la confiabilidad.



Fuente: [Autores].

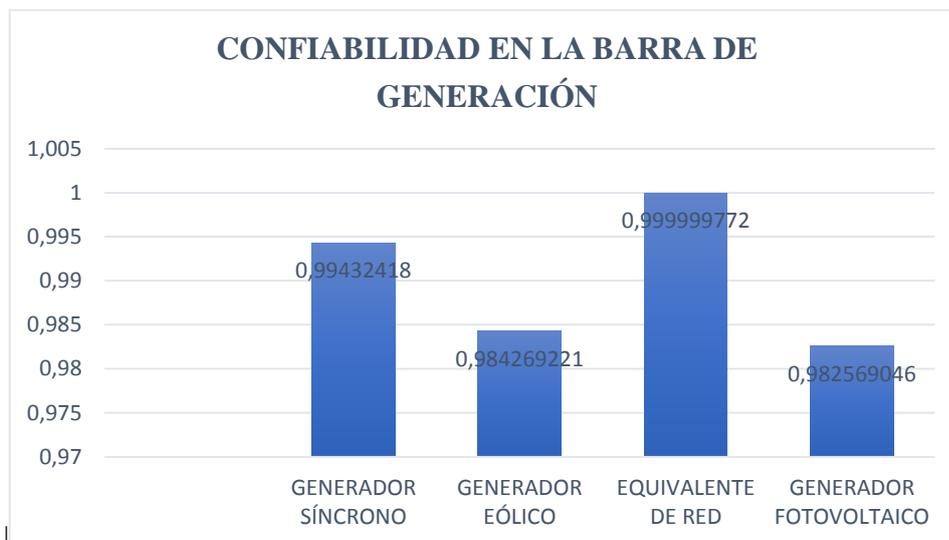
Una vez realizado este procedimiento al evaluar cada una de las generaciones en sistemas radiales se determinó la confiabilidad de cada una el cual se resume a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9: Confiabilidad en las barras de carga con diferente generación

CONFIABILIDAD EN LAS BARRAS DE GENERACIÓN CON DIFERENTES FUENTES	
GENERADOR SÍNCRONO	0,99432418
GENERADOR EÓLICO	0,984269221
EQUIVALENTE DE RED	0,999999772
GENERADOR FOTOVOLTAICO	0,982569046

Fuente: [Autores].

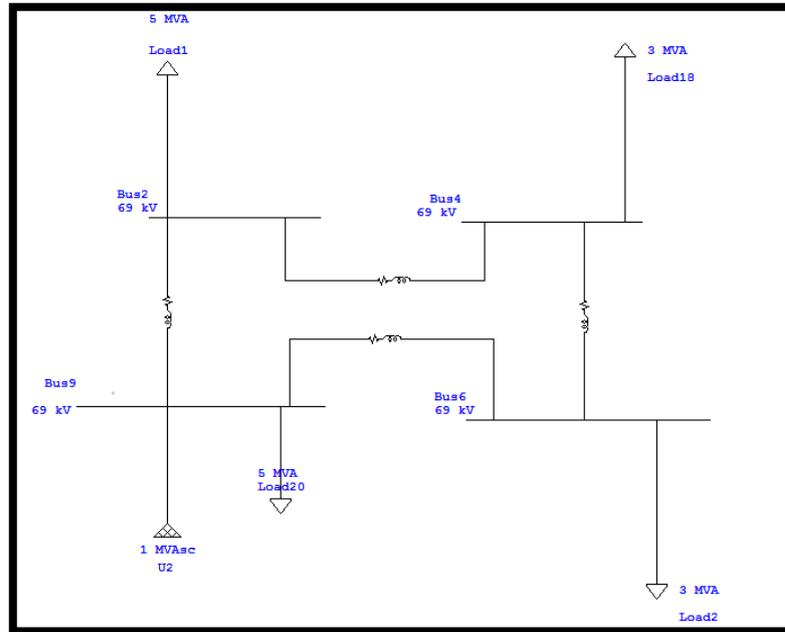
Para una mejor apreciación de los resultados se graficó los datos en un diagrama de barras para verificar la confiabilidad que presenta cada tipo de generación, determinando así que la mayor confiabilidad se presenta en el equivalente de red al considerarse como la barra slack de todo el sistema.

Figura 13: Diagrama de barras de la confiabilidad de cada sistema de generación radial.

Fuente: [Autores].

Una vez determinada la confiabilidad de un sistema radial se procedió analizar con cada sistema de generación en una configuración en anillo.

Figura 14: Configuración en anillo de un sistema eléctrico de potencia con generación distribuida a 69 kV



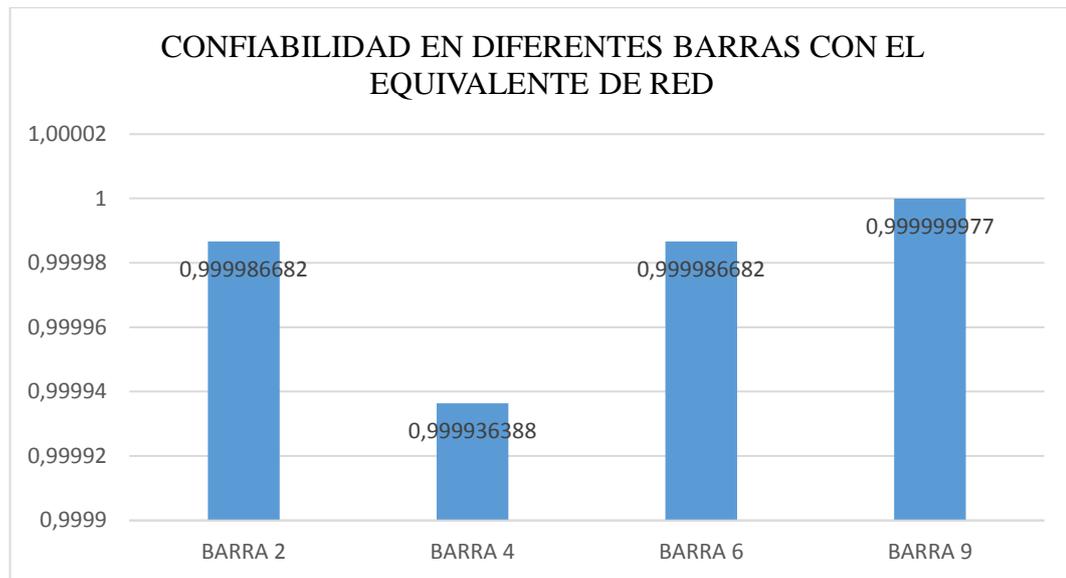
Fuente: [Autores].

Mediante la utilización de diagrama de bloques se determina la confiabilidad en cada una de las barras permitiendo así determinar la confiabilidad, obteniendo así los siguientes resultados. Los cálculos se detallan en el **Anexo 4**.

Tabla 10: Confiabilidad en diferentes barras con el equivalente de red

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON EL EQUIVALENTE DE RED	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,999986682
BARRA 4	0,999936388
BARRA 6	0,999986682
BARRA 9	0,999999977

Fuente: [Autores].

Figura 15: Confiabilidad en las barras mediante el uso del equivalente de red.

Fuente: [Autor].

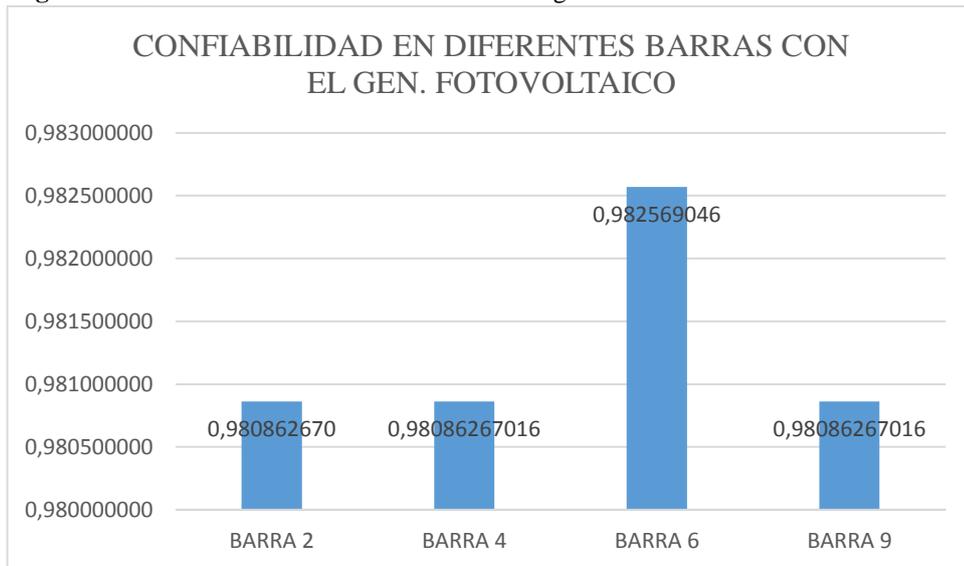
Al hacer un análisis en cada una de las barras se determina que la confiabilidad en las barras 2 y 6 son las mismas por tener las mismas características los elementos interconectados. Siendo la barra 4 que se encuentra más lejana del punto de generación en presenta una confiabilidad baja

De igual manera se obtiene la confiabilidad para el sistema de generación fotovoltaica el cual se detalla a continuación

Tabla 11: Confiabilidad en diferentes barras con generación fotovoltaica.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON EL GEN. FOTOVOLTAICO	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,980862670
BARRA 4	0,98086267016
BARRA 6	0,982569046
BARRA 9	0,98086267016

Fuente: [Autores].

Figura 16: Confiabilidad en diferentes barras con generación fotovoltaica

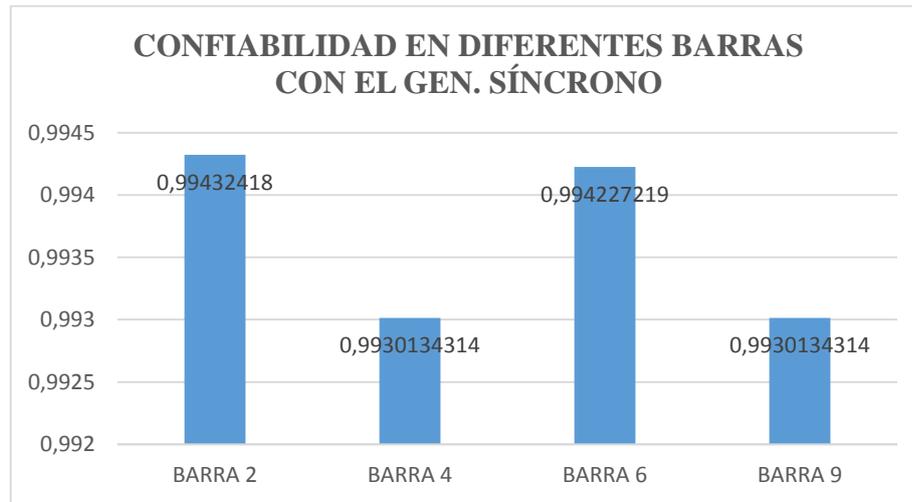
Fuente: [Autores].

Análisis de confiabilidad del sistema en anillo con generación síncrona el cual da los siguientes resultados mostrados en la Tabla 11.

Tabla 12: Confiabilidad en diferente barras con el generador síncrono.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON EL GEN. SÍNCRONO	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,99432418
BARRA 4	0,9930134314
BARRA 6	0,994227219
BARRA 9	0,9930134314

Fuente: [Autores].

Figura 17: Confiabilidad en diferentes barras con el generador síncrono

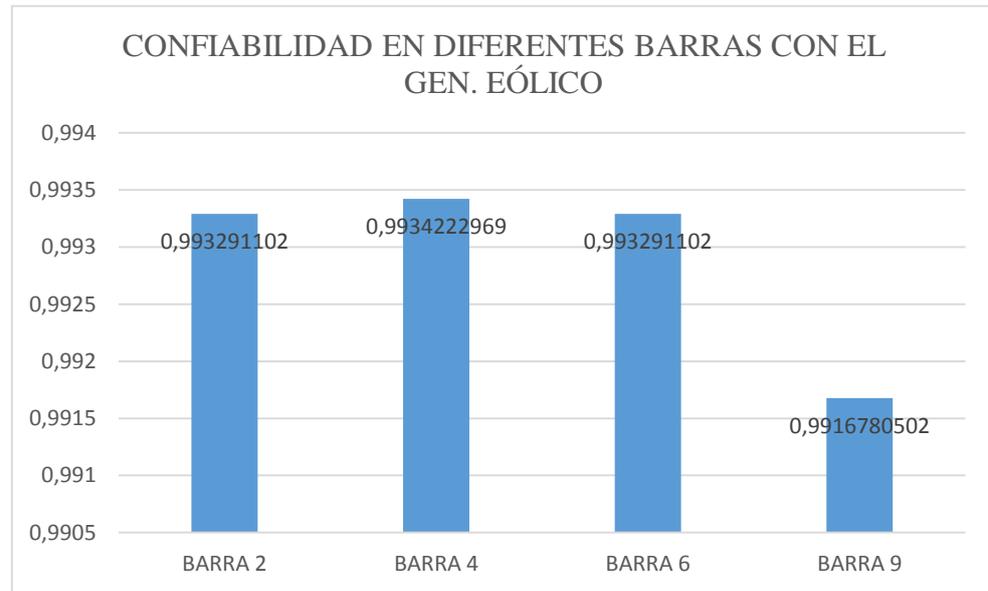
Fuente: [Autores].

Análisis de confiabilidad del sistema en anillo con generación Eólica el cual da los siguientes resultados mostrados en la Tabla 12.

Tabla 13: Confiabilidad en diferentes barras con generación eólica

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON EL GEN. EÓLICO	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,993291102
BARRA 4	0,9934222969
BARRA 6	0,993291102
BARRA 9	0,9916780502

Fuente: [Autores].

Figura 18: Confiabilidad con generación eólica.

Fuente: [Autores].

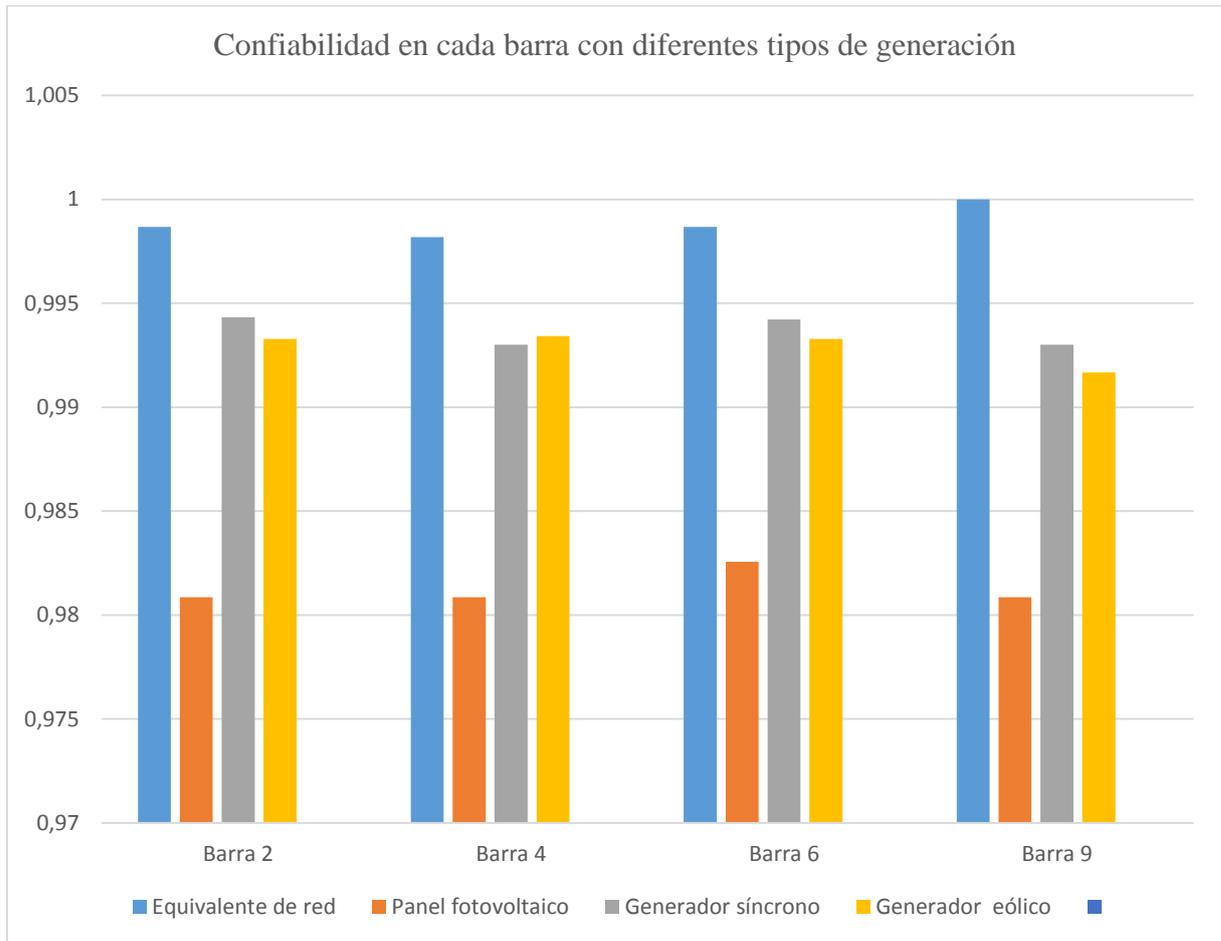
Una vez desarrollado el análisis con cada una de las generaciones se muestra en la tabla 14 el resumen con cada una de las generaciones.

Tabla 14: Resumen de confiabilidad con diferente tipo de generación en cada una de las barras.

Generación	Barra 2	Barra 4	Barra 6	Barra 9
Equivalente de red	0,998674027	0,998187078	0,998674027	0,999999772
Panel fotovoltaico	0,98086267	0,98086267	0,982569046	0,98086267
Generador síncrono	0,99432418	0,993013431	0,994227219	0,993013431
Generador eólico	0,993291102	0,993422297	0,993291102	0,99167805

Fuente: [Autores].

Figura 19: Confiabilidad de en cada barra con diferente tipo de generación.



Fuente: [Autores].

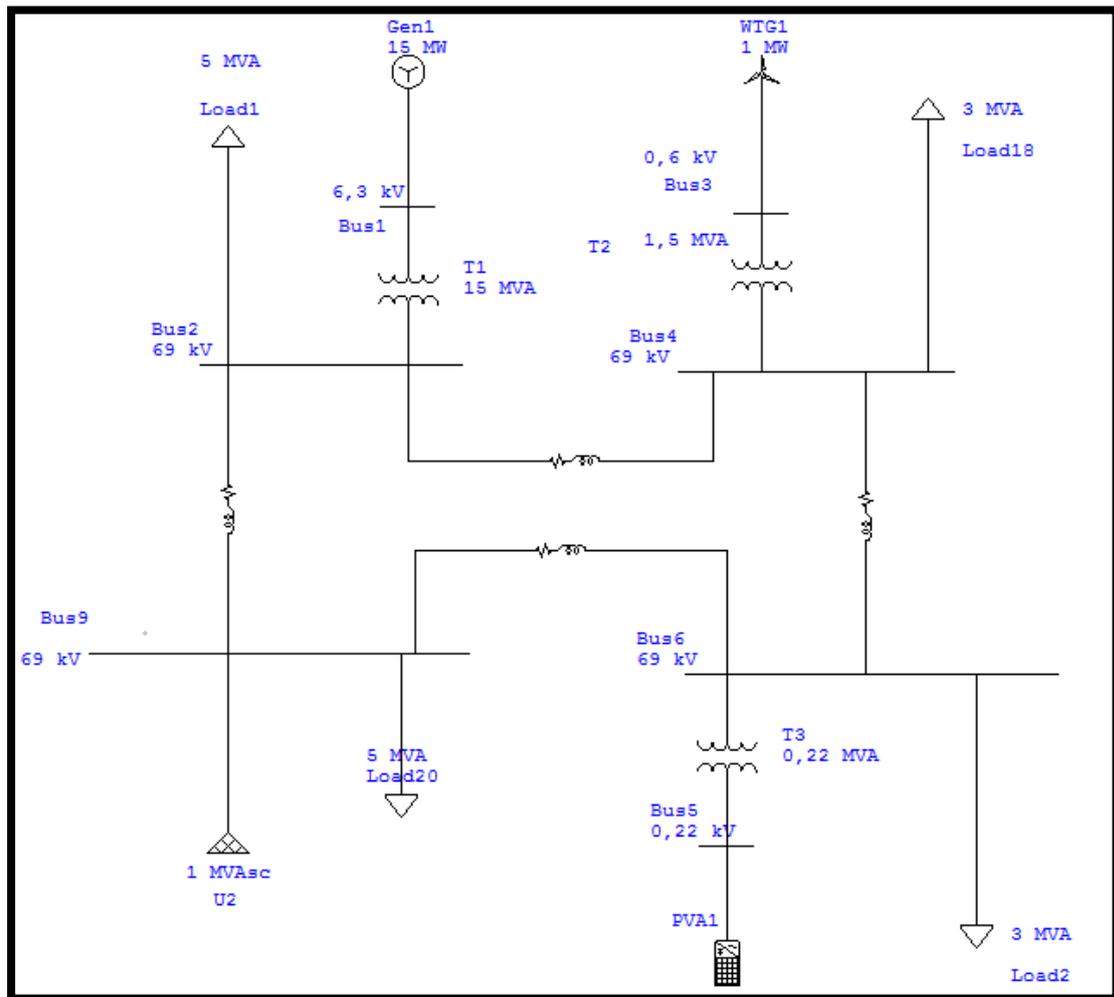
En la figura se demuestra cómo cada sistema de generación presenta variaciones en la red en anillo al funcionar de manera independiente dando como mejor aportación al sistema el equivalente de red y el de menor aportación el generador fotovoltaico.

Cuando se hace un análisis en un sistema radial o en anillo la confiabilidad depende de los elementos asociados al mismo. En el caso del sistemas en anillo la confiabilidad es dependiente del punto de análisis mientras más alejado sea el mismo la confiabilidad va a ser mucho menor.

Una vez determinado y verificado las confiabilidades del sistema de generación radial se procedió al análisis de los elementos en un sistema de generación distribuida en anillo empleado un generador síncrono, generador eólico, equivalente de red y generación fotovoltaica como se puede observar en la figura 20, para el posterior análisis de los diferentes escenarios, mediante el uso del software de simulación Etap.

En el sistema en anillo se encuentra estructurado por 4 tipos de generación las que se encuentran ubicadas en el siguiente orden; la generación síncrona se encuentra conectada a la barra 2, la eólica a la barra 4, la fotovoltaica en la barra 6 y el equivalente de red a la barra 9.

Figura 20: Sistema en anillo con GD para los diferentes escenarios de operación.



Fuente: [Autores].

Método 1

Análisis desde el punto de vista del Equivalente de red

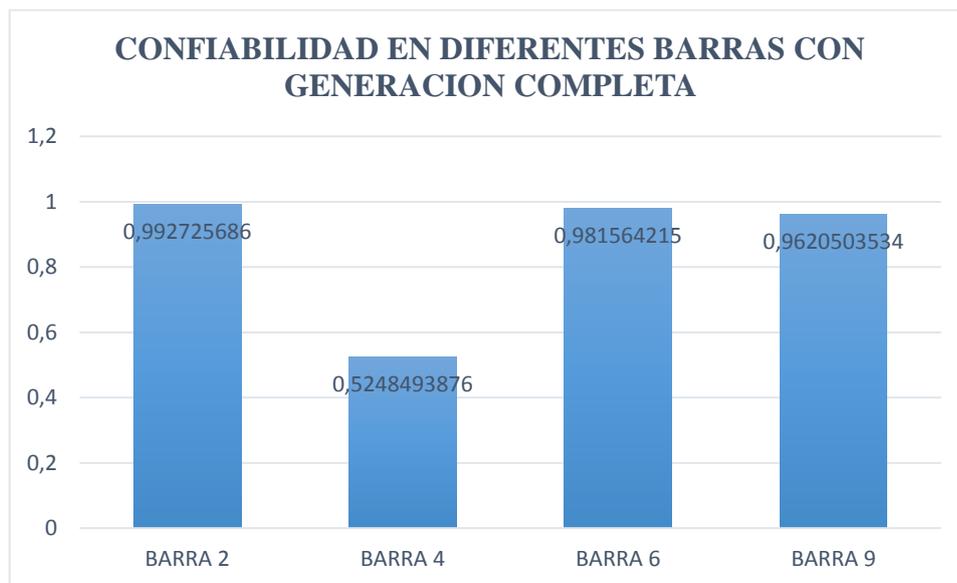
Equivalente de red + Generador Fotovoltaico + Generador Eólico + Generador Síncrono

Tabla 15: Confiabilidad en diferentes barras con generación completa.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN COMPLETA	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,992725686
BARRA 4	0,5248493876
BARRA 6	0,981564215
BARRA 9	0,9620503534

Fuente: [Autores].

Figura 21: Confiabilidad en diferentes barras con generación total



Fuente: [Autores].

Después del análisis desde el punto de vista del Equivalente de red se pudo constatar que la confiabilidad más baja en las barras se obtuvo en la barra 4, el cual se puede verificar en la figura 21, puesto que es la que se encuentra en el sitio más lejano del punto de análisis y por su tipo de generación.

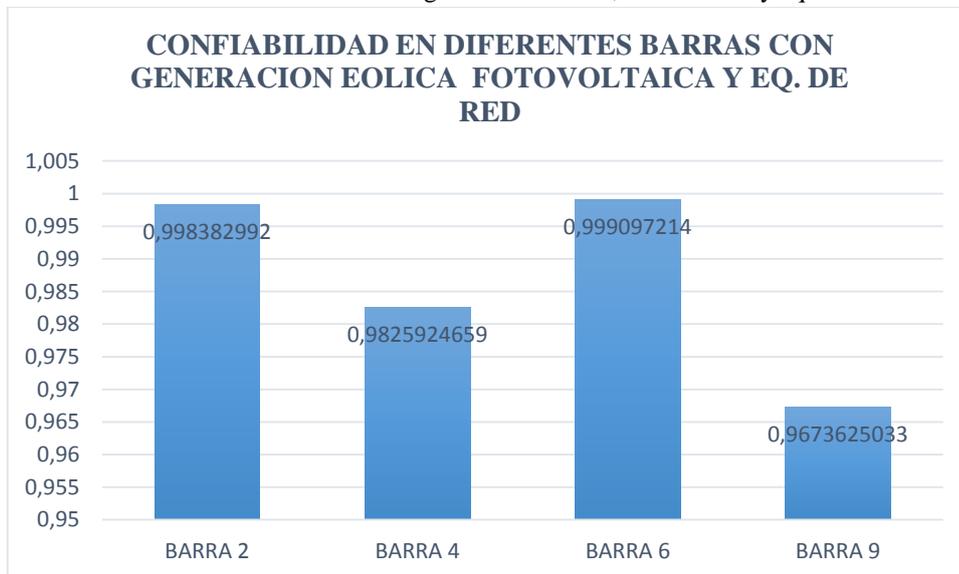
Equivalente de red + Generador Fotovoltaico + Generador Eólico

Tabla 16: Confiabilidad en diferentes barras con generación eólica, fotovoltaica y equivalente de red.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN EÓLICA, FOTOVOLTAICA Y EQ. DE RED	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,998382992
BARRA 4	0,9825924659
BARRA 6	0,999097214
BARRA 9	0,9673625033

Fuente: [Autores].

Figura 22: Confiabilidad en diferentes barras con generación eólica, fotovoltaica y equivalente de red.



Fuente: [Autores].

La confiabilidad analizada desde el equivalente de red, cuando el generador síncrono se encuentra en falla arroja los siguientes datos donde se puede constatar que la confiabilidad en la barra 9 donde se encuentra el mismo baja puesto que al depender de varios elementos en el sistema este disminuye, como se puede visualizar en la figura 22.

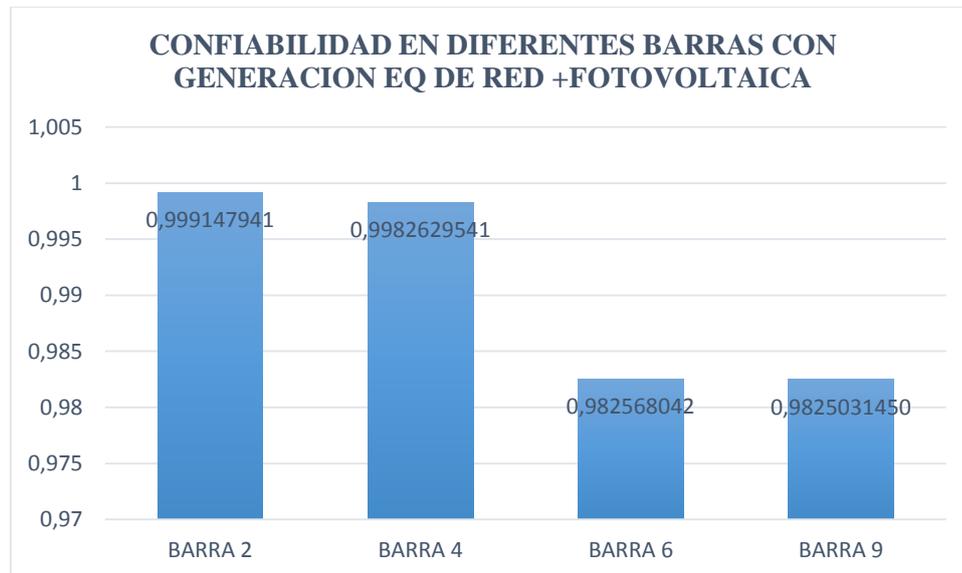
Equivalente de red + Generador Fotovoltaico

Tabla 17: Confiabilidad en diferentes barras con equivalente de red y generación fotovoltaica.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN EQ DE RED +FOTOVOLTAICA	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,999147941
BARRA 4	0,9982629541
BARRA 6	0,982568042
BARRA 9	0,9825031450

Fuente: [Autores].

Figura 23: Confiabilidad en diferentes barras con el equivalente de red y generación fotovoltaica.



Fuente: [Autores].

Para el análisis de la confiabilidad con el generador síncrono y el generador eólico fuera de servicio, se obtuvieron los siguientes datos; en la barra estudiada es donde se presenta la menor confiabilidad por su dependencia de los elementos asociados en el anillo.

Los valores de las barras 2 y 4, son donde mayor confiabilidad se puede observar ya que sus barras tienen los índices de confiabilidad elevados.

Análisis desde el punto de vista del Generador Síncrono

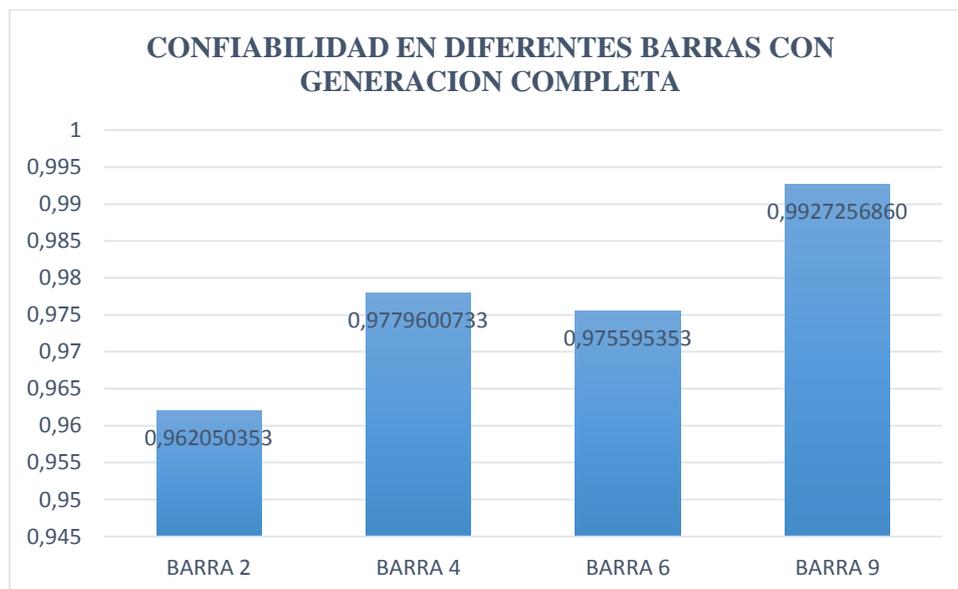
Generador Síncrono + Equivalente de red + Generador Fotovoltaico+ Generador Eólico

Tabla 18: Análisis desde el punto de vista del Generador Síncrono.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN COMPLETA	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,962050353
BARRA 4	0,9779600733
BARRA 6	0,975595353
BARRA 9	0,9927256860

Fuente: [Autores].

Figura 24: Confiabilidad en diferentes barras con generación completa



Fuente: [Autores].

Análisis desde el punto de vista del Generador Síncrono

Los índices de confiabilidad vista desde la barra 2 donde se encuentra el generador síncrono es baja al presentar un bajo índice de confiabilidad esto es provocado por que al tener dos generaciones con indicadores bajos interconectados, sus tiempos de reparación y frecuencia de falla aumentan en la barra de análisis.

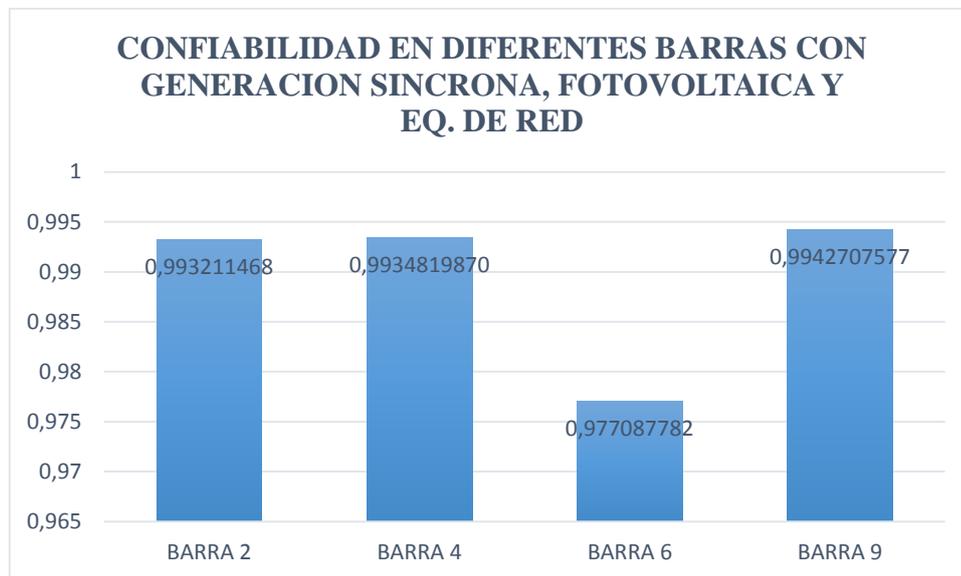
Generador Síncrono + Equivalente de red + Generador Fotovoltaico

Tabla 19: Confiabilidad en diferentes barras con generación síncrona, fotovoltaica y Equivalente de red.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN SÍNCRONA, FOTOVOLTAICA Y EQ. DE RED	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,993211468
BARRA 4	0,9934819870
BARRA 6	0,977087782
BARRA 9	0,9942707577

Fuente: [Autores].

Figura 25: Confiabilidad en diferentes barras con generación síncrona, fotovoltaica y Equivalente de red.



Fuente: [Autores].

Para el análisis de barra 2 se consideró la generación fotovoltaica y el equivalente de red, visto desde el punto de vista de la generación síncrona, descartando la generación eólica.

Al analizar las barras se puede visualizar que la generación síncrona y las fotovoltaicas presentes en las barras 2 y 6 respectivamente son bajas. Para el caso de la barra 2 este esta interconectada en serie con todo el sistema y para el caso de la barras 6 esta al ser analizada desde el punto de vista de la barra 2 se debe analizar mediante reducción de red, llegando a obtener un equivalente en paralelo.

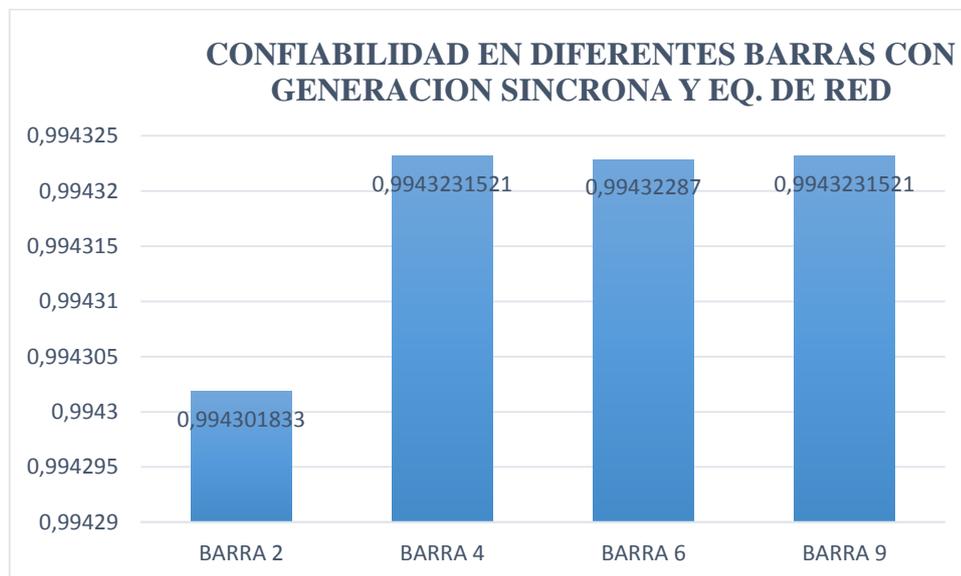
Generador Síncrono + Equivalente de red

Tabla 20: Confiabilidad en diferentes barras con generación síncrona y Equivalente de red.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN SÍNCRONA Y EQ. DE RED	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,994301833
BARRA 4	0,9943231521
BARRA 6	0,99432287
BARRA 9	0,9943231521

Fuente: [Autores].

Figura 26: Confiabilidad en diferentes barras con generación síncrona y Equivalente de red



Fuente: [Autores].

La confiabilidad que presenta las barras 4 y 6 son elevadas al no estar asociadas a otros elementos en serie, la barra 9 presenta una confiabilidad alta por que al estar conectada con el equivalente de red este mejora sus índices, por el contrario la barra 2 presenta una baja confiabilidad por depender de varios elementos en serie.

Análisis desde el punto de vista del Generador Eólico

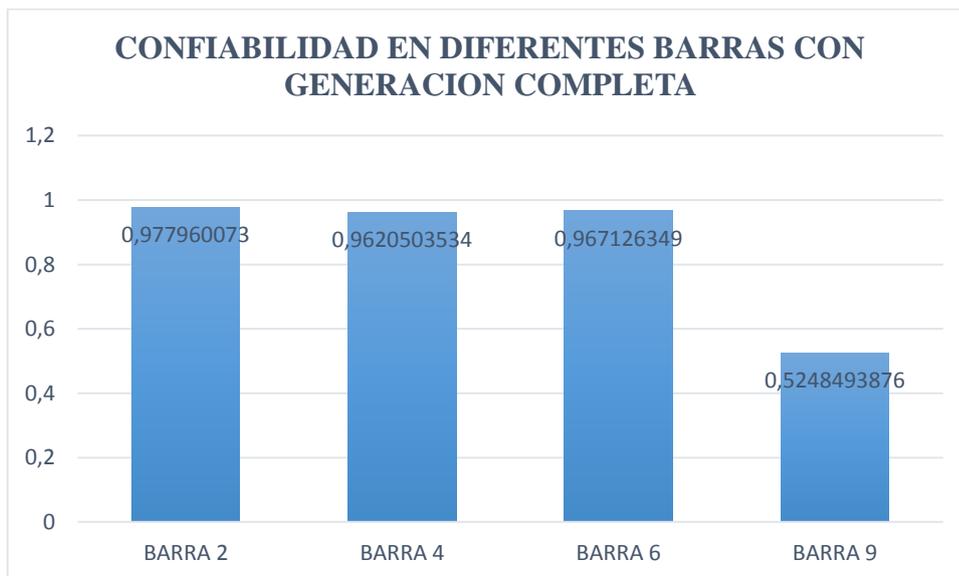
Generador Eólico + Equivalente de red + Generador Síncrono + Generador Fotovoltaico

Tabla 21: Confiabilidad en diferentes barras con generación completa.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN COMPLETA	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,977960073
BARRA 4	0,9620503534
BARRA 6	0,967126349
BARRA 9	0,5248493876

Fuente: [Autores].

Figura 27: Confiabilidad en diferentes barras con generación completa.



Fuente: [Autores].

Para el análisis desde el punto de vista de la barra 4 donde se encuentra la generación eólica con todos los elementos del sistema interconectados entre sí, se obtuvieron los siguientes resultados expresados en el diagrama de barras donde los índices de confiabilidad más bajos se encuentran en la barra 9 correspondiente al equivalente de red y en la barra de estudio estos valores arrojados por el cálculo son el primero por estar distante de la barra de referencia, y el segundo por el tiempo de reparación y la frecuencia de falla son altos en el generador eólico.

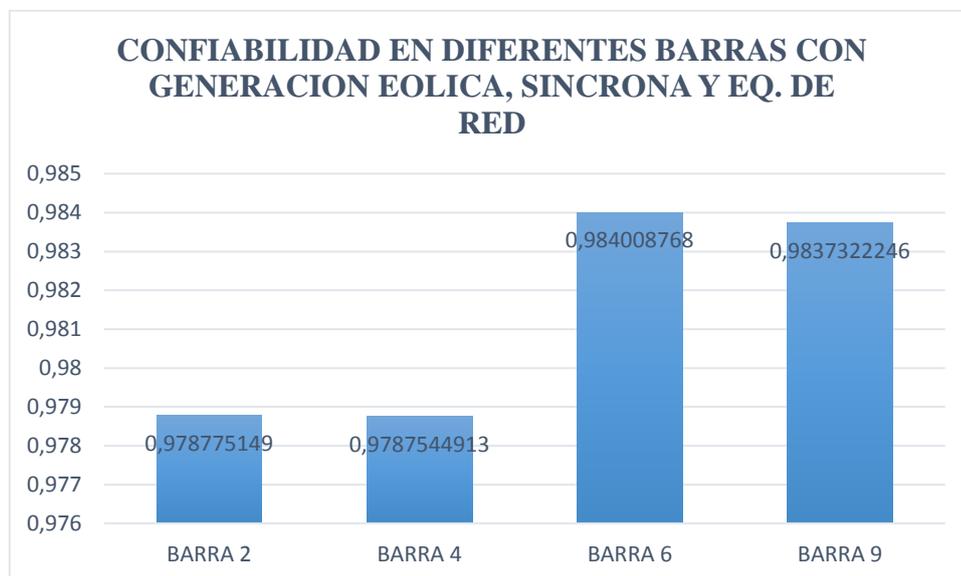
Generador Eólico + Equivalente de red +Generador Síncrono

Tabla 22: Confiabilidad en diferentes barras con generación eólica, síncrona y equivalente de red.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN EÓLICA, SÍNCRONA Y EQ. DE RED	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,978775149
BARRA 4	0,9787544913
BARRA 6	0,984008768
BARRA 9	0,9837322246

Fuente: [Autores].

Figura 28: Confiabilidad en diferentes barras con generación eólica, síncrona y equivalente de red.



Fuentes: [Autores].

Como se observa en la figura 28, en el diagrama de barras con la generación fotovoltaica fuera de servicio, el índice más bajo de confiabilidad se presenta en la barra de estudio (barra 2), esto ocurre porque al realizar su análisis en serie el panel fotovoltaico no tiene ningún aporte al sistema bajando índice entre el generador síncrono y el eólico, por el contrario el equivalente de red presenta un valor alto y esto ocurre por la confiabilidad propia el cual no presenta fallas.

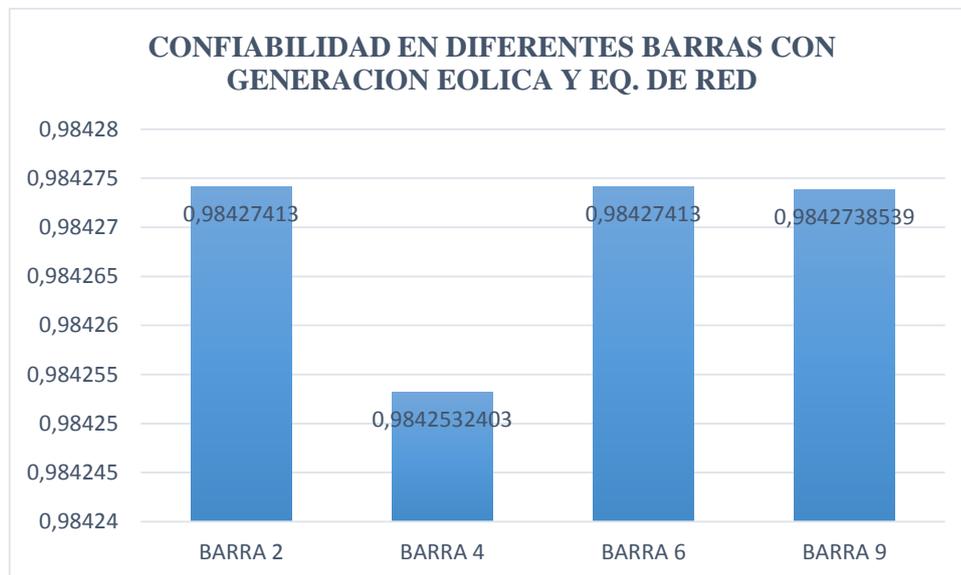
Generador Eólico + Equivalente de red

Tabla 23: Confiabilidad en diferentes barras con generación eólica, síncrona y equivalente de red.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN EÓLICA Y EQ. DE RED	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,98427413
BARRA 4	0,9842532403
BARRA 6	0,98427413
BARRA 9	0,9842738539

Fuente: [Autores].

Figura 29: Confiabilidad en diferentes barras con generación eólica y equivalente de red



Fuente: [Autores].

En el siguiente escenario la generación eólica y el equivalente de red están interconectados al sistema, y la generación síncrona y la generación fotovoltaica fuera de servicio, determinando así que el índice de confiabilidad más bajo en el sistema se presenta en la barra de generación de estudio con un 0,9842532403, al tener dos generaciones sin conectar, también por su frecuencia de falla y su tiempo de reparación altos.

Análisis desde el punto de vista del Generador Fotovoltaico

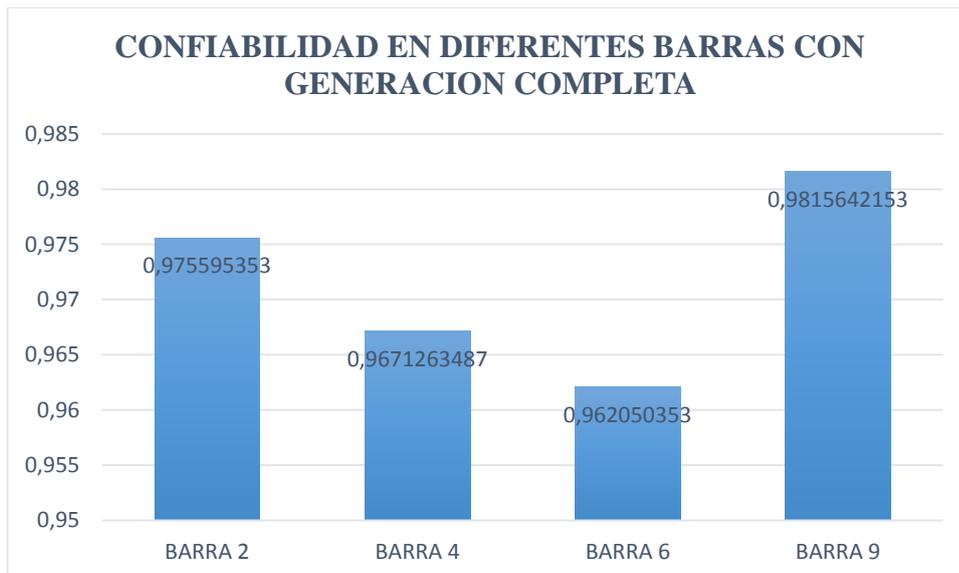
Generador Fotovoltaico + Equivalente de red + Generador Eólico + Generador Síncrono

Tabla 24: Confiabilidad en diferentes barras con generación completa.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN COMPLETA	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,975595353
BARRA 4	0,9671263487
BARRA 6	0,962050353
BARRA 9	0,9815642153

Fuente: [Autores].

Figura 30: Confiabilidad en diferentes barras con generación completa



Fuente: [Autores].

Para el siguiente análisis desde el punto de vista desde el generador fotovoltaico ubicado en la barras 6 del sistema, con todo sus elementos interconectados entre sí se puede apreciar que la menor confiabilidad se presenta en la barra 6 donde estudia esto ocurre por depender de su sistema de generación con índices bajos propio de los elementos asociados a la misma.

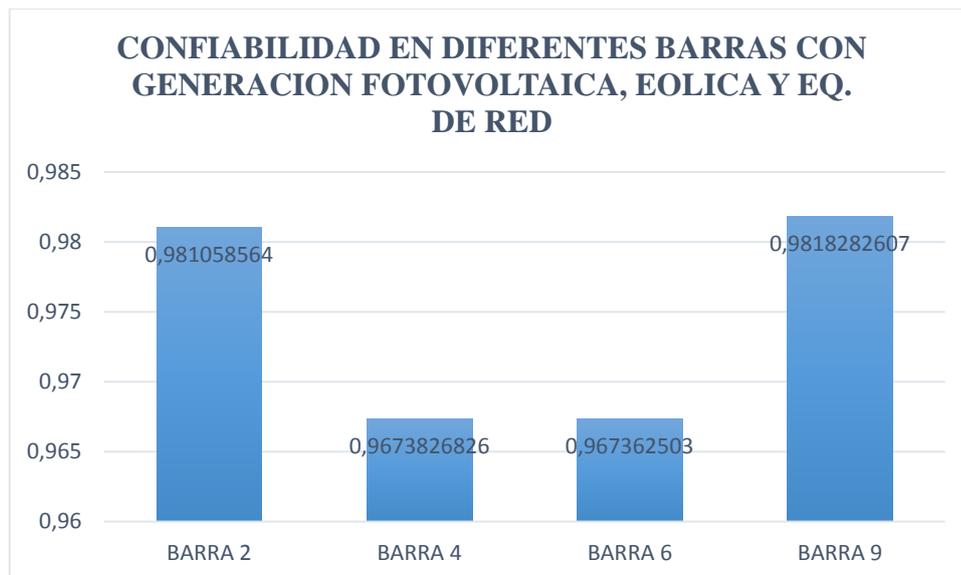
Generador Fotovoltaico + Equivalente de red + Generador Eólico

Tabla 25: Confiabilidad en diferentes barras con generación fotovoltaica, eólica y equivalente de red.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA, EÓLICA Y EQ. DE RED	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,981058564
BARRA 4	0,9673826826
BARRA 6	0,967362503
BARRA 9	0,9818282607

Fuente: [Autores].

Figura 31: Confiabilidad en diferentes barras con generación fotovoltaica, eólica y equivalente de red.



Fuente: [Autores].

Al sacar de servicio a la generación síncrona y realizar el análisis con respecto a la confiabilidad registrada en la barra de estudio se verifica que su índice es bajo esto ocurre puesto que los elementos presentes en esta barra tiene su tiempo de reparación y frecuencia de falla bajos, causando que al realizar las pruebas en el mismo, este presente una dependencia por los elementos asociados en serie.

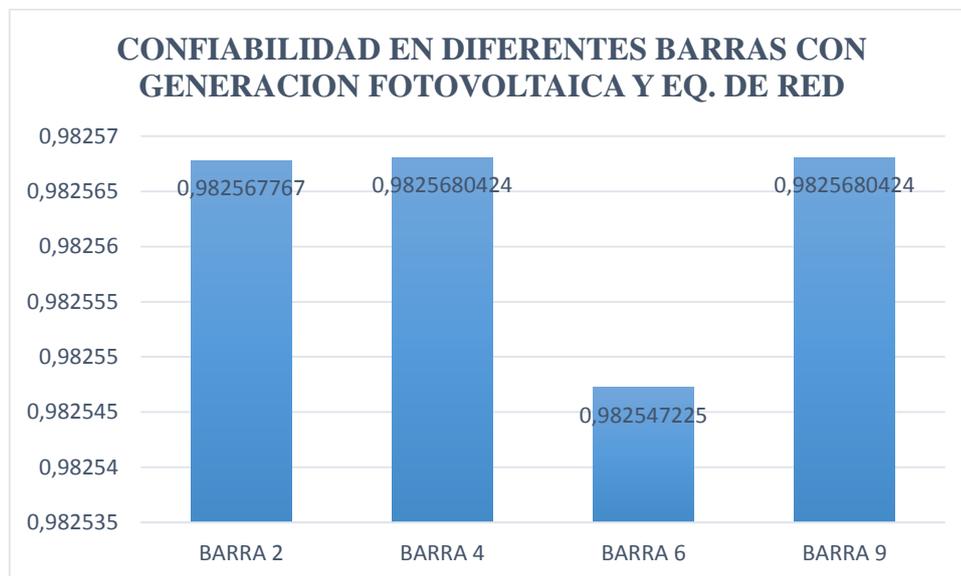
Generador Fotovoltaico + Equivalente de red

Tabla 26: Confiabilidad en diferentes barras con generación fotovoltaica y equivalente de red.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA Y EQ. DE RED	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,982567767
BARRA 4	0,9825680424
BARRA 6	0,982547225
BARRA 9	0,9825680424

Fuente: [Autores].

Figura 32: confiabilidad en diferentes barras con generación fotovoltaica y equivalente de red.



Fuente: [Autores].

Los índices de confiabilidad al tener generando únicamente la generación fotovoltaica y el equivalente de red, su resultado es bajo esto ocurre porque la única generación presente es la fotovoltaica dependiente de sí mismo ya que el equivalente de red siempre dependerá de otras fuentes de generación con una óptima confiabilidad.

Método 2

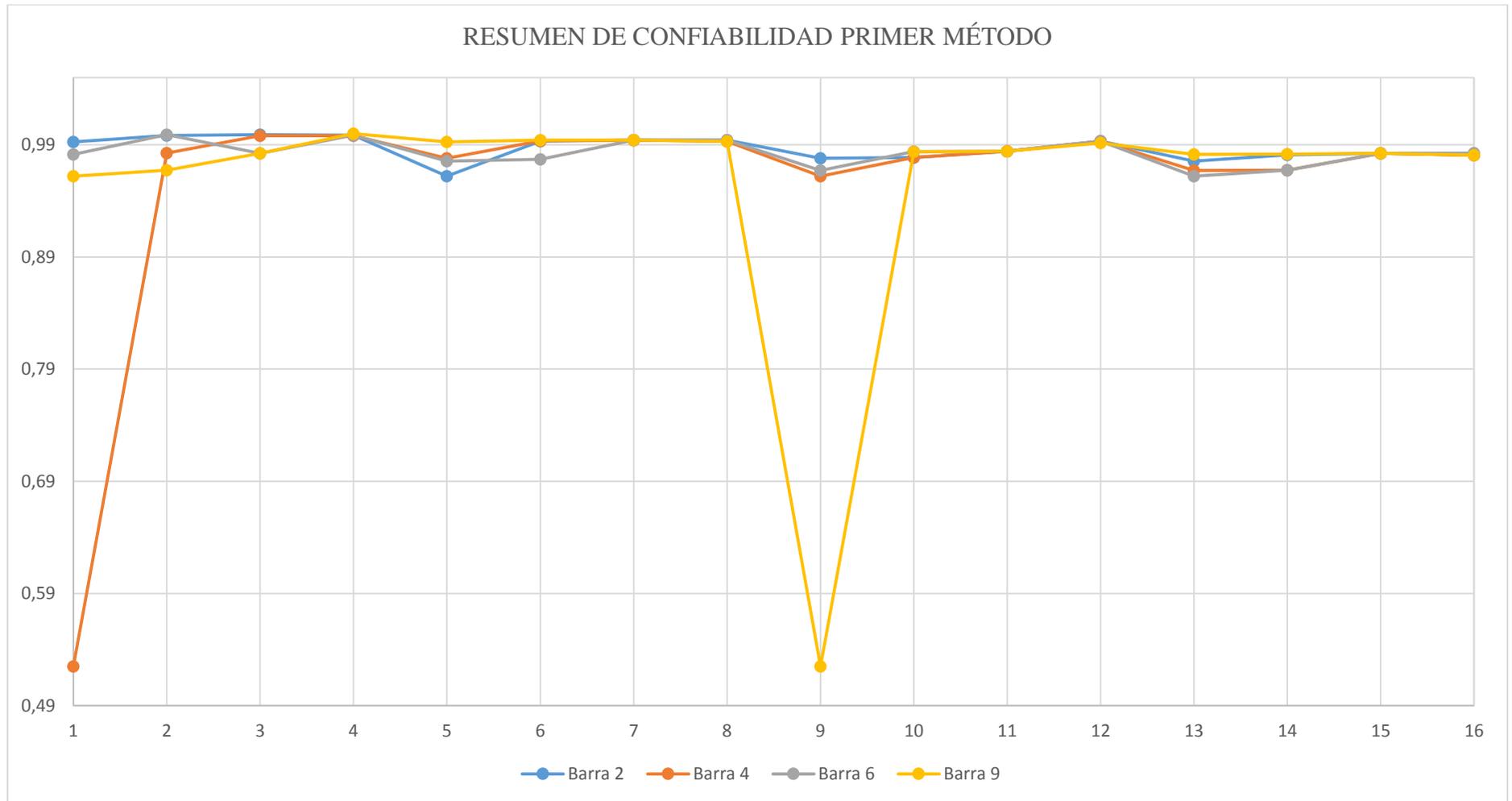
En este método se realiza un análisis similar al anterior uno con la diferencia de que en este, los generadores se interconectan en paralelo entre si dependiendo de punto de análisis y es necesario emplear las ecuaciones de transformación Triangulo- Estrella detallada en las ecuaciones (26), (27) y (28). La diferencia es que en este se trabaja directamente utilizando las disponibilidades de cada elemento interconectado en el sistema. El desarrollo de este método se lo puede apreciar en el **Anexo 5**.

Tabla 27: Cuadro de resumen de confiabilidad.

Cuadro de resumen de confiabilidad					
Referencia	Combinación	Barra 2	Barra 4	Barra 6	Barra 9
Equivalente de red	Generación completa	0,992725686	0,524849388	0,981564215	0,962050353
	Equivalente de red + Generador Eólico + Generador Fotovoltaico	0,998382992	0,982592466	0,999097214	0,967362503
	Equivalente de red + Generador Fotovoltaico	0,999147941	0,998262954	0,982568042	0,982503145
	Equivalente de red	0,998674027	0,998187078	0,998674027	0,999999772
Generador Síncrono	Generación completa	0,962050353	0,977960073	0,975595353	0,992725686
	Generador Síncrono + Generador Fotovoltaico+ Equivalente de red	0,993211468	0,993481987	0,977087782	0,994270758
	Generador Síncrono + Equivalente de red	0,994301833	0,994323152	0,99432287	0,994323152
	Generador Síncrono	0,99432418	0,993013431	0,994227219	0,993013431
Generador Eólico	Generación completa	0,977960073	0,962050353	0,967126349	0,524849388
	Generador Eólico + Generador Síncrono + Equivalente de red	0,978775149	0,978754491	0,984008768	0,983732225
	Generador Eólico + Equivalente de red	0,98427413	0,98425324	0,98427413	0,984273854
	Generador Eólico	0,993291102	0,993422297	0,993291102	0,99167805
Generador Fotovoltaico	Generación completa	0,975595353	0,967126349	0,962050353	0,981564215
	Generador Fotovoltaico + Generador Eólico + Equivalente de red	0,981058564	0,967382683	0,967362503	0,981828261
	Generador Fotovoltaico + Equivalente de red	0,982567767	0,982568042	0,982547225	0,982568042
	Generador Fotovoltaico	0,98086267	0,98086267	0,982569046	0,98086267

Fuente: [Autores].

Figura 33: Confiabilidad desde cada punto de referencia.



Fuente: [Autores]

Descripción de la figura 33.

Caso 1: Desde el punto de vista del Equivalente de red

1. **Escenario 1:** Generación completa
2. **Escenario 2:** Equivalente de red + Generador Eólico + Generador Fotovoltaico
3. **Escenario 3:** Equivalente de red + Generador Fotovoltaico
4. **Escenario 4:** Equivalente de red

Caso 2: Desde el punto de vista del Generador Síncrono

5. **Escenario 1:** Generación completa
6. **Escenario 2:** Generador Síncrono + Generador Fotovoltaico+ Equivalente de red
7. **Escenario 3:** Generador Síncrono + Equivalente de red
8. **Escenario 4:** Generador Síncrono

Caso 3: Generador Eólico

9. **Escenario 1:** Generación completa
10. **Escenario 2:** Generador Eólico + Generador Síncrono + Equivalente de red
11. **Escenario 3:** Generador Eólico + Equivalente de red
12. **Escenario 4:** Generador Eólico

Caso 4: Desde el punto de vista del Generador Fotovoltaico

13. **Escenario 1:** Generación completa
14. **Escenario 2:** Generador Fotovoltaico + Generador Eólico + Equivalente de red
15. **Escenario 3:** Generador Fotovoltaico + Equivalente de red
16. **Escenario 4:** Generador Fotovoltaico

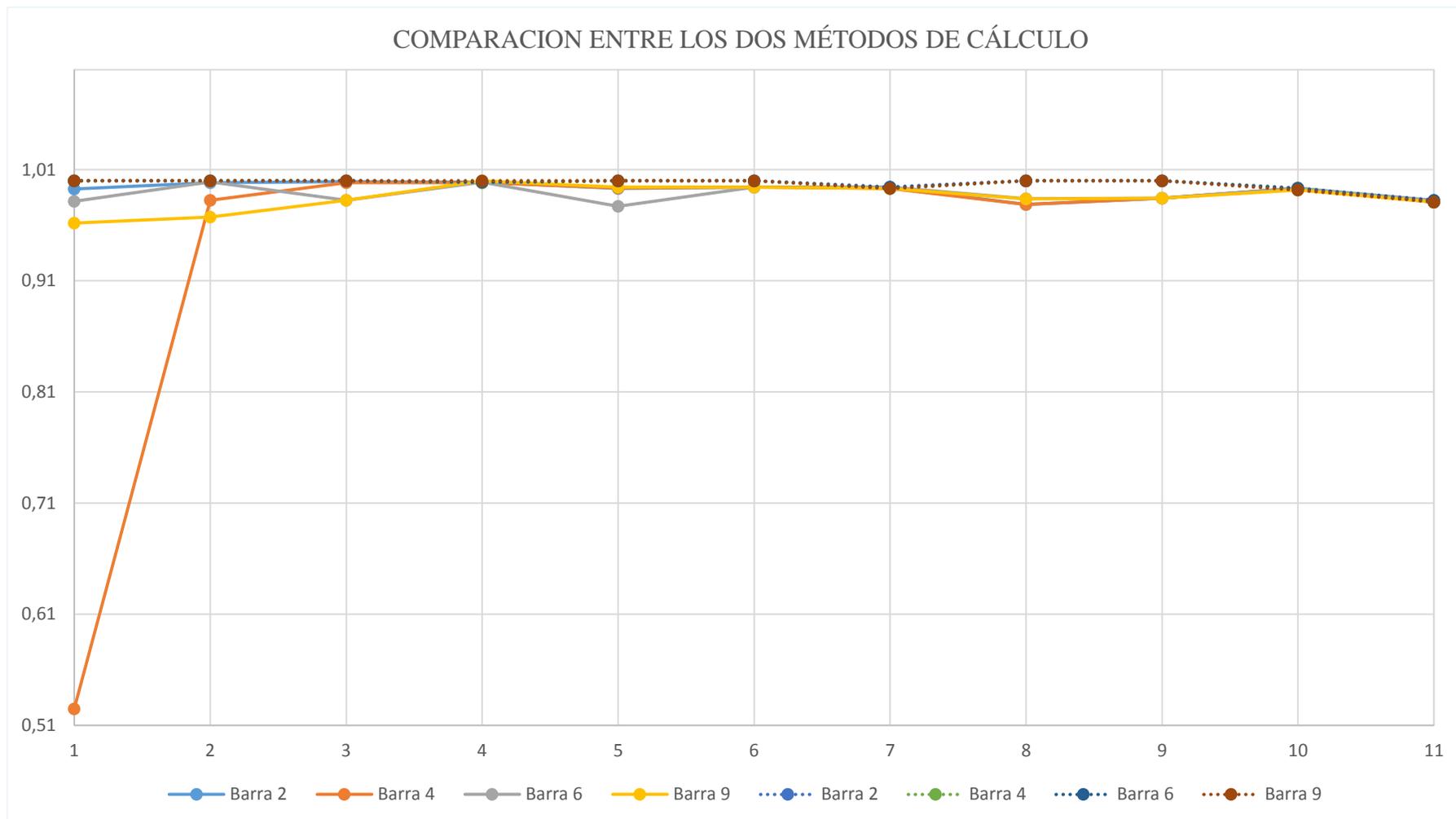
Analizando la figura 33, el sistema presenta una confiabilidad alta para el caso donde se analiza desde el punto de vista del equivalente de red, para cada proceso los índices en las barras no presentan un mayor cambio respecto a los otros sistemas excepto en el escenario en donde se encuentra el generador eólico, en este en particular es donde el desfase es mayor por la característica misma de la barra y de su tipo de generación, al ser el punto más lejano conectado al mismo, y para ciertos casos los índices más bajos son los obtenidos en las barras que se encuentran opuesta al punto de referencia del cual se realiza el estudio.

Tabla 28: Comparación de los dos métodos de cálculo.

Combinación	MÉTODO 1				MÉTODO 2			
	Barra 2	Barra 4	Barra 6	Barra 9	Barra 2	Barra 4	Barra 6	Barra 9
Generación completa	0,992725686	0,524849388	0,981564215	0,962050353	0,999999772	0,999999745	0,999999809	0,999999771
Equivalente de red + Generador Eólico + Generador Fotovoltaico	0,998382992	0,982592466	0,999097214	0,967362503	0,999999771	0,999999717	0,999999676	0,999999772
Equivalente de red + Generador Fotovoltaico	0,999147941	0,998262954	0,982568042	0,982503145	0,999999772	0,999999772	0,999999676	0,999999772
Equivalente de red	0,998674027	0,998187078	0,998674027	0,999999772	0,998674027	0,998187078	0,998674027	0,999999772
Generador Síncrono + Generador Fotovoltaico+ Equivalente de red	0,993211468	0,993481987	0,977087782	0,994270758	0,999999771	0,999999676	0,999999904	0,999999772
Generador Síncrono + Equivalente de red	0,994301833	0,994323152	0,99432287	0,994323152	0,999999772	0,999999772	0,999999772	0,999999772
Generador Síncrono	0,99432418	0,993013431	0,994227219	0,993013431	0,99432418	0,993013431	0,994227219	0,993013431
Generador Eólico + Generador Síncrono + Equivalente de red	0,978775149	0,978754491	0,984008768	0,983732225	0,999999771	0,999999772	0,999999772	0,999999772
Generador Eólico + Equivalente de red	0,98427413	0,98425324	0,98427413	0,984273854	0,999999772	0,999999772	0,999999772	0,999999772
Generador Eólico	0,993291102	0,993422297	0,993291102	0,99167805	0,993291102	0,993422297	0,993291102	0,99167805
Generador Fotovoltaico	0,98086267	0,98086267	0,982569046	0,98086267	0,98086267	0,98086267	0,982569046	0,98086267

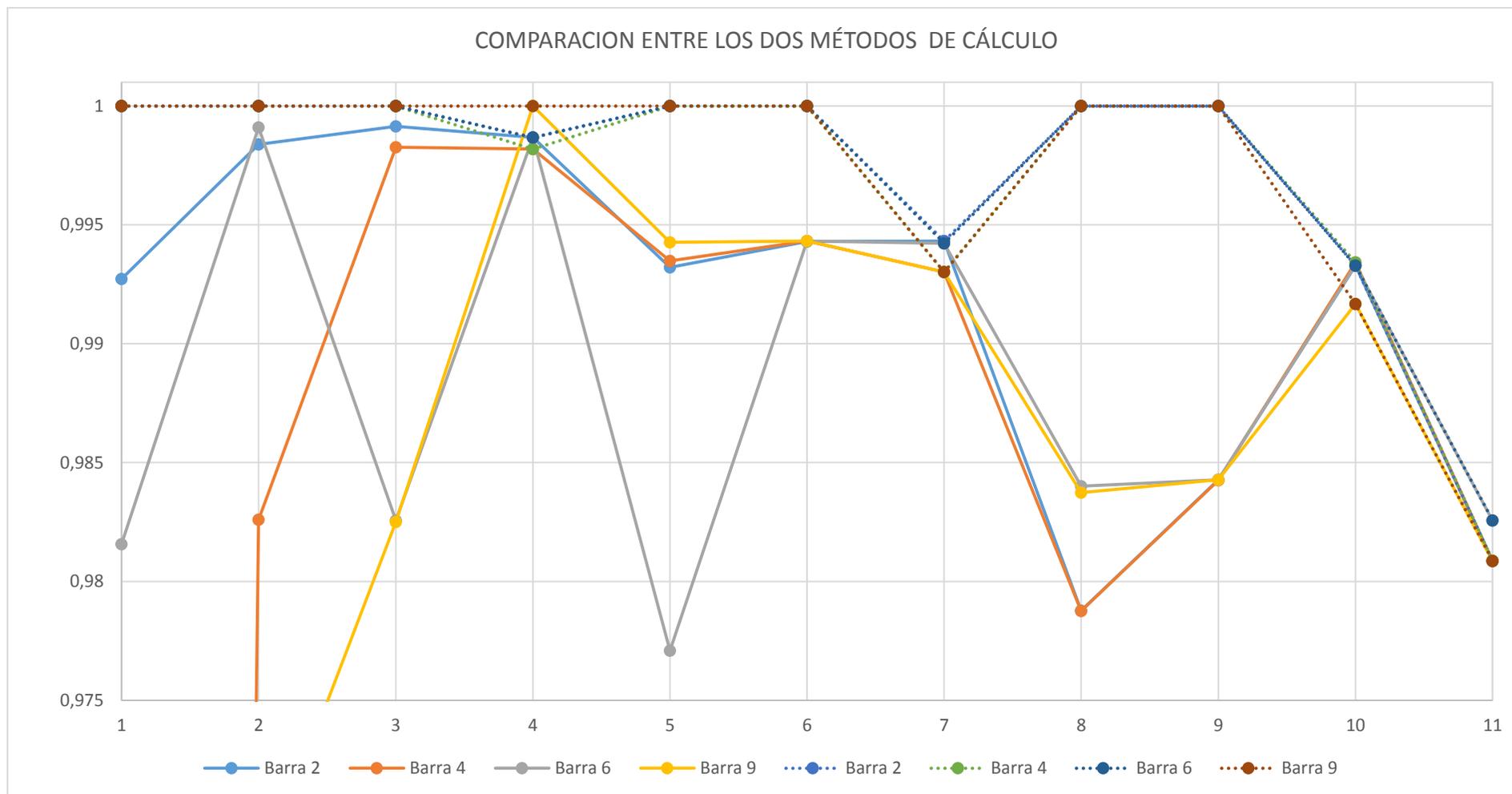
Fuente: [Autores].

Figura 34: Comparación entre los dos métodos.



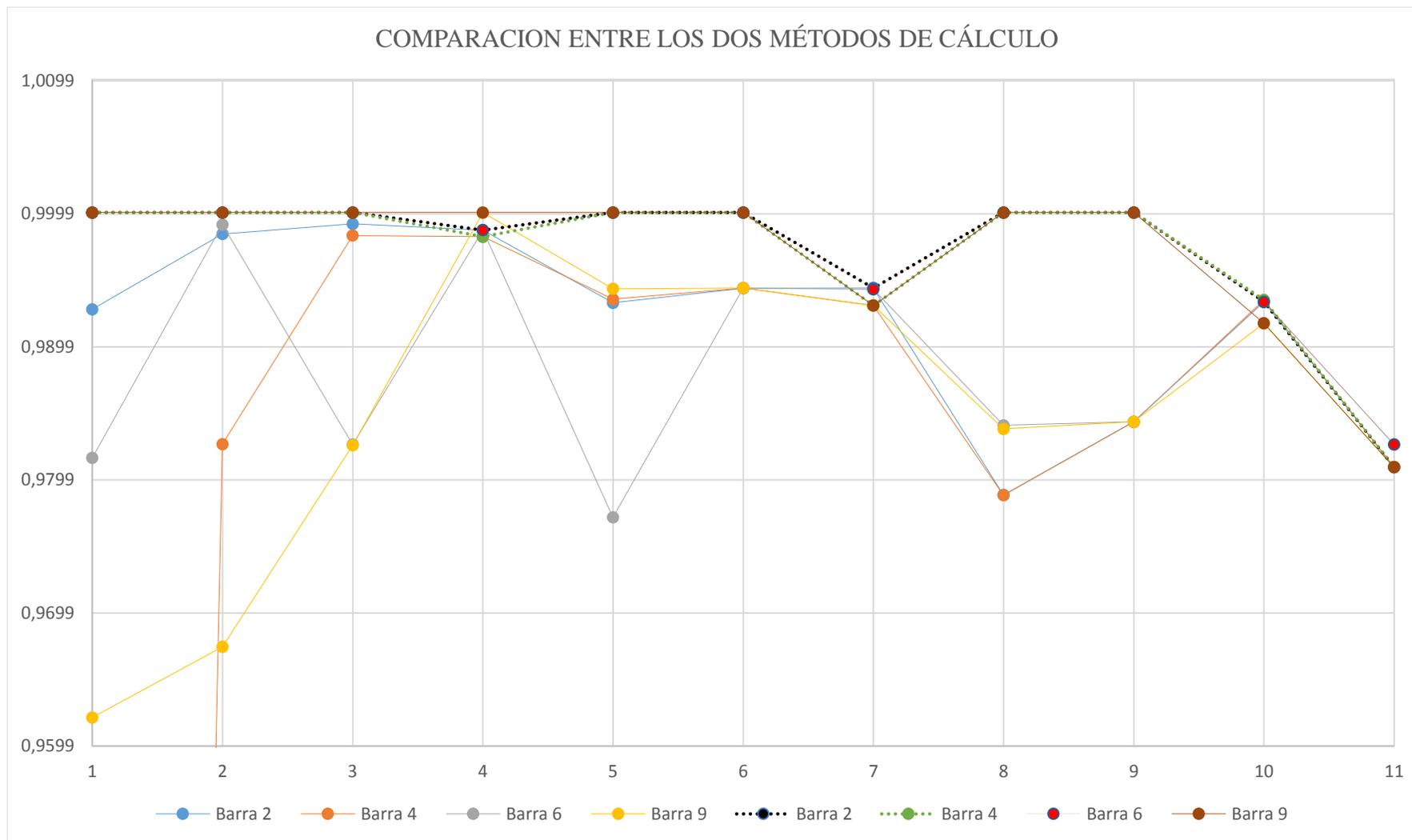
Fuente: [Autores].

Figura 35: Comparación entre los dos métodos.



Fuente: [Autores].

Figura 36: Comparación entre los dos métodos.



Fuente: [Autores].

Descripción de la figura 34, 35 y 36.

- 1 Escenario 1:** Generación completa
- 2 Escenario 2:** Equivalente de red + Generador Eólico + Generador Fotovoltaico
- 3 Escenario 3:** Equivalente de red + Generador Fotovoltaico
- 4 Escenario 4:** Equivalente de red
- 5 Escenario 5:** Generador Síncrono + Generador Fotovoltaico+ Equivalente de red
- 6 Escenario 6:** Generador Síncrono + Equivalente de red
- 7 Escenario 7:** Generador Síncrono
- 8 Escenario 8:** Generador Eólico + Generador Síncrono + Equivalente de red
- 9 Escenario 9:** Generador Eólico + Equivalente de red
- 10 Escenario 10:** Generador Eólico
- 11 Escenario 11:** Generador Fotovoltaico

Una vez estructurado el sistema de GD en anillo se realiza el análisis con diferentes escenarios de operación en los cuales se desarrolla mediante dos métodos, método 1, análisis del sistema de manera simple como un sistema radial, método 2, análisis considerando interconexión en paralelo entre generadores asociados al sistema.

Al realizar un análisis de la figuras 34 y 36 el sistema con interconexión de generadores en paralelo, los índices de confiabilidad mejoran por reducir la cantidad de elementos conectados en serie es por eso que hay una variación entre ambos métodos pero como se usa 9 decimales es factible apreciar esta diferenciación.

La confiabilidad en cada uno de los elementos asociados, varía en función del tipo de generación, pero al hacer una comparación con el método de generación interconectada en paralelo los indicadores del sistema suben con respecto al primer método produciendo una variación de + 3,11612 % .

Error entre métodos de cálculo

$$e = \left(\frac{0,99999977 - 0,96205035}{0,99999977} \right) * 100\%$$

$$e = 3.794943 \%$$

$$e = \left(\frac{0,99999977 - 0,99321147}{0,99999977} \right) * 100\%$$

$$e = 0,67883053\%$$

Error total

$$e = \pm 3,11612\%$$

Este error es considerado una variación del valor más alto puede disminuir un $-3,11612 \%$ al usar el segundo método, pero si se emplea el primer método este varía un $-3,11612 \%$.

La máxima variación que se tiene en el sistema es cuando se usa energías renovables como es el caso del eólico y fotovoltaico, si estos están cerca de una fuente que posee una alta confiabilidad estos sistemas mejoran su rendimiento, pero si estos están apartados su tasa de falla se incrementa.

Cálculo económico de todo el sistema.

Para el siguiente cálculo se tomó los valores de las cargas presentadas en el sistema eléctrico de potencia con generación distribuida, propuestas por los postulantes.

- Carga total del sistema= 16 MVA
- Disponibilidad del sistema = 0,0041114514
- Costo de la energía no suministrada= 4,15 USD/ kWh [26]

$$C = (16000000 * 0,0041114514) * (4,15 \frac{USD}{kWh})$$

$$C = 65.7783 kWh * \frac{4,15 USD}{kWh}$$

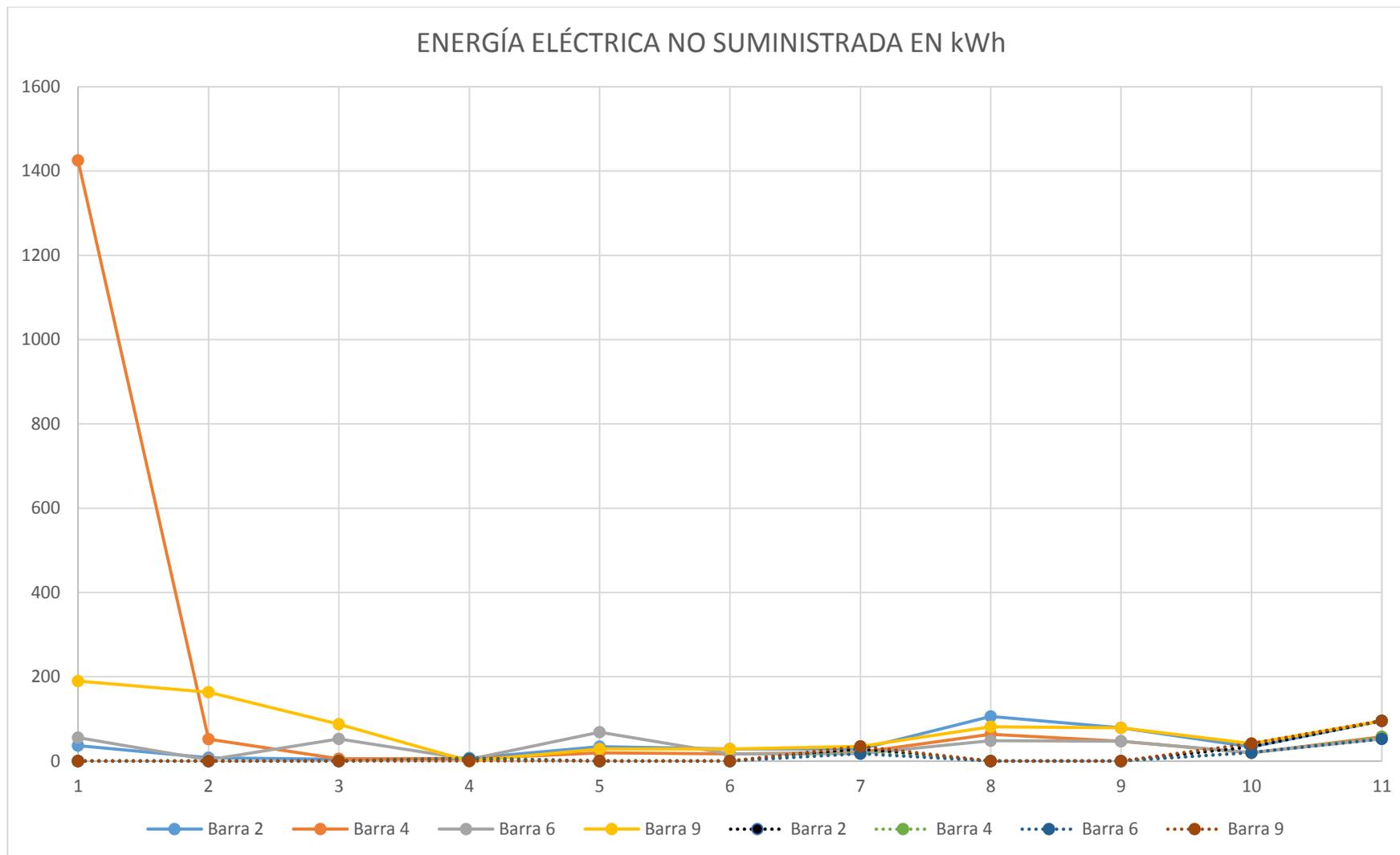
$$C = 272,979945 USD$$

Tabla 29: Energía no suministrada en cada barra en kWh.

ENERGÍA NO SUMINISTRADA POR EL SISTEMA kWh									ENS DEL SISTEMA	
Combinación	MÉTODO 1				MÉTODO 2				ENS MÉTODO 1	ENS MÉTODO 2
	Barra 2	Barra 4	Barra 6	Barra 9	Barra 2	Barra 4	Barra 6	Barra 9		
Generación completa	36,3715698	1425,451837	55,30735423	189,748233	0,001141579	0,000765938	0,000573062	0,001146292	1706,87899	0,003626872
Equivalente de red + Generador Eólico + Generador Fotovoltaico	8,085037663	52,22260227	2,708357009	163,1874834	0,001146294	0,000849385	0,000971577	0,001141552	226,20348	0,004108809
Equivalente de red + Generador Fotovoltaico	4,260293809	5,211137724	52,29587287	87,48427514	0,001141705	0,000685116	0,000971462	0,001141552	149,25158	0,003939836
Equivalente de red	6,629863975	5,438765494	3,977918385	0,001141552	6,629863975	5,438765494	3,977918385	0,001141552	16,0476894	16,04768941
Generador Síncrono + Generador Fotovoltaico+ Equivalente de red	33,94266177	19,55403908	68,73665428	28,64621174	0,00114291	0,000971624	0,000288157	0,001141552	150,879567	0,003544244
Generador Síncrono + Equivalente de red	28,49083369	17,03054357	17,03139004	28,38423928	0,001141552	0,00068512	0,00068512	0,001141555	90,9370066	0,003653347
Generador Síncrono	28,37910176	20,95970589	17,31834385	34,93284315	28,37910176	20,95970589	17,31834385	34,93284315	101,589995	101,5899947
Generador Eólico + Generador Síncrono + Equivalente de red	106,1242564	63,73652599	47,97369623	81,33887708	0,001144604	0,000684933	0,000685063	0,001141552	299,173356	0,003656153
Generador Eólico + Equivalente de red	78,6293479	47,24027919	47,17760874	78,63073031	0,001141705	0,000684931	0,000684942	0,001141552	251,677966	0,003653131
Generador Eólico	33,54449185	19,73310916	20,12669511	41,60974912	33,54449185	19,73310916	20,12669511	41,60974912	115,014045	115,0140452
Generador Fotovoltaico	95,6866492	57,41198952	52,292863	95,6866492	95,6866492	57,41198952	52,292863	95,6866492	301,078151	301,0781509

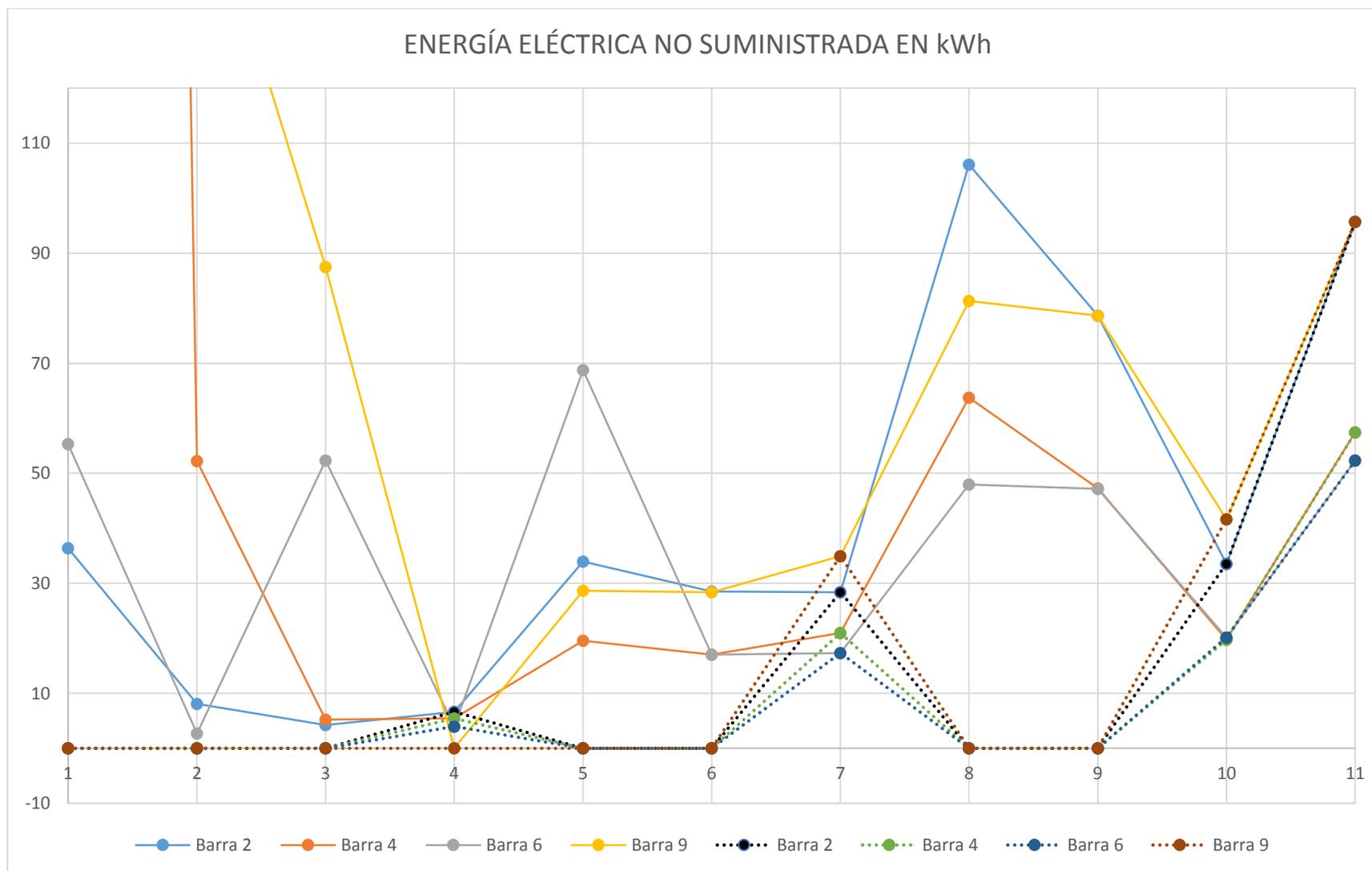
Fuente: Autores.

Figura 35: Energía no suministrada



Fuente : Autores

Figura 36: Energía no suministrada en kWh escalado



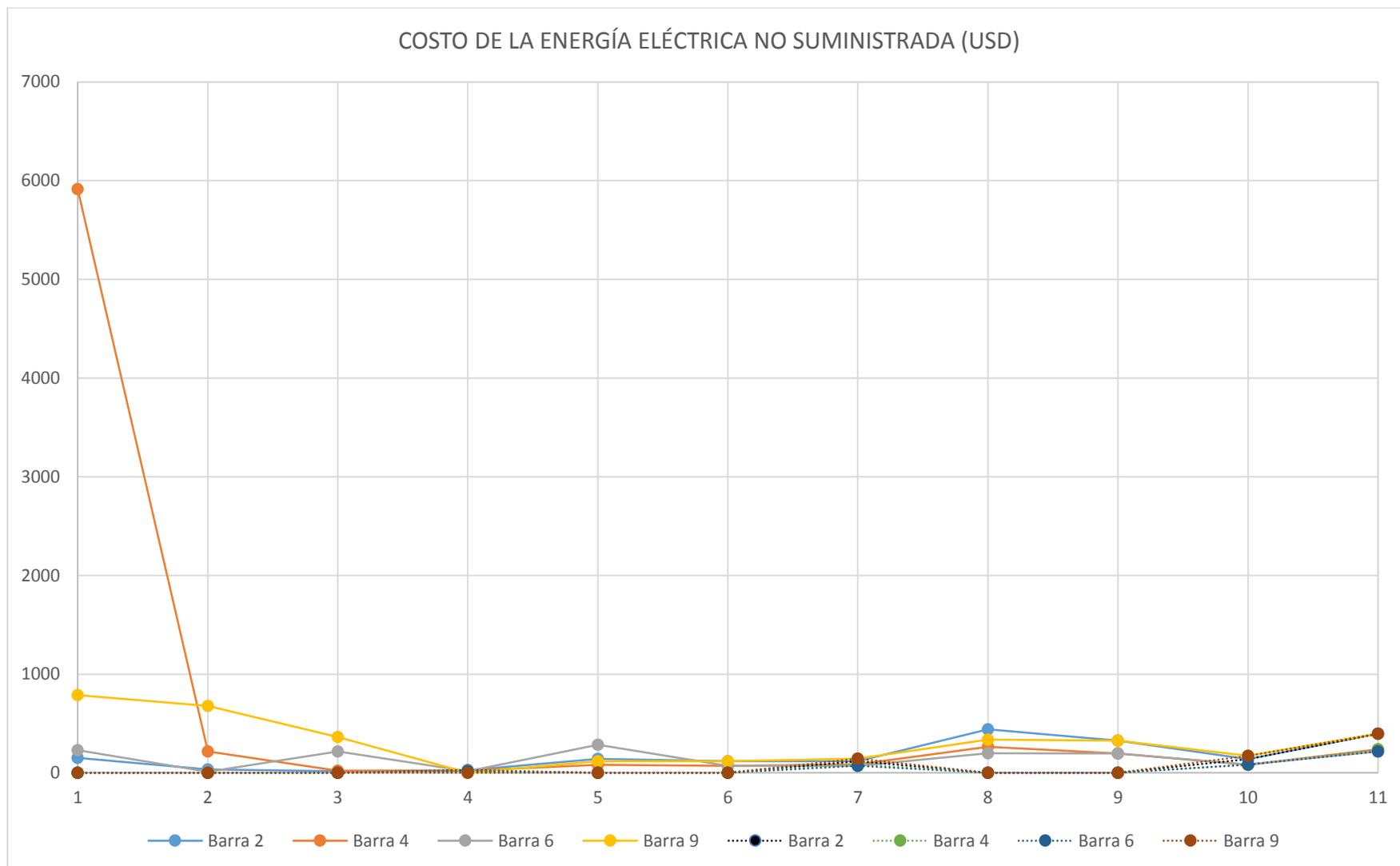
Fuente : Autores

Tabla 30: Costo de la energía no suministrada.

COSTO DE LA ENERGÍA NO SUMINISTRADA POR EL SISTEMA USD									COSTO DEL SISTEMA	
Combinación	MÉTODO 1				MÉTODO 2				COSTO MÉTODO 1	COSTO MÉTODO 2
	Barra 2	Barra 4	Barra 6	Barra 9	Barra 2	Barra 4	Barra 6	Barra 9		
Generación completa	150,9420147	5915,625125	229,5255201	787,4551669	0,004737554	0,003178645	0,002378208	0,004757113	7083,54783	0,015051519
Equivalente de red + Generador Eólico + Generador Fotovoltaico	33,5529063	216,7237994	11,23968159	677,2280563	0,00475712	0,003524949	0,004032045	0,004737442	938,744444	0,017051556
Equivalente de red + Generador Fotovoltaico	17,68021931	21,62622155	217,0278724	363,0597418	0,004738074	0,002843233	0,004031569	0,004737442	619,394055	0,016350318
Equivalente de red	27,5139355	22,5708768	16,5083613	0,004737442	27,5139355	22,5708768	16,5083613	0,004737442	66,597911	66,59791104
Generador Síncrono + Generador Fotovoltaico+ Equivalente de red	140,8620463	81,14926219	285,2571153	118,8817787	0,004743079	0,004032241	0,001195853	0,004737442	626,150203	0,014708614
Generador Síncrono + Equivalente de red	118,2369598	70,67675581	70,68026866	117,794593	0,004737442	0,002843248	0,002843246	0,004737453	377,388577	0,015161389
Generador Síncrono	117,7732723	86,98277945	71,87112696	144,9712991	117,7732723	86,98277945	71,87112696	144,9712991	421,598478	421,5984778
Generador Eólico + Generador Síncrono + Equivalente de red	440,415664	264,5065829	199,0908394	337,5563399	0,004750107	0,002842473	0,002843013	0,004737442	1241,56943	0,015173035
Generador Eólico + Equivalente de red	326,3117938	196,0471587	195,7870763	326,3175308	0,004738077	0,002842465	0,002842508	0,004737442	1044,46356	0,015160492
Generador Eólico	139,2096412	81,89240302	83,5257847	172,6804588	139,2096412	81,89240302	83,5257847	172,6804588	477,308288	477,3082877
Generador Fotovoltaico	397,0995942	238,2597565	217,0153815	397,0995942	397,0995942	238,2597565	217,0153815	397,0995942	1249,47433	1249,474326

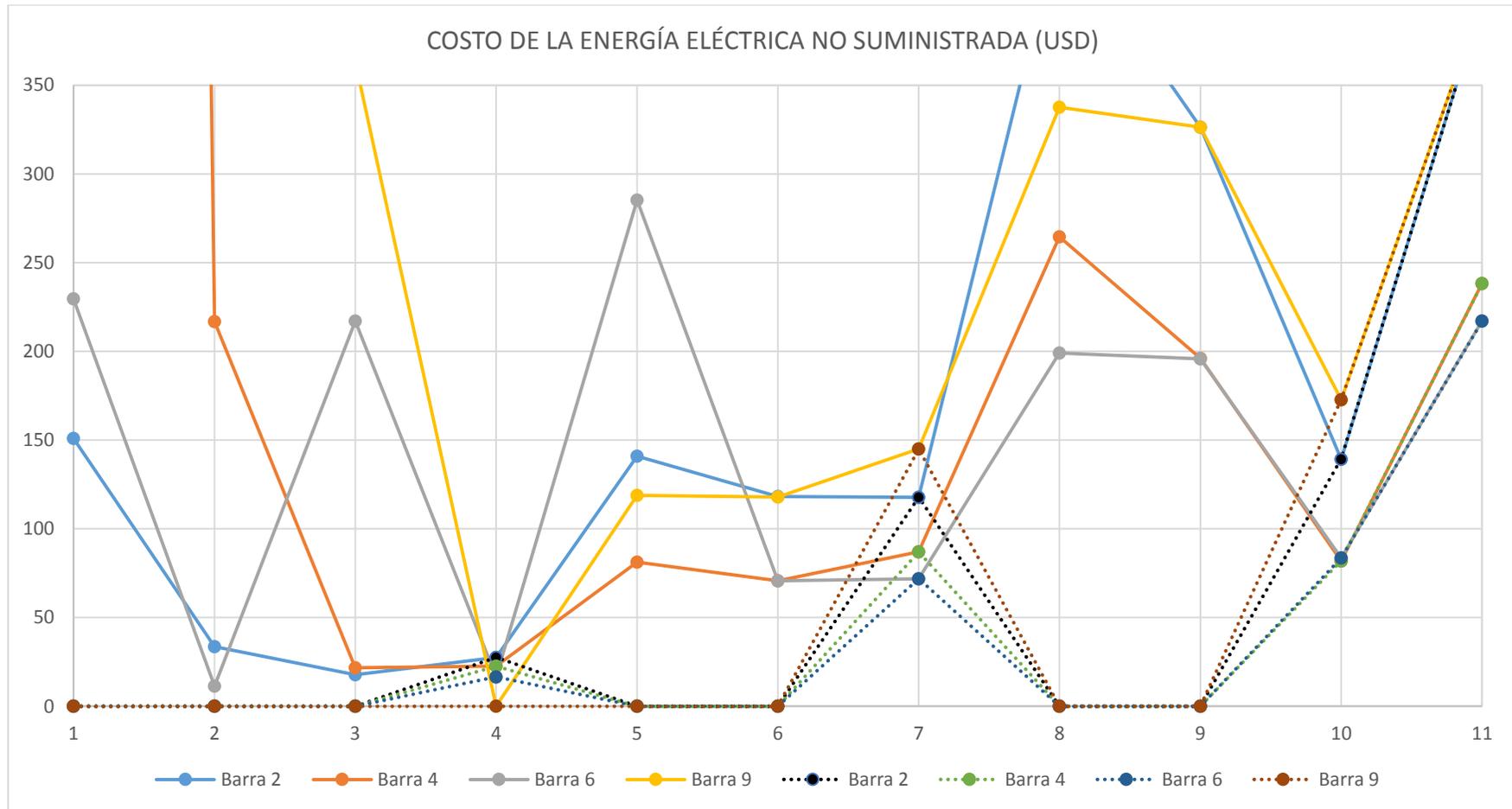
Fuente: Autores.

Figura 37: Costo de energía no suministrada en cada barra



Fuente: Autores

Figura 380: Costo de la energía no suministrada en USD escalado.



Fuente: Autores

Descripción de la figura 35, 36, 37 y 38.

- 1 Escenario 1:** Generación completa
- 2 Escenario 2:** Equivalente de red + Generador Eólico + Generador Fotovoltaico
- 3 Escenario 3:** Equivalente de red + Generador Fotovoltaico
- 4 Escenario 4:** Equivalente de red
- 5 Escenario 5:** Generador Síncrono + Generador Fotovoltaico+ Equivalente de red
- 6 Escenario 6:** Generador Síncrono + Equivalente de red
- 7 Escenario 7:** Generador Síncrono
- 8 Escenario 8:** Generador Eólico + Generador Síncrono + Equivalente de red
- 9 Escenario 9:** Generador Eólico + Equivalente de red
- 10 Escenario 10:** Generador Eólico
- 11 Escenario 11:** Generador Fotovoltaico

En la figura 35 y 36 se puede observar la energía no suministrada por cada una de los escenarios, viendo así na gran variación en la generación eólica, pero esta variación es producida al ser analizado desde el punto de vista del equivalente de red.

De igual manera se puede apreciar en la figura 37 y 38 los costos asociados a cada una de las combinaciones del sistema dando como el mejor resultado el segundo método en cuanto a costos.

Los costos cuando opera todo el sistema debe ser menor como se muestra en la gráfica del segundo método con líneas entrecortadas, pero en el primer método esto no concuerda por el punto de análisis que se elige para el caso de estudio.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Al simular el sistema de generación distribuida, permitió determinar la confiabilidad equivalente del sistema, y al cambiar el escenario de operación se evidencio la variación de los índices.
- Al analizar los diferentes sistemas de generación se verifico que una de las ventajas de la generación distribuida es que estas se encuentran cerca a la carga y al mismo tiempo pueden aportar al sistema de potencia para mejorar la calidad del servicio y la confiabilidad.
- Los valores para determinar los índices de confiabilidad son relativamente bajos para la apreciación de resultados, por ello se optó por datos aumentados en diez veces su valor real para ingresar al simulador y fue necesario trabajar con nueve decimales para estimar su variación.
- Al modelar en el Software Etap la confiabilidad del sistema con generación distribuida es alta en comparación con cada una de las generaciones, sin embargo los generadores con menor confiabilidad incrementan la misma por depender también de los otros sistemas cuyos índices son altos.
- Al realizar el análisis por escenarios desde diferentes puntos de vista y aplicando dos métodos, la confiabilidad es elevada en casi todas las barras con excepción de las que se encuentran conectadas las generaciones eólica y fotovoltaica, siendo estas con mayor deficiencia en el sistema, por las características propias de sus elementos.
- Cuando una barra se queda sin fuente de generación por algún tipo de falla, su confiabilidad se incrementa porque disminuyen los elementos a la que está asociada en serie, sin embargo sigue dependiendo del anillo al que está conectado y por ende su confiabilidad se incrementa.
- Al aplicar los dos métodos de cálculo y realizar las comparaciones de resultados existe un error de cálculo equivalente al $\pm 3,1161 \%$.

Recomendaciones

- Para hacer un análisis de confiabilidad de un sistema es necesario escoger un punto de referencia del cual partirá el desarrollo del estudio.
- Es recomendable al usar el software Etap llenar todos los campos de confiabilidad ya que si no se los completa, el simulador los asume por default dándose incongruencias durante el análisis.
- Tener accesibilidad a información actualizada como es el caso de los papers de la IEEE, su gran cantidad de investigación relacionada con estos temas que ayudarían a proponer resolver indagaciones por otros métodos.
- Después de desarrollar esta investigación se puede proponer realizar un estudio acoplando carga real con demanda para una modelación completa de un SEP. con GD.
- La confiabilidad al darse en valores por debajo de 1 es muy probable que no se pueda diferenciar al momento de analizarla utilizando diagramas de barras por ello es recomendable redondear a 9 decimales para una mejor visualización de las variaciones que se produce en cada uno de las barras.

13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Marin, «Universidad distrital Francisco José de Caldas,» 30 Noviembre 2011. [En línea]. Available: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/6886/8480>. [Último acceso: 16 Junio 2018].
- [2] A. Cadena, «redalyc org,» 20 Diciembre 2008. [En línea]. Available: <http://www.redalyc.org/html/1210/121015051012/>. [Último acceso: 17 Junio 2018].
- [3] F. Gonzales, «Academia,» 2008. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/23445348/Capitulo_2._Tecnolog%C3%ADas_empleadas_en_la_Generaci%C3%B3n_Distribuida_-_Sistemas_de_Generacion_Distribuida. [Último acceso: 17 Junio 2018].
- [4] C. H. Ramírez, «ECURED,» Mayo 2018. [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Generaci%C3%B3n_de_Energ%C3%ADa_El%C3%A9ctrica. [Último acceso: 10 Junio 2018].
- [5] A. H. F. a. K. Palanisamy, «Energy Storage Systems for Energy Management of,» *INTECH*, p. 27, 2013.
- [6] G. Salazar, «Escuela Politecnica Naional,» Septiembre 2015. [En línea]. Available: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/508/pdf. [Último acceso: 14 Junio 2018].
- [7] B. Reyes, «Redalyc org,» 2009. [En línea]. Available: <http://www.redalyc.org/pdf/1813/181321580007.pdf>. [Último acceso: 18 Junio 2018].
- [8] I. A. Esparza, «GRUPEL,» 10 Octubre 2017. [En línea]. Available: <https://grupel.eu/es/grupel-es/tipos-generadores-de-corriente-electrica/>. [Último acceso: 10 Junio 2018].
- [9] C. d. Madrid, «Biblioteca Virtual,» 5 Enero 2012. [En línea]. Available: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM005776.pdf>. [Último acceso: 11 Junio 2018].
- [10] D. B. Santos, «Introducción a la Energía Fotovoltaica,» 2012. [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70271/fichero/02+INTRODUCCI%C3%93N+A+LA+ENERG%C3%8DA+FOTOVOLTAICA%252FIntroducci%C3%B3n+a+la+Energ%C3%ADa+Fotovoltaica.pdf>. [Último acceso: 15 08 2017].
- [11] CONELEC, «CONELEC,» 28 Febrero 2008. [En línea]. Available: http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/CONELEC-CALIDADSNi_003_08.pdf. [Último acceso: 28 Junio 2018].

- [12] C. J. Zapata, «feisUNIVERSIDAD DE PEREIRA,» 2011. [En línea]. Available: http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lapsee/curso_2011_zapata_2.pdf. [Último acceso: 21 Junio 2018].
- [13] G. Esquivel, «Mediagráfico,» 20 Junio 2008. [En línea]. Available: <http://www.medigraphic.com/pdfs/gaceta/gm-2008/gm086e.pdf>. [Último acceso: 13 Junio 2018].
- [14] C. Zapata, «Universidad Tecnológica de Pereira,» 2011. [En línea]. Available: http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lapsee/curso_2011_zapata_2.pdf. [Último acceso: 10 Junio 2018].
- [15] L. Camacho, «Academia,» 2007. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/9826705/An%C3%A1lisis_de_confiabilidad_en_sistemas_de_generaci%C3%B3n. [Último acceso: 15 Junio 2018].
- [16] C. Zapata, «UTP,» 29 Diciembre 2005. [En línea]. Available: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/viewFile/6609/3883>. [Último acceso: 16 Junio 2018].
- [17] A. S. 762-1987, «IEEE Standard Definitions for Use in Reporting Electric Generating Unit Reliability, Availability, and Productivity,» Marzo 2007. [En línea]. Available: <https://www.nerc.com/docs/pc/gadstf/ieee762tf/762-2006.pdf>.
- [18] A. Ghaedi, A. Abbaspour y M. Fotuhi-Firuzabaad, «Reliability Evaluation of a Composite Power System,» IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference, 2013.
- [19] A. Torres, «Revista Scielo,» [En línea]. Available: Evaluación de confiabilidad tecnológica del parque aerogenerador de Gibara 2. [Último acceso: 30 Junio 2018].
- [20] C. Alfredo, «Convencion Cientifica de Ingenieria Arquitectura,» 25 Noviembre 2016. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/application/ClientValidation.html?origPath=/profile/Yorlandys_Salgado_Duarte/publication/311263826_EVALUACION_DE_LA_CONFIABILIDAD_DE_SISTEMAS_DE_GENERACION_ELECTRICA_CON_FUENTES_HIDRAULICAS_LIMITADAS_Y_ALTA_PENETRACION_EOLICA/. [Último acceso: 10 Julio 2018].
- [21] S. Sinng y E. Fernandez, «Reliability Evaluation of a Solar Photovoltaic System with and without Battery Storage,» IEEE INDICON, 2015.
- [22] A. M. Pachano, «Confiabilidad Topológica,» de *Confiabilidad de sistemas Electricos de Potencia*, Quito, 1983, pp. 35-36.
- [23] L. Gomez, «Silviatech suministros integrales para electricidad,» Silviatech, [En línea]. Available: <http://www.silviatech.com.ec/software-etap.html>. [Último acceso: 03 Agosto 2018].

- [24] R. Billinton, «Distribution Systems,» de *Reliability Evaluation of Power Systems*, England, Pitman Books, 1984, p. 225.
- [25] J. Zaruma, ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL CENTROSUR C.A., Cuenca, Junio 2012.
- [26] P. 2016-2025, «Ministerio de Electricidad y Energías Renovables,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php/plan-maestro-de-electricidad-2016-2025>. [Último acceso: 25 Enero 2019].

ANEXOS

Anexo 1: Demostración de método de Markov en un sistema radial con diferentes tipos de generación.

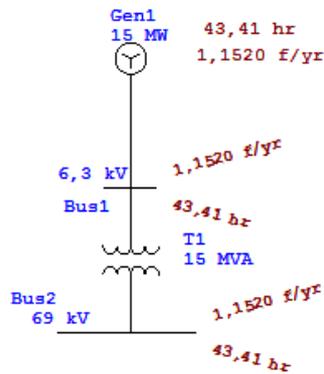


Figura 1. Diagrama radial con generación síncrona.

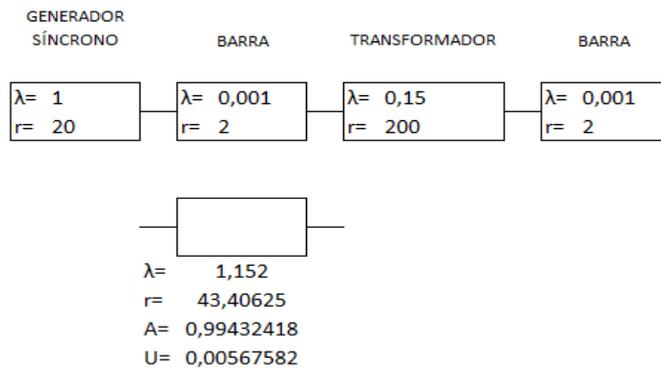


Figura 2. Diagrama de bloques de un sistema radial con generador síncrono

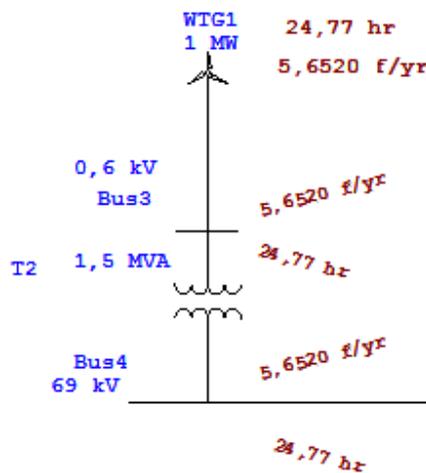


Figura 3. Sistema radial con generación eólica.

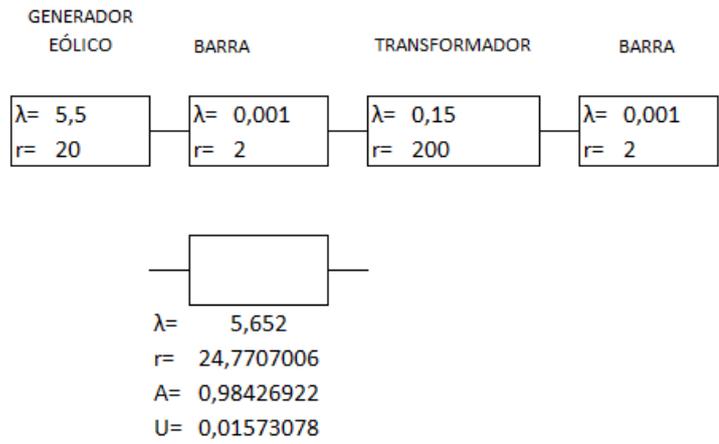


Figura 4. Diagrama de bloques de un sistema radial con generación eólica

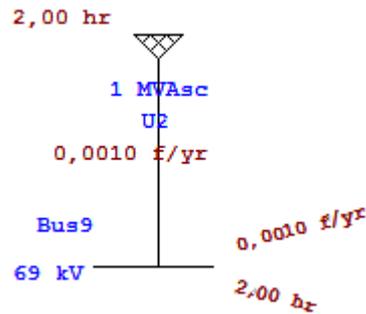


Figura 5. Sistema radial con el equivalente de red.

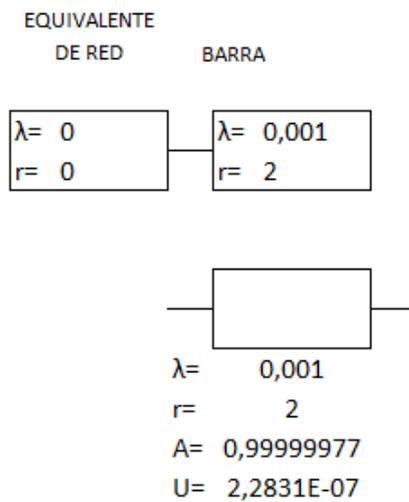


Figura 6. Diagrama de bloques de un sistema radial con equivalente de red.

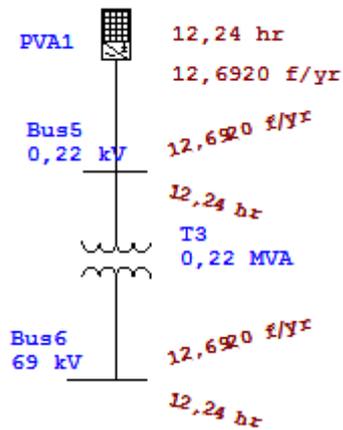


Figura 7. Sistema radial con generación fotovoltaica.

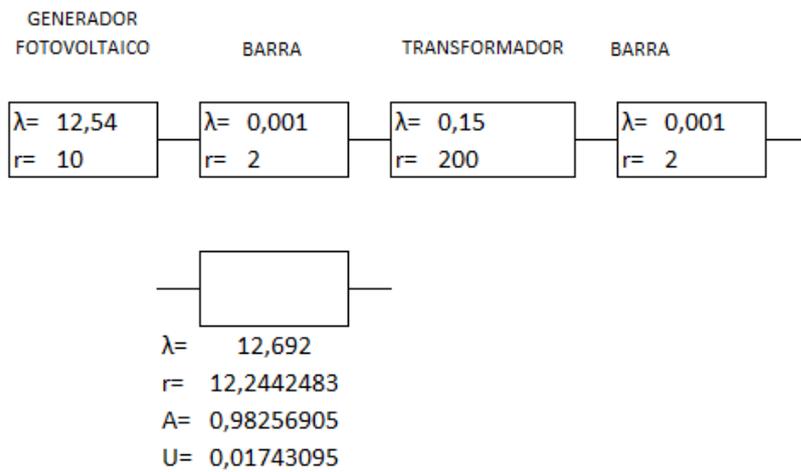


Figura 8. Diagrama de bloques de un sistema radial con generación fotovoltaica.

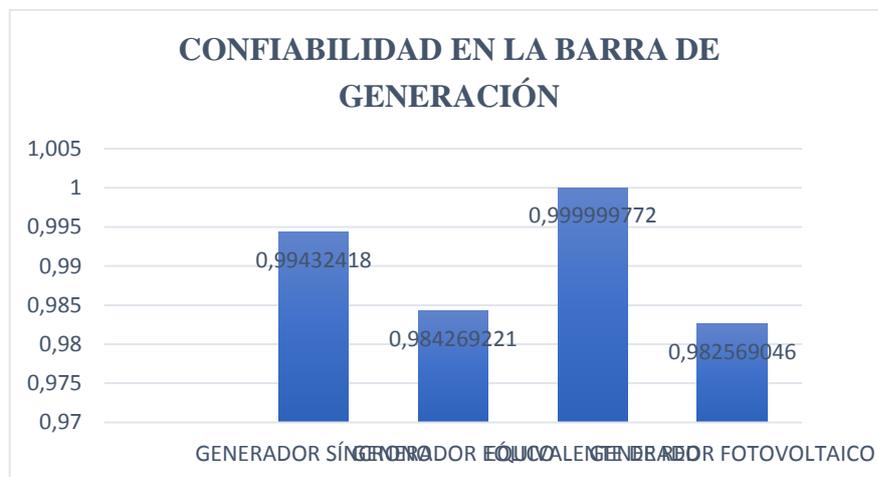
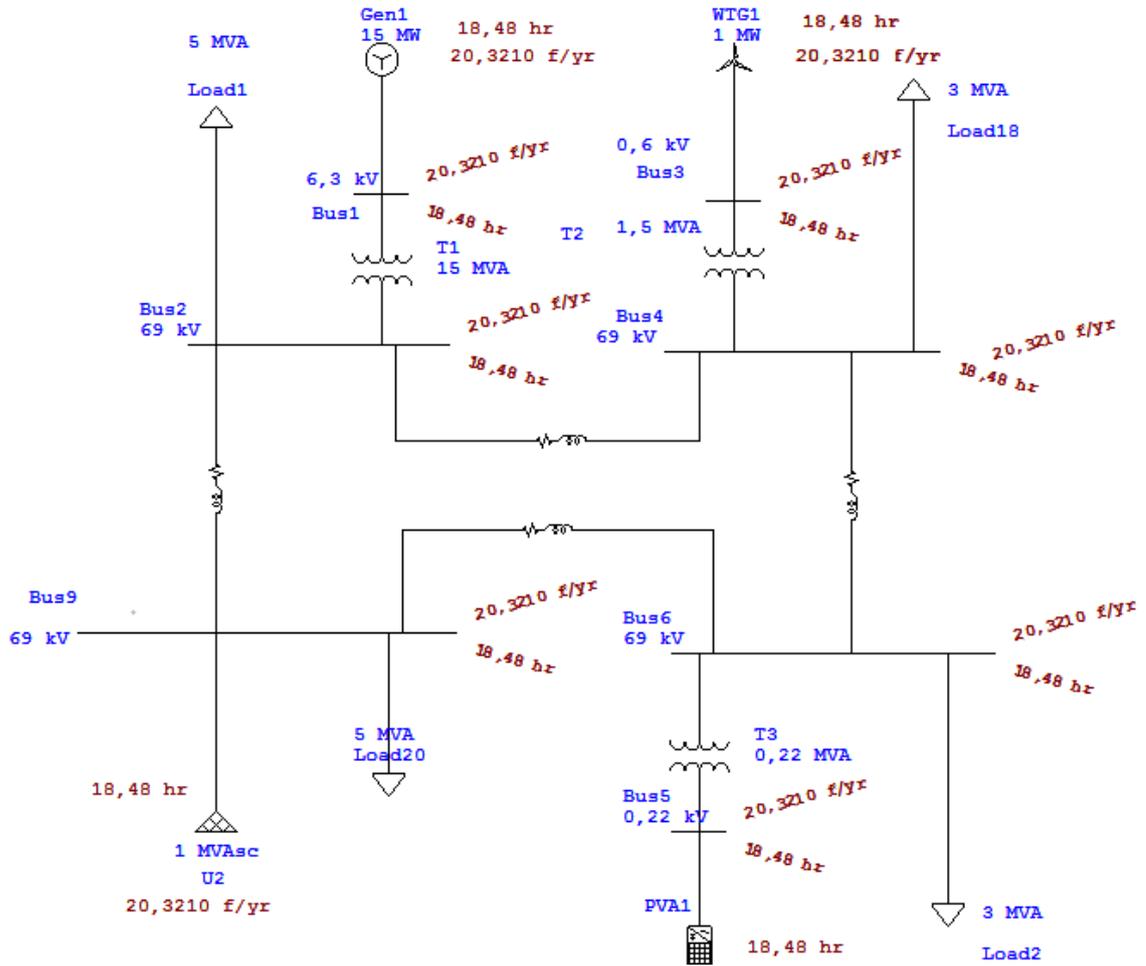


Figura 9. Diagrama de barras de la confiabilidad en un sistema radial.

Anexo 2: Demostración del método de cálculo en un sistema en anillo con GD.

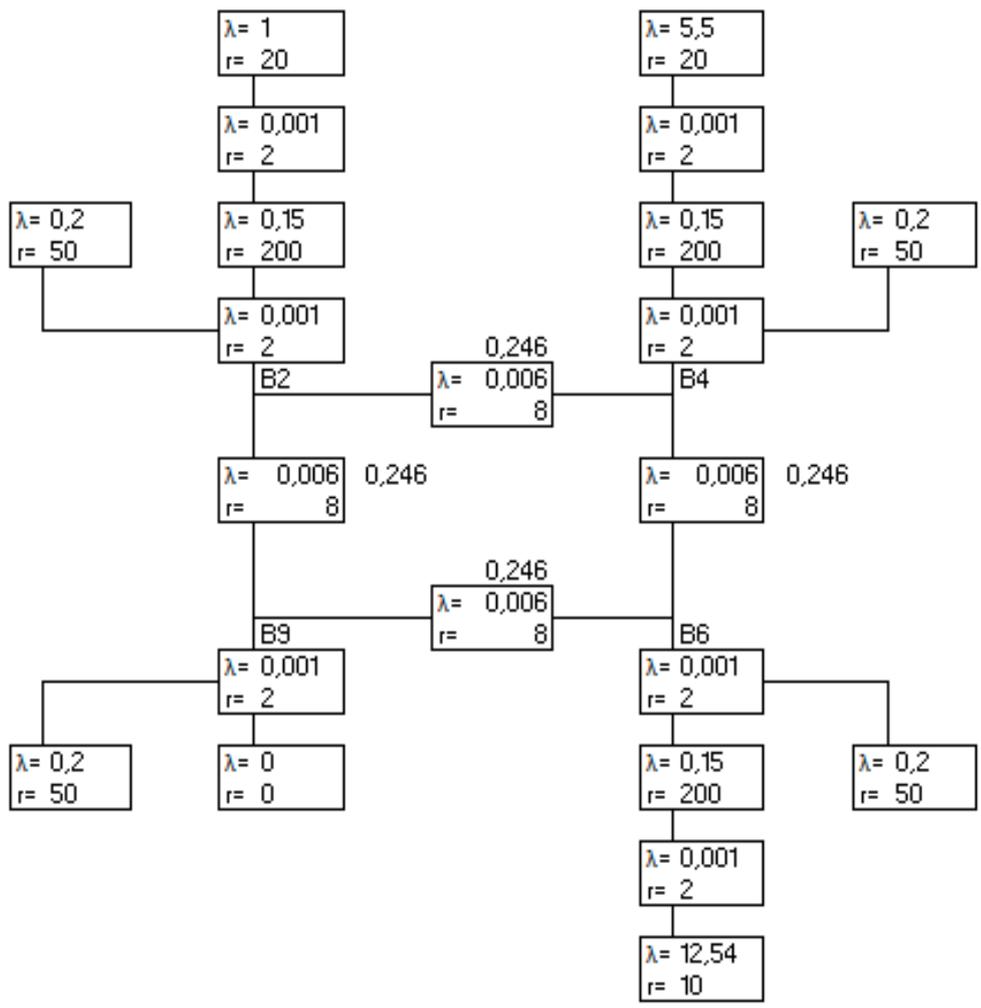


$\lambda = 20,32$ f/año

$\mu = 18,48$ h

Figura 10. Simulación de la confiabilidad de un sistema en anillo con generación distribuida.

En la **figura 11** se desarrolla el mismo esquema pero en diagramas de bloques para el cálculo de la confiabilidad.



$\lambda = 20,321 \text{ f/año}$

$\mu = 18,48 \text{ h}$

Figura 11. Diagrama de bloques de un sistema en anillo con generación distribuida para demostrar el método de cálculo de la confiabilidad.

Anexo 3: Análisis de la confiabilidad de un sistema de generación en anillo con un solo tipo de generación.

Escenario 1.

Equivalente de Red.

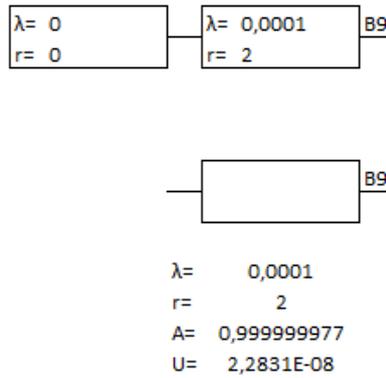


Figura 12. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad de un sistema en anillo con equivalente de red analizando la barra 9.

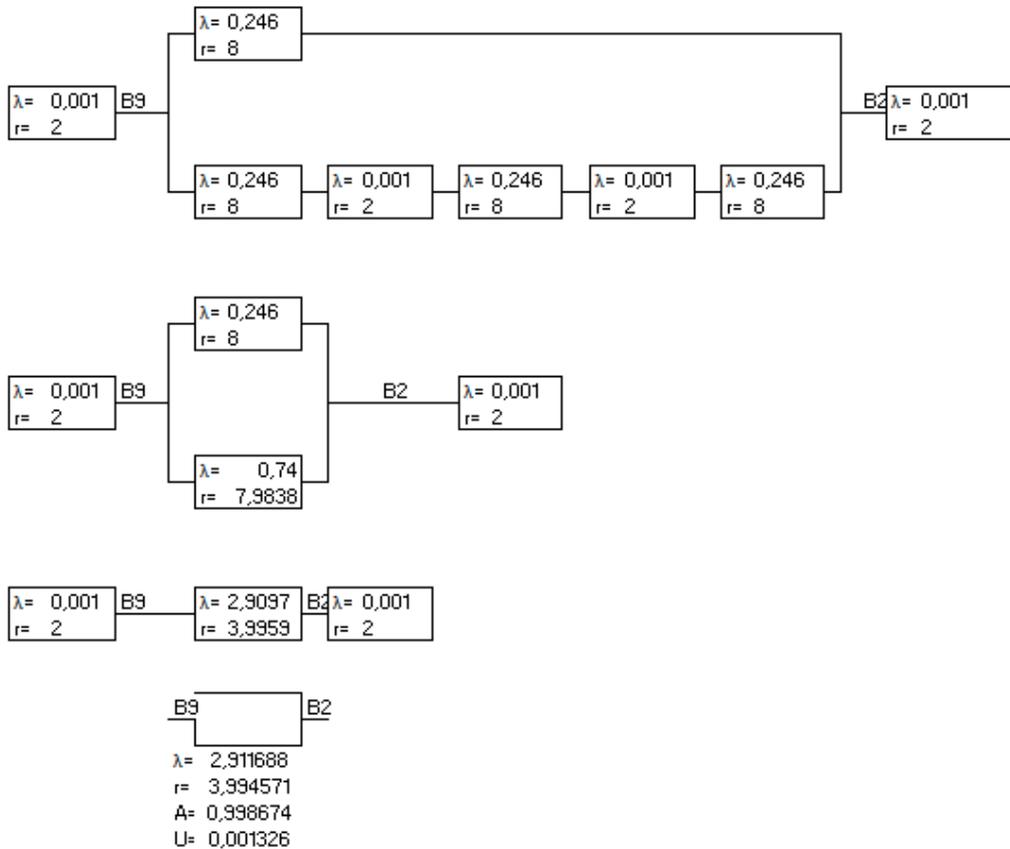


Figura 13. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad de un sistema en anillo con respecto al equivalente de red analizando la barra 2.

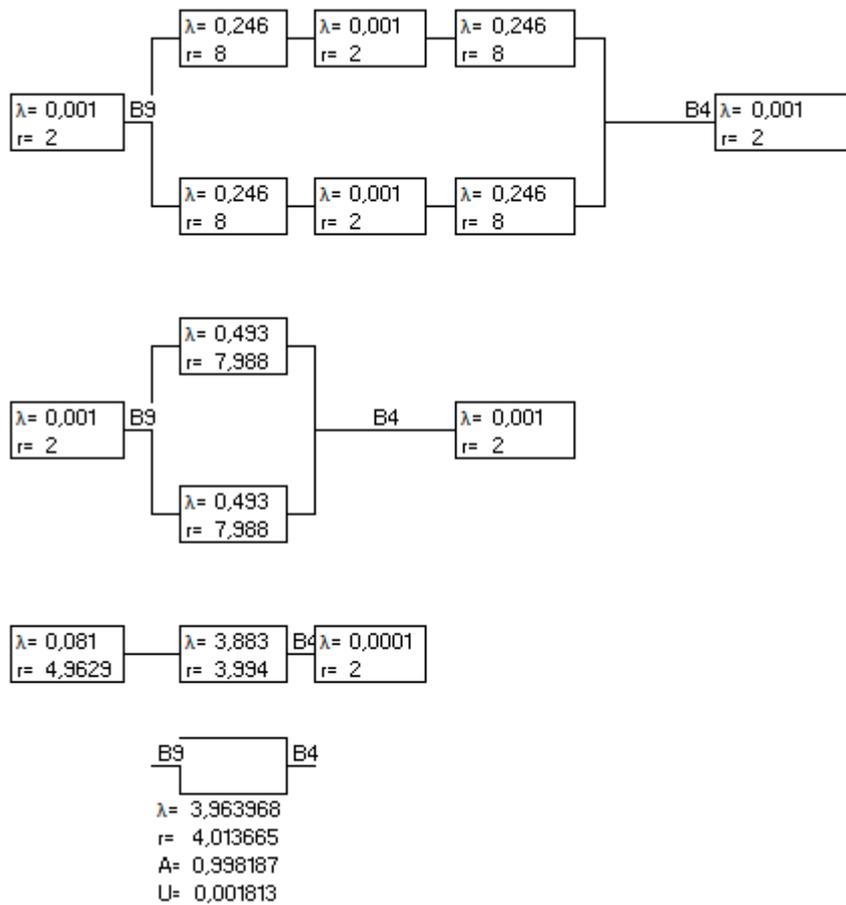


Figura 14. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad de un sistema en anillo con respecto al equivalente de red analizando la barra 4.

Escenario 2.

Paneles fotovoltaicos.

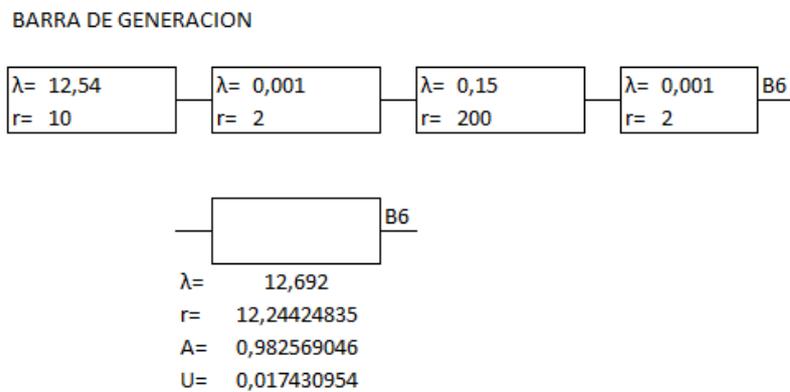


Figura 15. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad de un sistema en anillo con generación fotovoltaica analizando la barra 6.

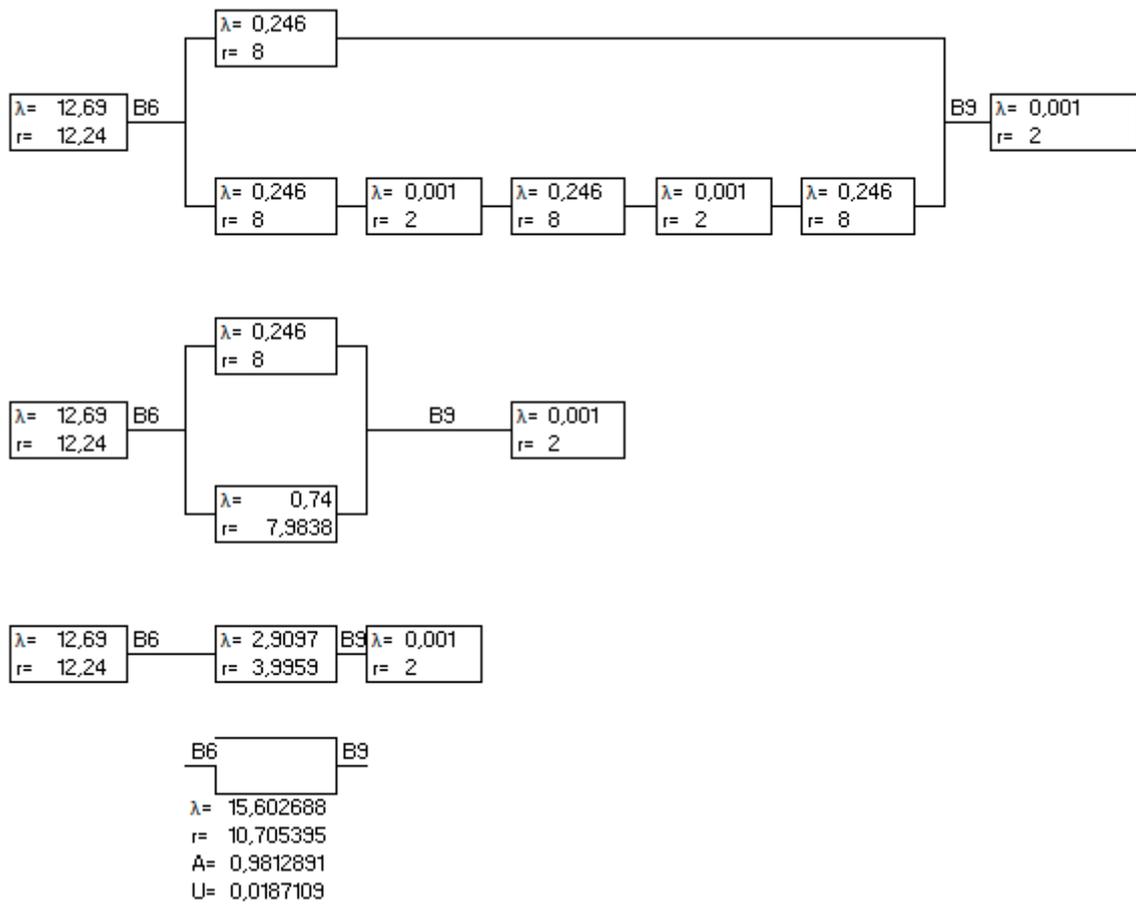


Figura 16. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad de un sistema en anillo con generación fotovoltaica analizando la barra 9 y 4.

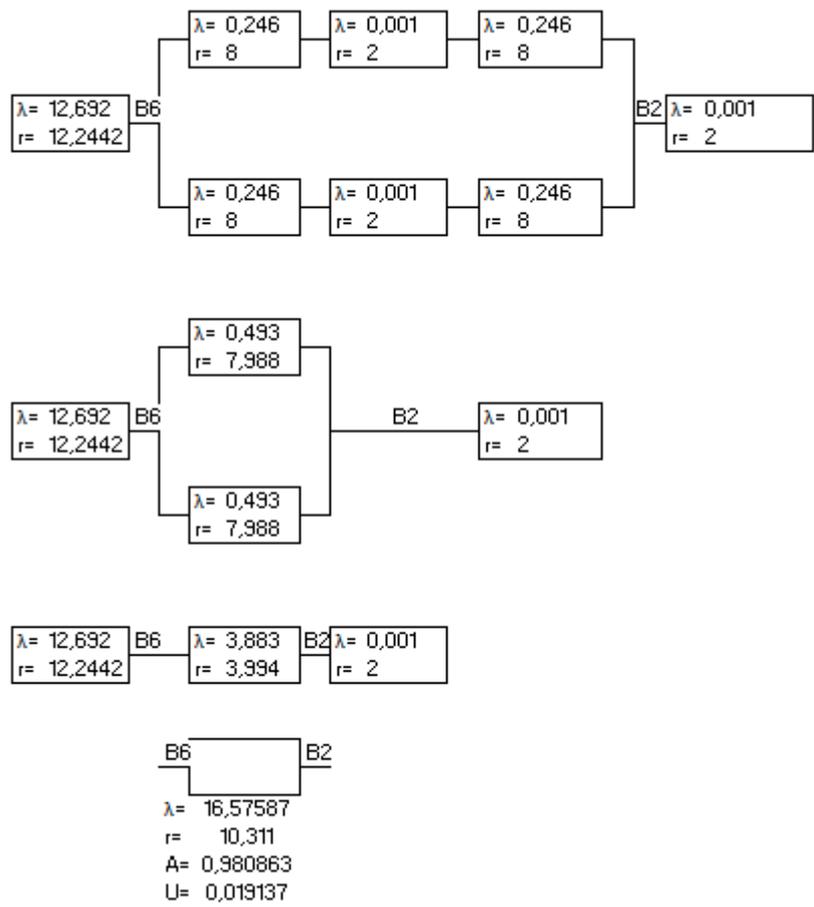


Figura 17. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad de un sistema en anillo con generación fotovoltaica analizando la barra 9 y 4

Escenario 3.

Generador Síncrono.

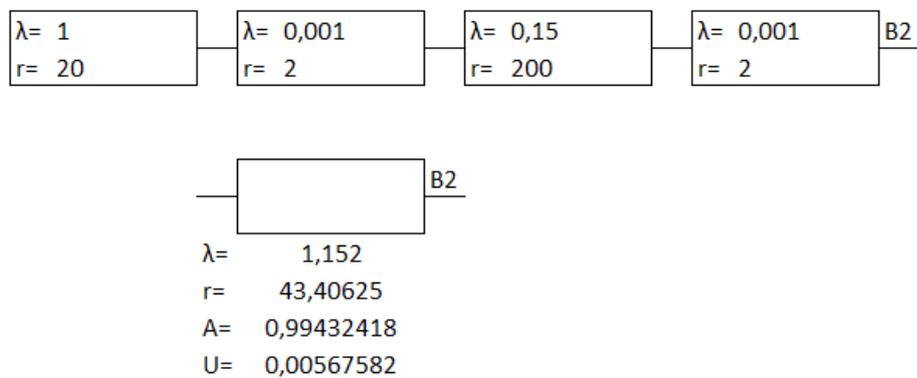


Figura 18. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad de un sistema en anillo con generador síncrono analizando la barra 2.

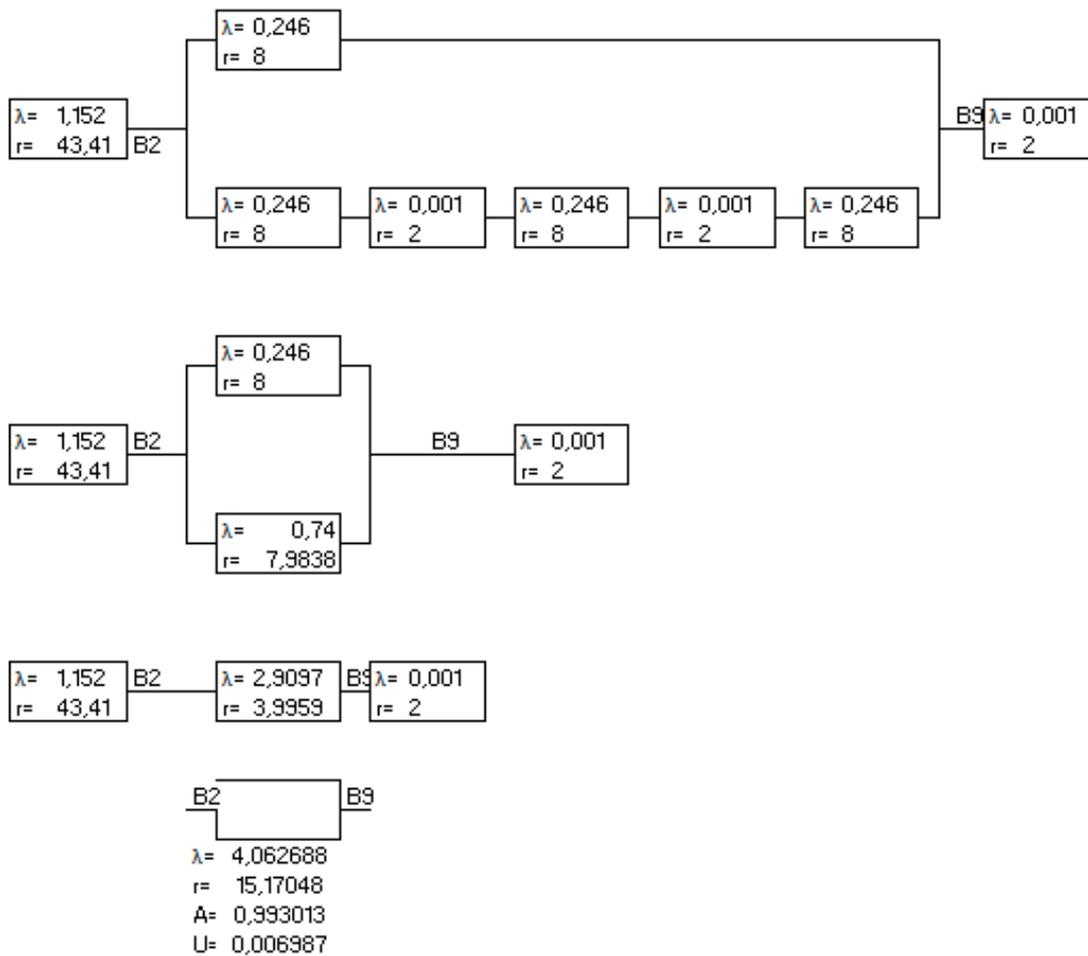


Figura 19. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad de un sistema en anillo con generador síncrono analizando la barra 9.

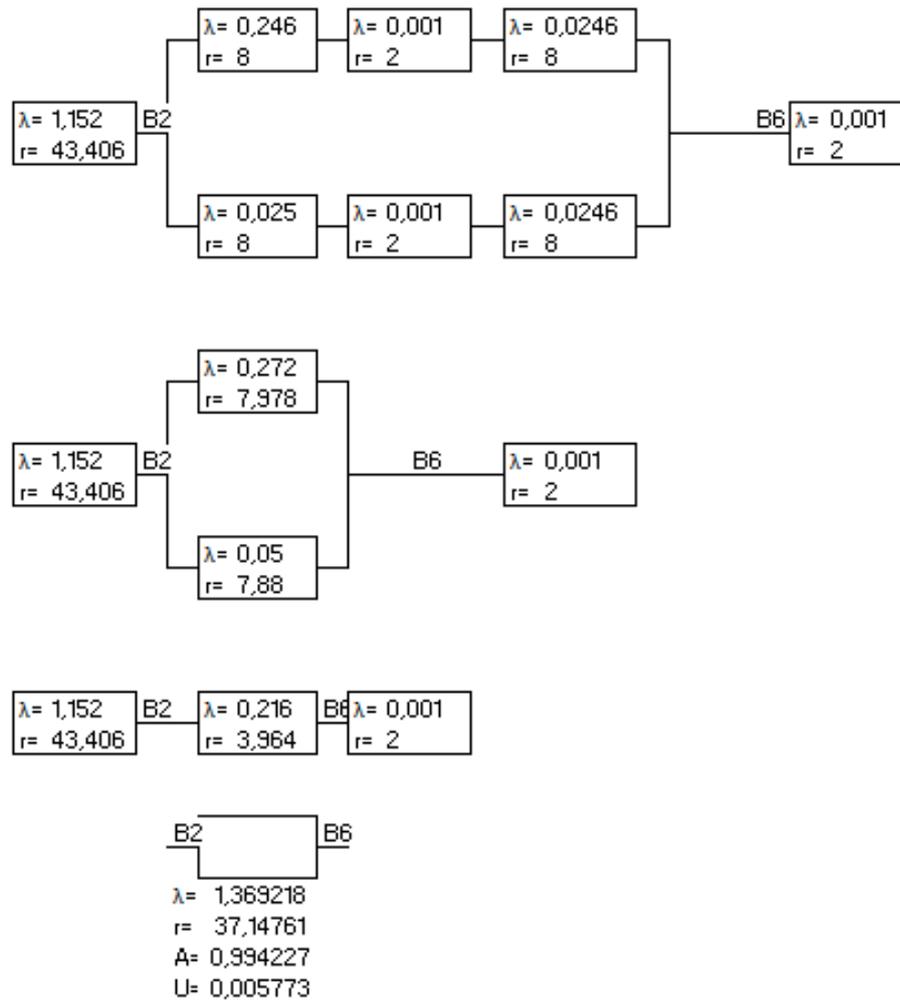


Figura 20. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad de un sistema en anillo con generador síncrono analizando la barra 6.

Escenario 4.

Generación Eólica.

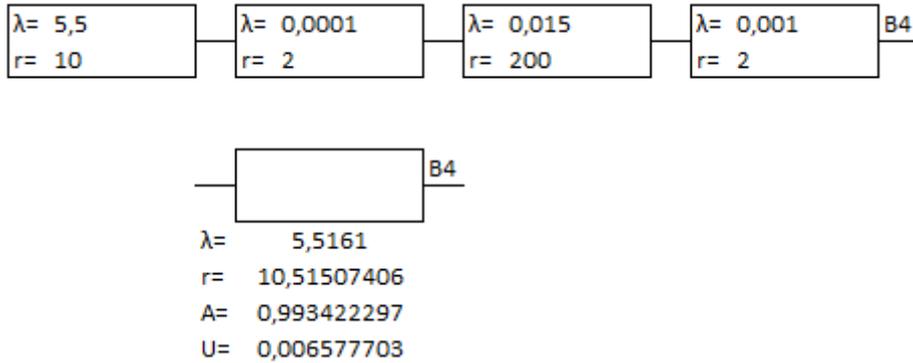


Figura 21. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad de un sistema en anillo con generación eólica analizando la barra 4.

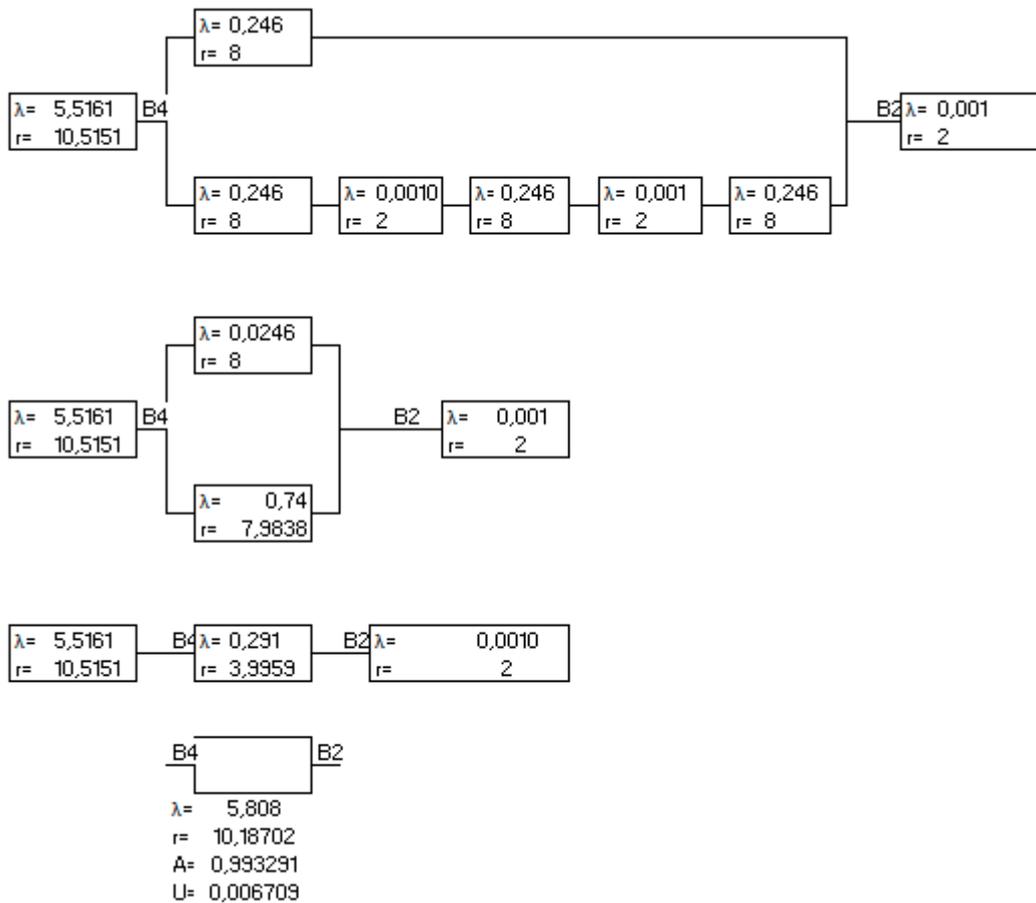


Figura 22. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad de un sistema en anillo con generación eólica analizando la barra 2.

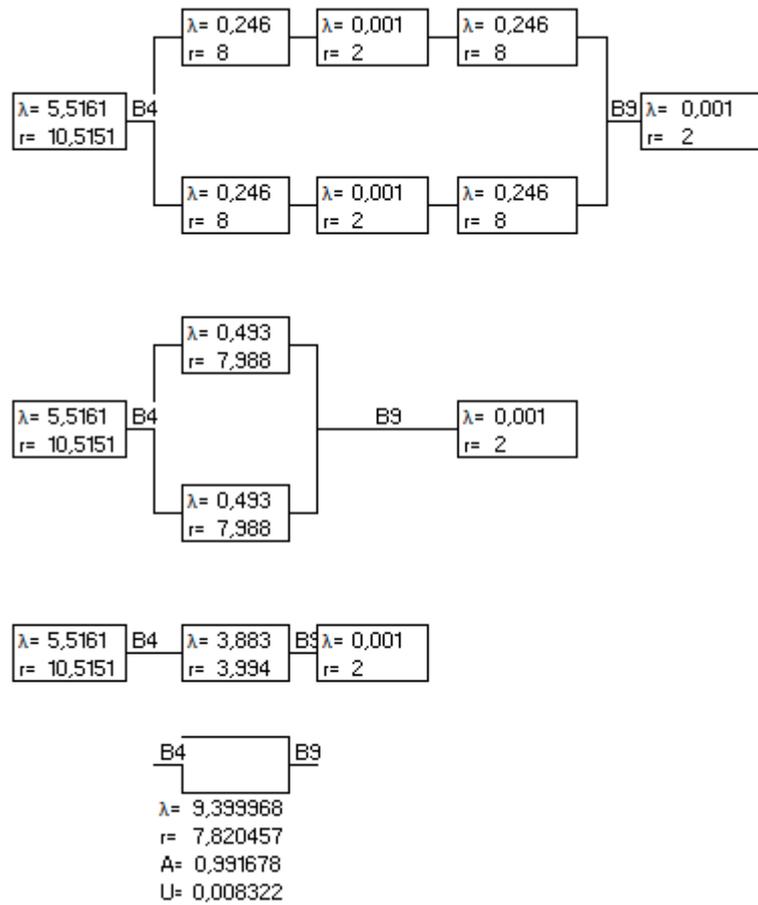


Figura 23. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad de un sistema en anillo con generación eólica analizando la barra 9.

Anexo 4: Método 1 de cálculo empleando Markov analizando de manera radial todo el sistema.

Anexo 4.1: Análisis de la confiabilidad de un sistema de generación distribuida en anillo con combinación de generación, analizada desde el punto de vista del Equivalente de red.

Escenario 1.

Equivalente de Red y todos los generadores en operación.

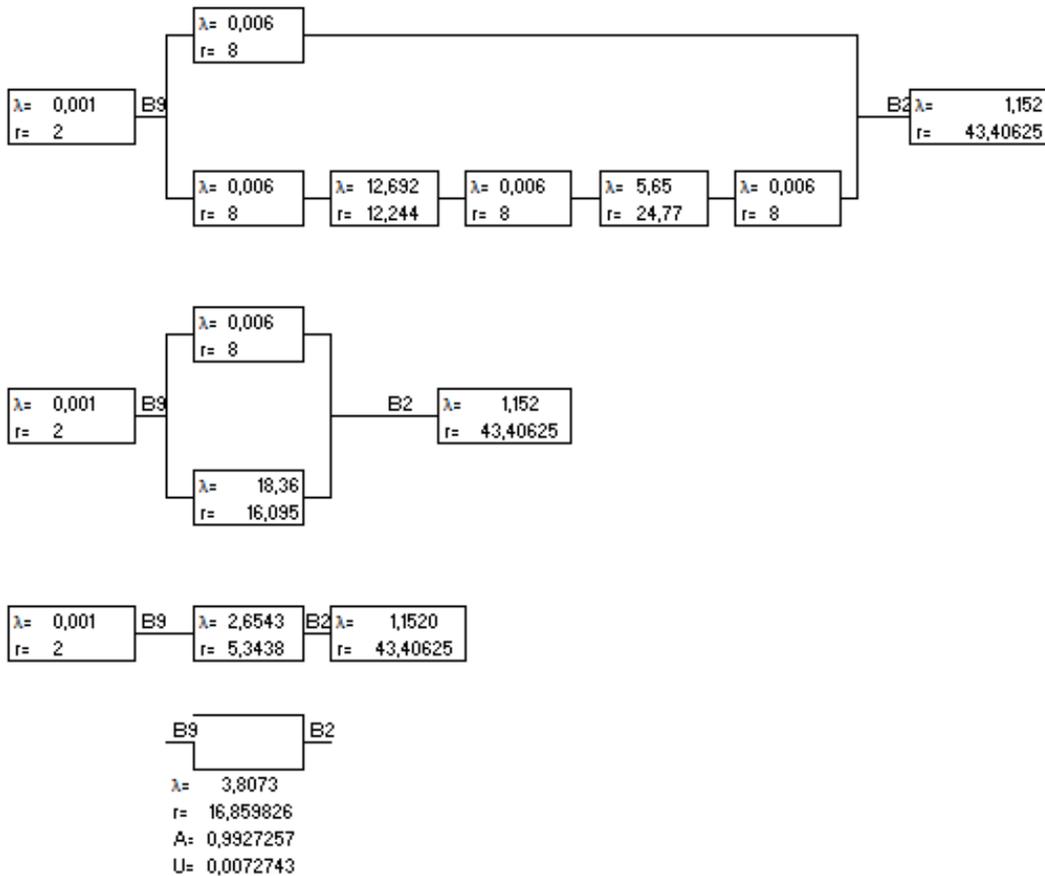


Figura 24. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 2.

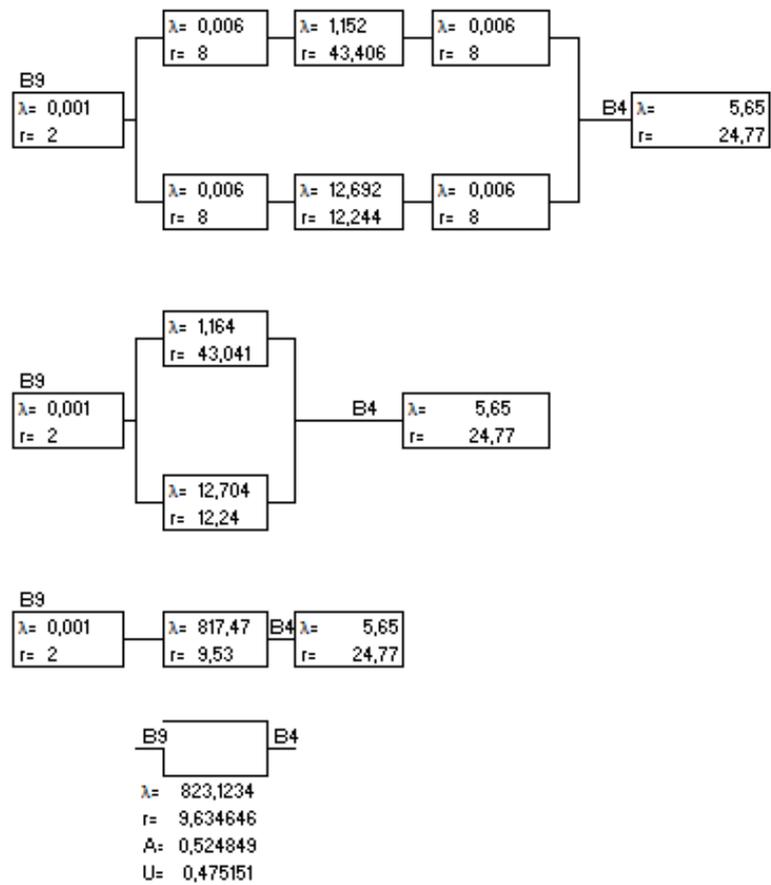


Figura 25. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 4.

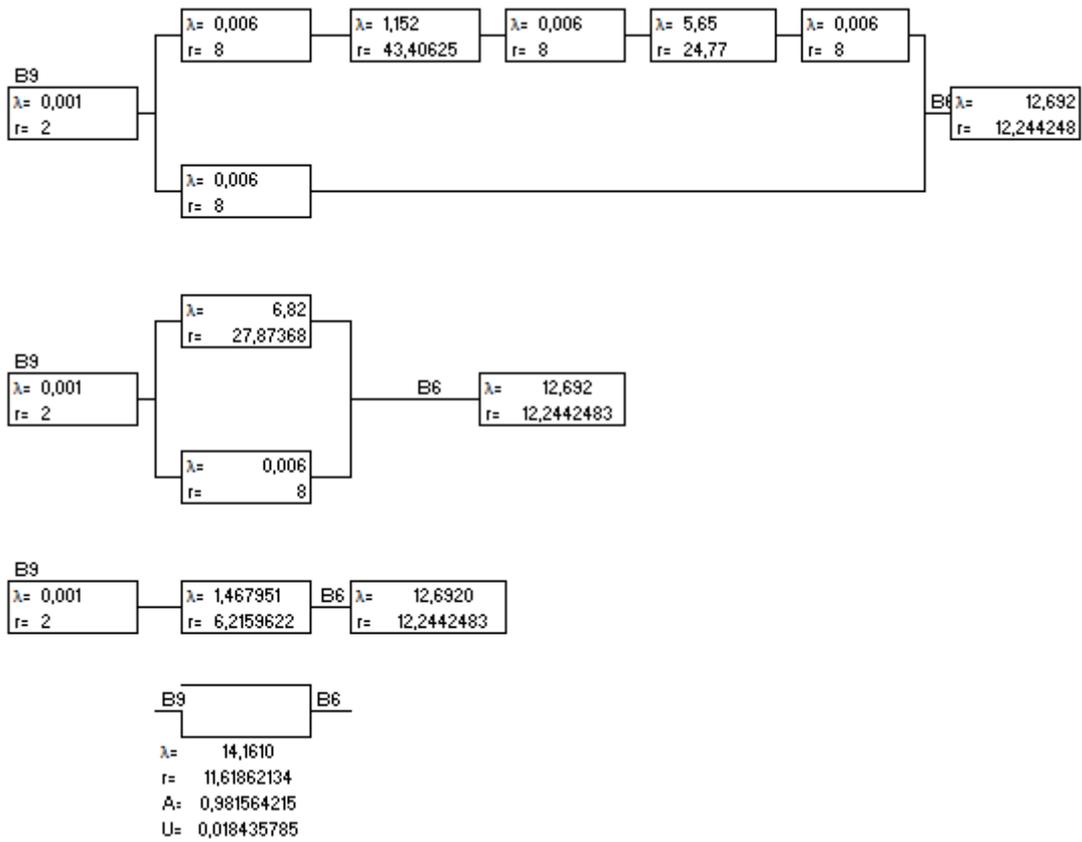


Figura 26. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 6.

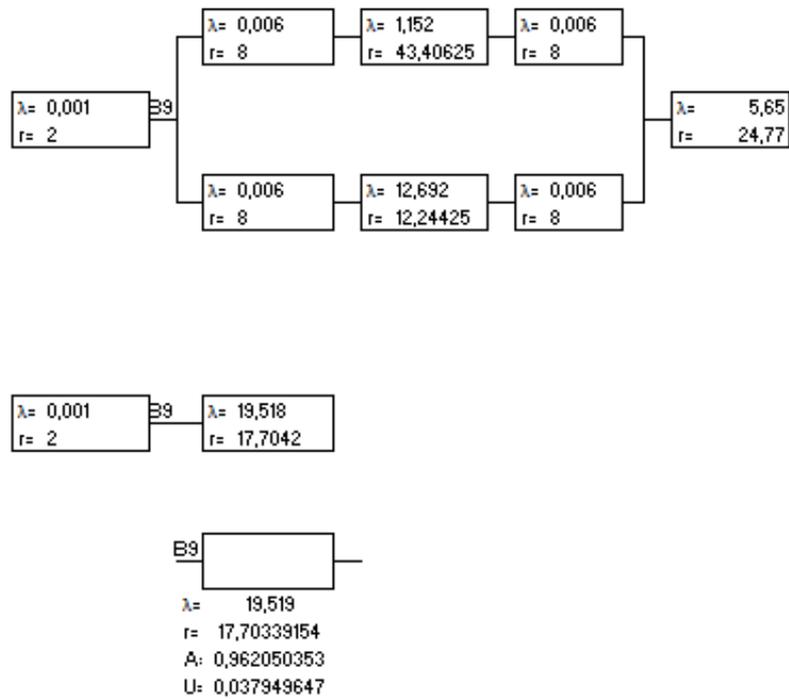


Figura 27. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 9.

Escenario 2.

Equivalente de red, generador fotovoltaico y generador eólico.

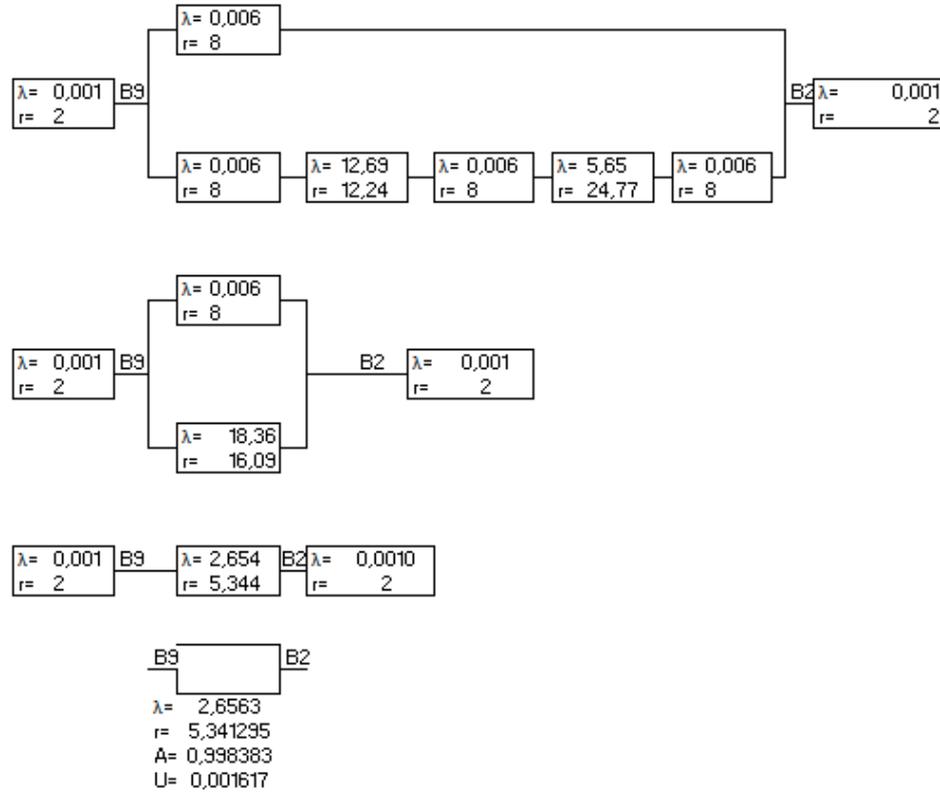


Figura 28. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 2.

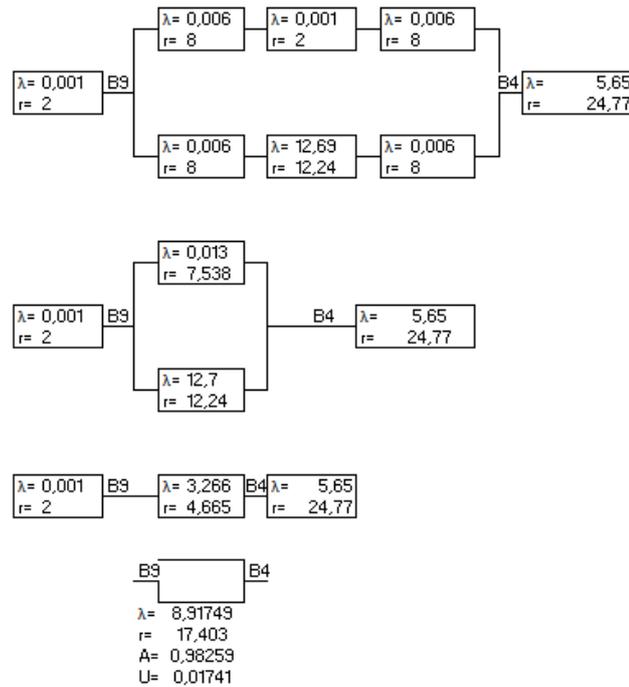


Figura 29. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 4.

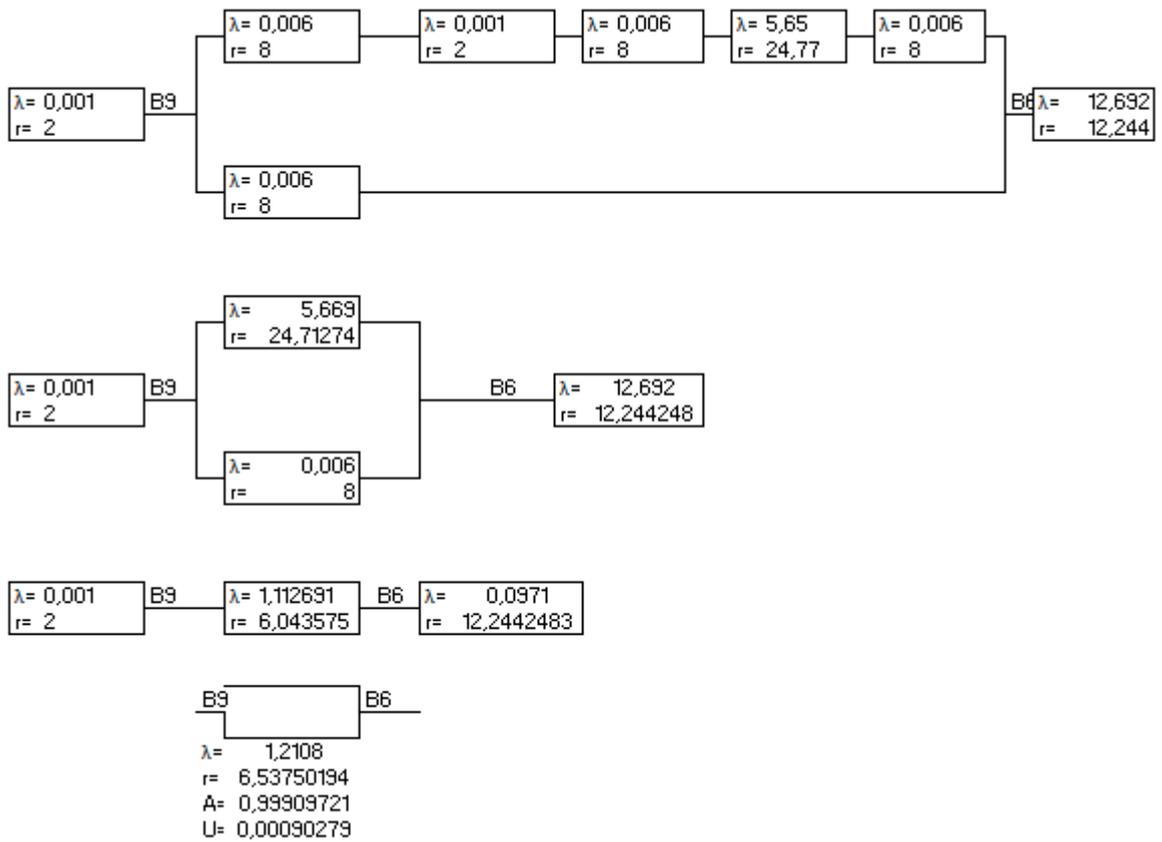


Figura 30. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 6.

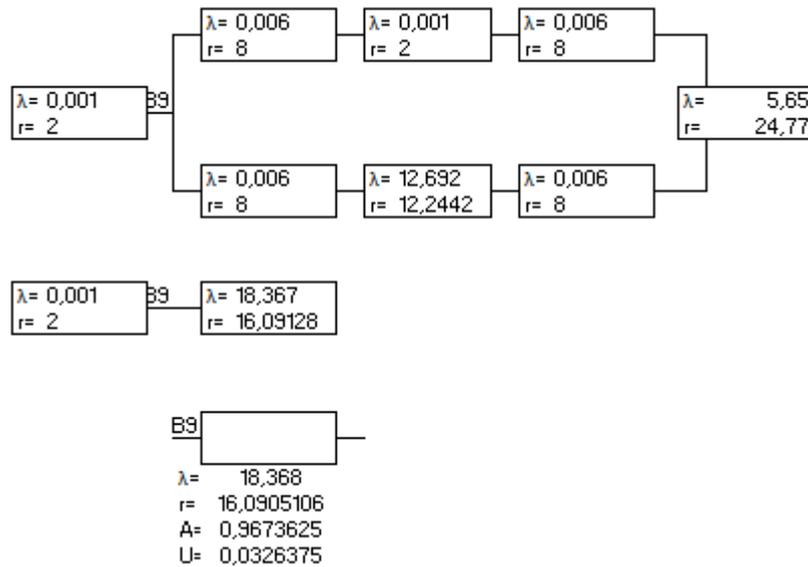


Figura 31. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 9.

Escenario 3.

Equivalente de Red y Generación Fotovoltaica.

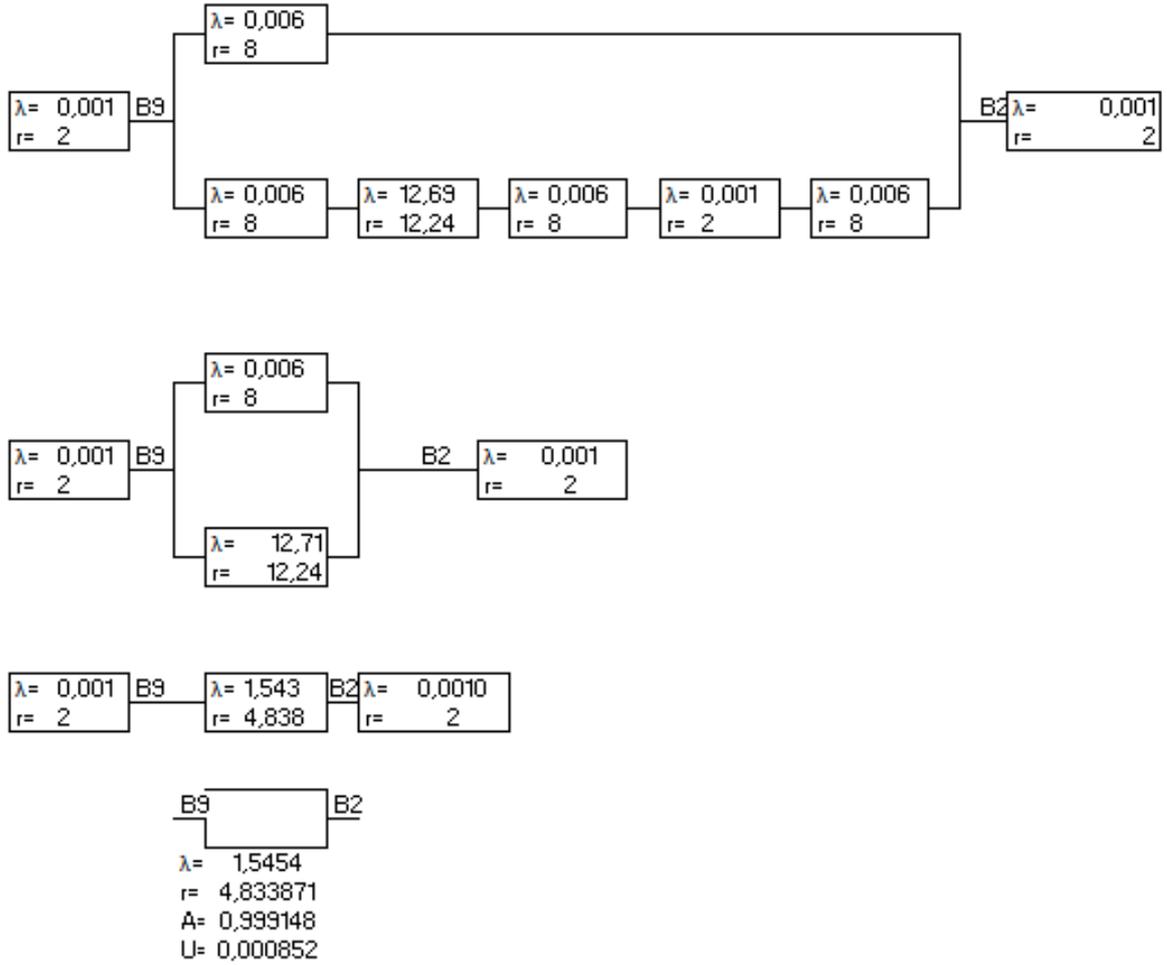


Figura 32. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 2.

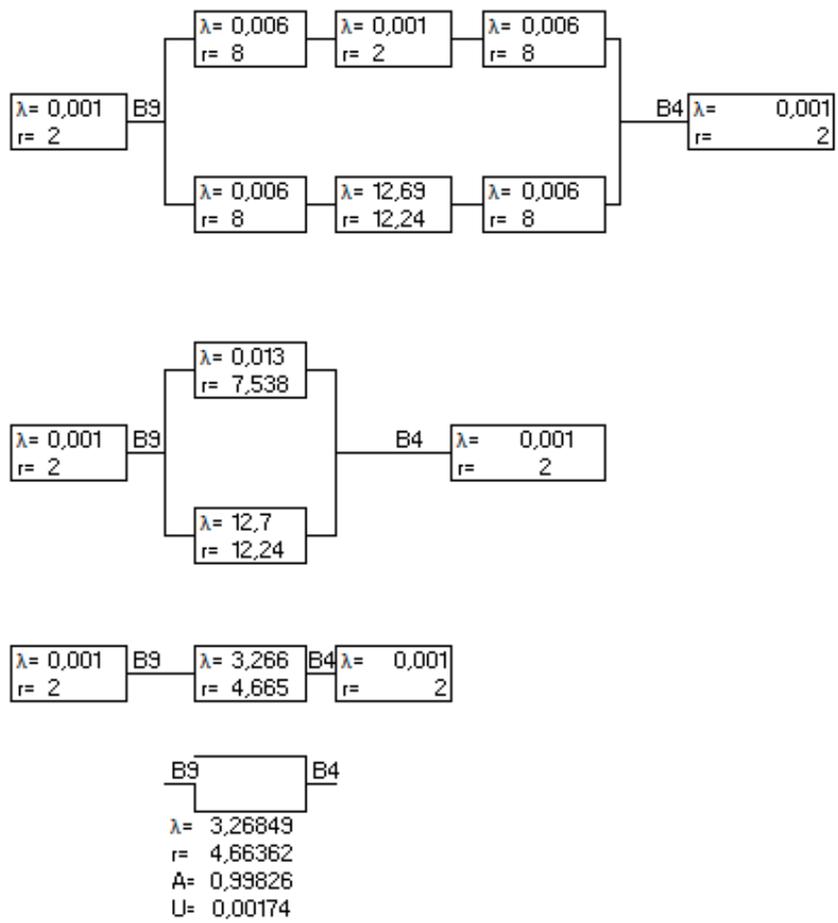


Figura 33. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 4.

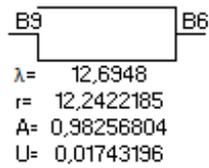
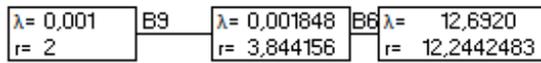
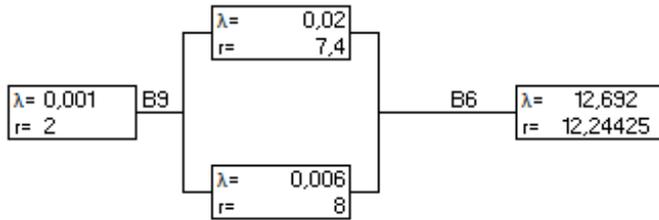
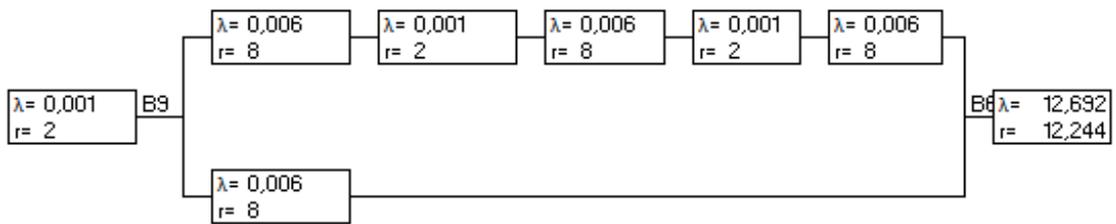


Figura 34. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 6.

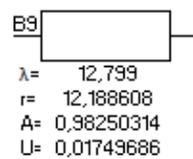
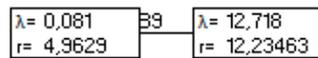
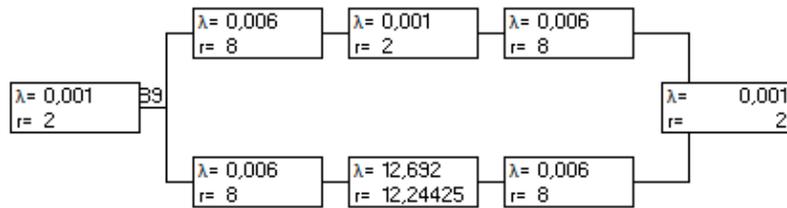


Figura 35. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 9.

Anexo 4.2: Análisis de la confiabilidad de un sistema de generación distribuida en anillo con combinación de generación, analizada desde el punto de vista del generador síncrono.

Escenario 1.

Generación Síncrona y todos los generadores en operación.

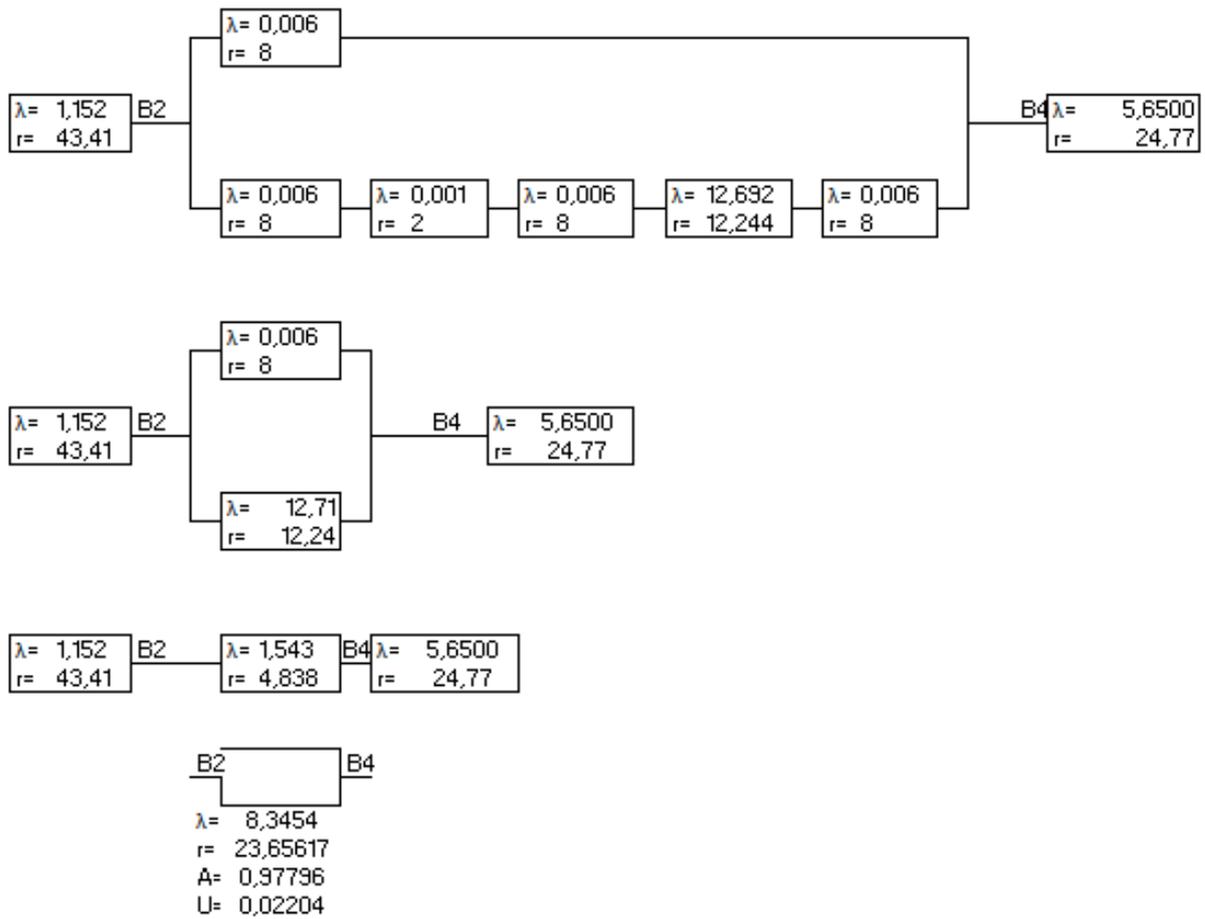


Figura 36. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 4.

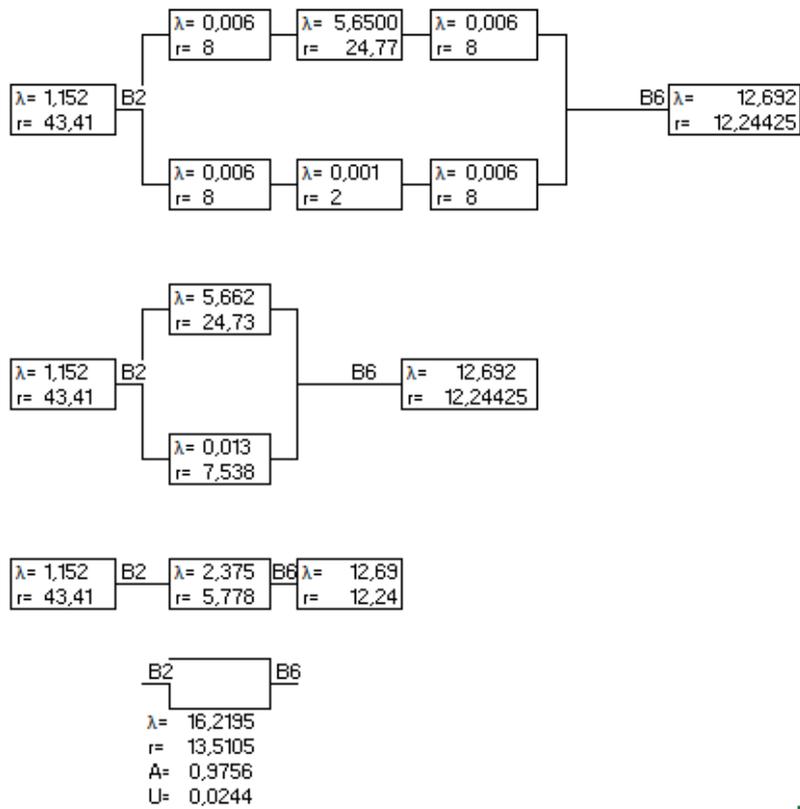


Figura 37. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 6.

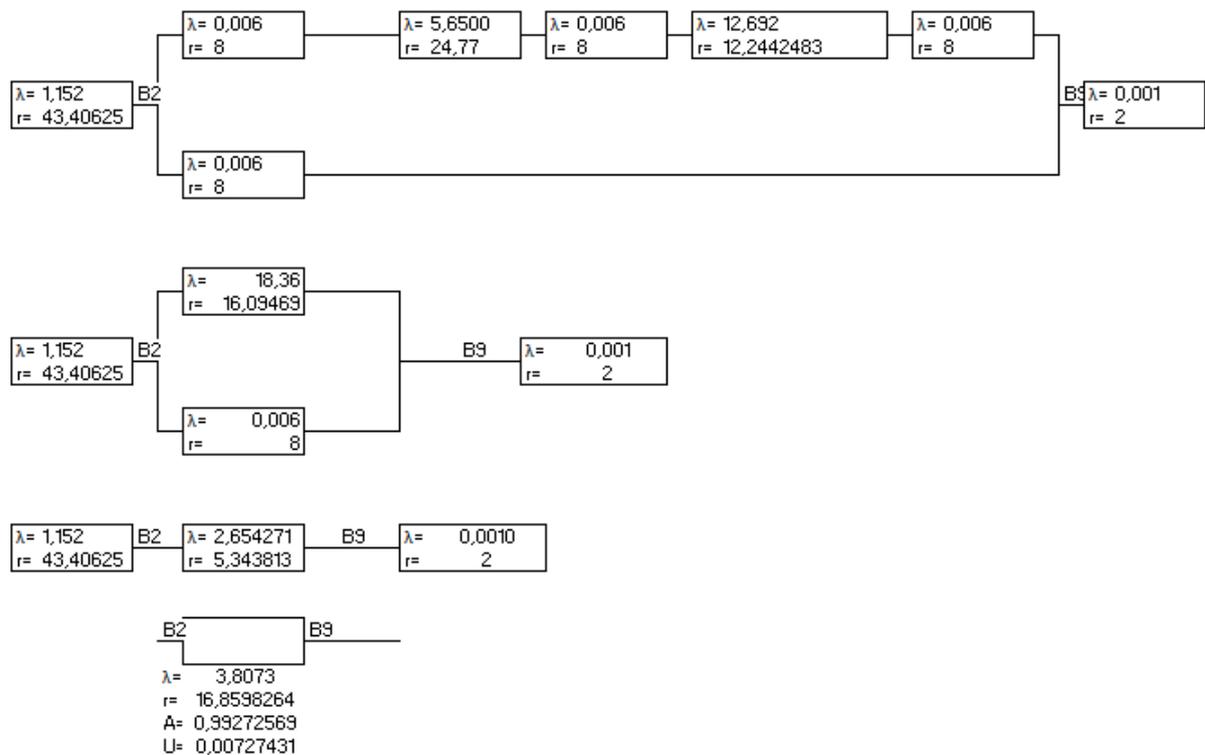


Figura 38. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 9.

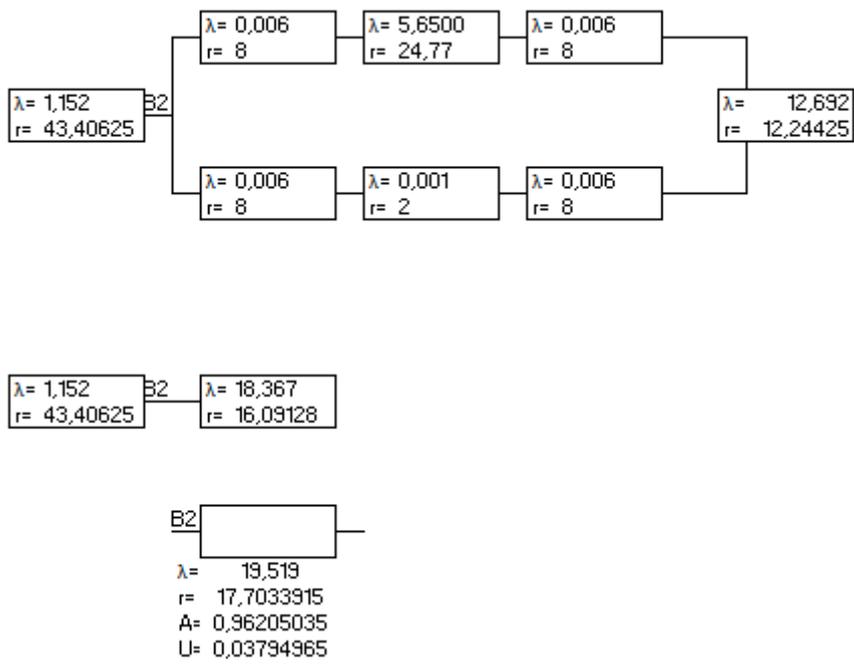


Figura 39. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 2.

Escenario 2.

Generación Síncrona, Generación Fotovoltaica y Equivalente de Red.

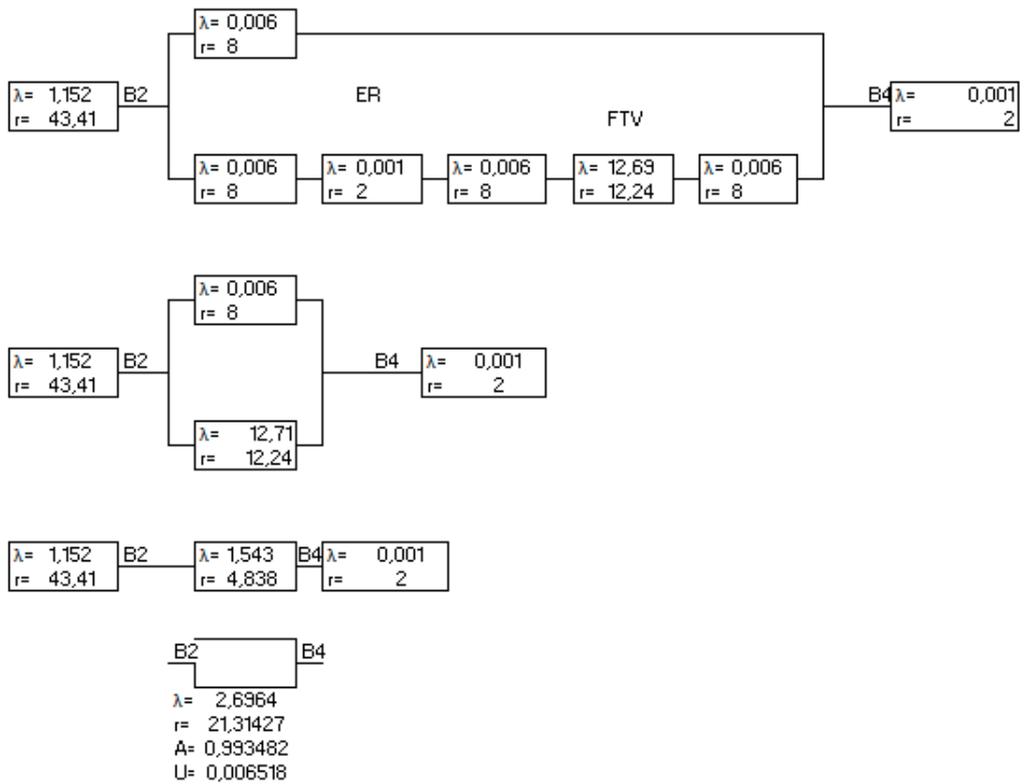


Figura 39. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 4.

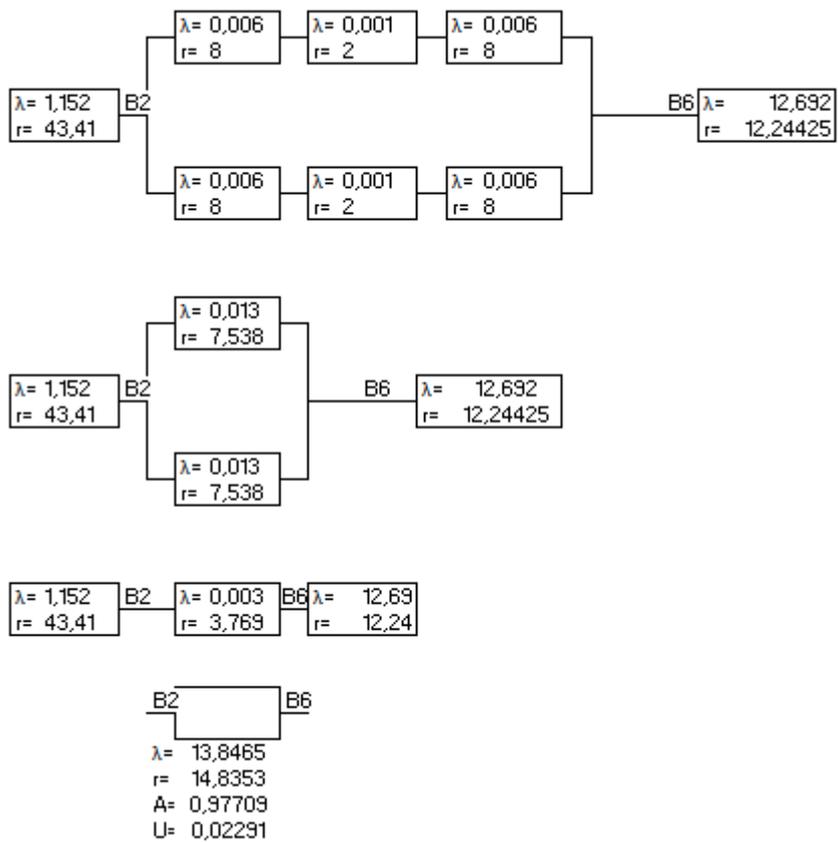


Figura 40. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 6.

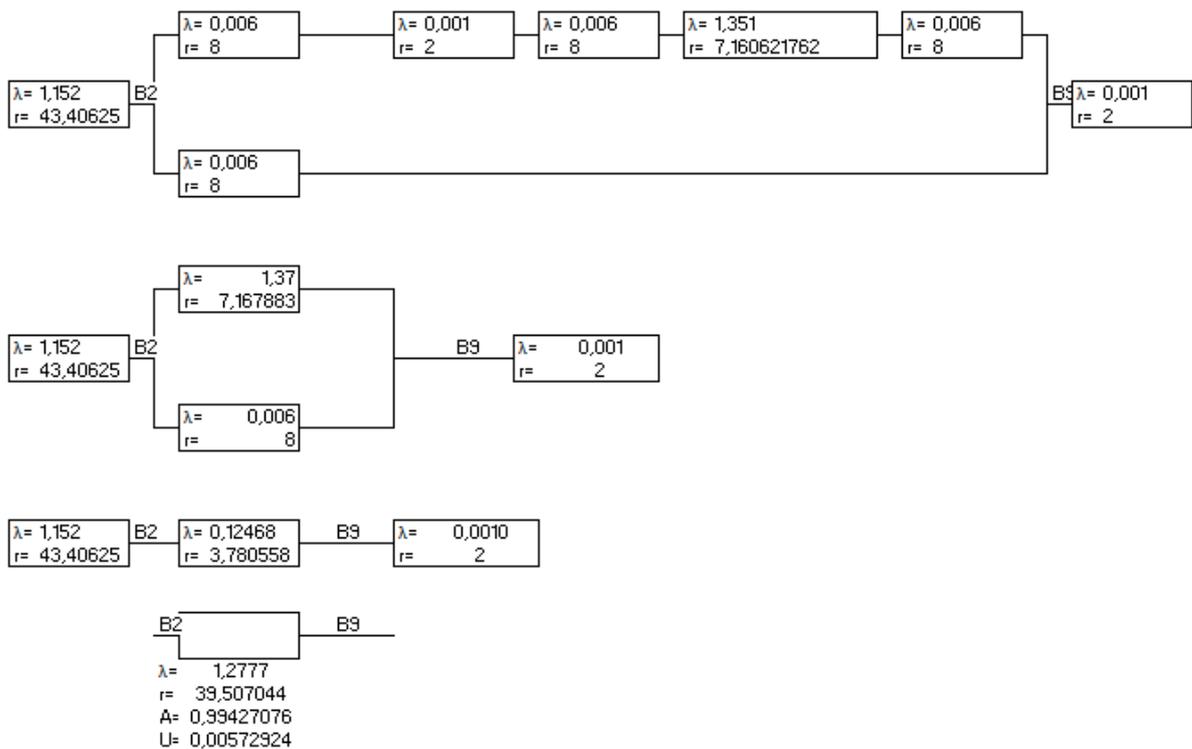


Figura 41. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 9.

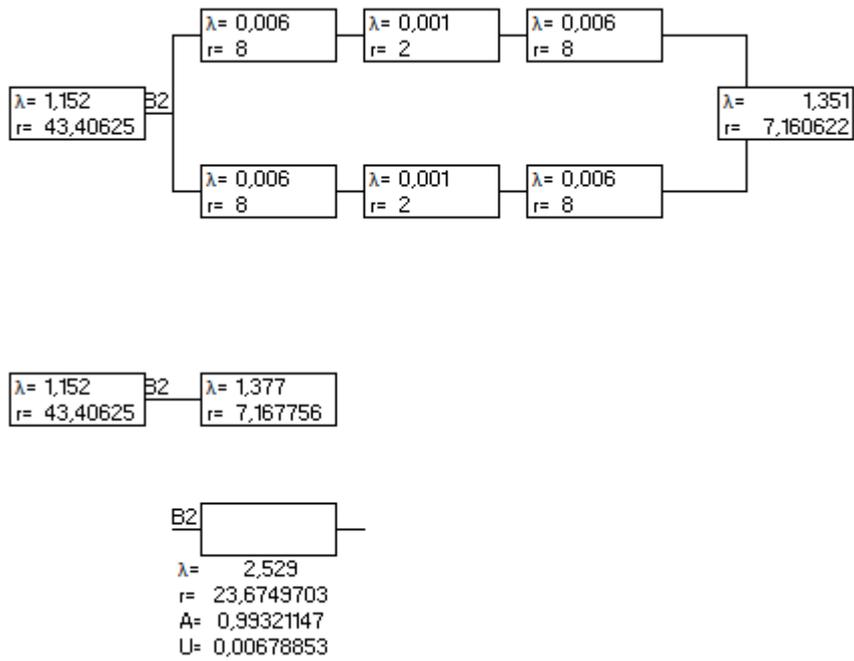


Figura 42. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 2.

Escenario 3.

Generación Síncrona y Equivalente de Red.

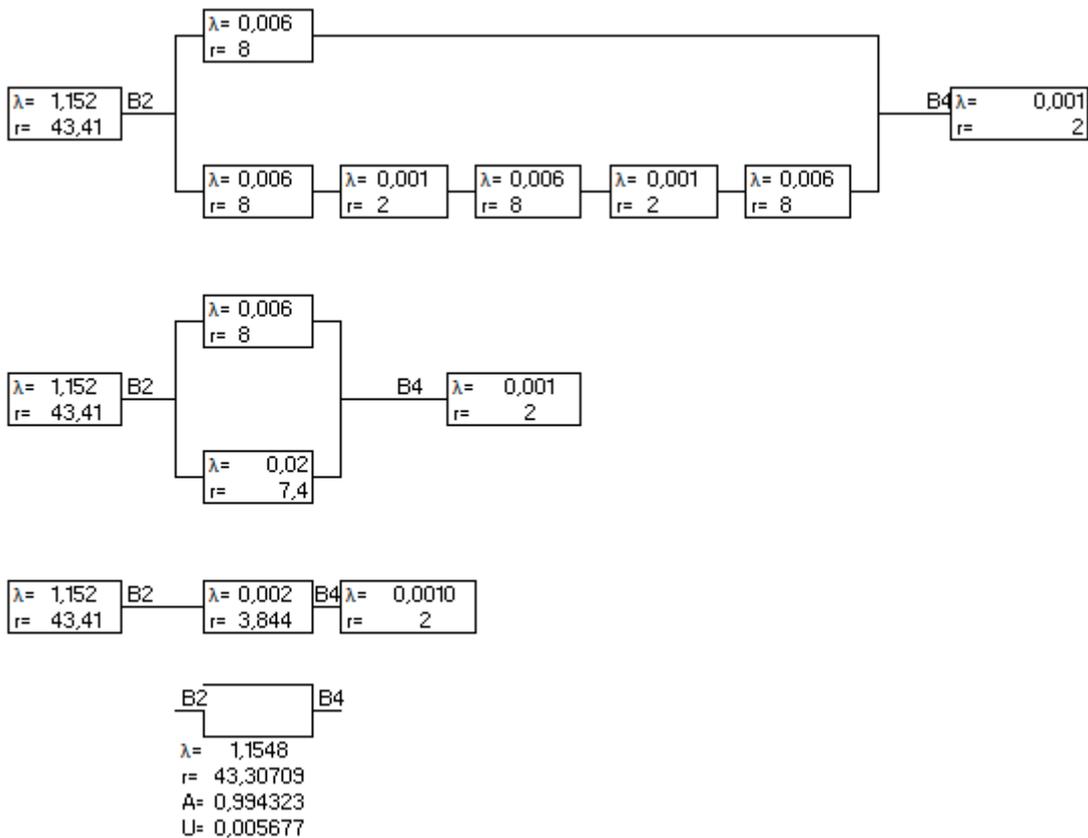


Figura 43. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 4.

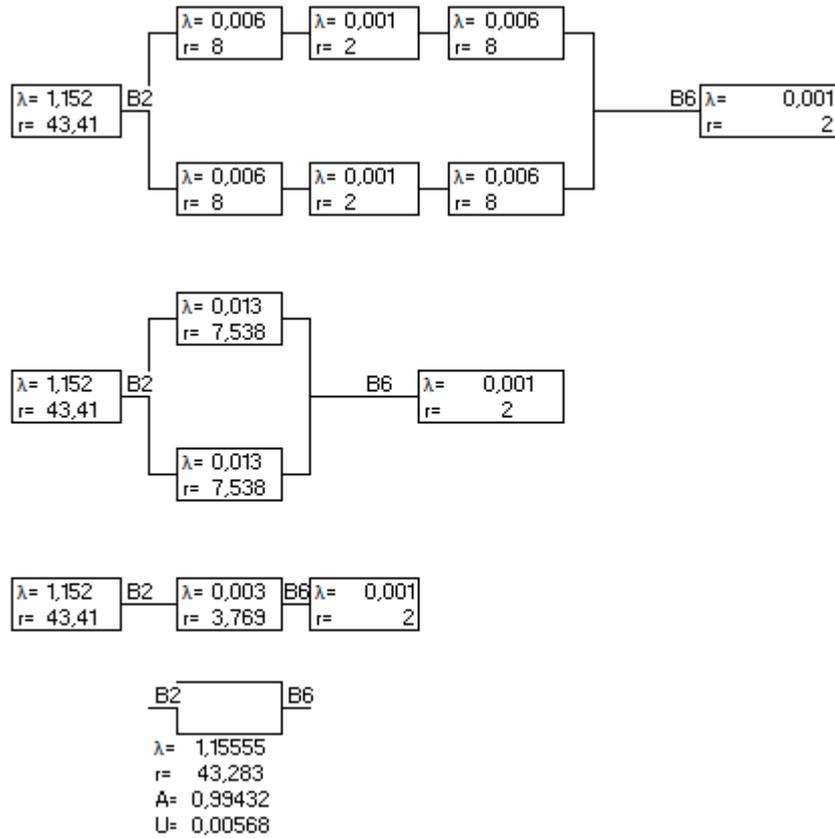


Figura 44. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 6.

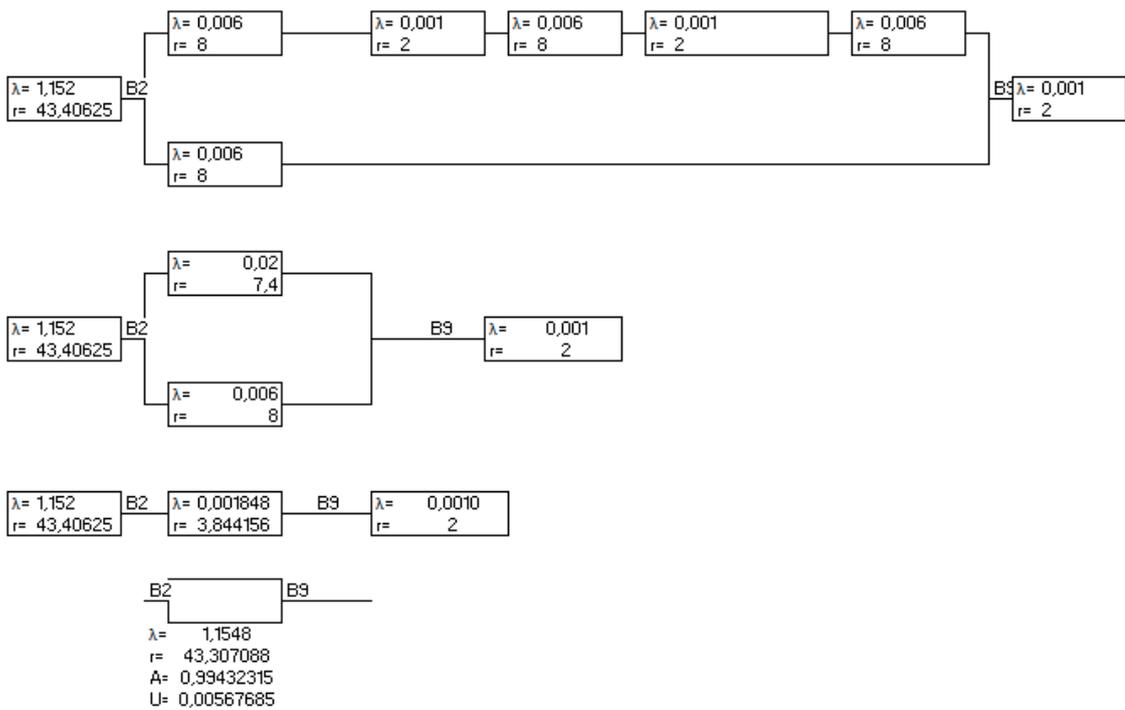


Figura 45. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 9.

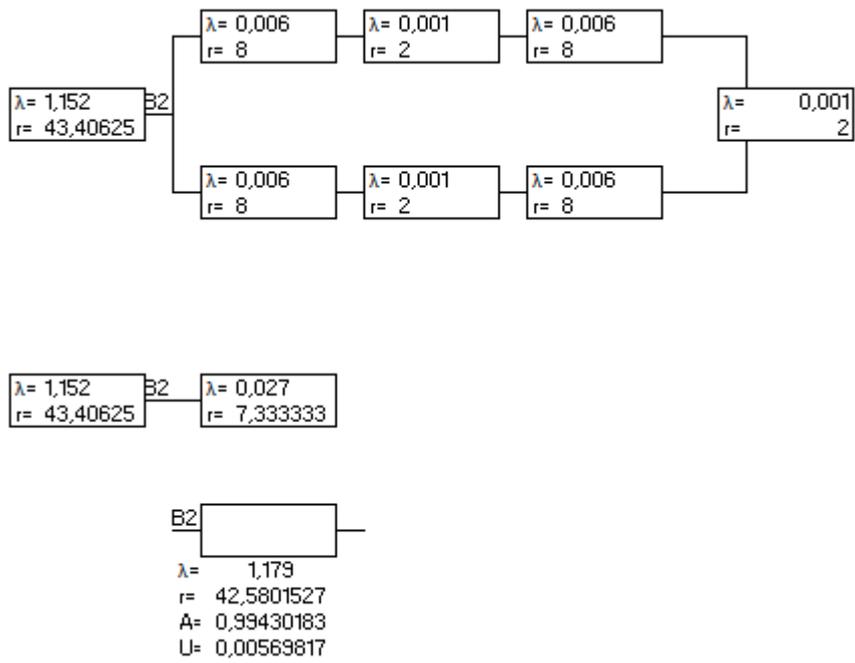


Figura 46. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 2.

Anexo 4.3: Análisis de la confiabilidad de un sistema de generación Distribuida en anillo con combinación de generación, analizada desde el punto de vista del generador eólico.

Escenario 1.

Generación eólica y todos los generadores en operación.

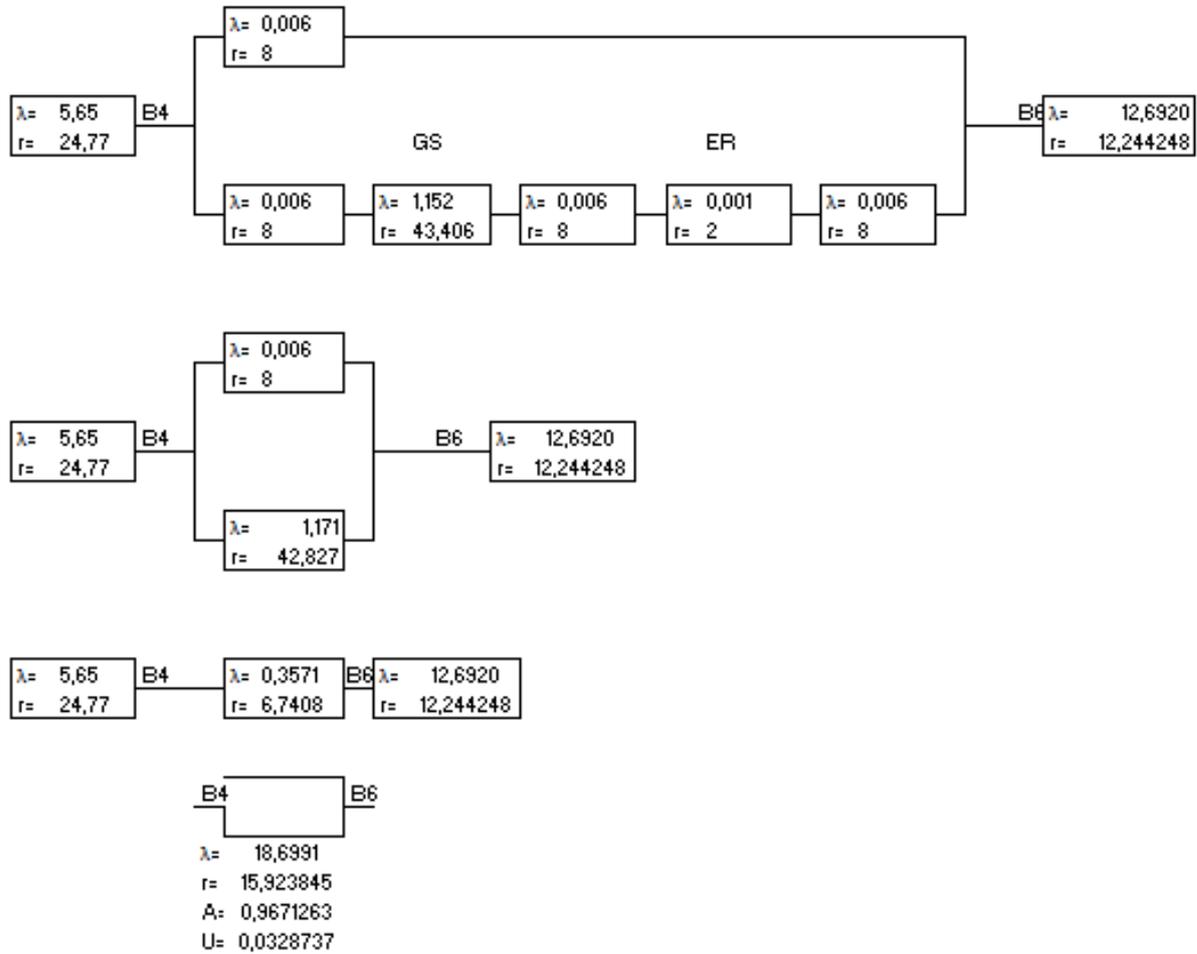


Figura 47. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 6.

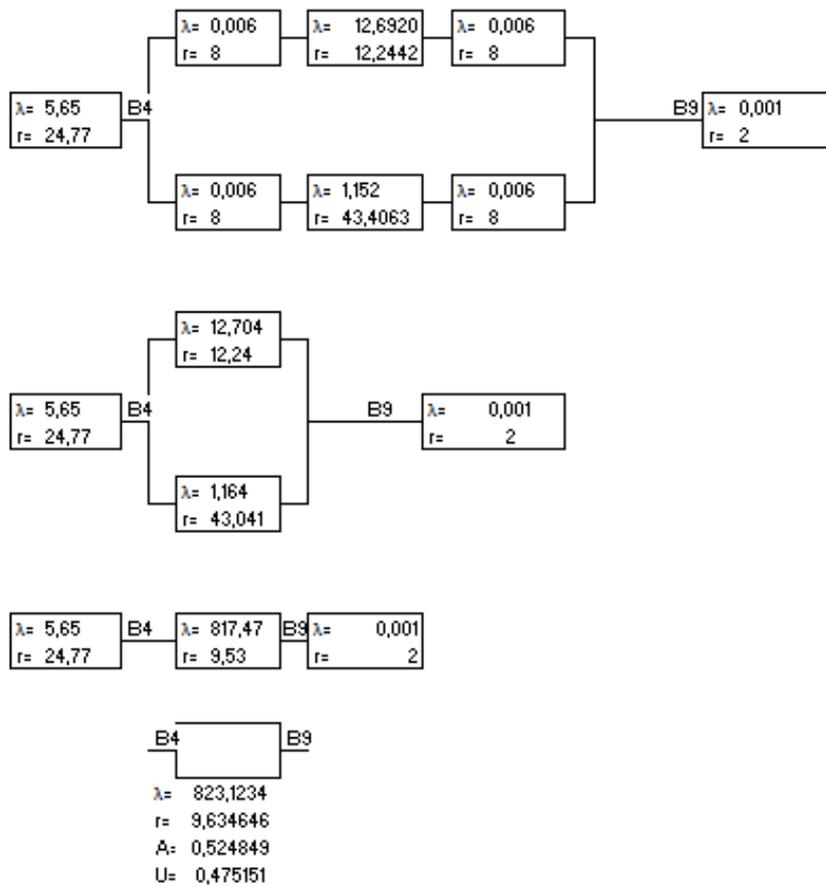


Figura 48. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 9.

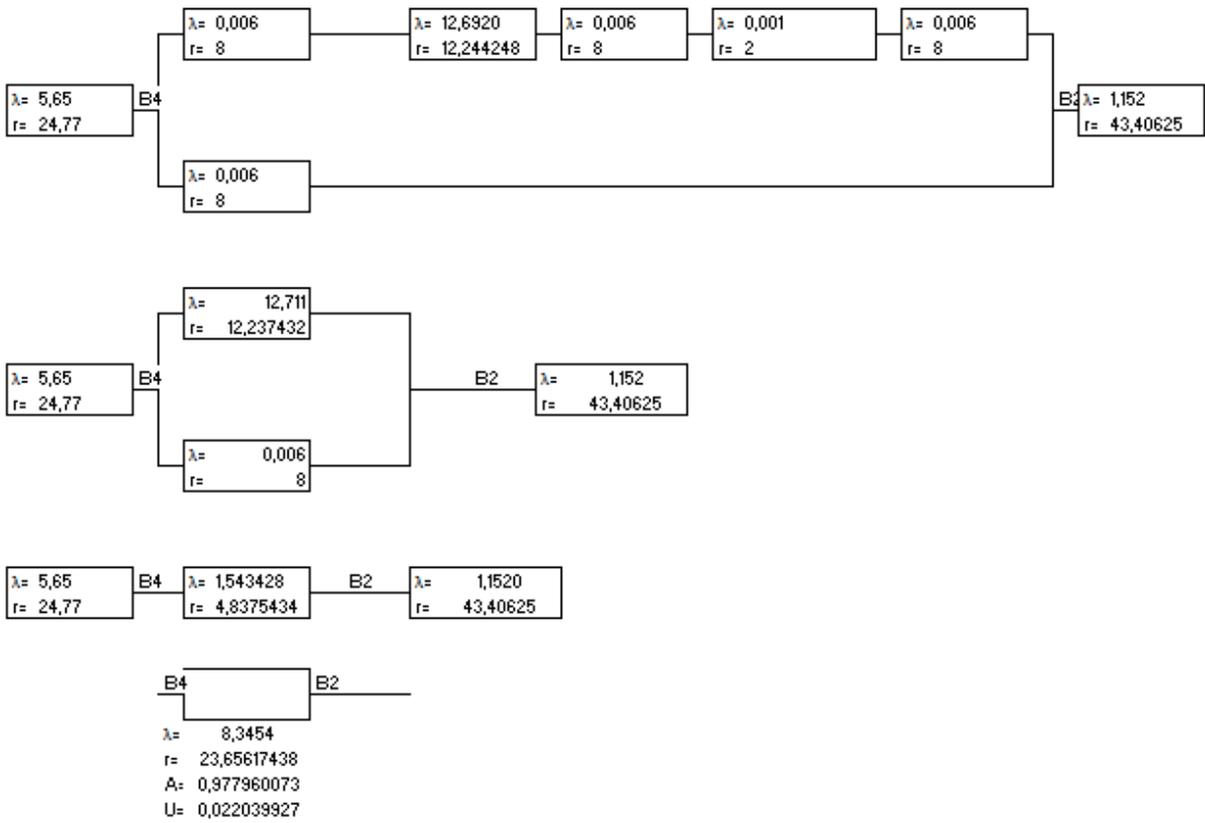


Figura 49. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 2.

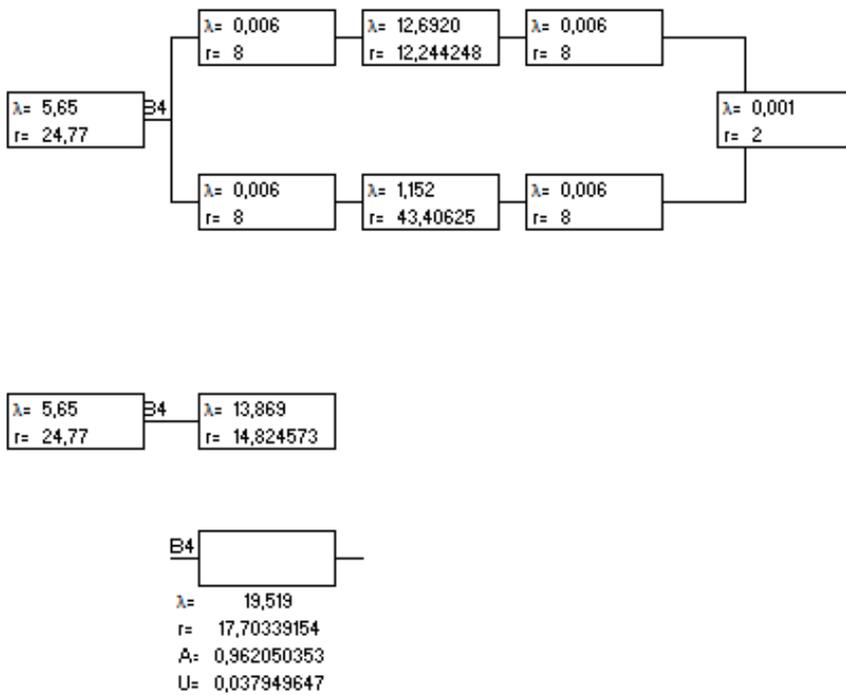


Figura 50. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 4.

Escenario 2.

Generación Eólica, Generador Síncrono y Equivalente de Red.

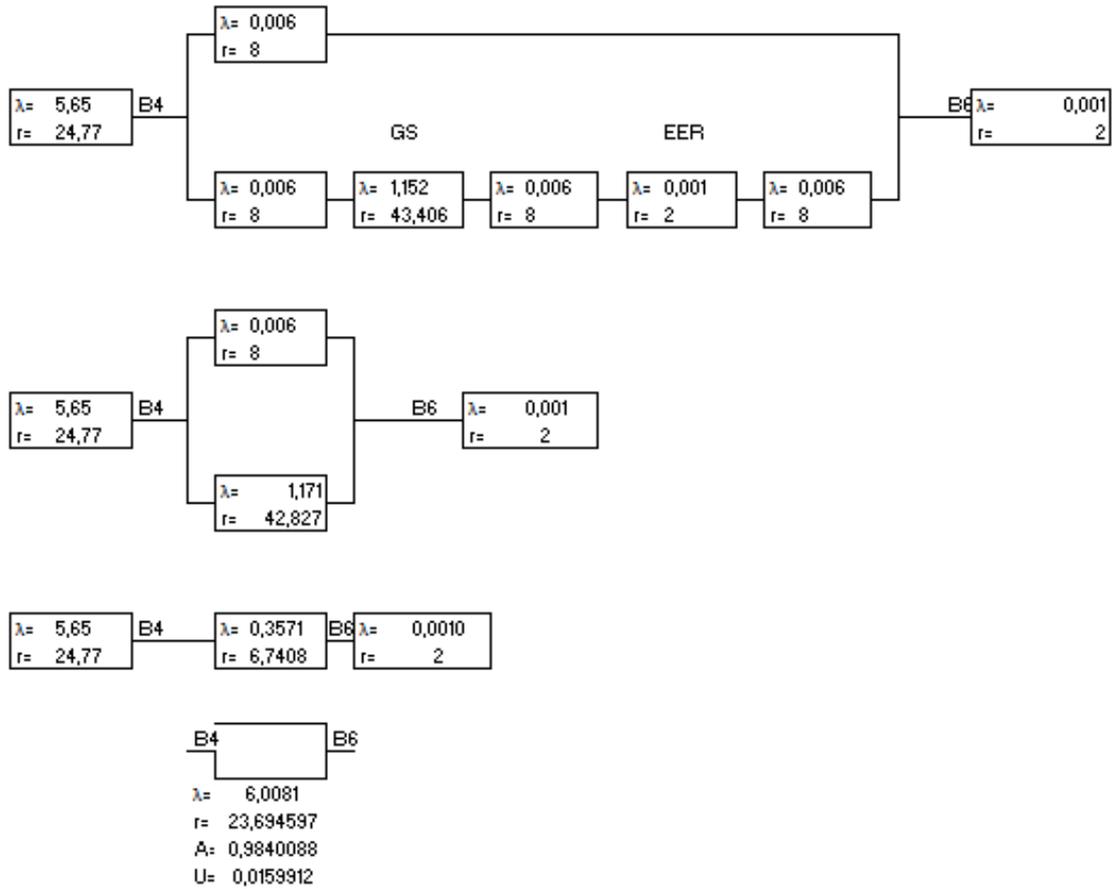


Figura 51. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 6.

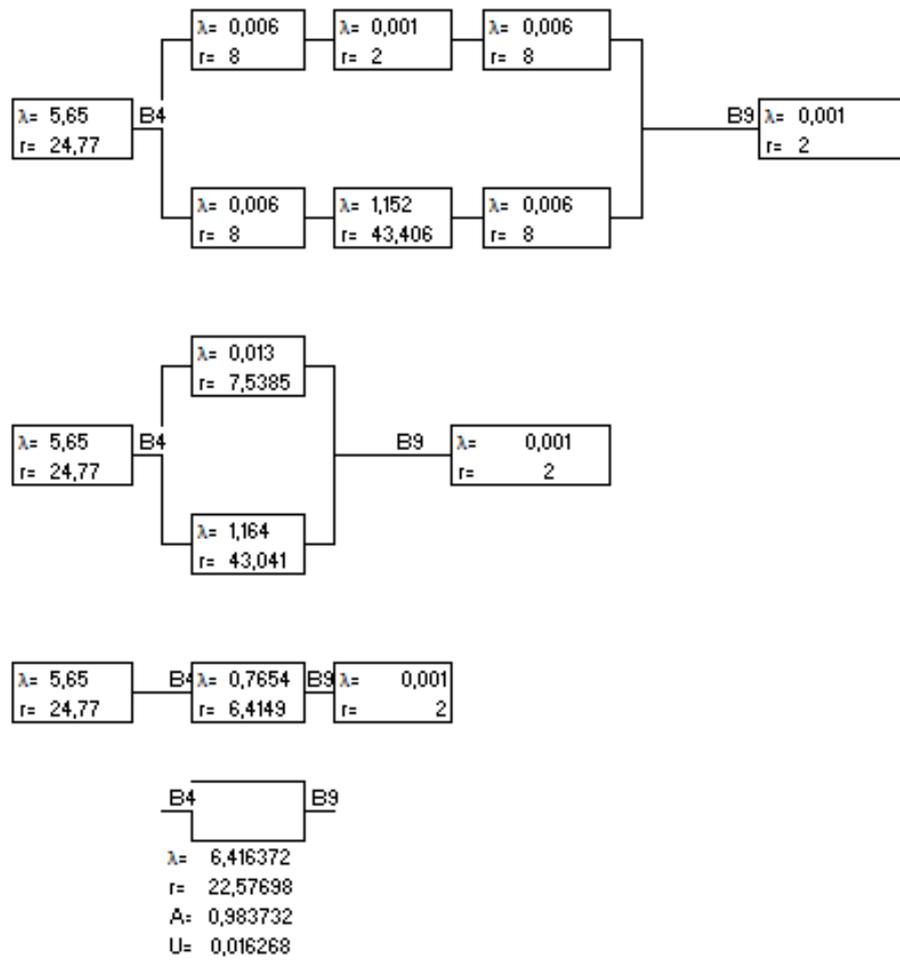


Figura 52. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 9.

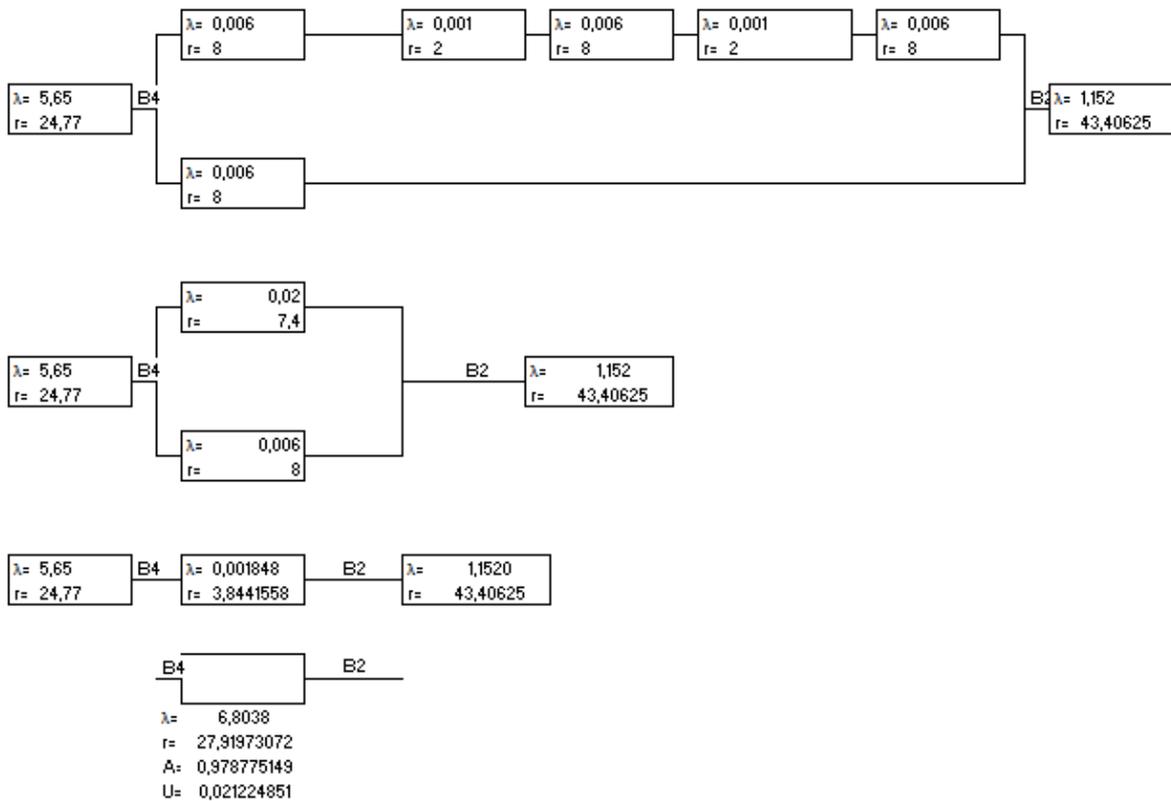


Figura 53. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 2.

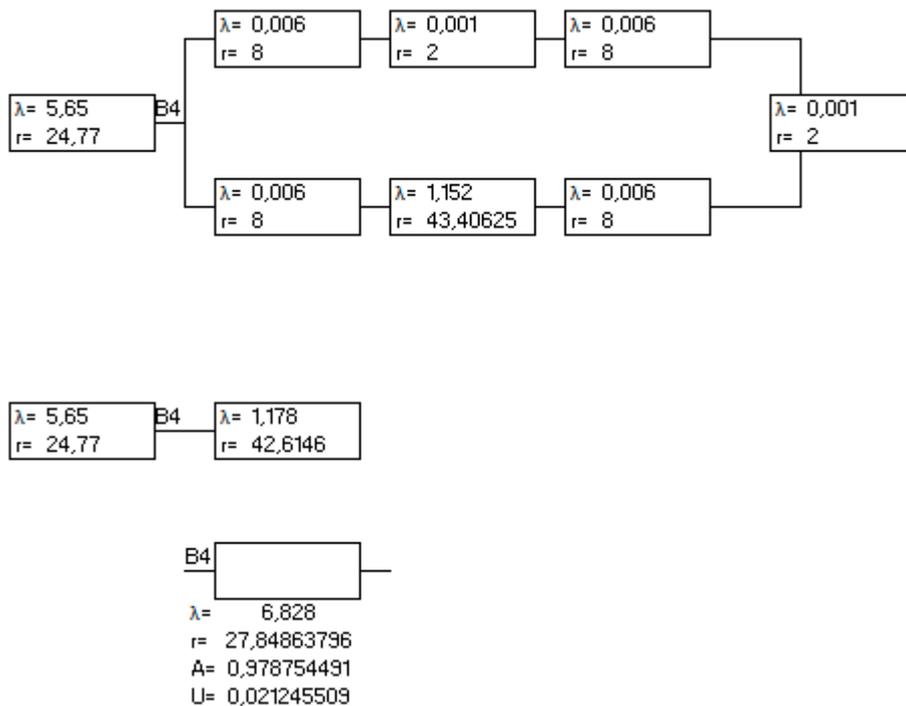


Figura 54. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 4.

Escenario 3.

Generación Eólica y Equivalente de Red.

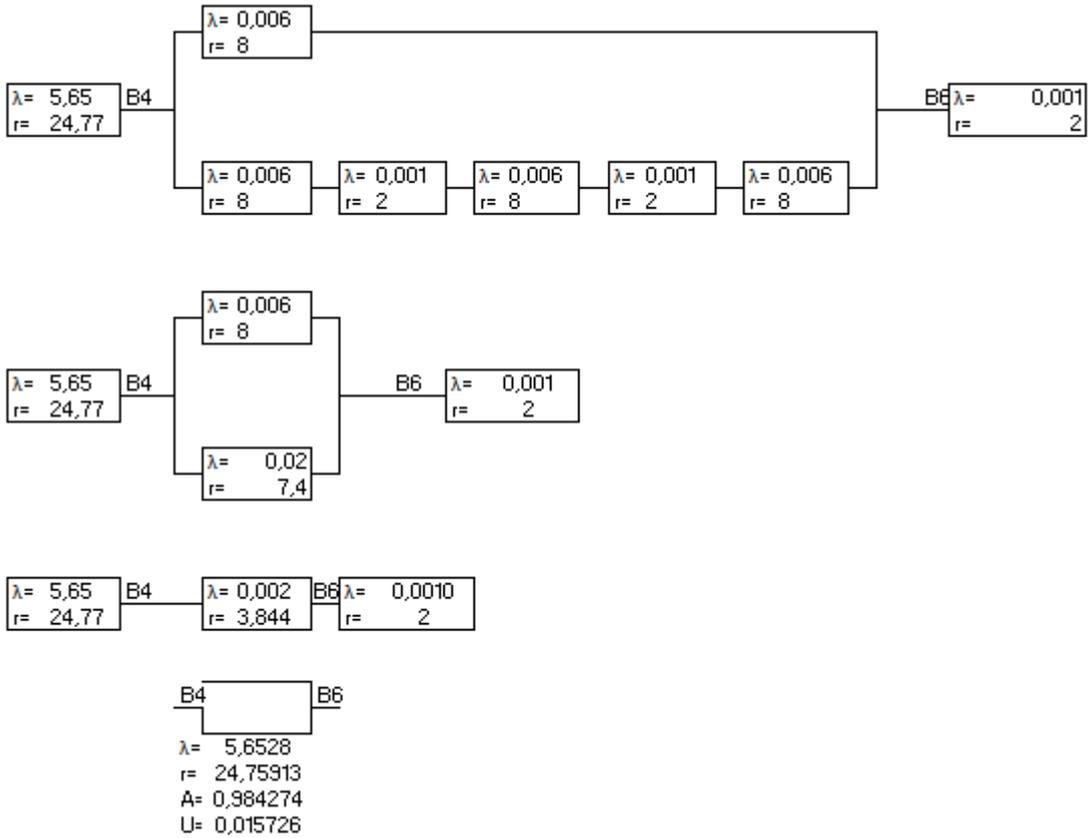


Figura 55. Diagrama de bloques de la confiabilidad de un sistema de generación eólica y equivalente de red barra 6.

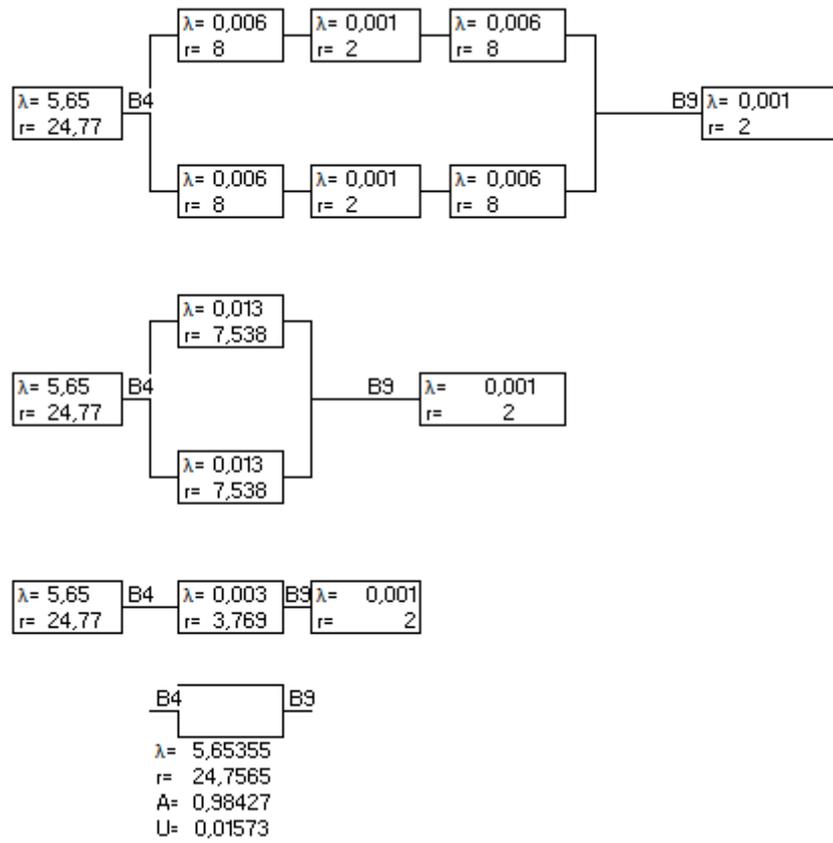


Figura 56. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 9.

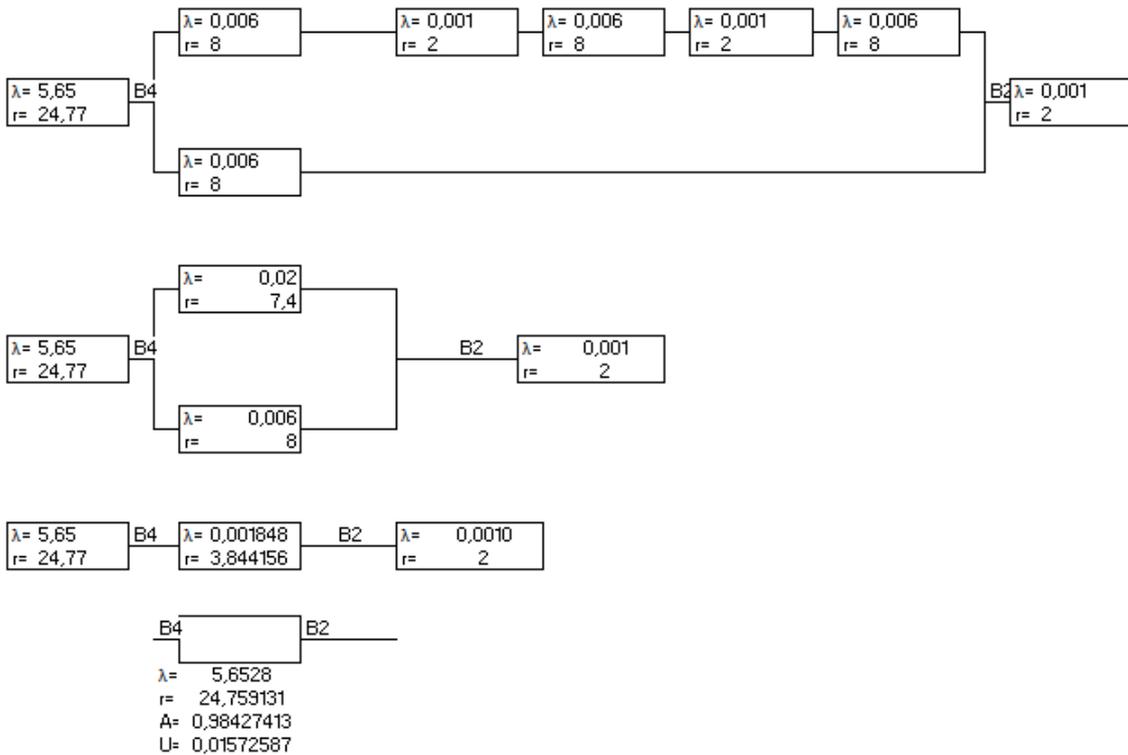


Figura 57. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 2.

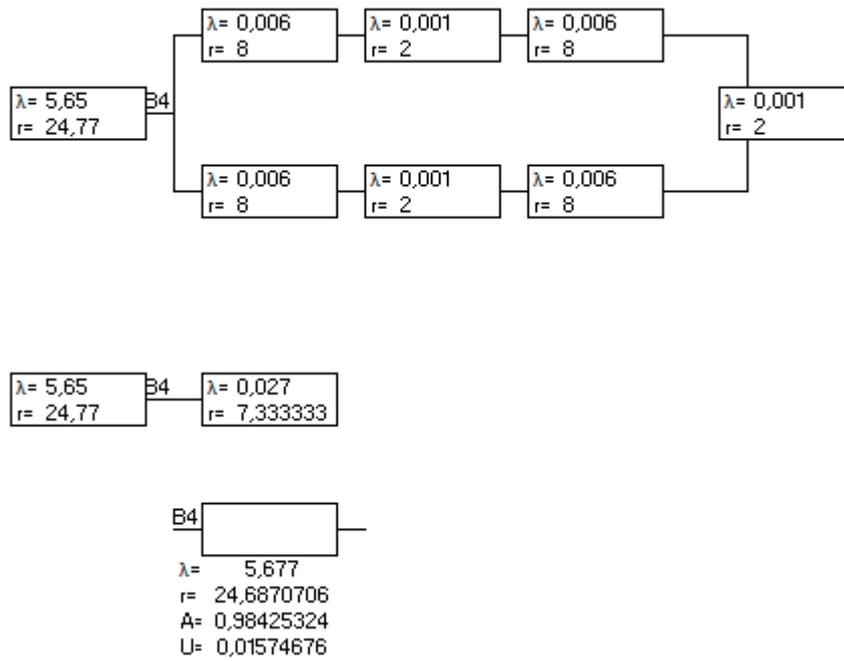


Figura 58. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 4.

Anexo 4.4: Análisis de la confiabilidad de un sistema de generación distribuida en anillo con combinación de generación, analizada desde el punto de vista del generador Fotovoltaico.

Escenario 1.

Generación Fotovoltaica y todos los generadores en operación.

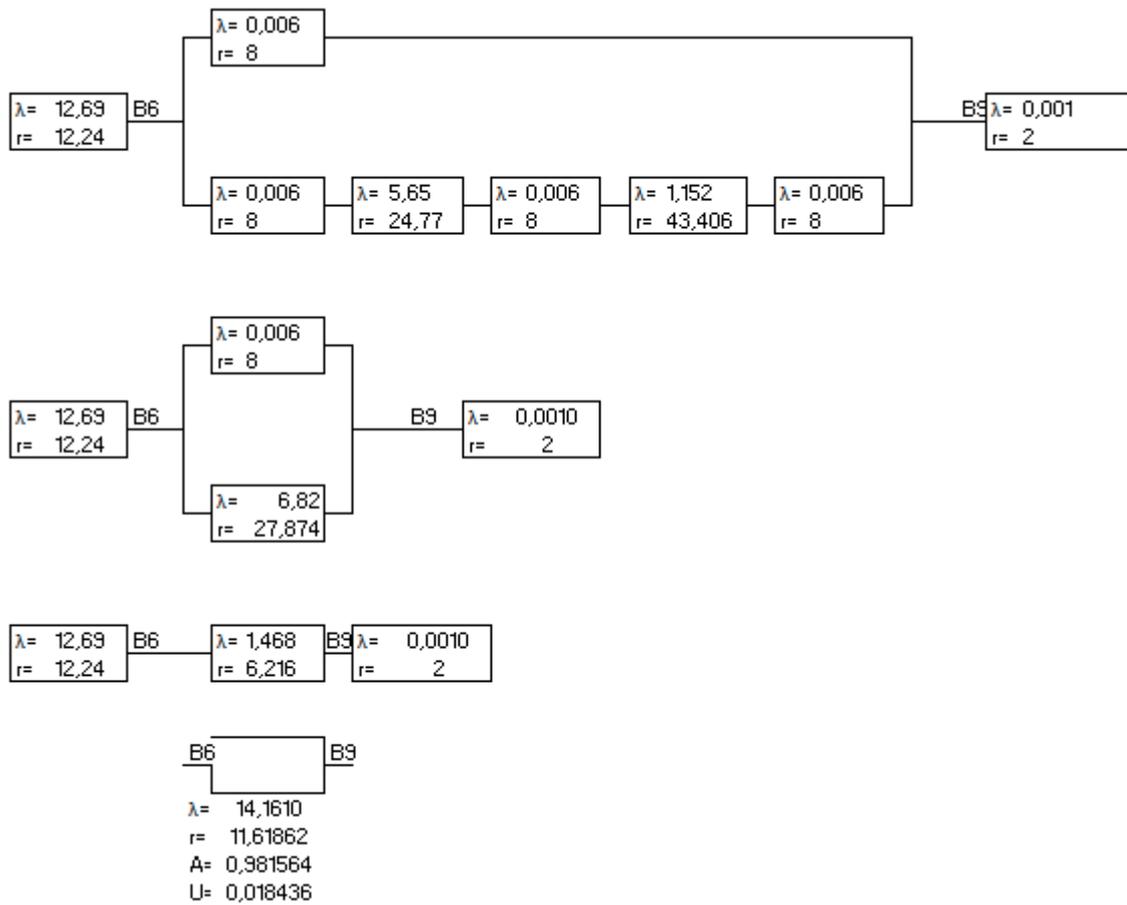


Figura 59. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 9.

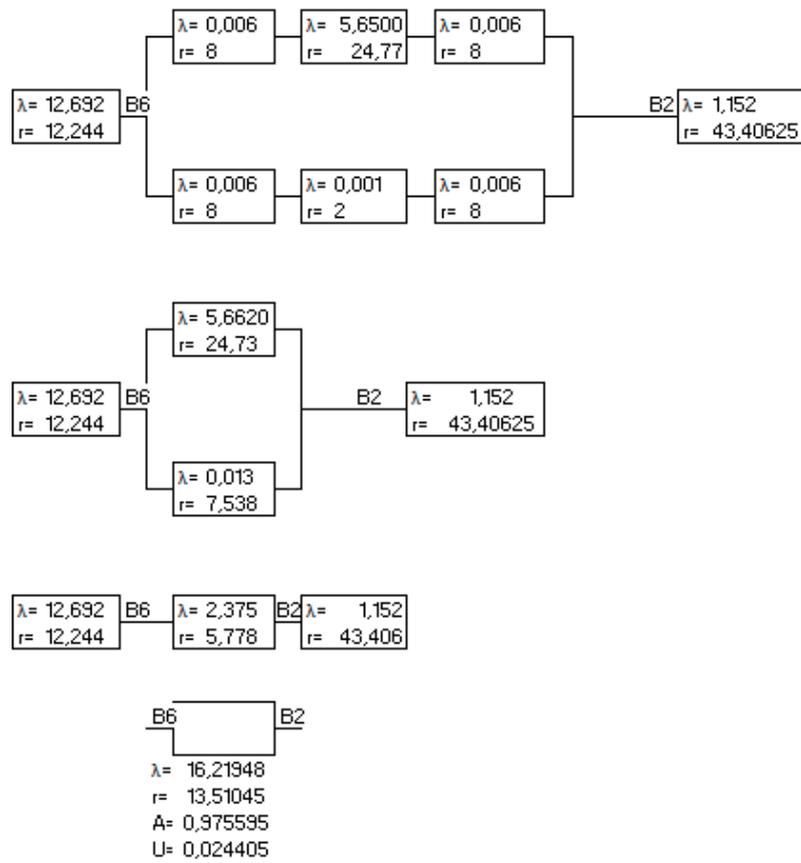


Figura 60. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 2.

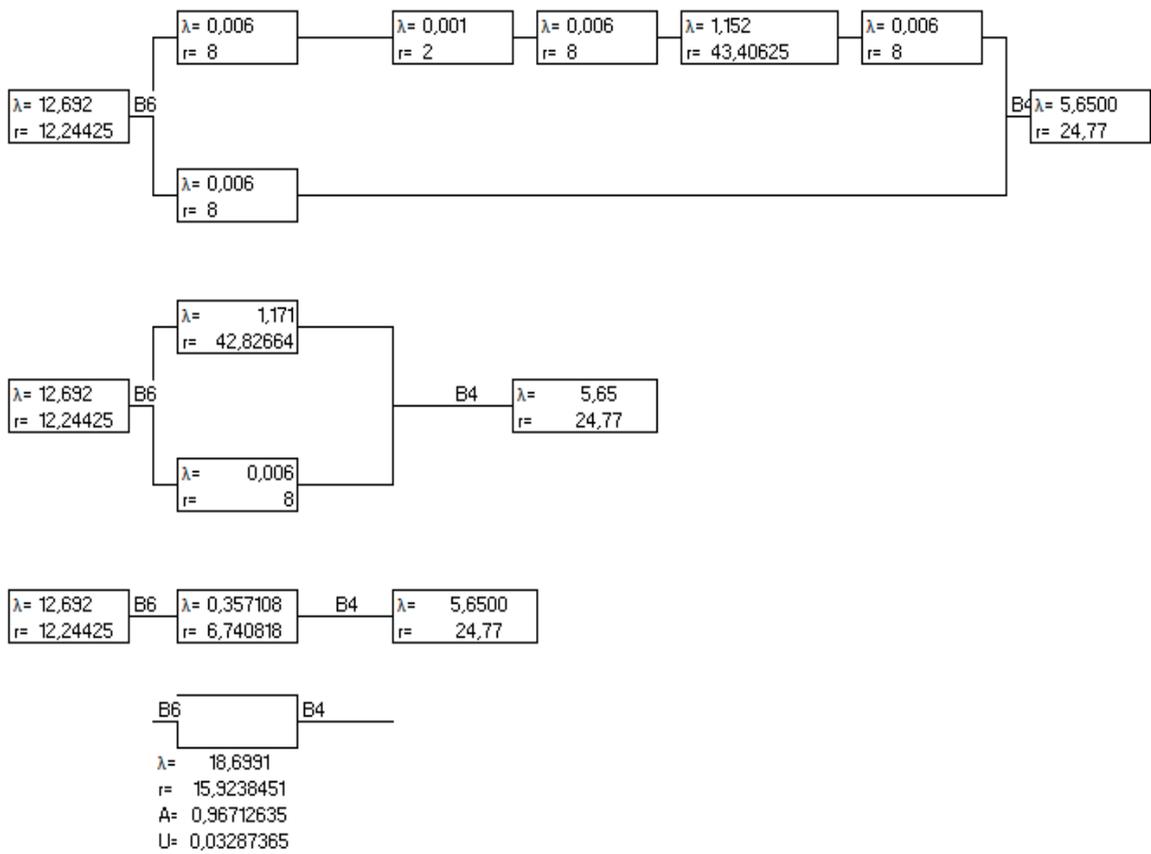


Figura 61. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 4.

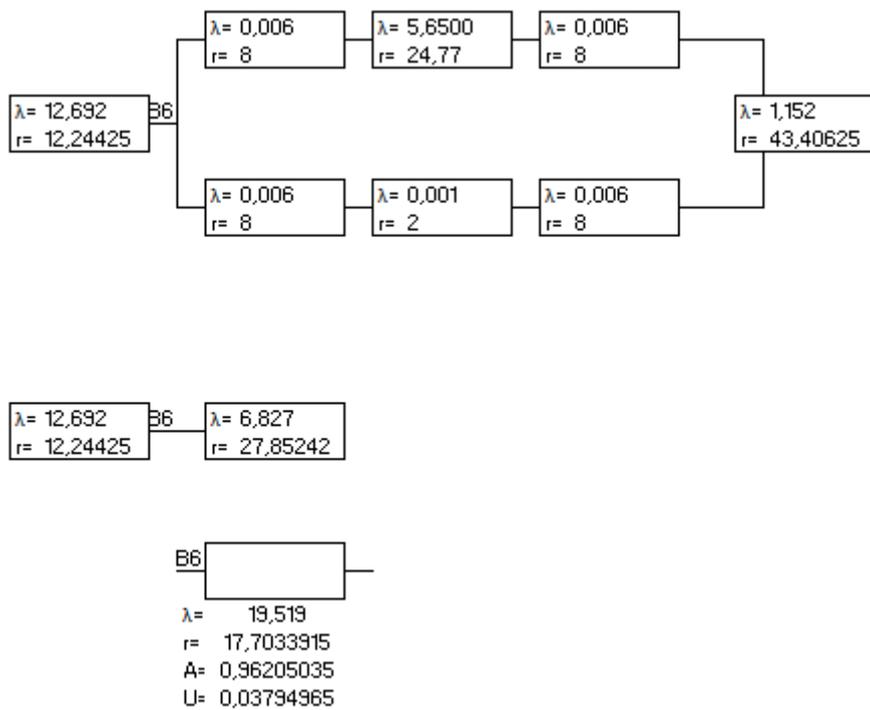


Figura 62. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 6.

Escenario 2.

Generación fotovoltaica, Generación Eólica y el Equivalente de Red.

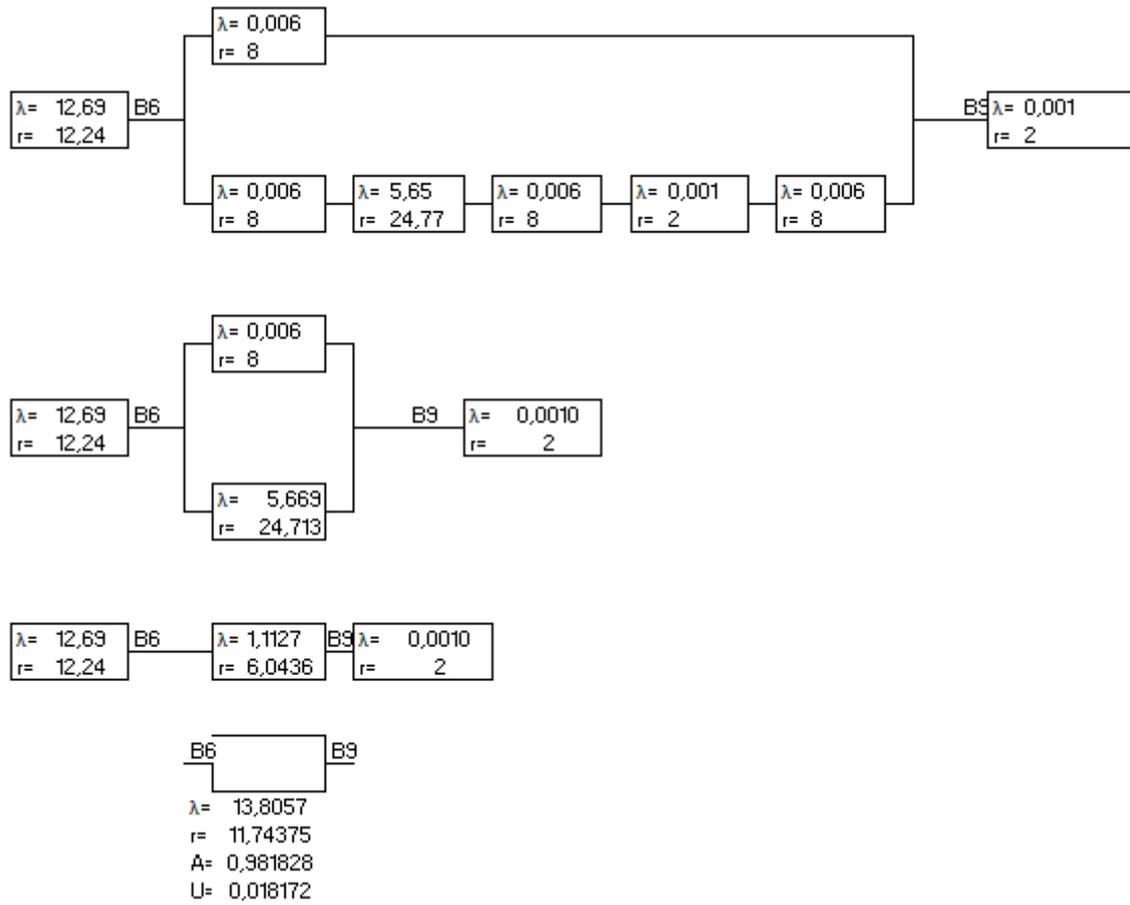


Figura 63. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 9.

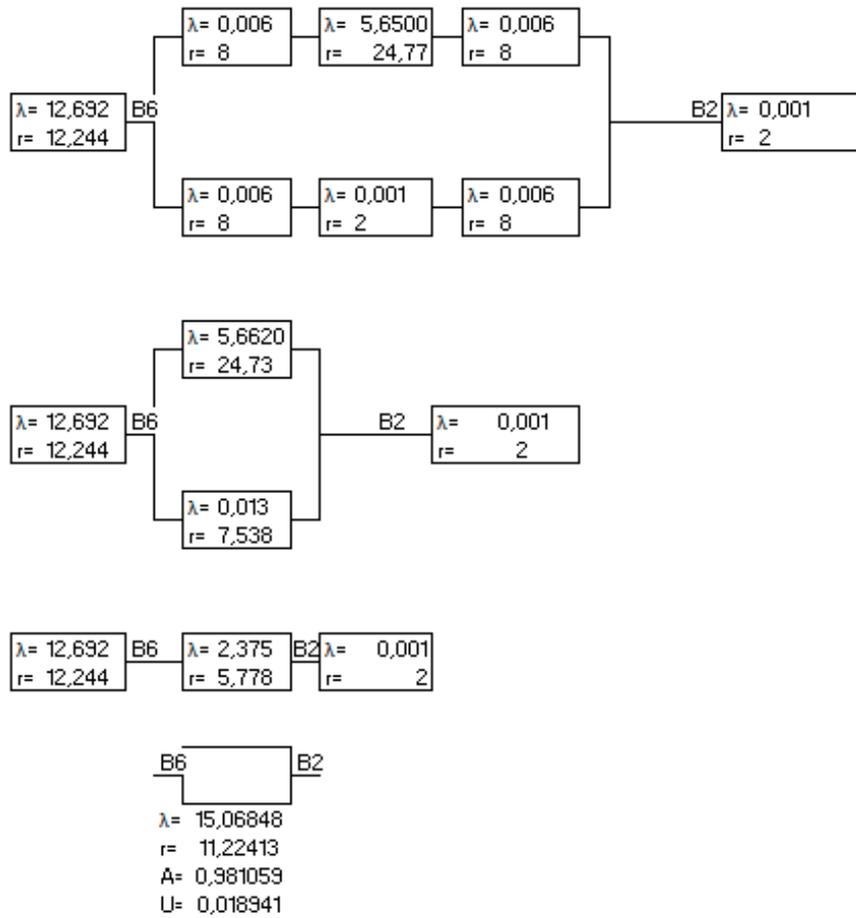


Figura 64. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 2.

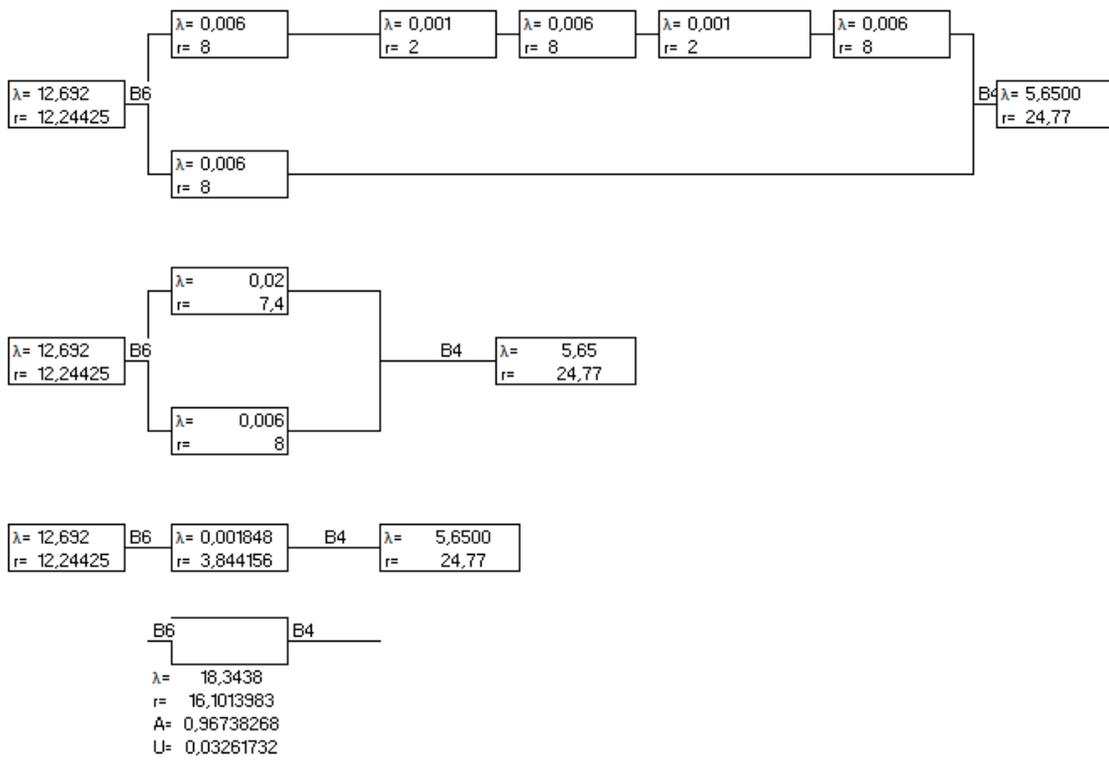


Figura 65. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 4.

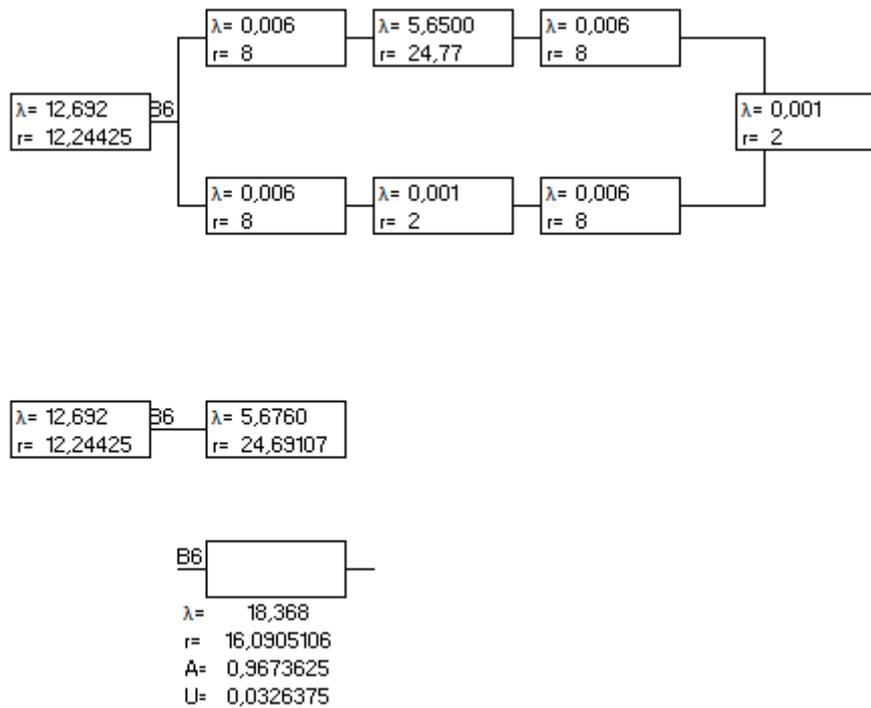


Figura 66. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 6.

Escenario 3.

Generación Fotovoltaica y el Equivalente de Red.

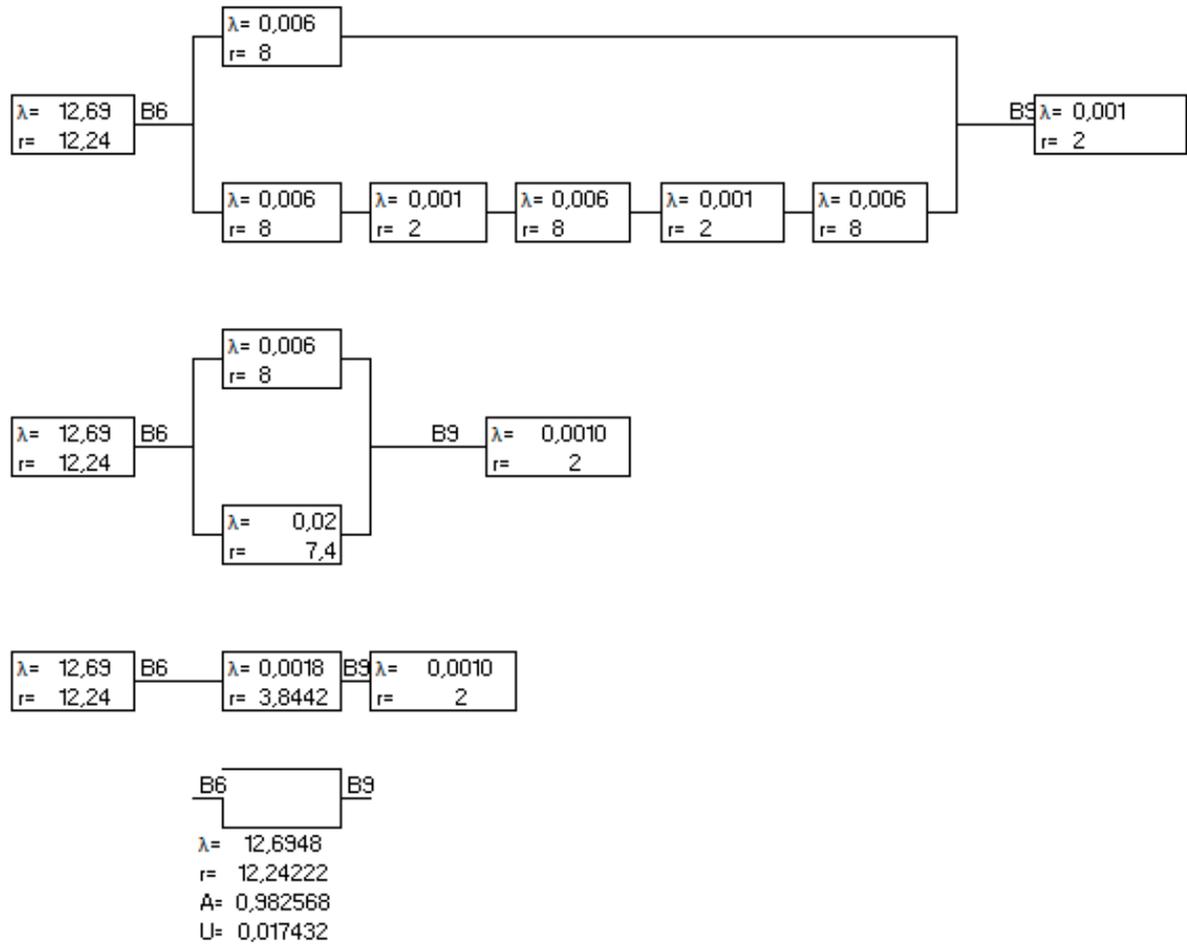


Figura 67. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 9.

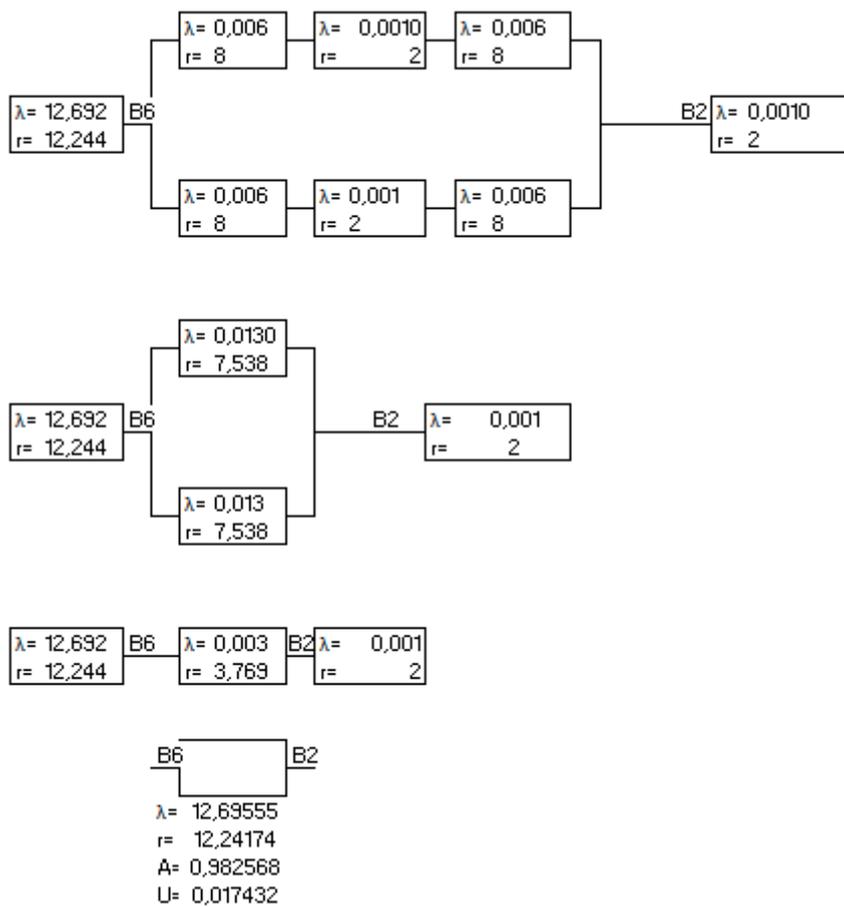


Figura 68. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 2.

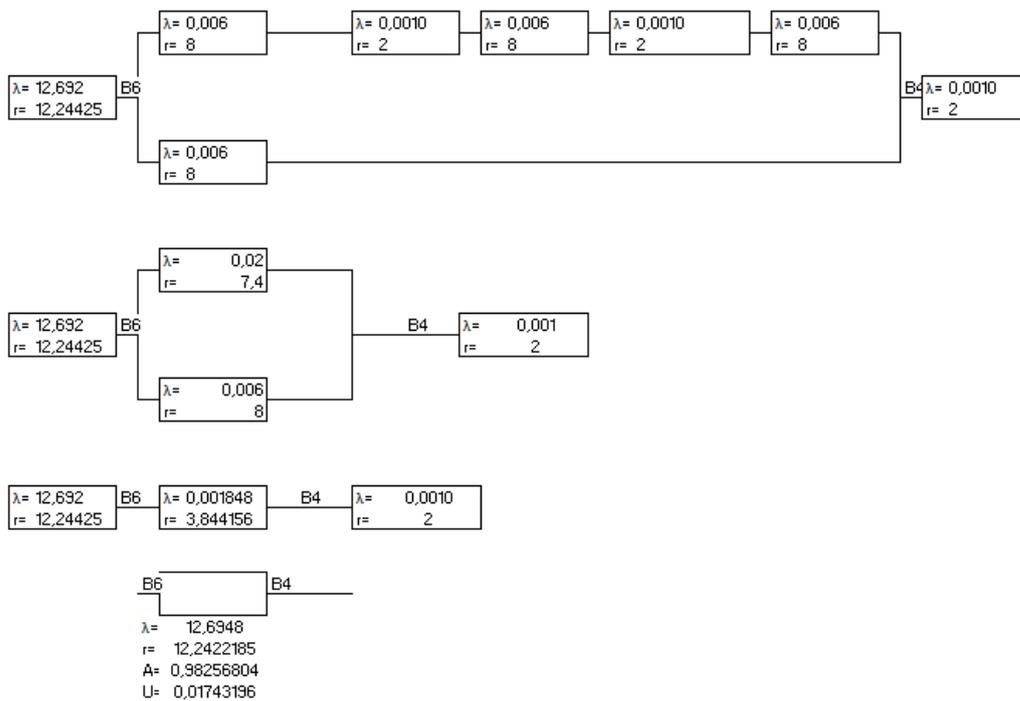


Figura 69. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 4.

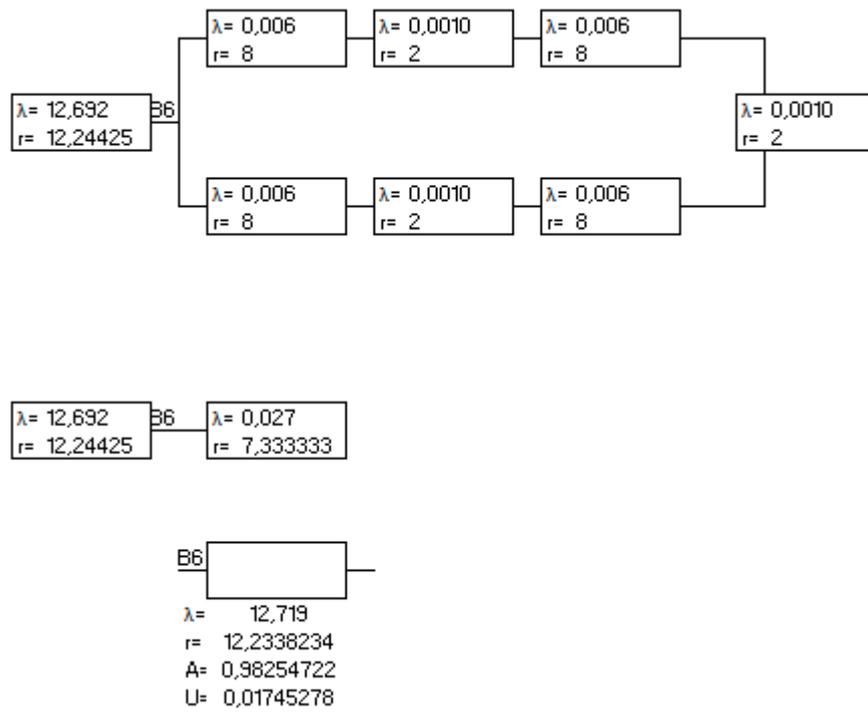


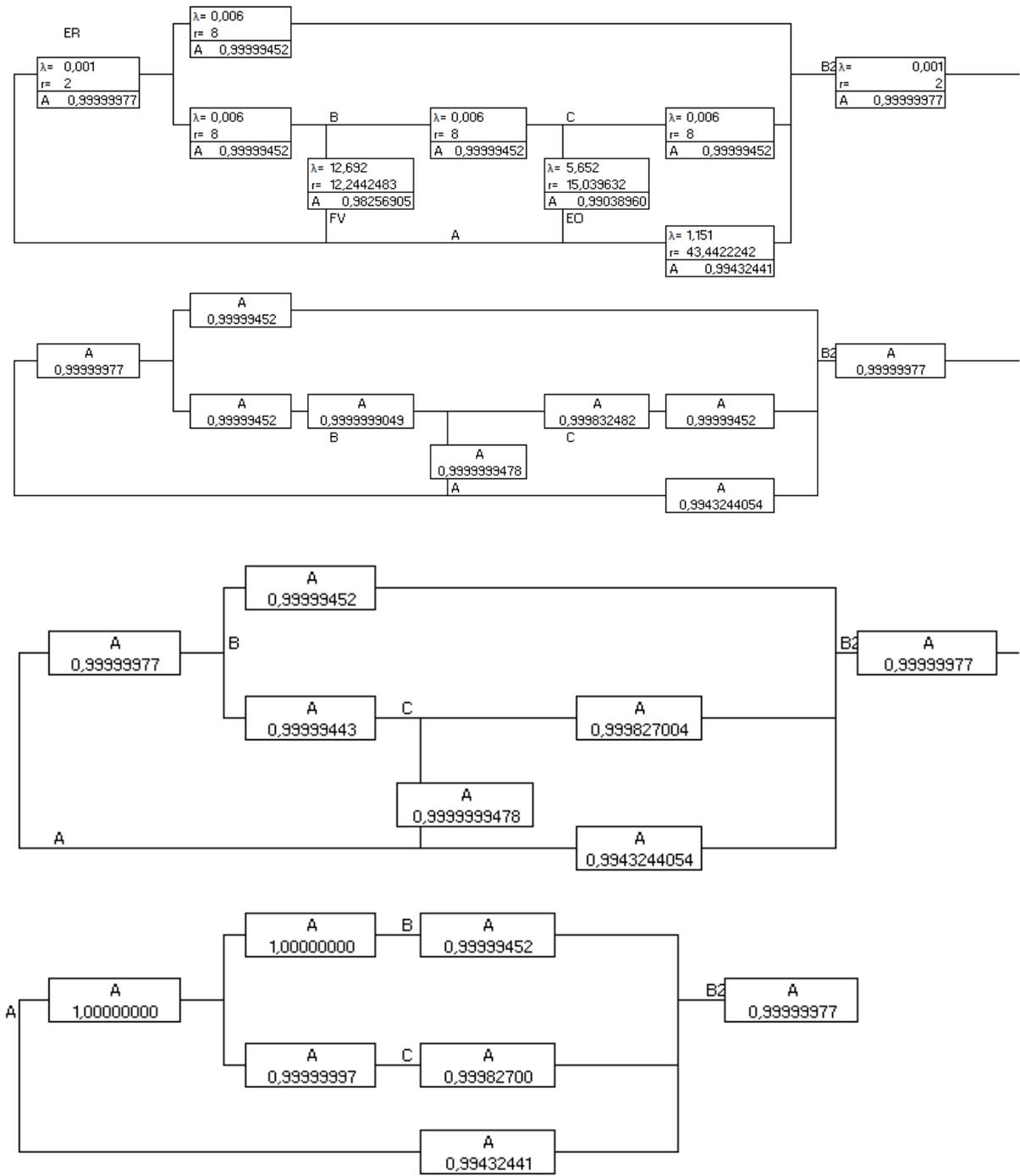
Figura 70. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 6

Anexo 5: Método 2 de cálculo empleando Markov analizando paralelo las generaciones del sistema.

Anexo 5.1: Análisis de la confiabilidad de un sistema de generación distribuida en anillo con combinación de generación, analizada desde el punto de vista del Equivalente de red.

Escenario 1.

Todos los generadores en operación.



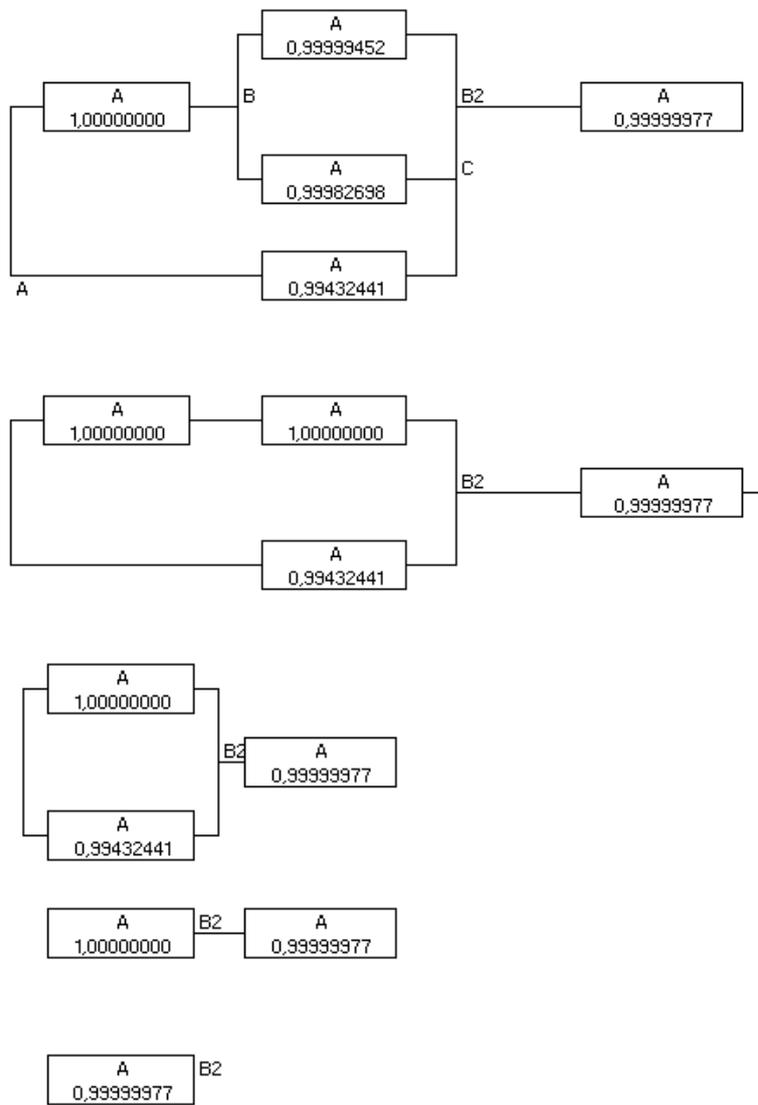
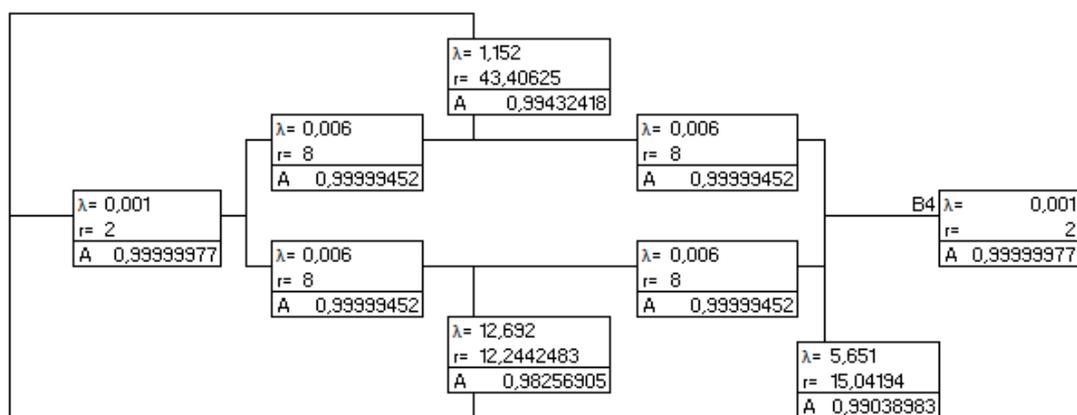


Figura 71. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con todos los generación en operación, analizado en la barra 2



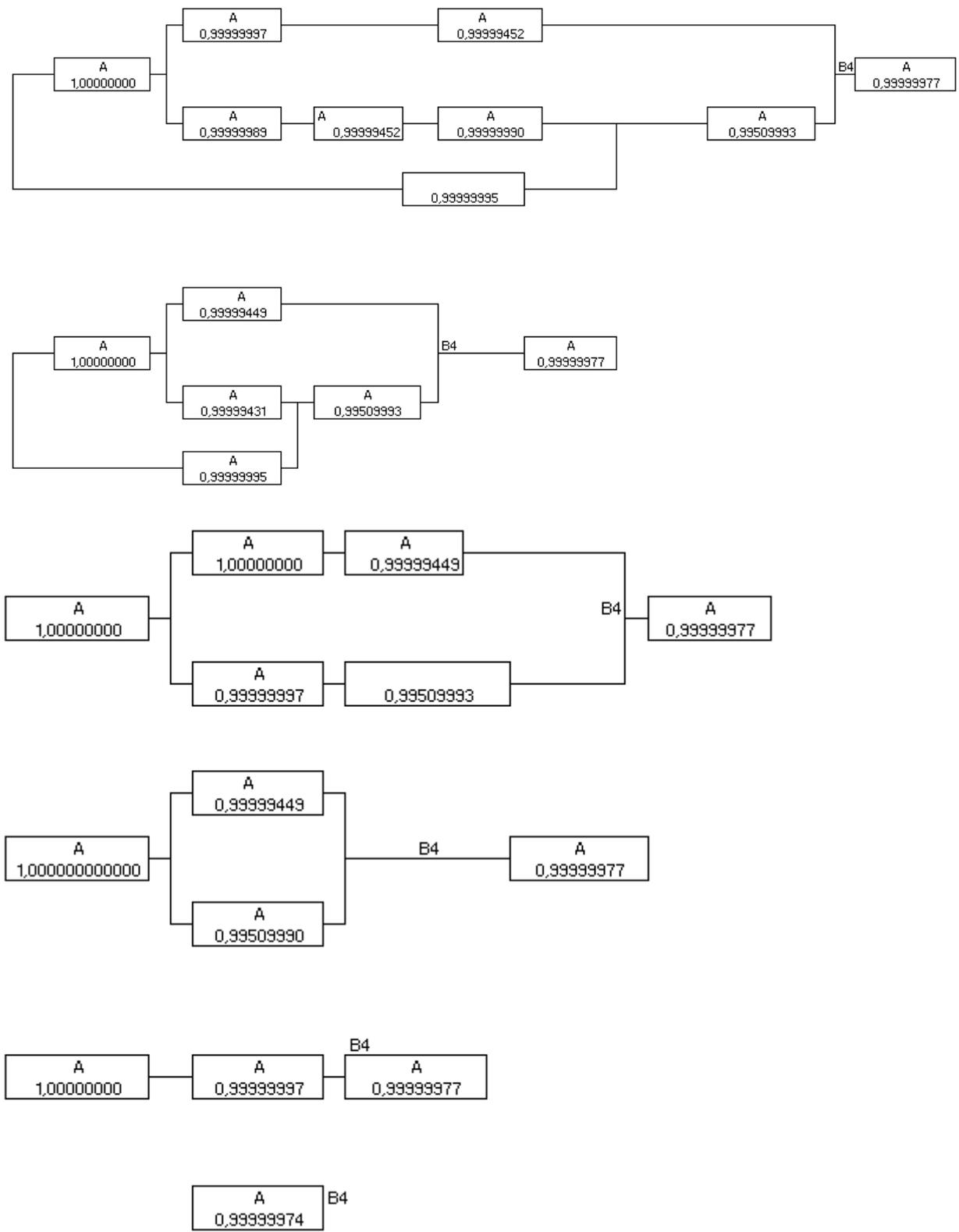
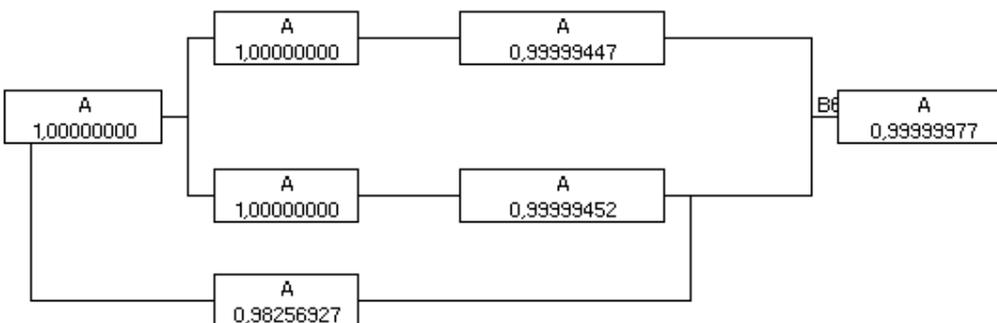
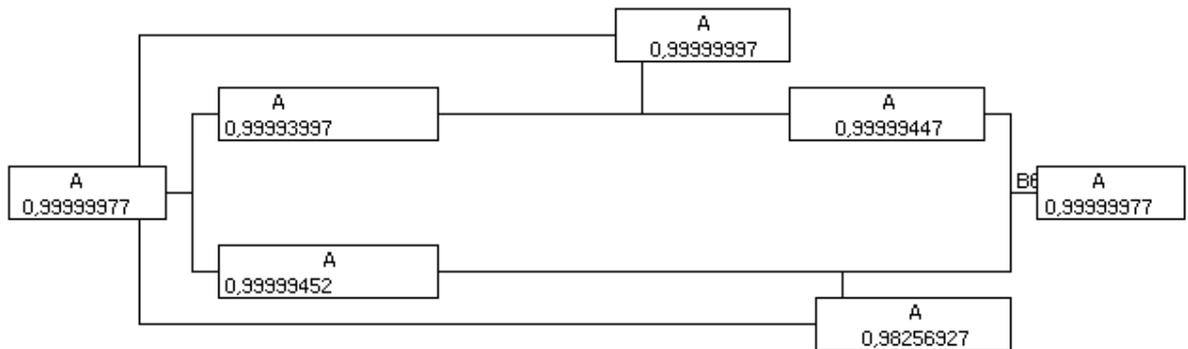
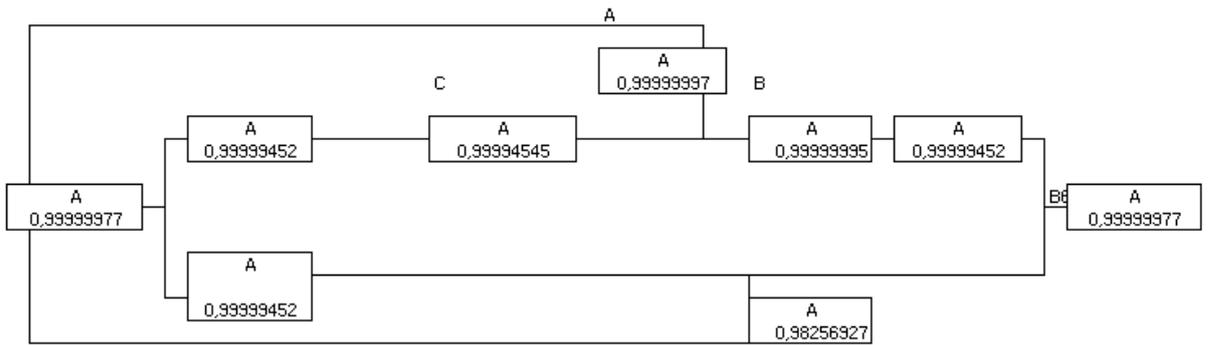
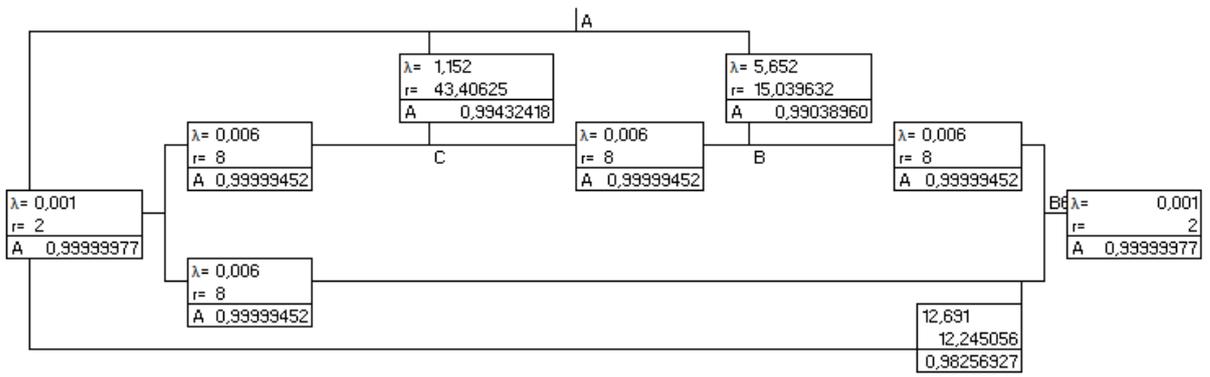


Figura 72. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con todos los generación en operación analizando la barra 4.



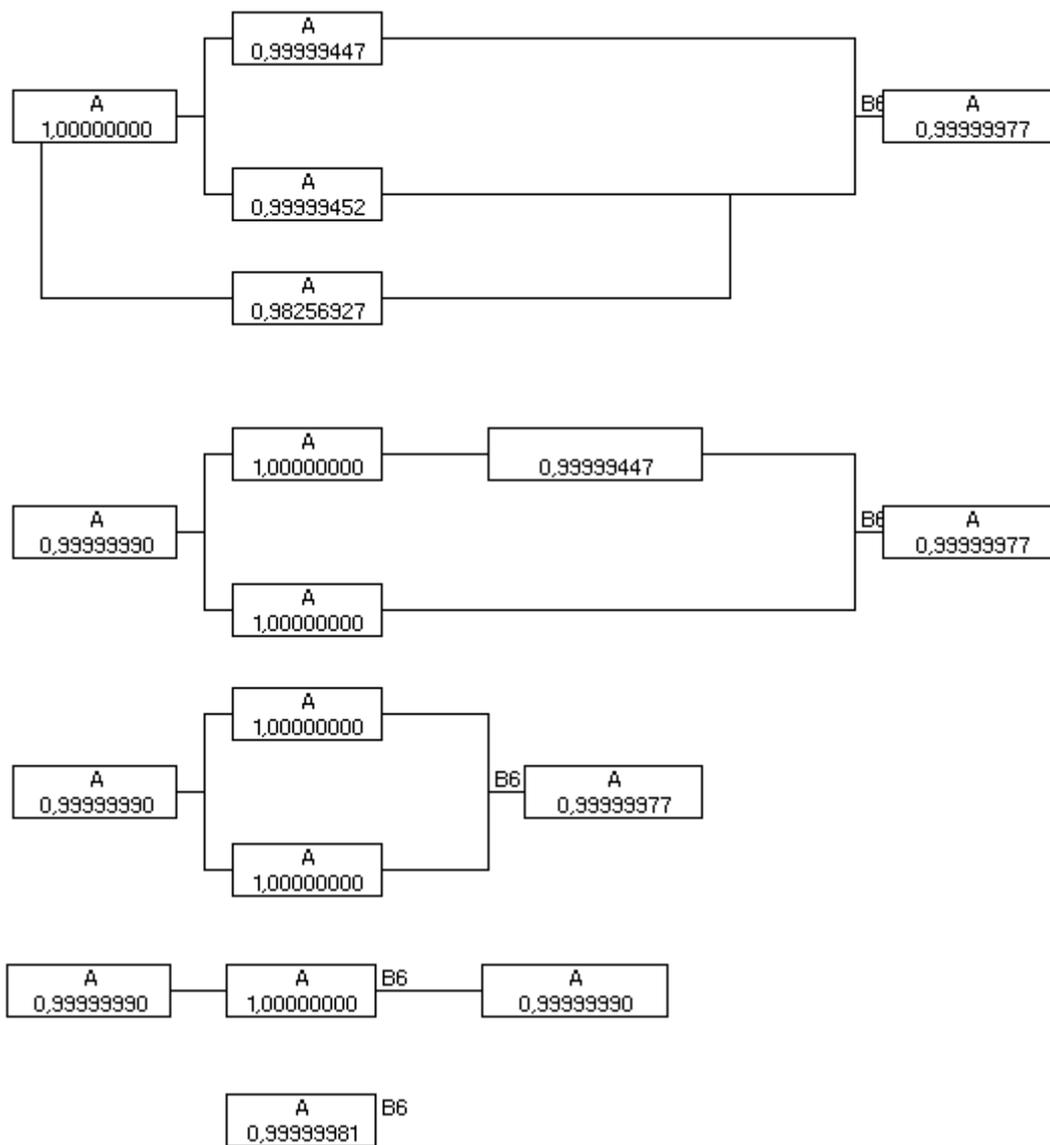
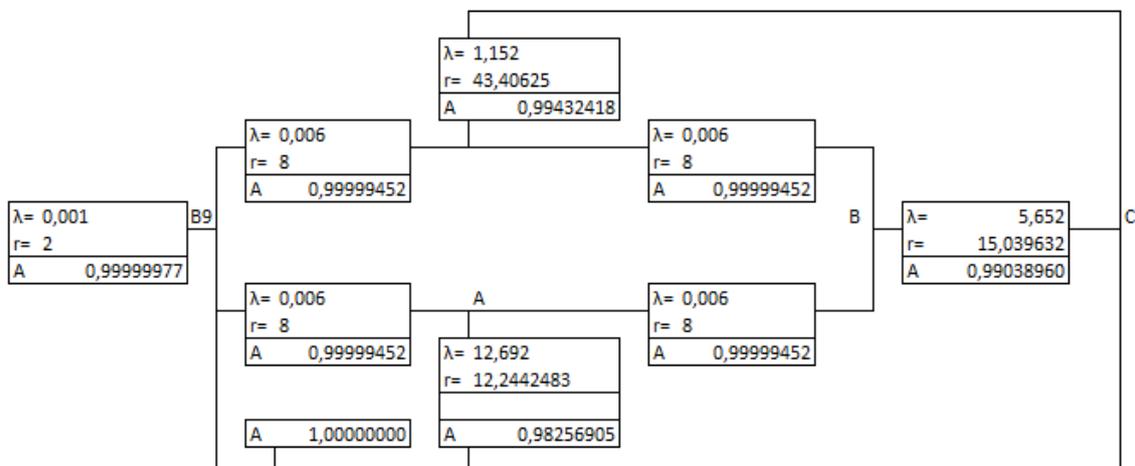
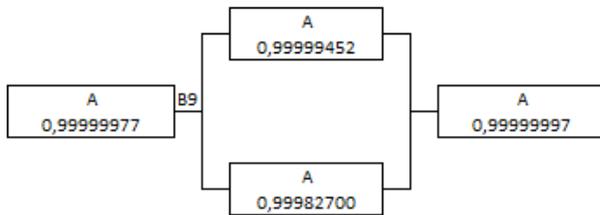
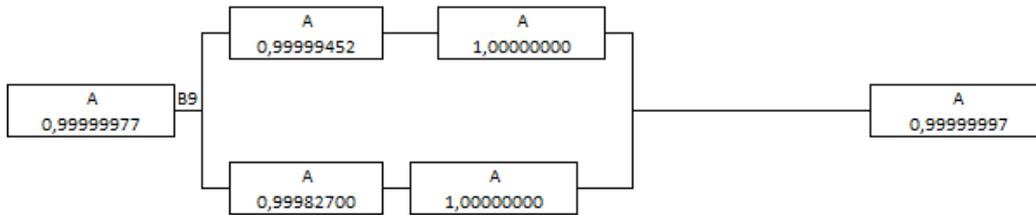
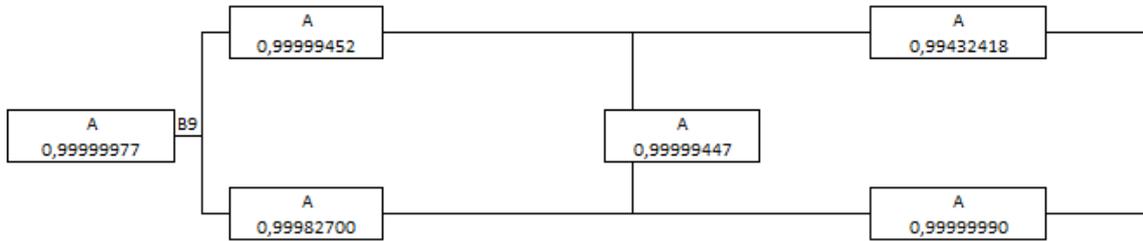
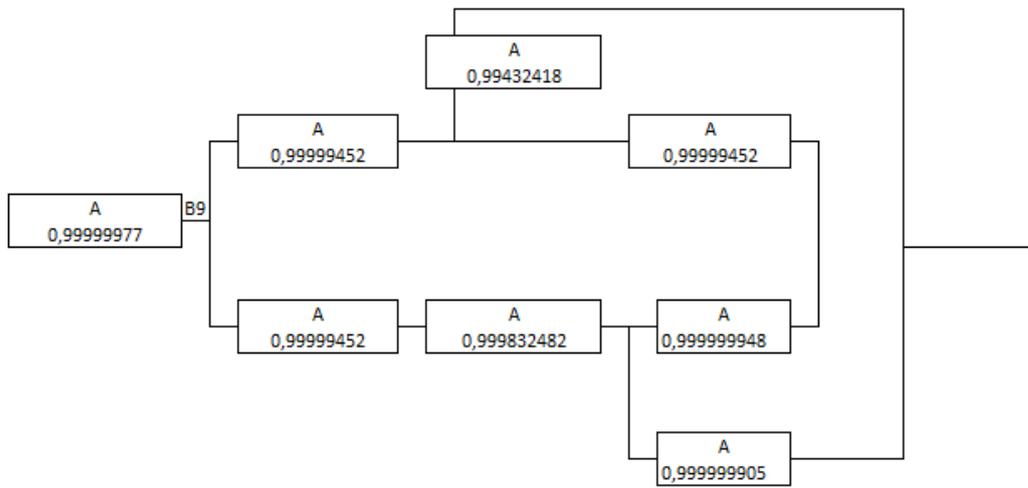


Figura 73. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con todos los generación en operación analizando la barra 6.





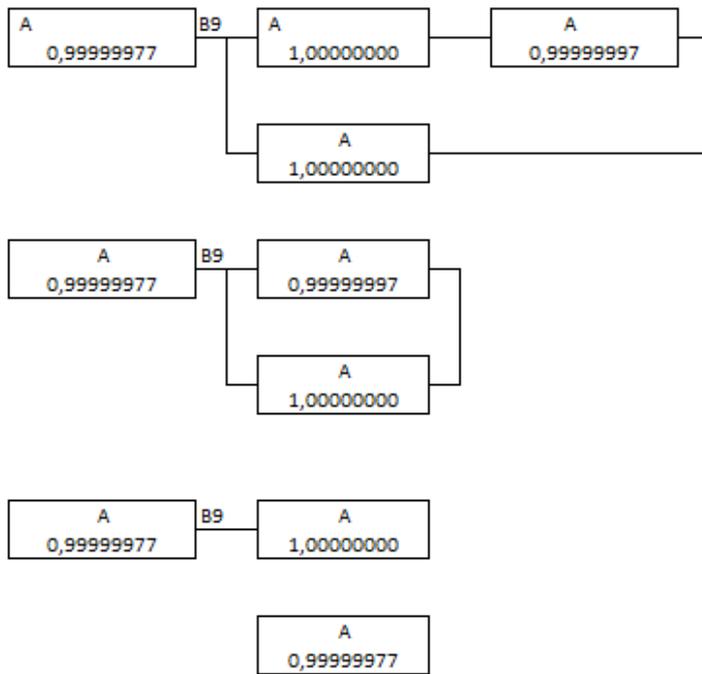


Figura 74. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con todos los generación en operación analizando la barra 9.

Tabla 1. Datos de confiabilidad en cada barra con todos los generadores en operación.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN COMPLETA	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,99999977
BARRA 4	0,9999997447
BARRA 6	0,99999981
BARRA 9	0,9999997707

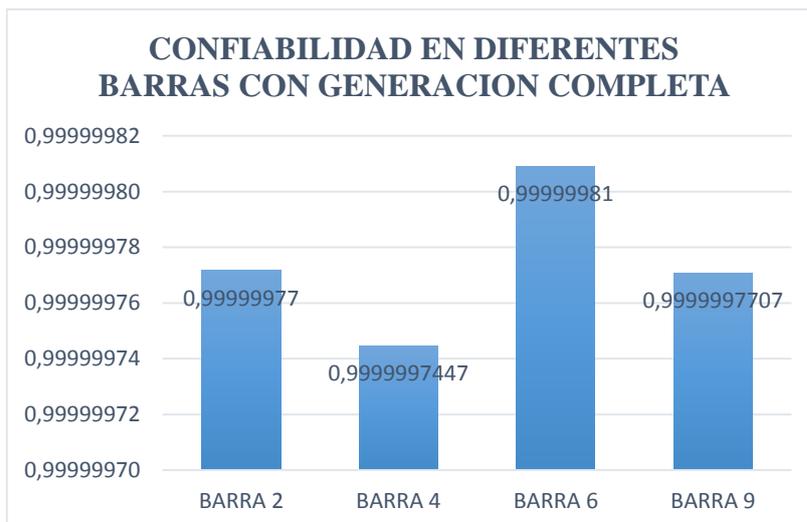
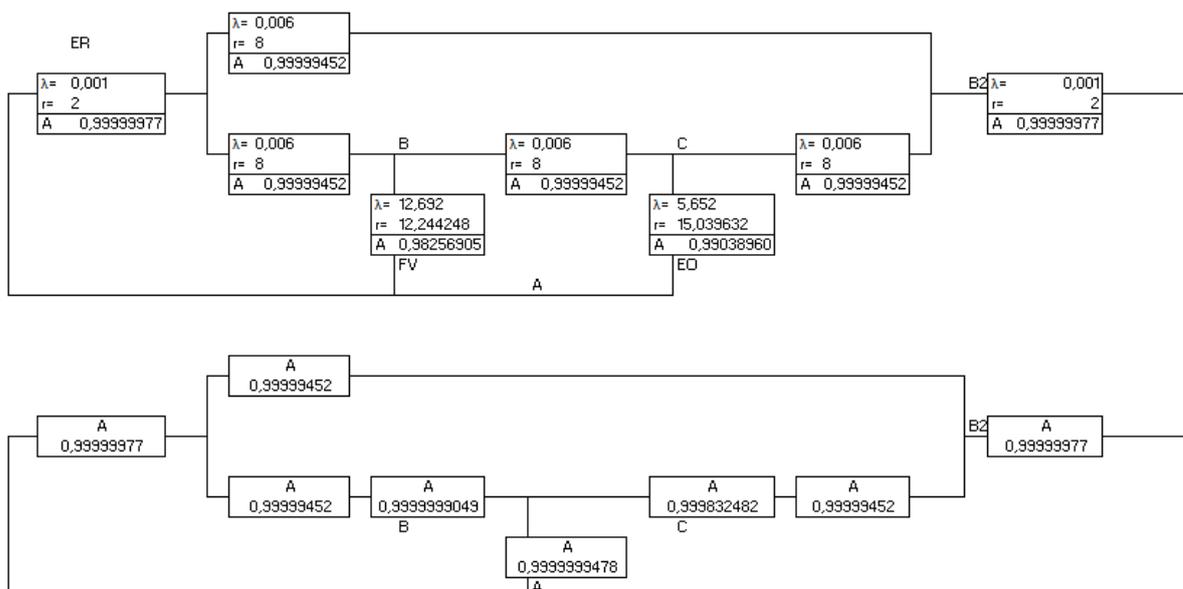


Figura 75. Análisis de la confiabilidad en un diagrama de barras con la combinación del equivalente de red y todos los generadores en operación respecto a cada una de las barras.

Escenario 2.

Todos los generadores en operación excepto la generación síncrona.



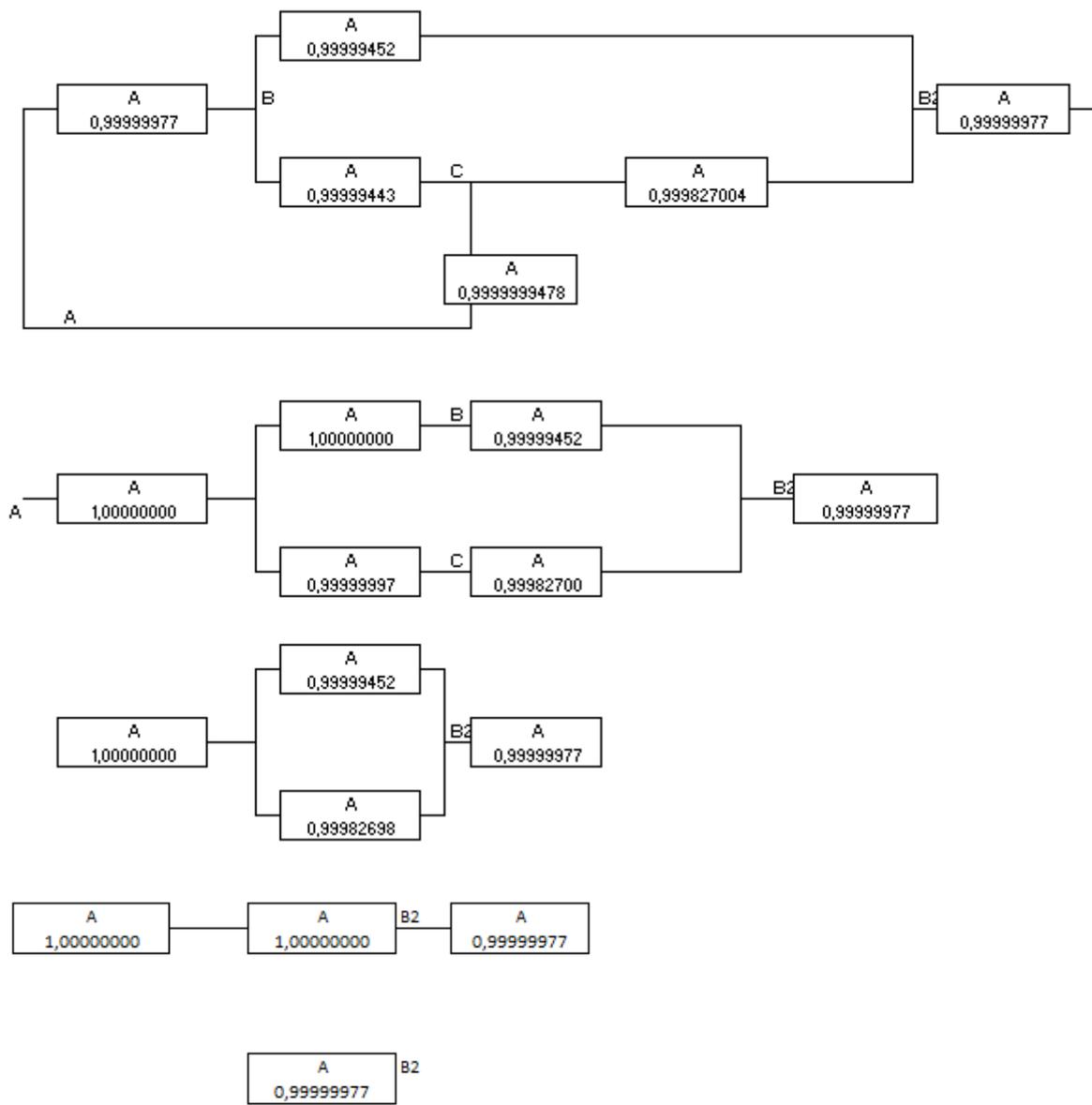
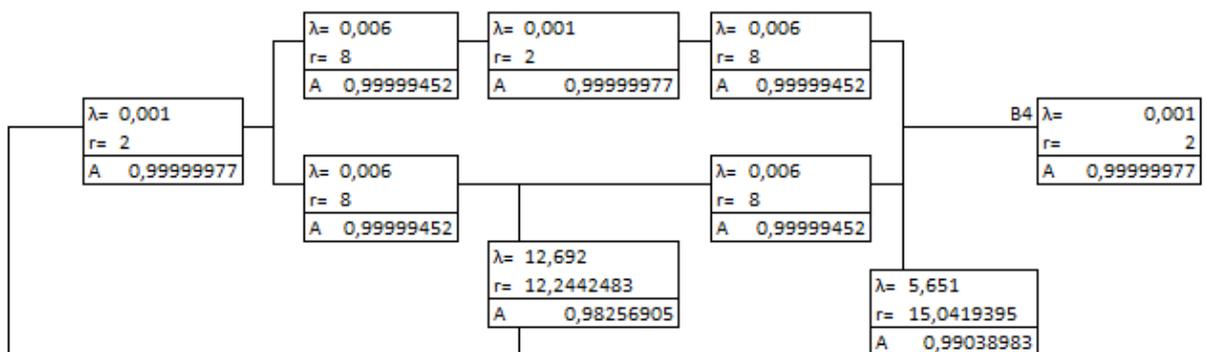


Figura 76. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con todos los generación en operación excepto la generación síncrona analizando la barra 2 .



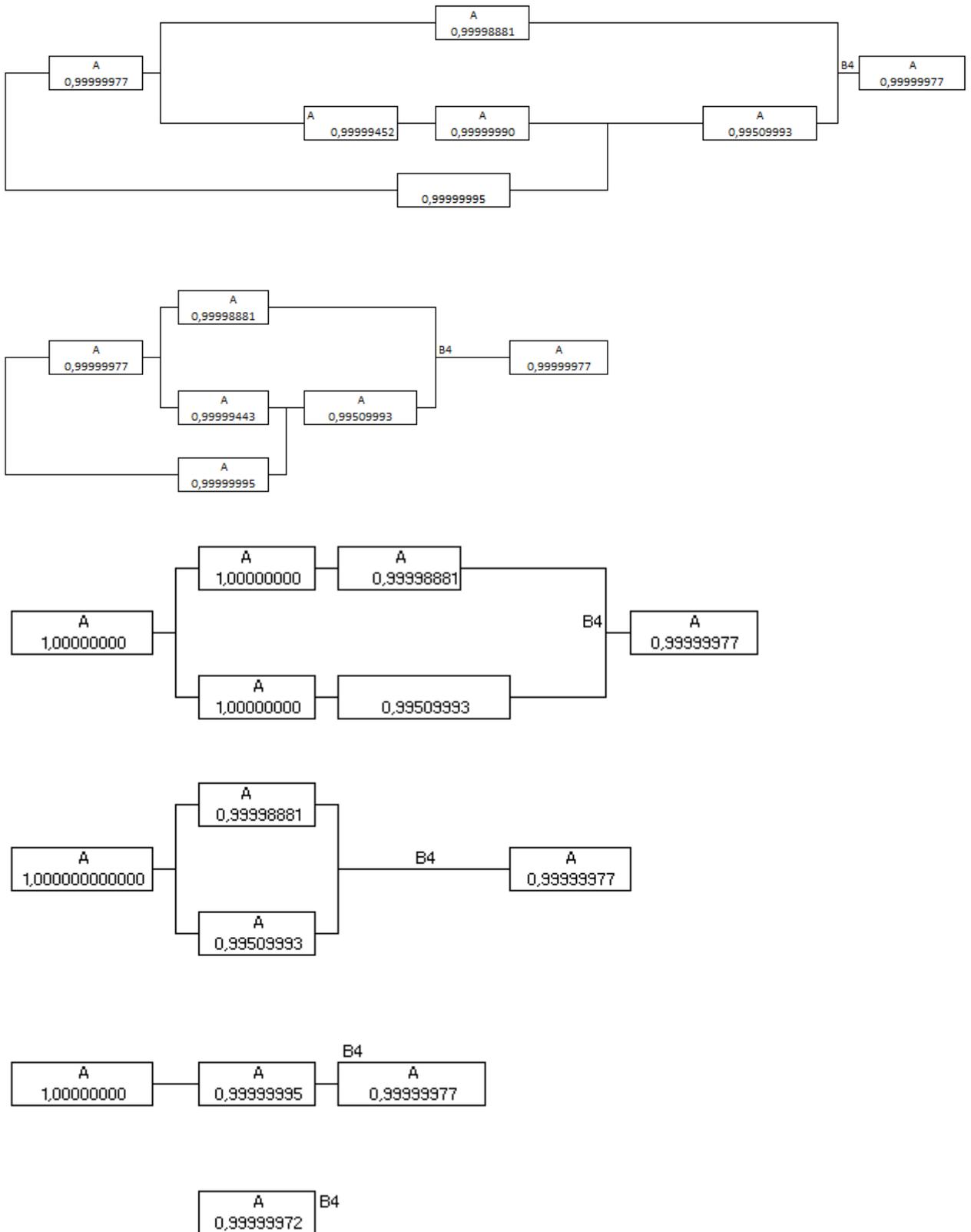
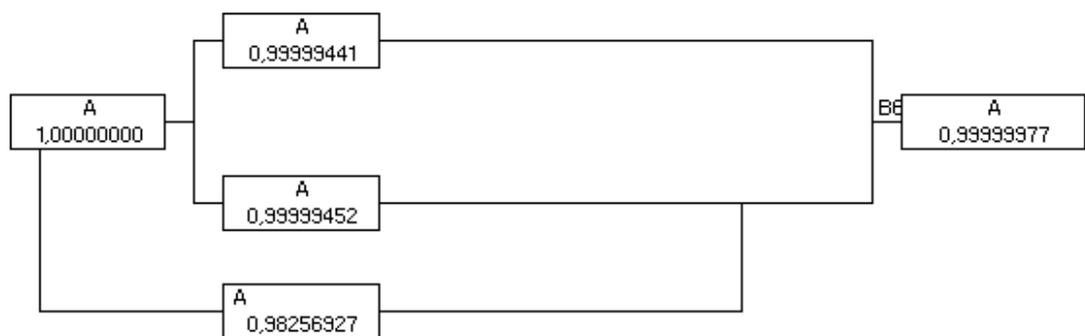
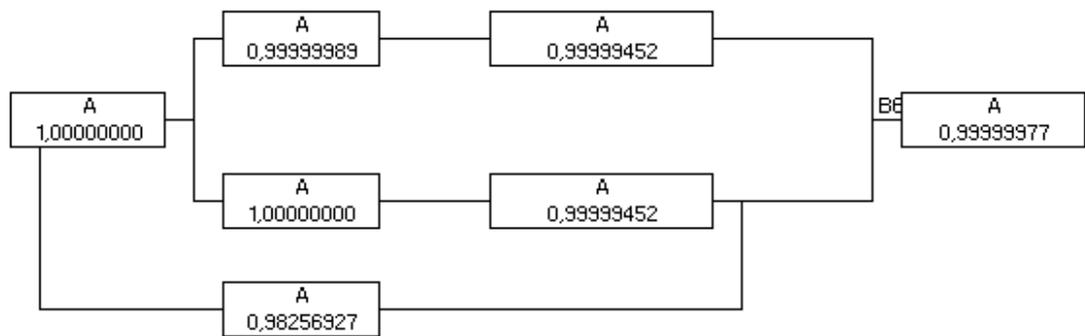
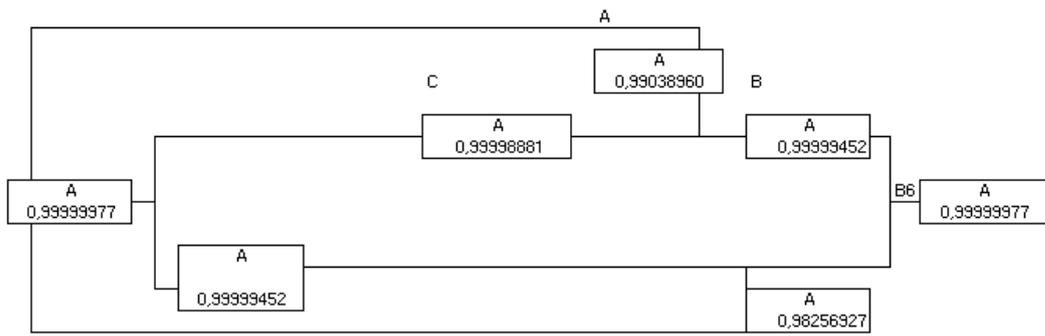
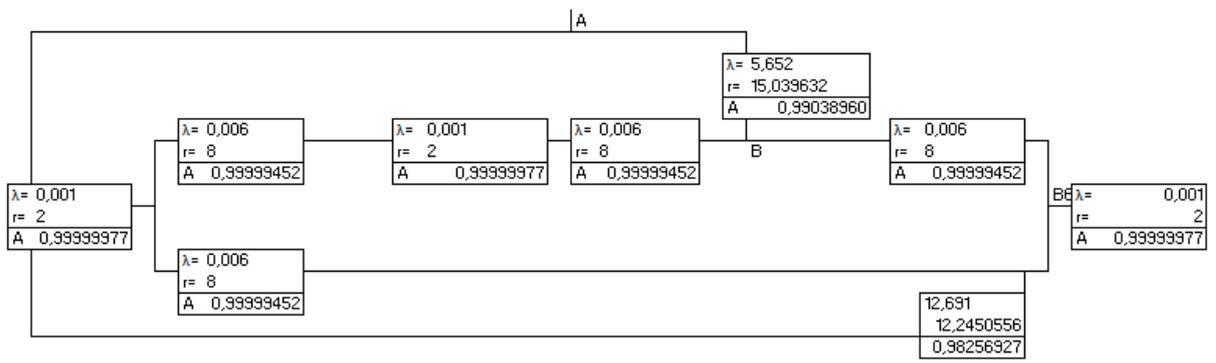


Figura 77. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con todos los generación en operación excepto la generación síncrona analizando la barra 4.



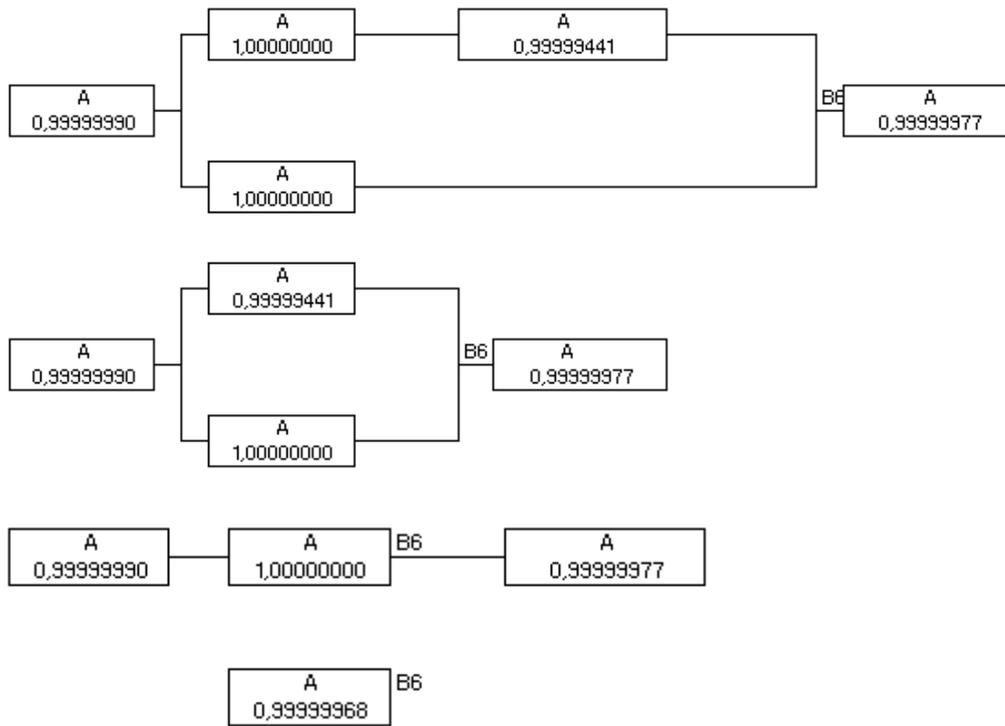
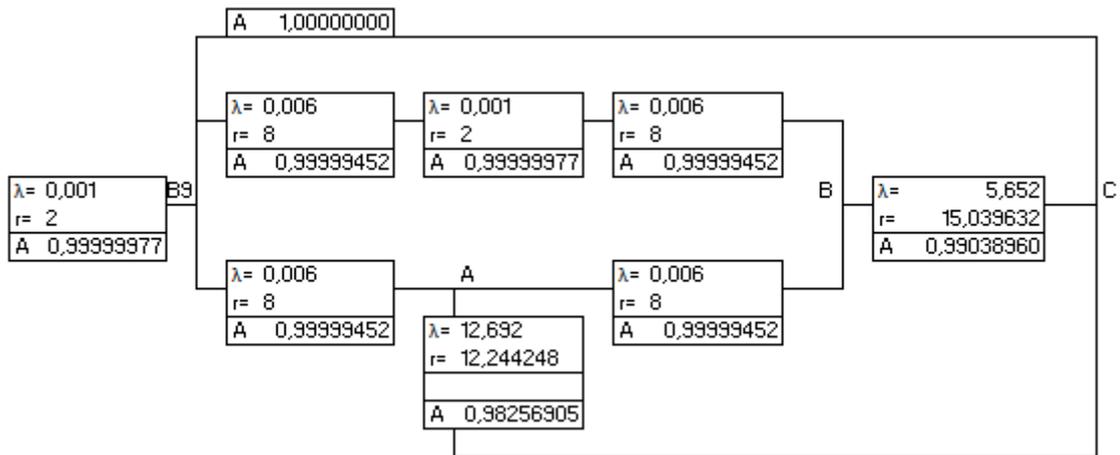


Figura78. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con todos los generación en operación excepto la generación síncrona analizando la barra 6.



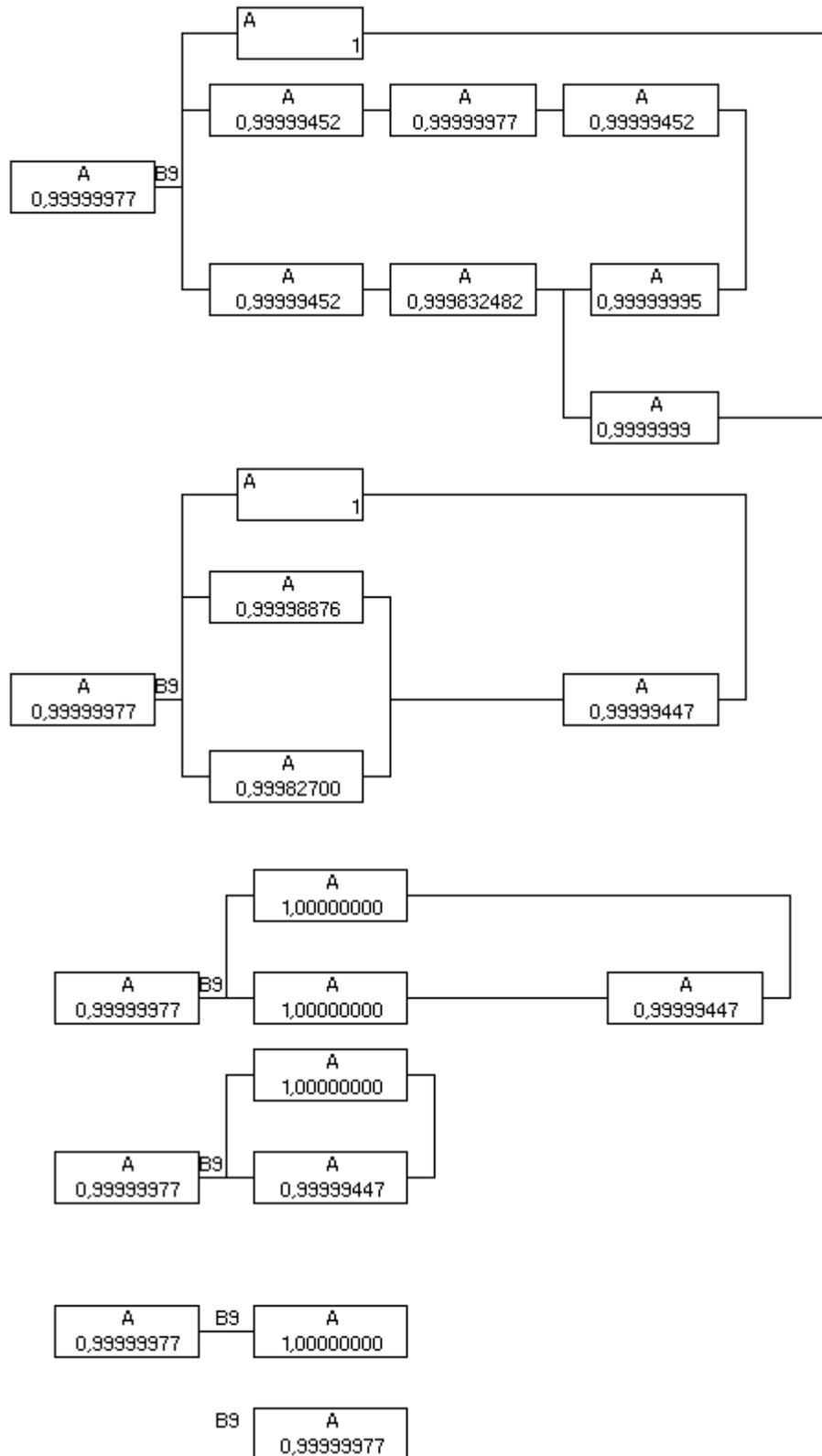


Figura79. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con todos los generación en operación excepto la generación síncrona analizando la barra 9.

Tabla 2. Datos de confiabilidad con toda la generación en operación excepto la generación síncrona analizando en cada barra.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN COMPLETA	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,99999977
BARRA 4	0,9999997169
BARRA 6	0,99999968
BARRA 9	0,9999997717

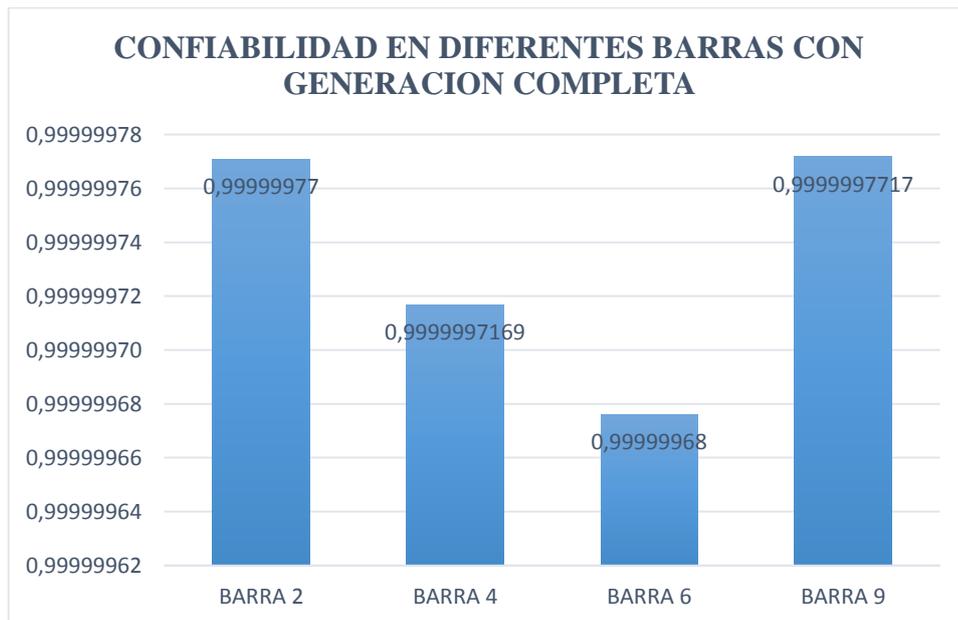
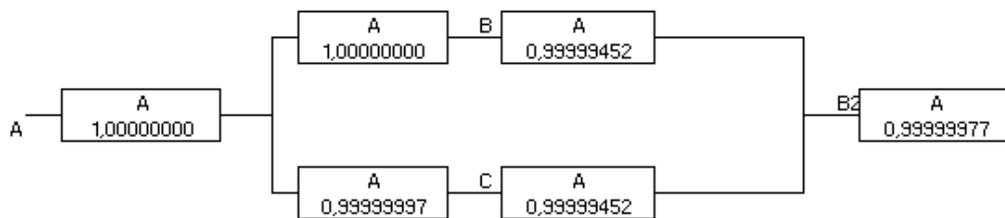
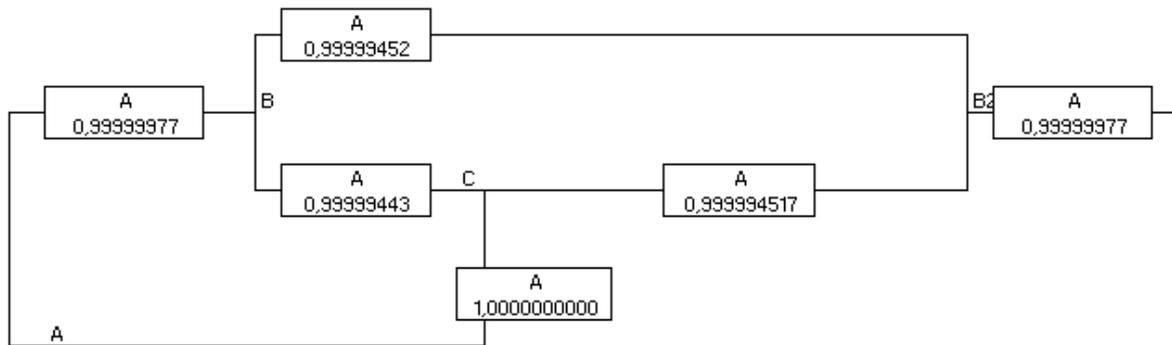
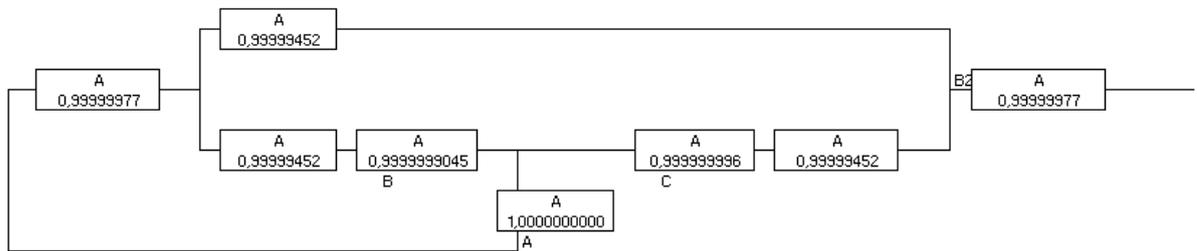
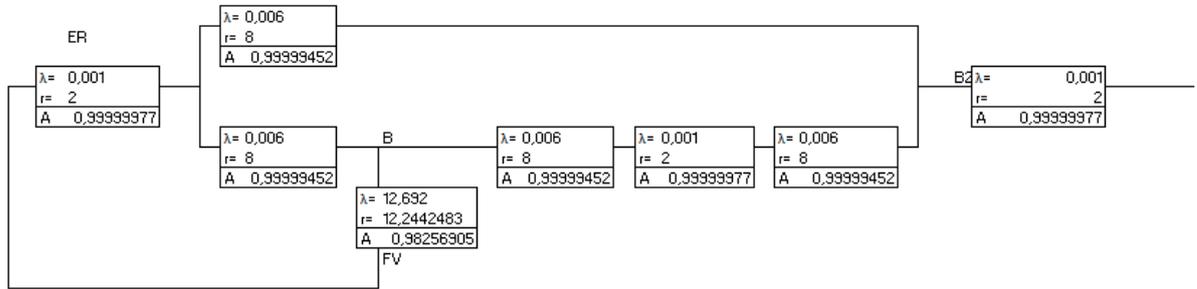


Figura 80. Análisis de la confiabilidad en un diagrama de barras con la combinación de todas las generaciones en operación excepto la generación síncrona.

Escenario 3.

Toda la generación en operación excepto la generación síncrona y eólica



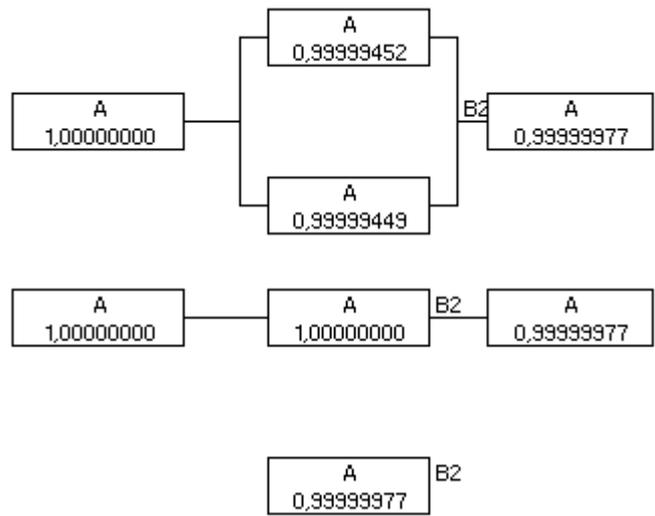
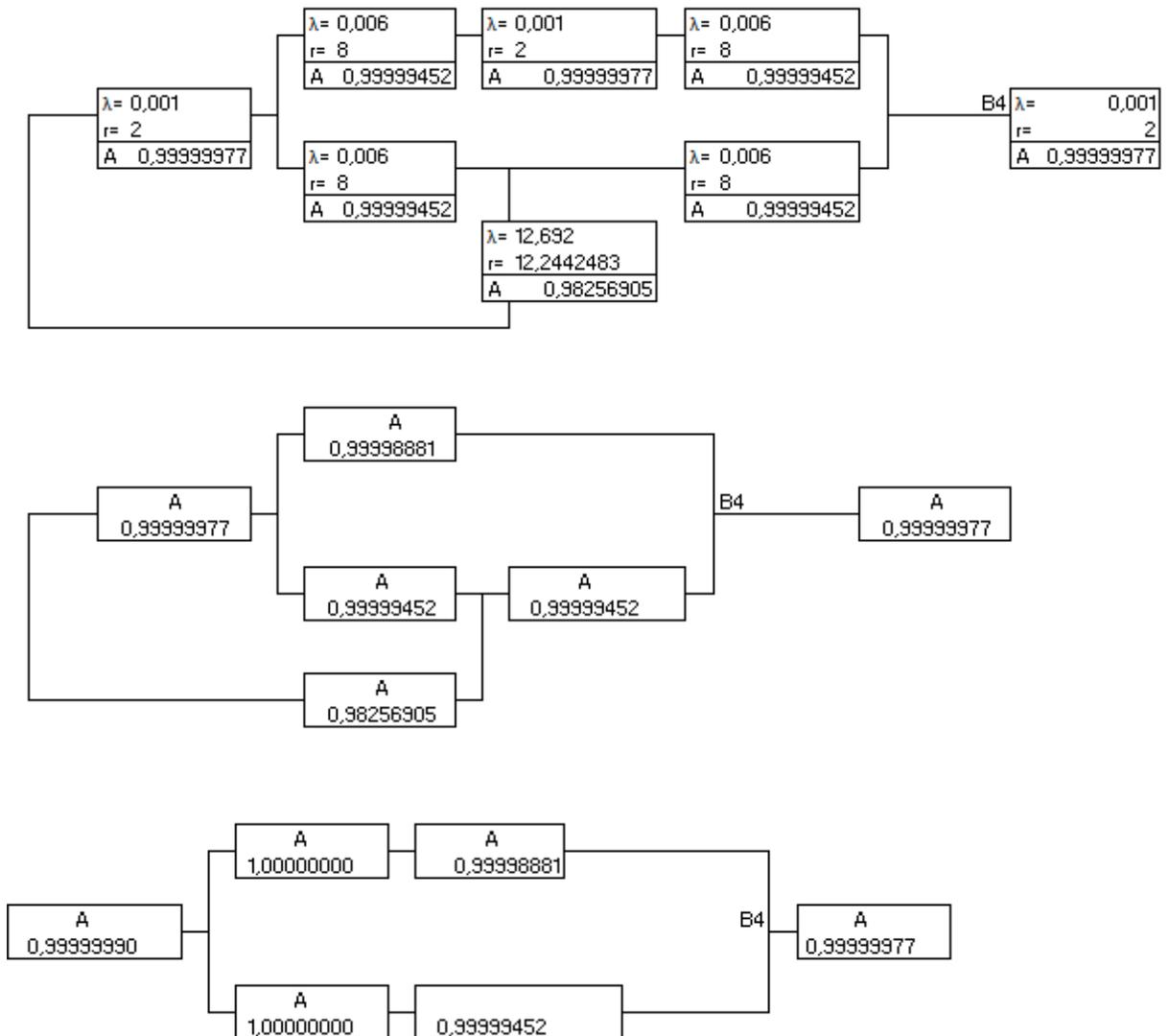


Figura 81. Diagrama de bloques de toda la generación en operación excepto la generación síncrona y eólica y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 2.



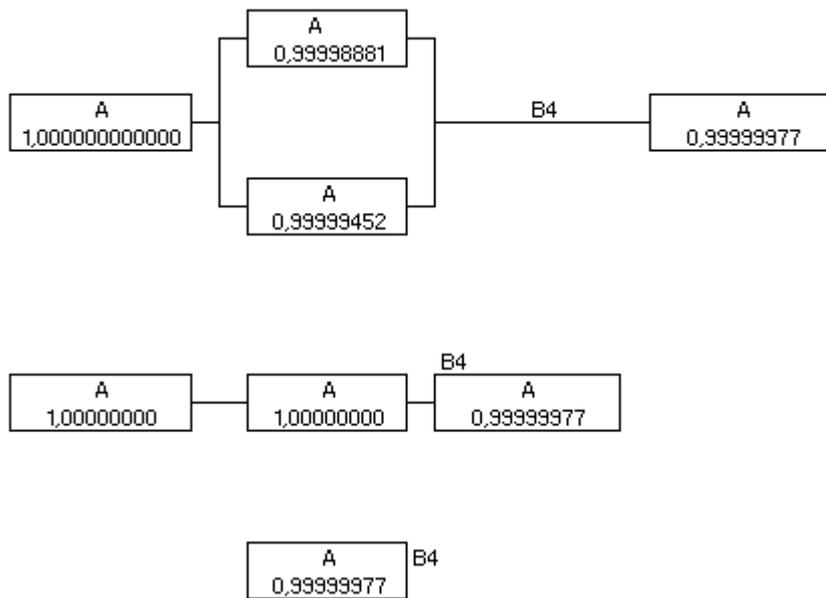
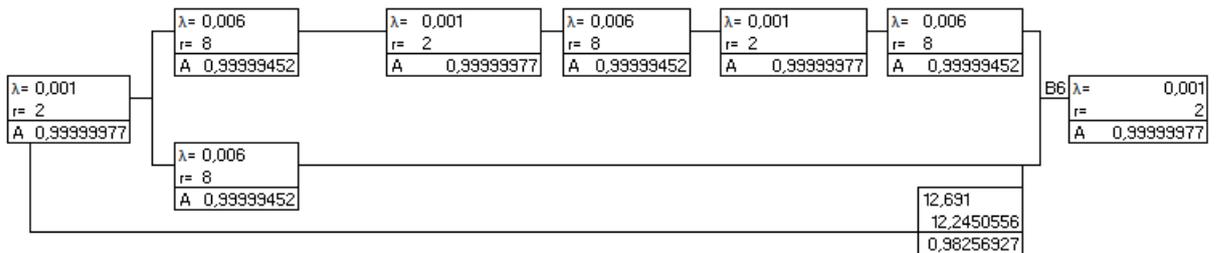
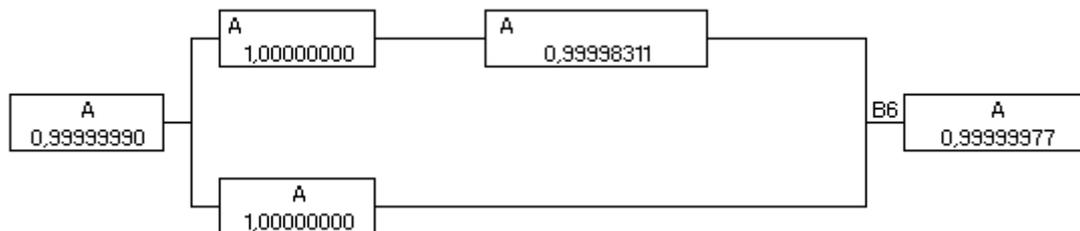
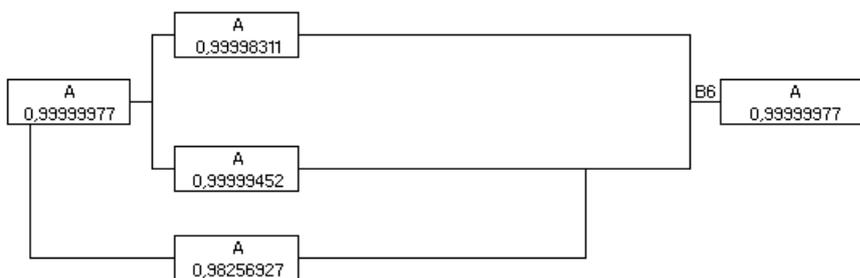


Figura 82. Diagrama de bloques de toda la generación en operación excepto la generación síncrona y eólica y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 4.



A



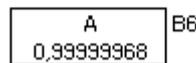
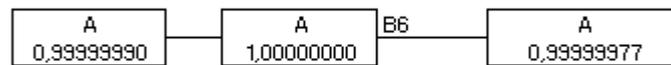
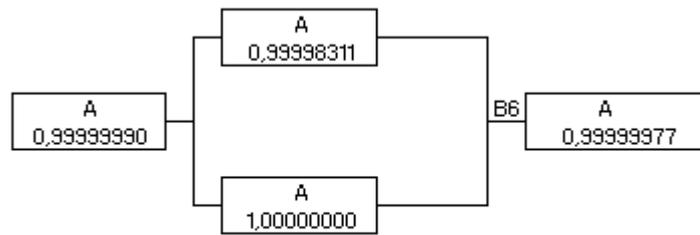
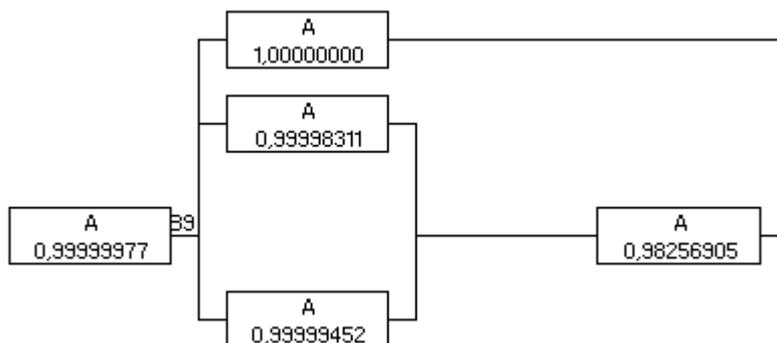
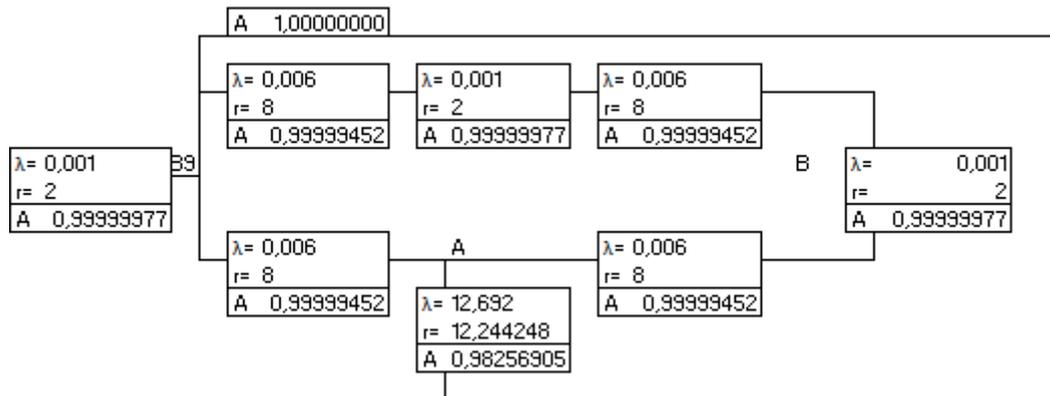


Figura 83. Diagrama de bloques de toda la generación en operación excepto la generación síncrona y eólica y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 6.



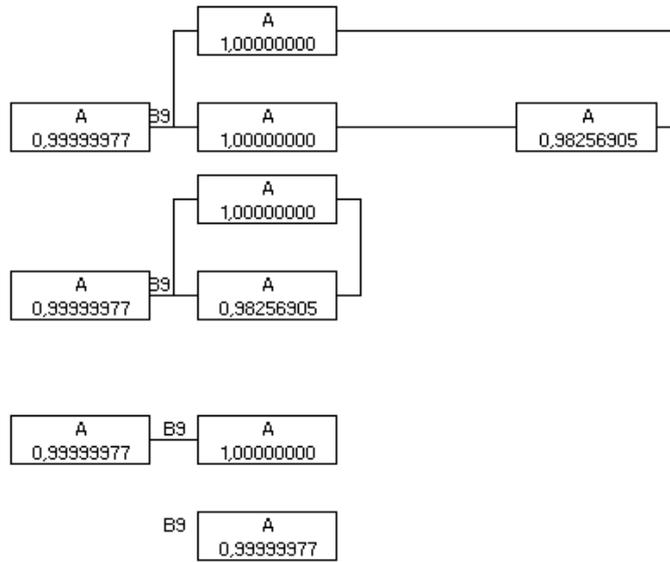


Figura 84. Diagrama de bloques de toda la generación en operación excepto la generación síncrona y eólica y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 9.

Tabla 3. Diagrama de bloques de toda la generación en operación excepto la generación síncrona y eólica y cálculo de la confiabilidad analizando en cada barra

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN COMPLETA	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,99999977
BARRA 4	0,9999997716
BARRA 6	0,99999968
BARRA 9	0,9999997717

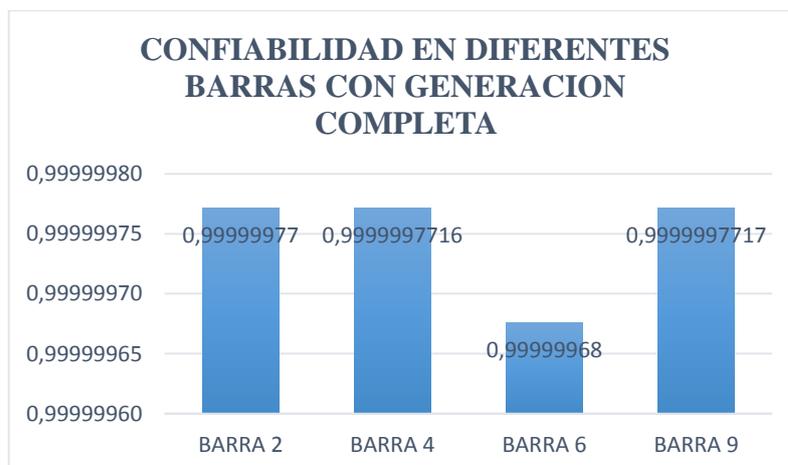
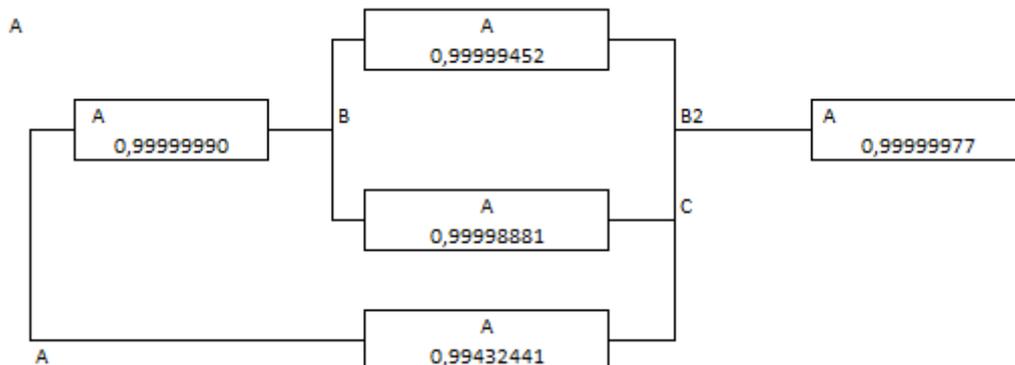
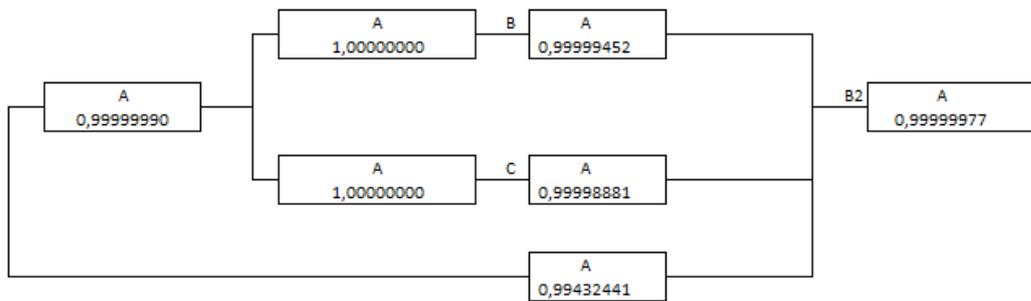
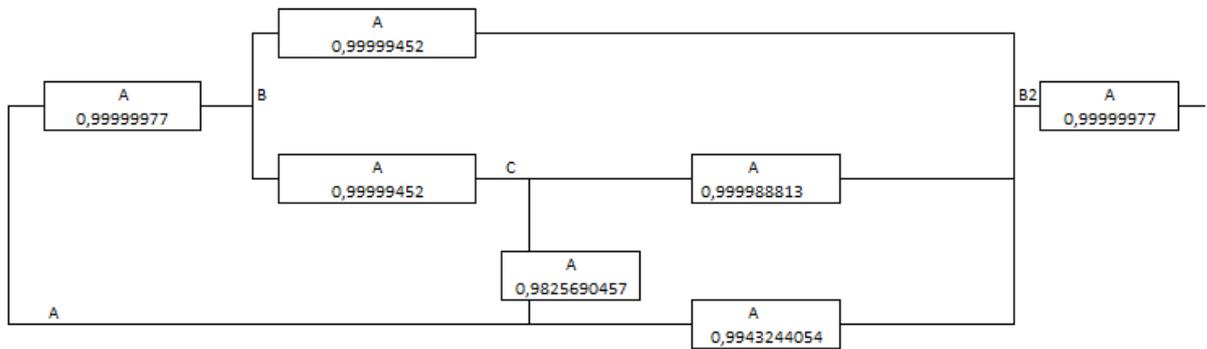
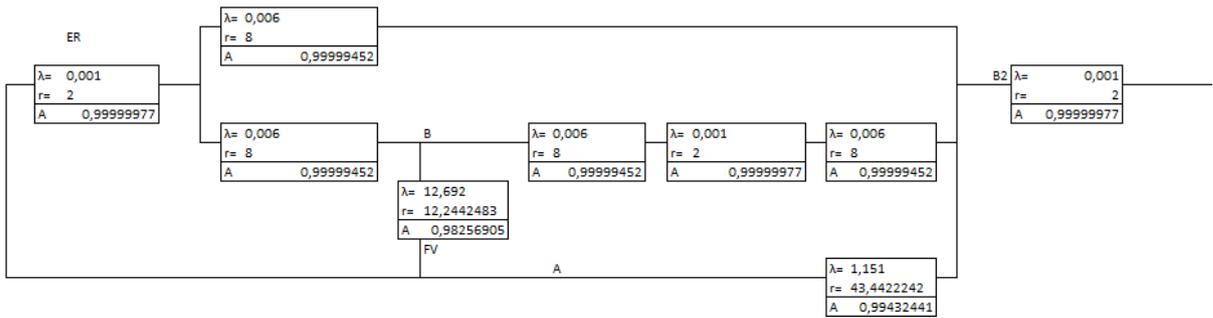


Figura 85. Análisis de la confiabilidad, diagrama de barras de toda la generación en operación excepto la generación síncrona y eólica.

Anexo 5.2: Análisis de la confiabilidad de un sistema de generación distribuida en anillo con combinación de generación excepto la eólica.

Escenario 1.

Todos los generadores en operación, excepto la eólica.



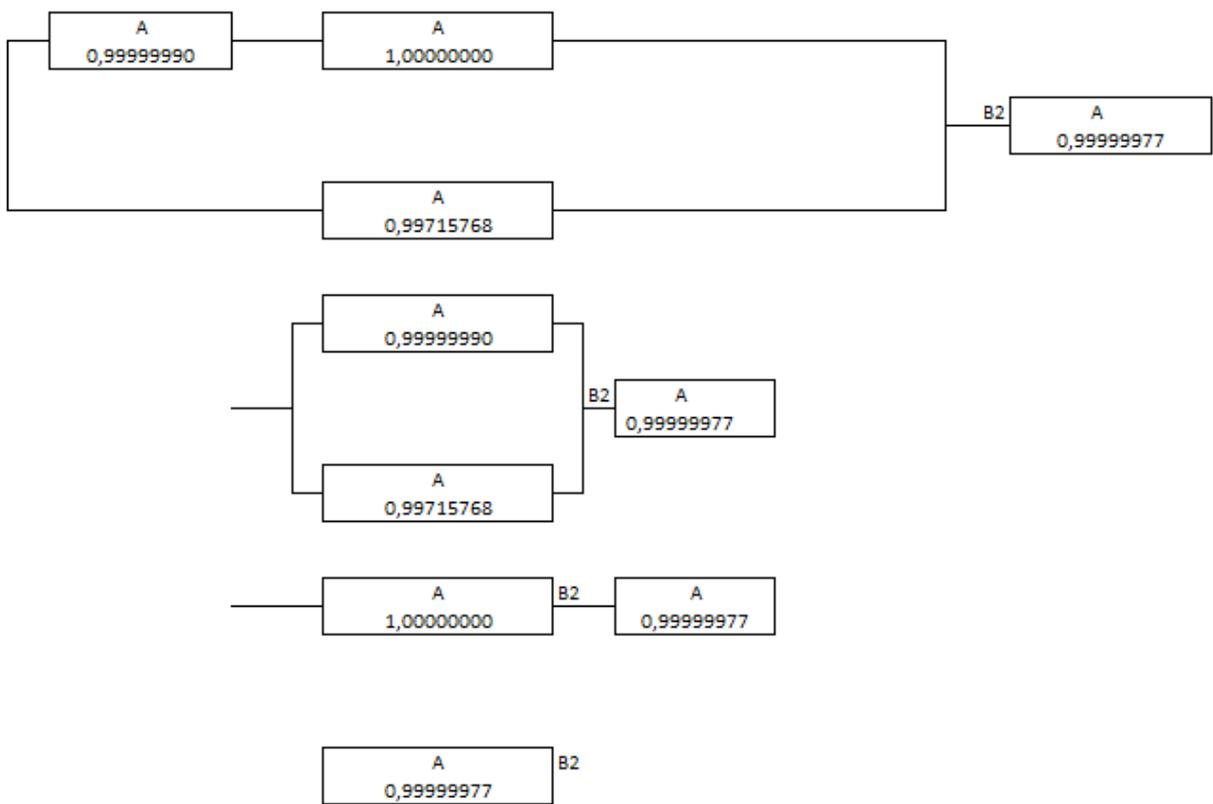
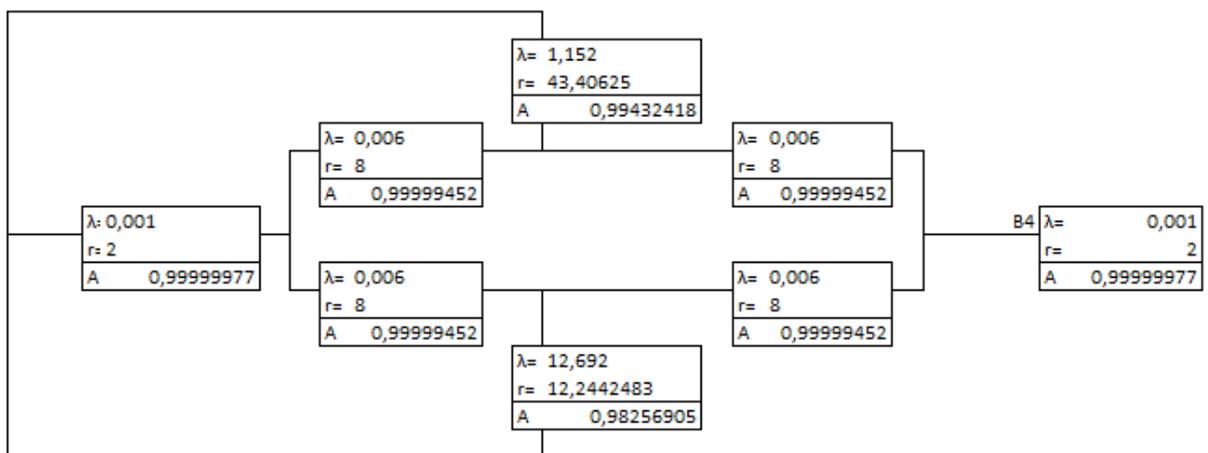


Figura 86. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con Todos los generadores en operación, excepto la eólica. Analizando en la barra 2.



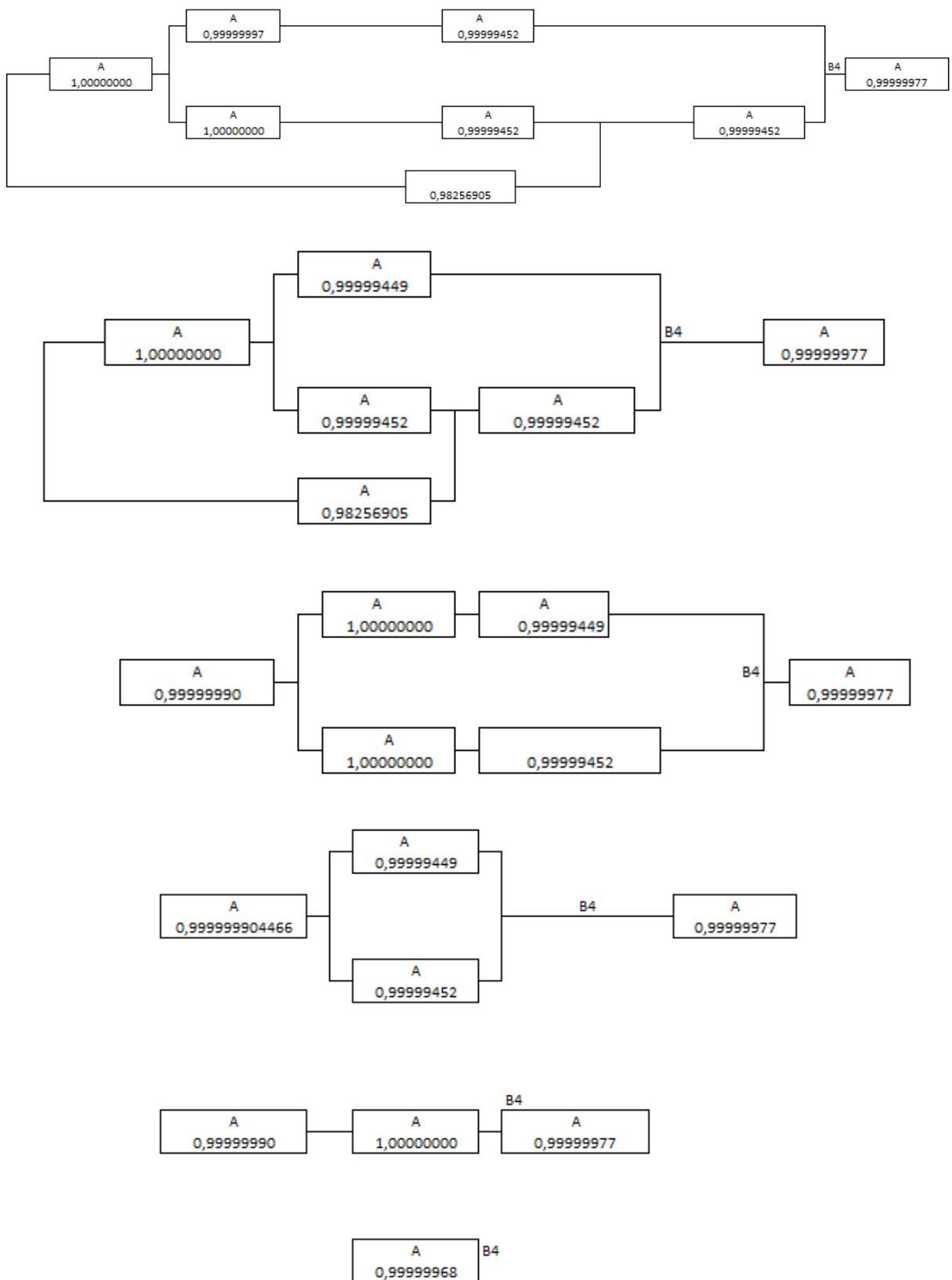
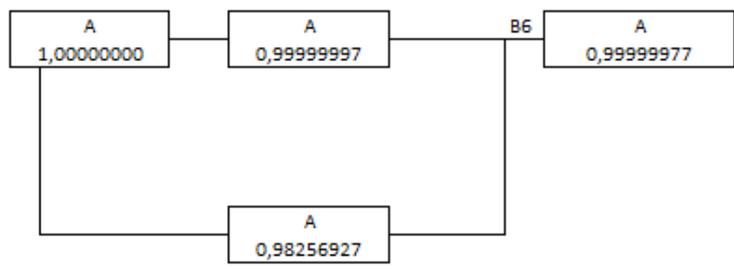
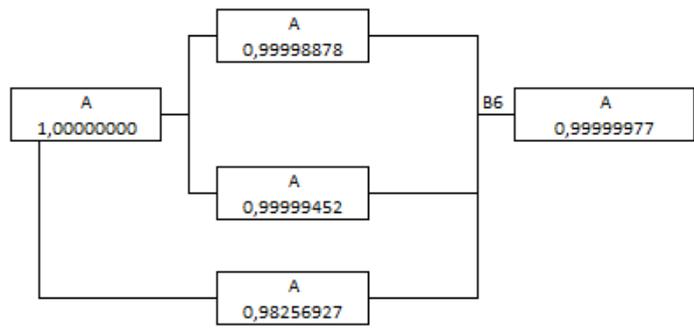
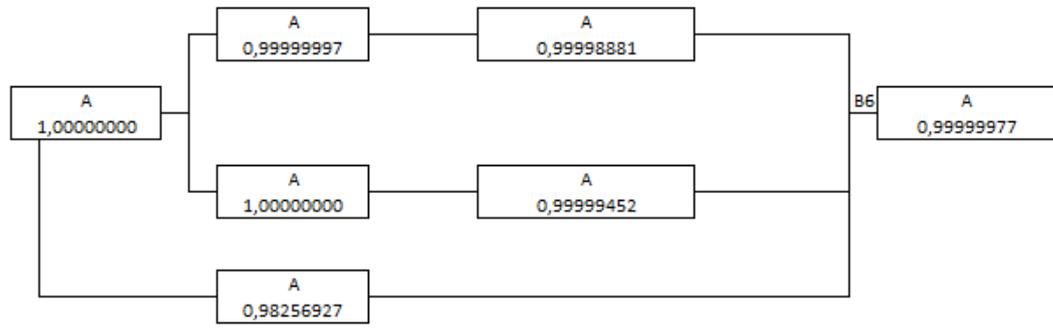
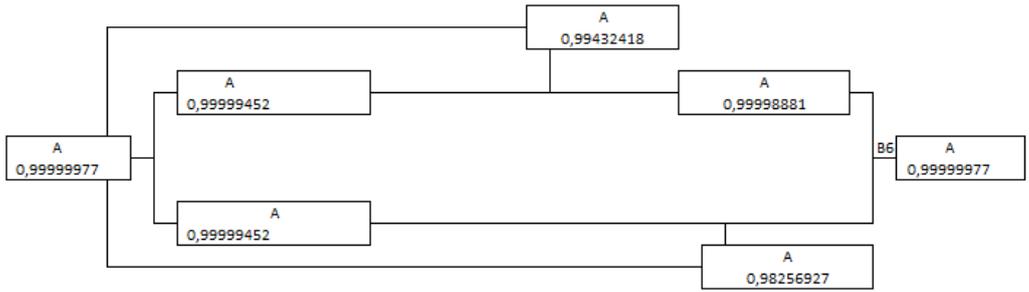
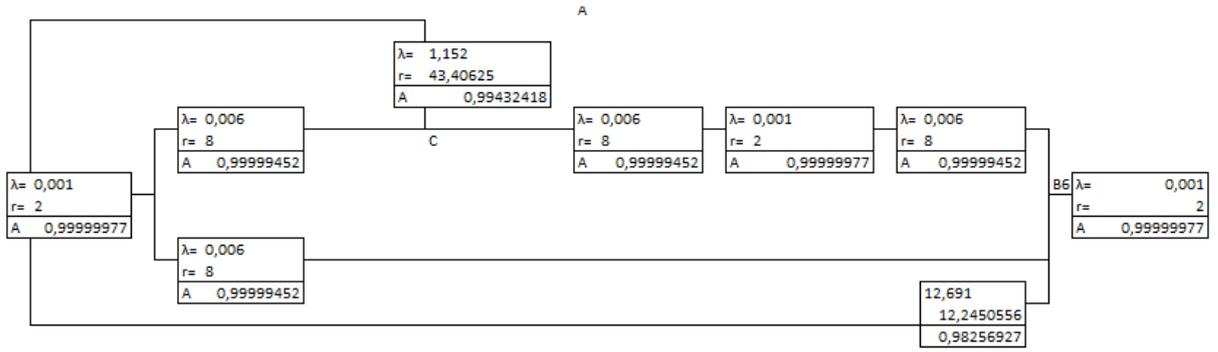


Figura 87. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con Todos los generadores en operación, excepto la eólica. Analizando en la barra 4.



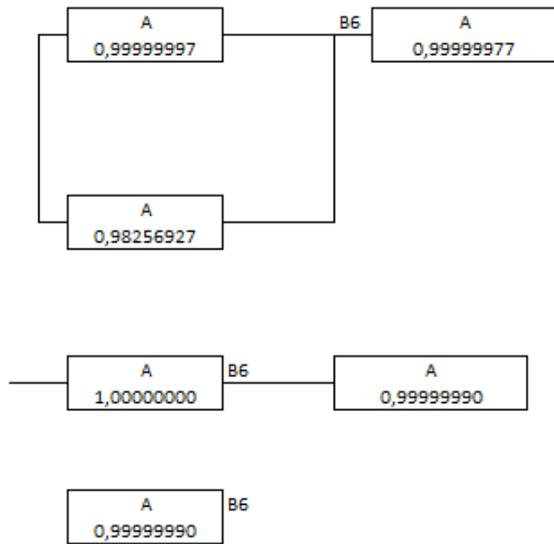
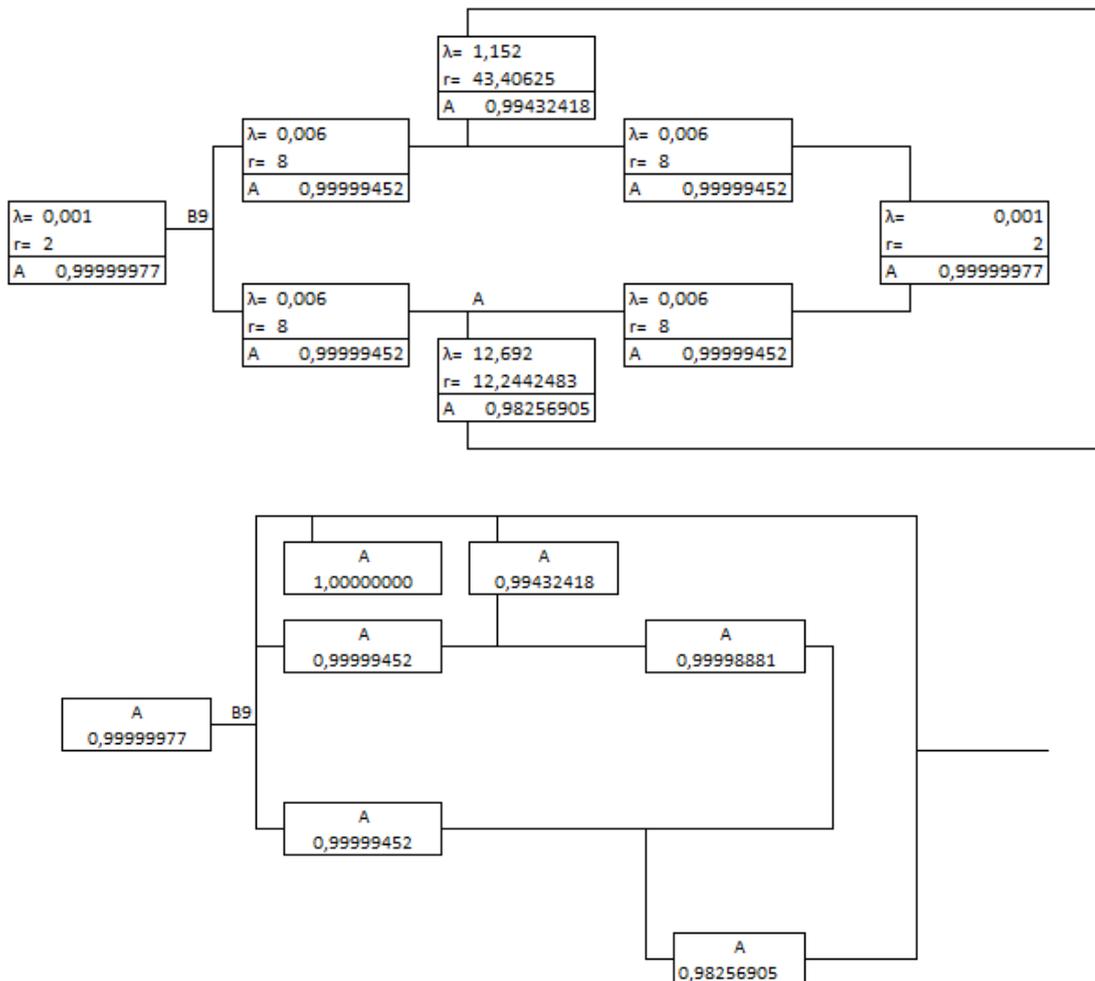


Figura 88. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con Todos los generadores en operación, excepto la eólica. Analizando en la barra 6.



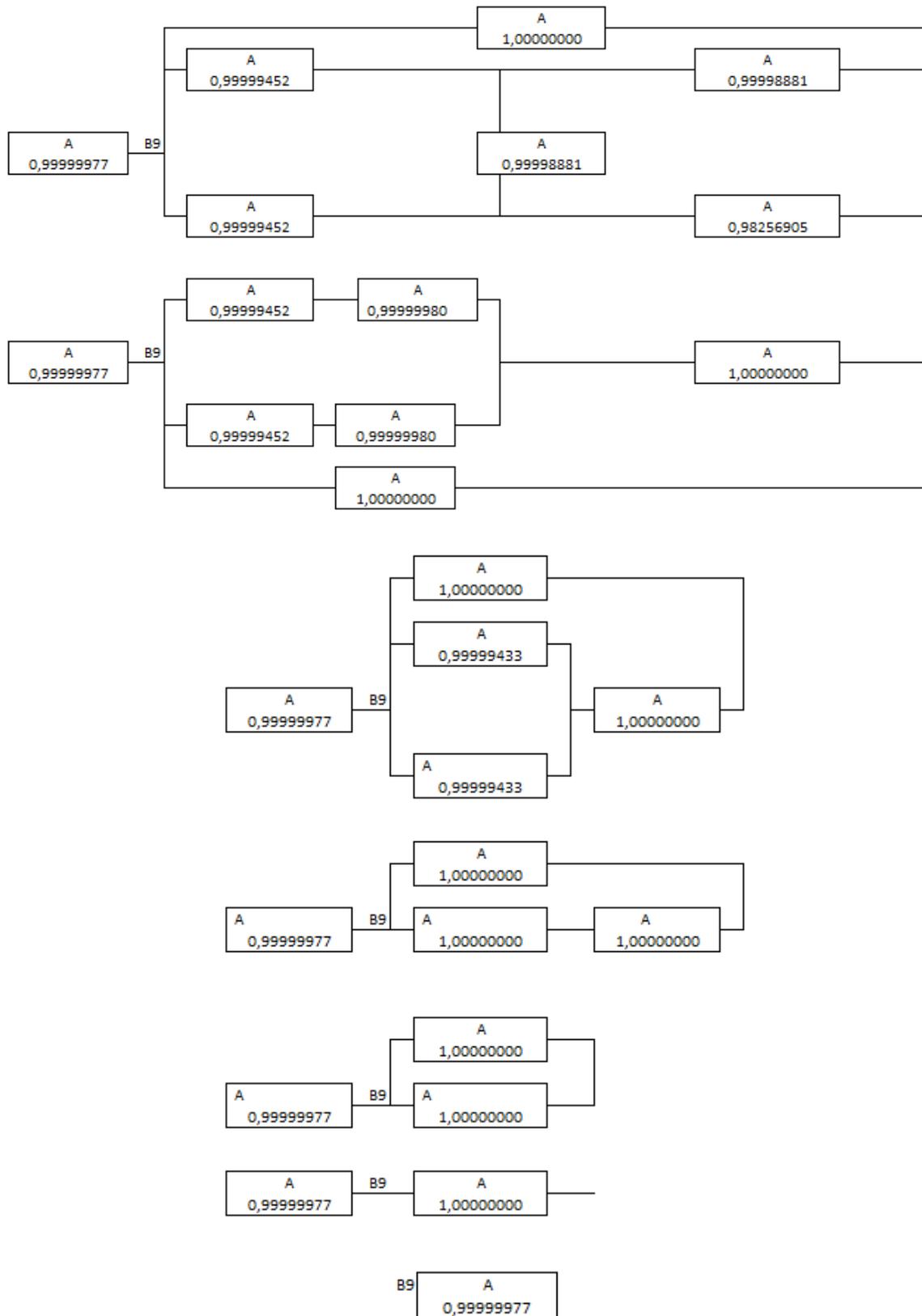


Figura 89. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con Todos los generadores en operación, excepto la eólica. Analizando en la barra 9.

Tabla 4. Datos de confiabilidad en cada una de las barras con toda la generación activa.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN COMPLETA	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,99999977
BARRA 4	0,9999996761
BARRA 6	0,99999990
BARRA 9	0,9999997717

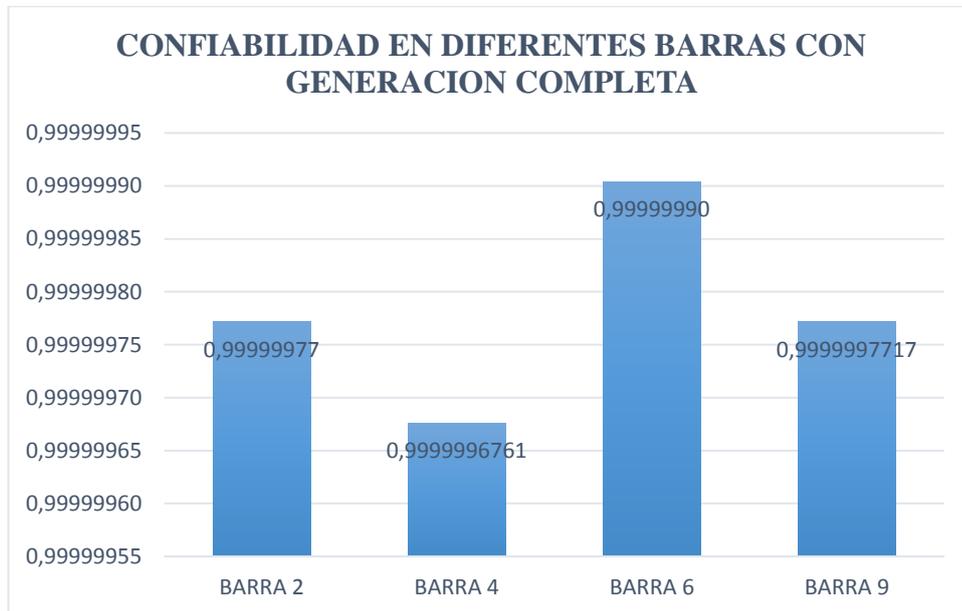


Figura 90. Análisis de la confiabilidad, con toda la combinación generación excepto la eólica.

Escenario 2.

Generación Síncrona, Equivalente de Red excepto Generación fotovoltaica y eólica.

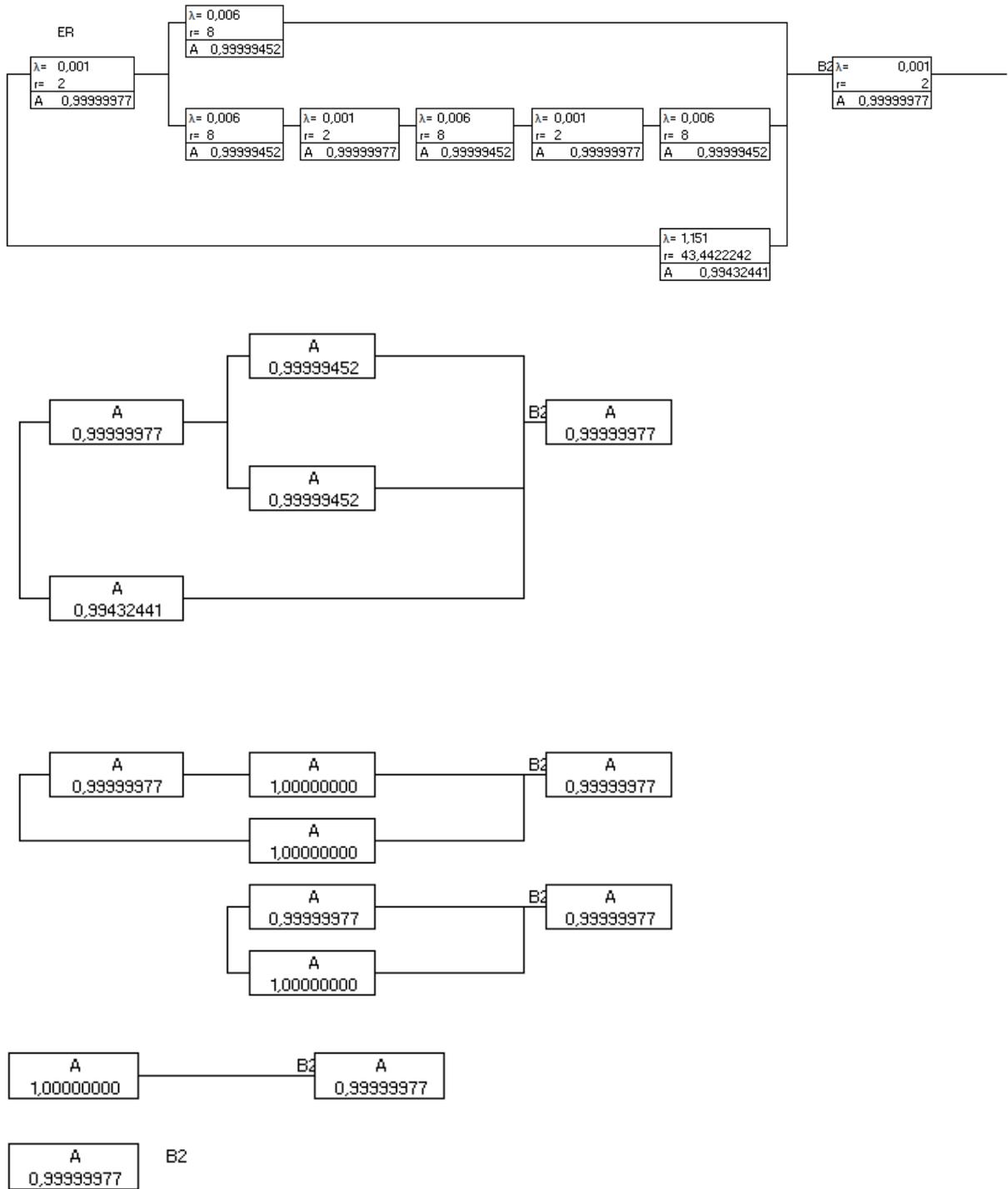


Figura 91. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 2.

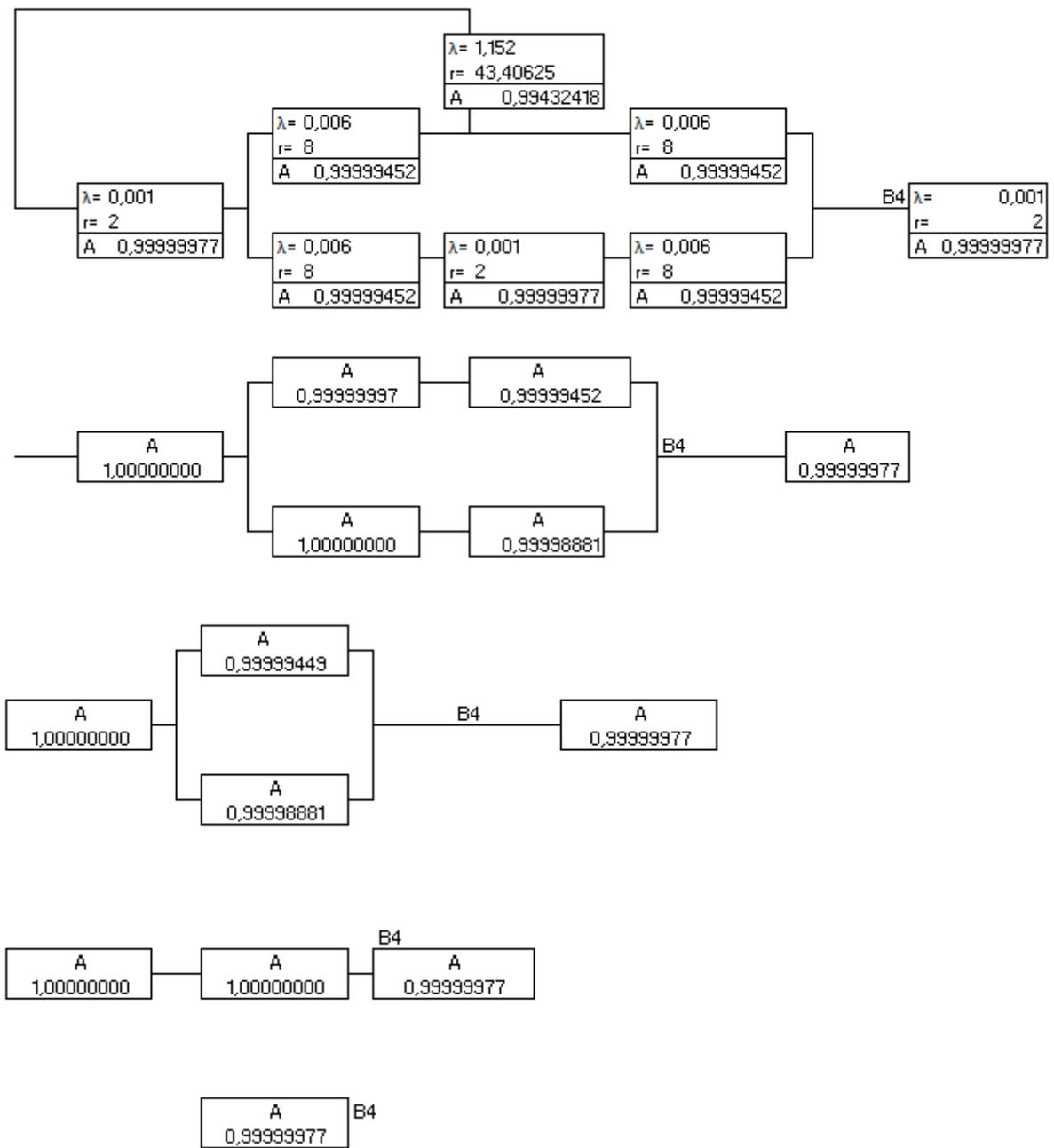
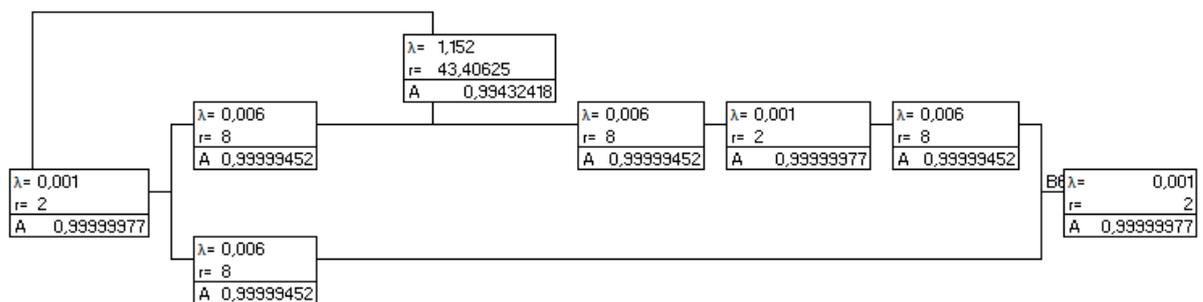


Figura 92. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 4.



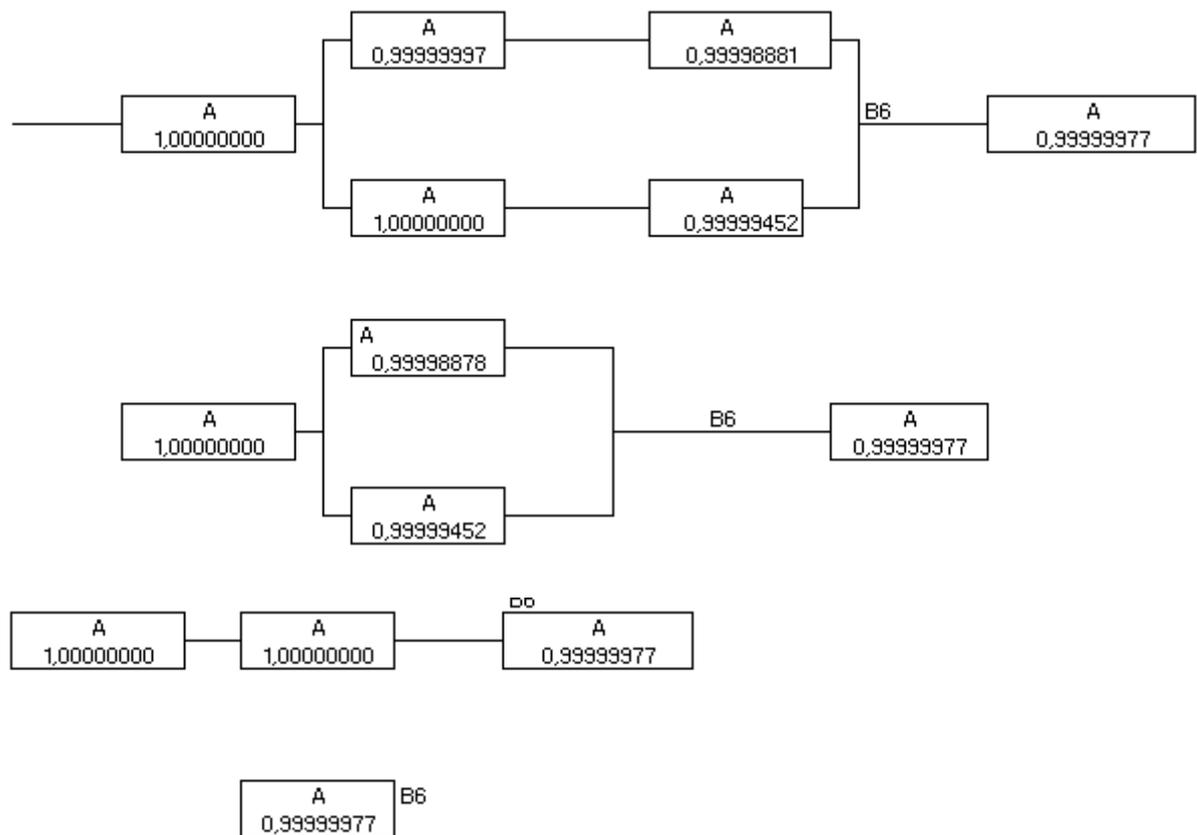
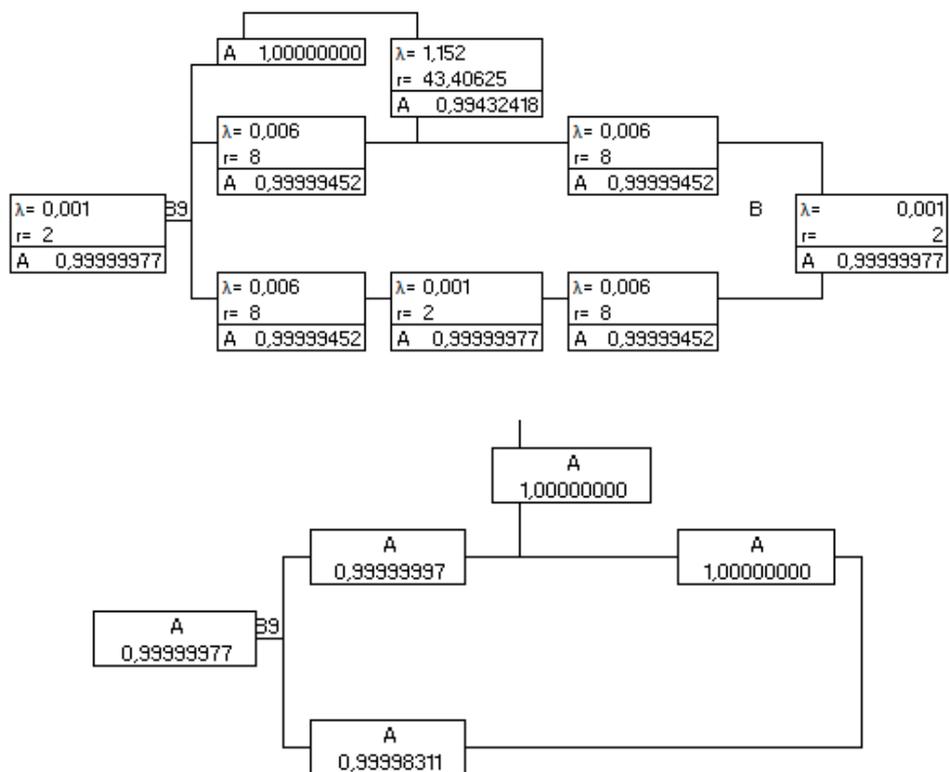


Figura 93. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 6.



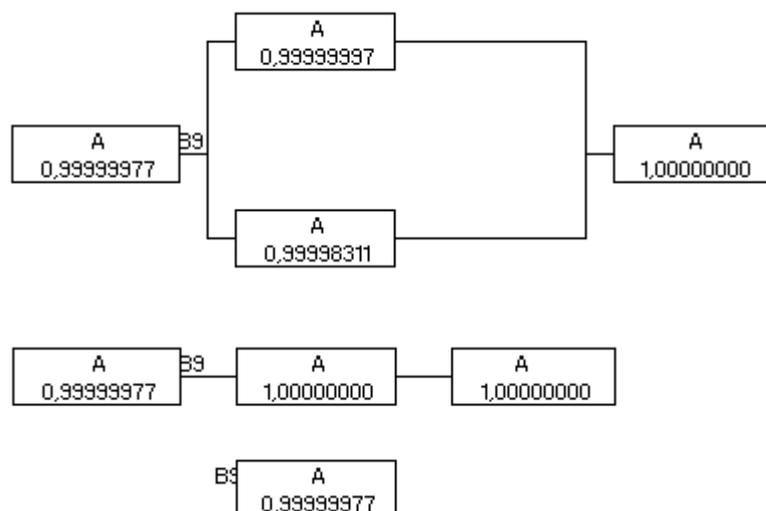


Figura 94. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad analizando la barra 9.

Tabla 5. Datos de confiabilidad con generación síncrona, equivalente de red excepto generación fotovoltaica y eólica.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN COMPLETA	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,99999977
BARRA 4	0,9999997716
BARRA 6	0,99999977
BARRA 9	0,9999997717

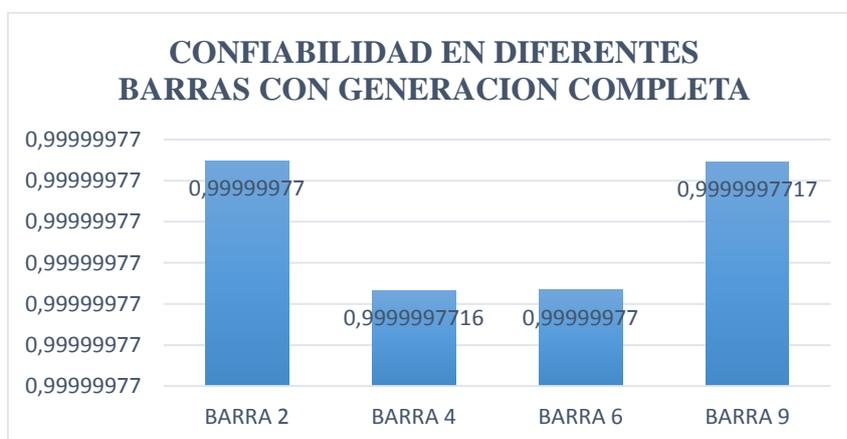
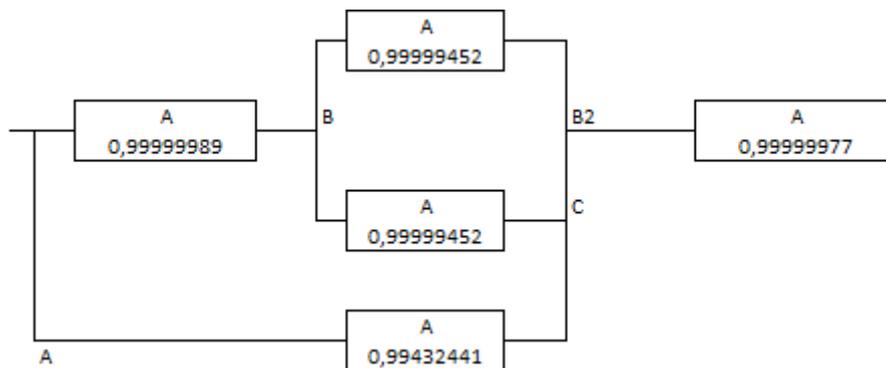
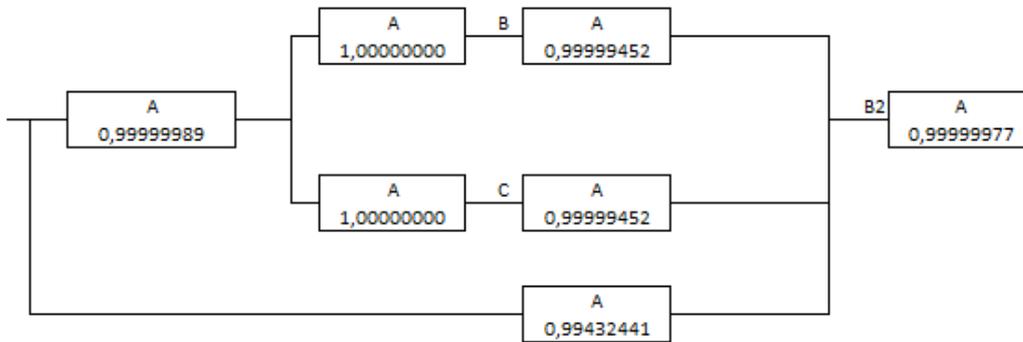
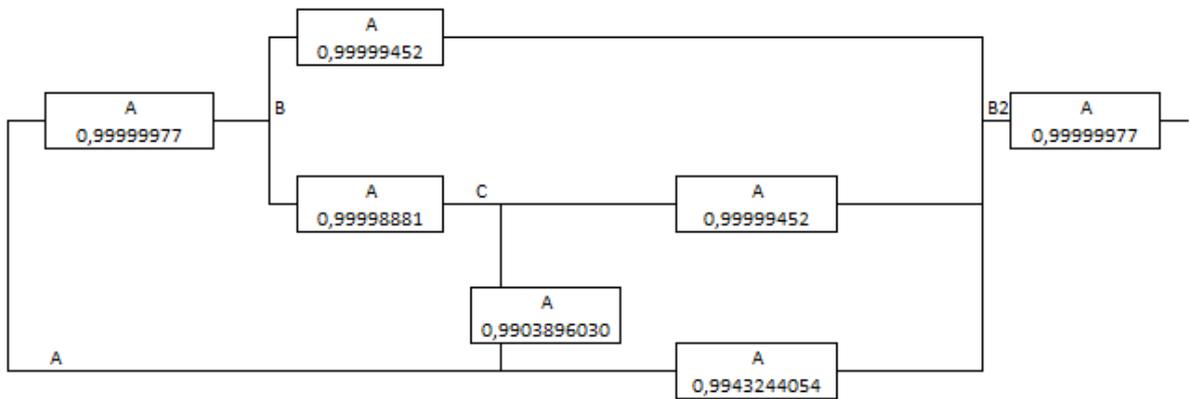
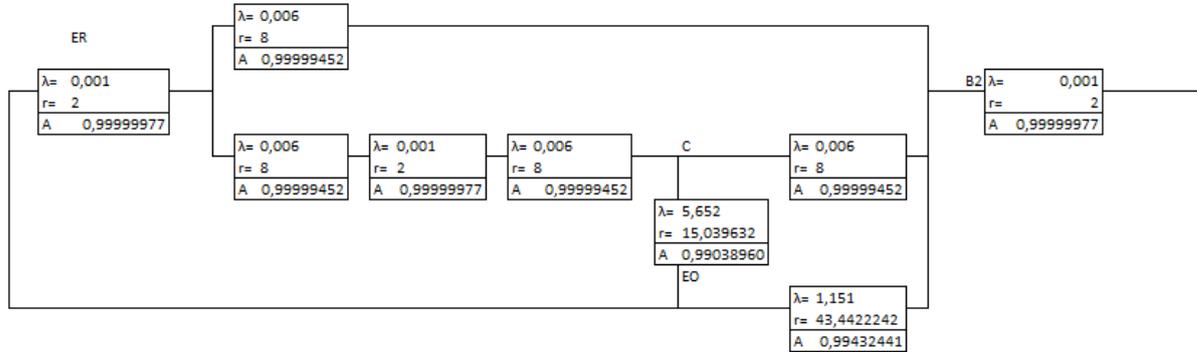


Figura 95. Análisis de la confiabilidad en un diagrama de barras con la combinación de generación síncrona, equivalente de red excepto generación fotovoltaica y eólica. .

Escenario 3.

Toda la generación en operación excepto la fotovoltaica



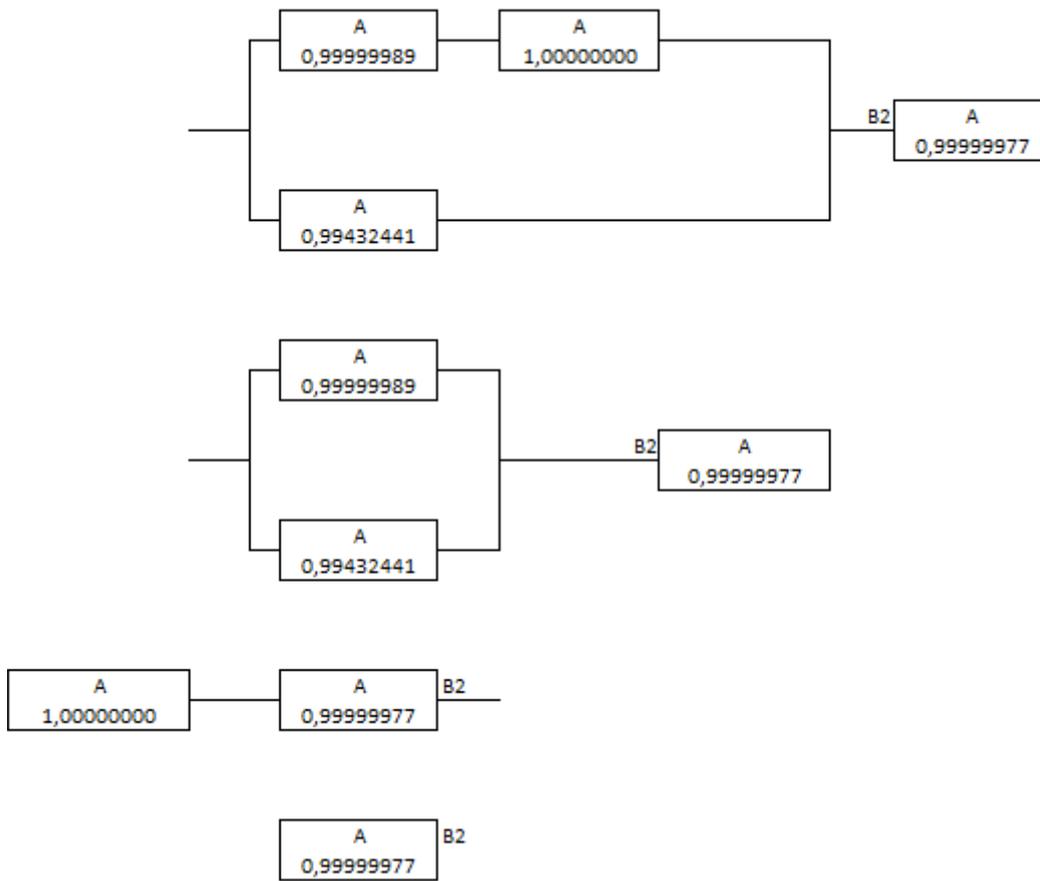
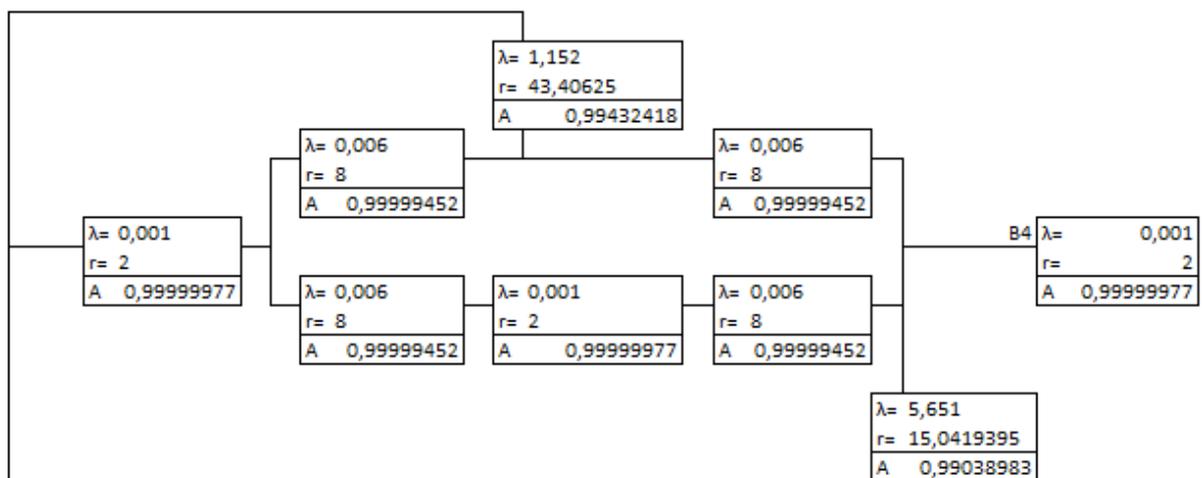


Figura 96. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con toda la generación en operación excepto la fotovoltaica, analizada desde la barra 2.



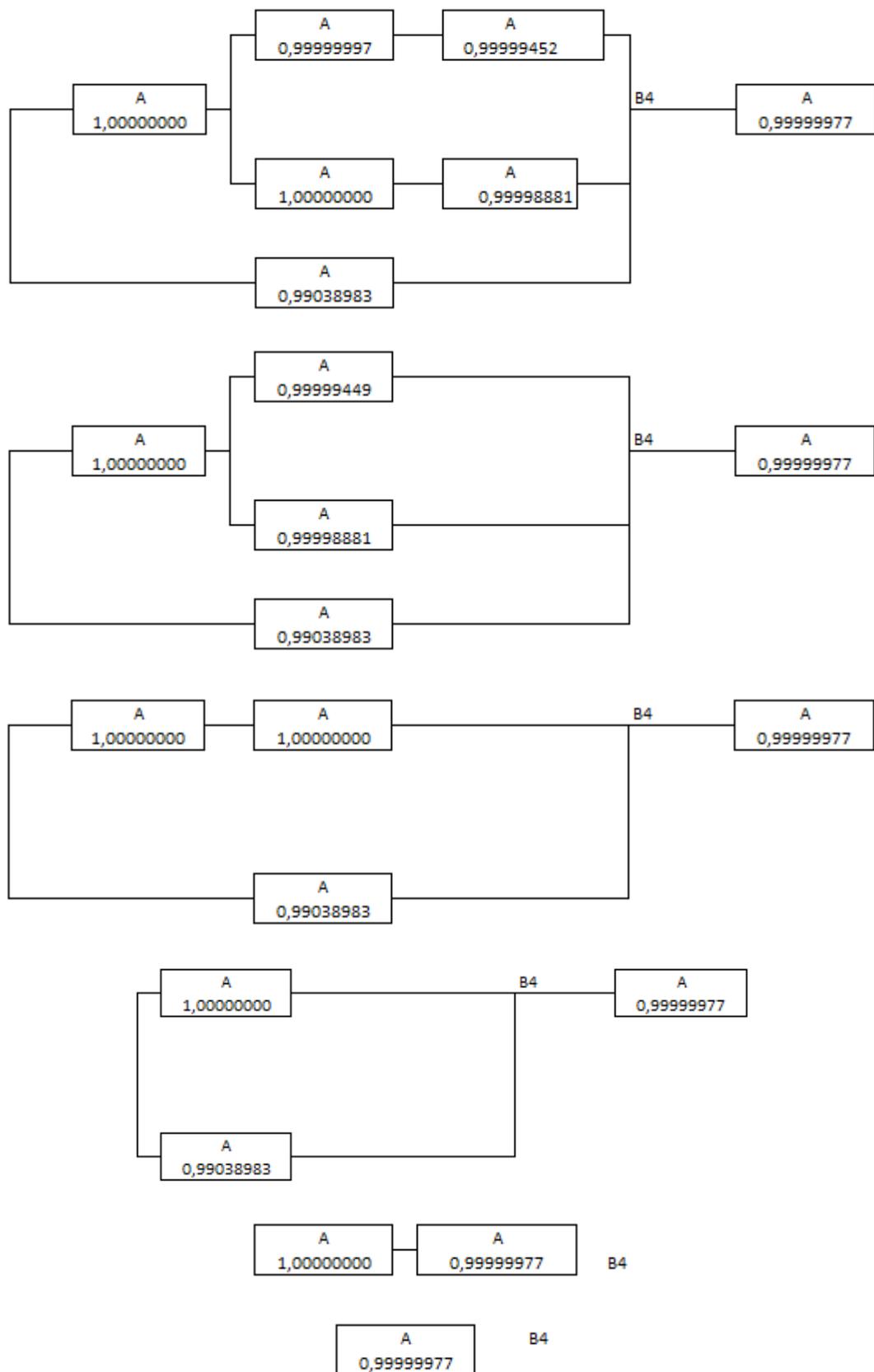


Figura 97. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con toda la generación en operación excepto la fotovoltaica, analizada desde la barra 4.

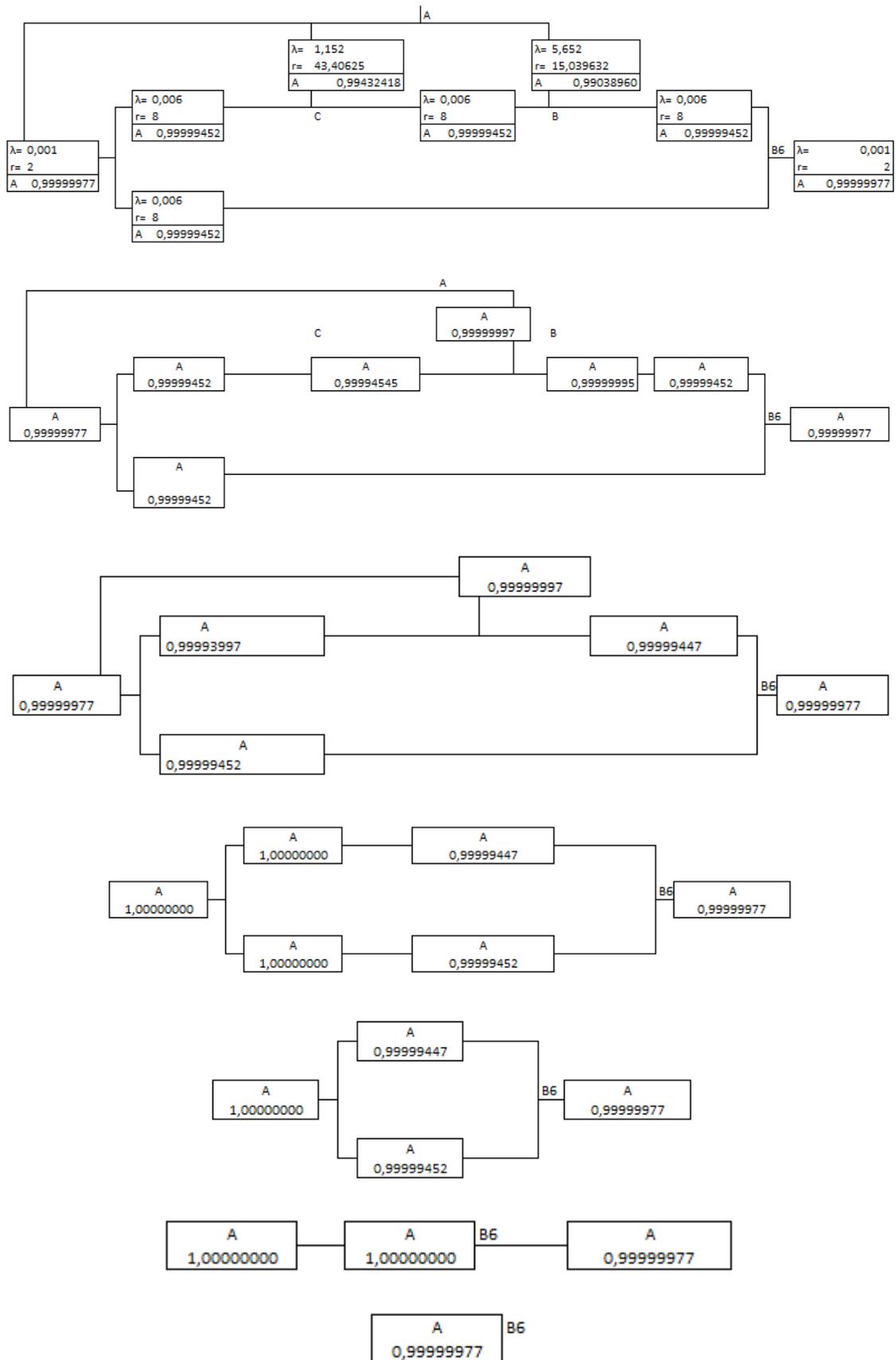


Figura 98. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con toda la generación en operación excepto la fotovoltaica, analizada desde la barra 6.

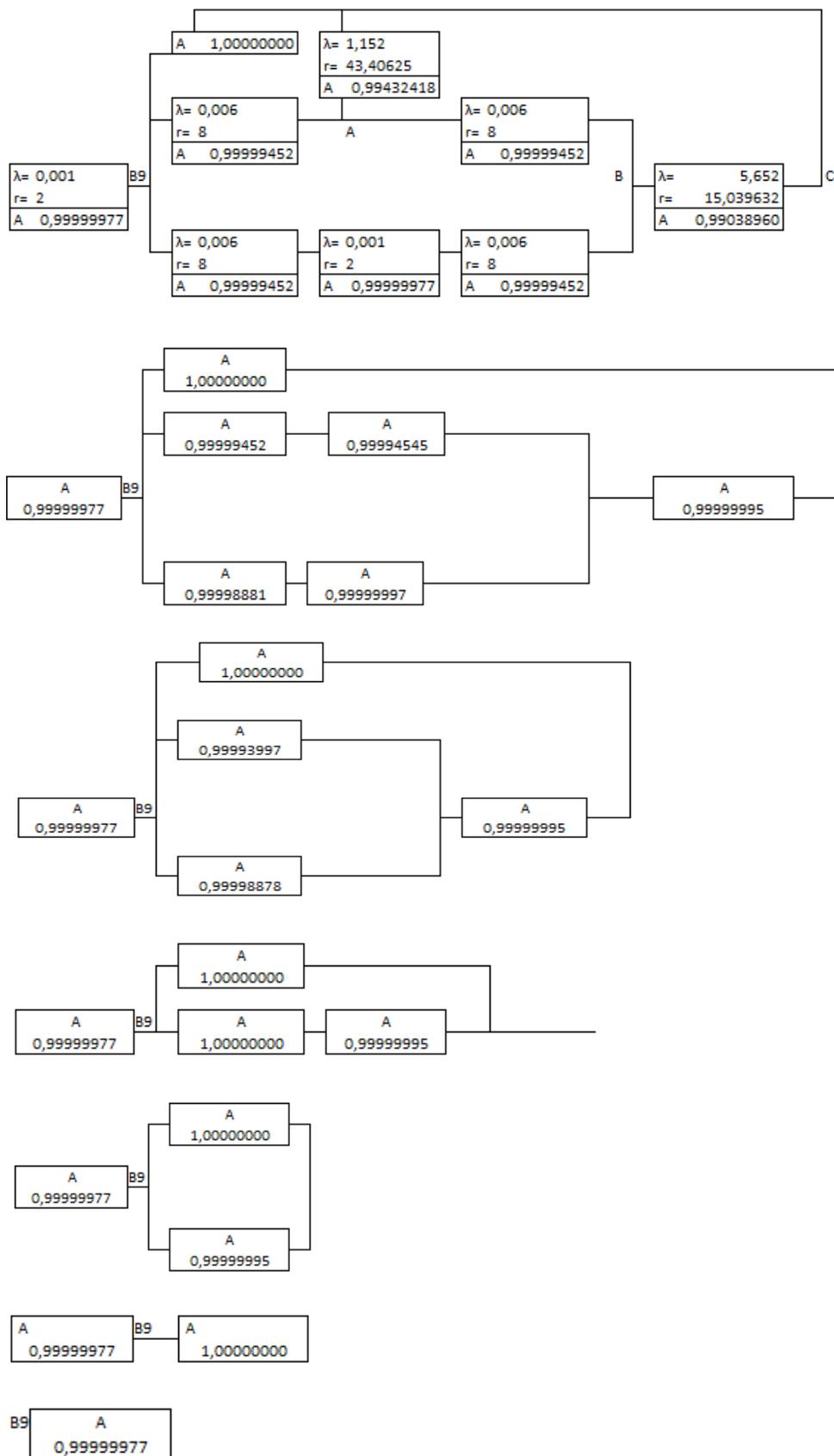


Figura 99. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con toda la generación en operación excepto la fotovoltaica, analizada desde la barra 9.

Tabla 6. Datos de confiabilidad en cada una de las barras con generación y cálculo de la confiabilidad con toda la generación en operación excepto la fotovoltaica.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN COMPLETA	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,99999977
BARRA 4	0,9999997717
BARRA 6	0,99999977
BARRA 9	0,9999997717

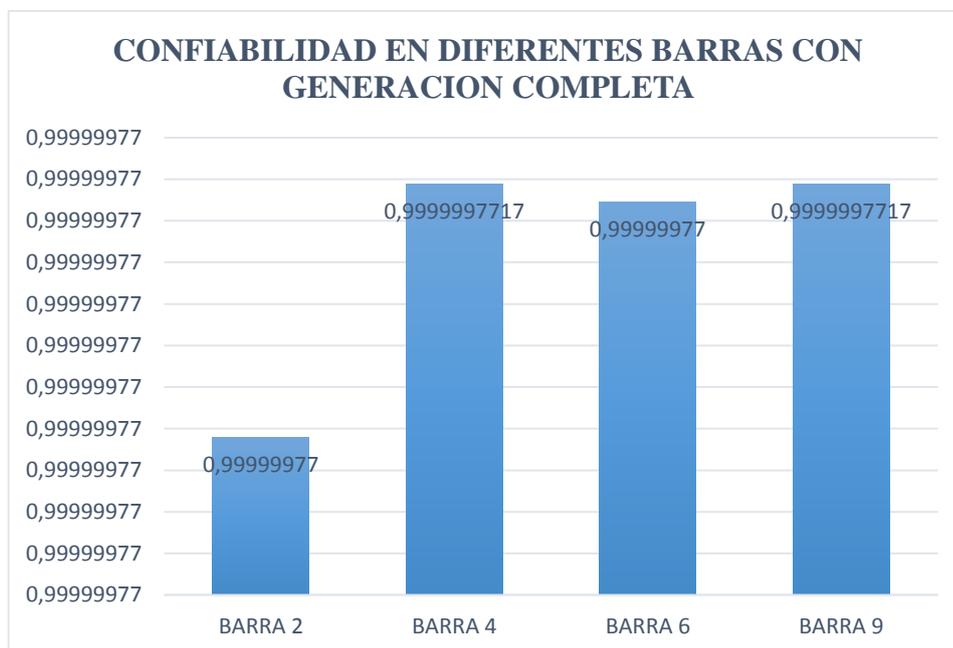


Figura 100. Análisis de la confiabilidad representada en un diagrama de barras con toda la generación en operación excepto la fotovoltaica.

Anexo 5.3: Análisis de la confiabilidad de un sistema de generación Distribuida en anillo con combinación de generación.

Escenario 1.

Todos los generadores en operación, excepto la fotovoltaica y la síncrona.

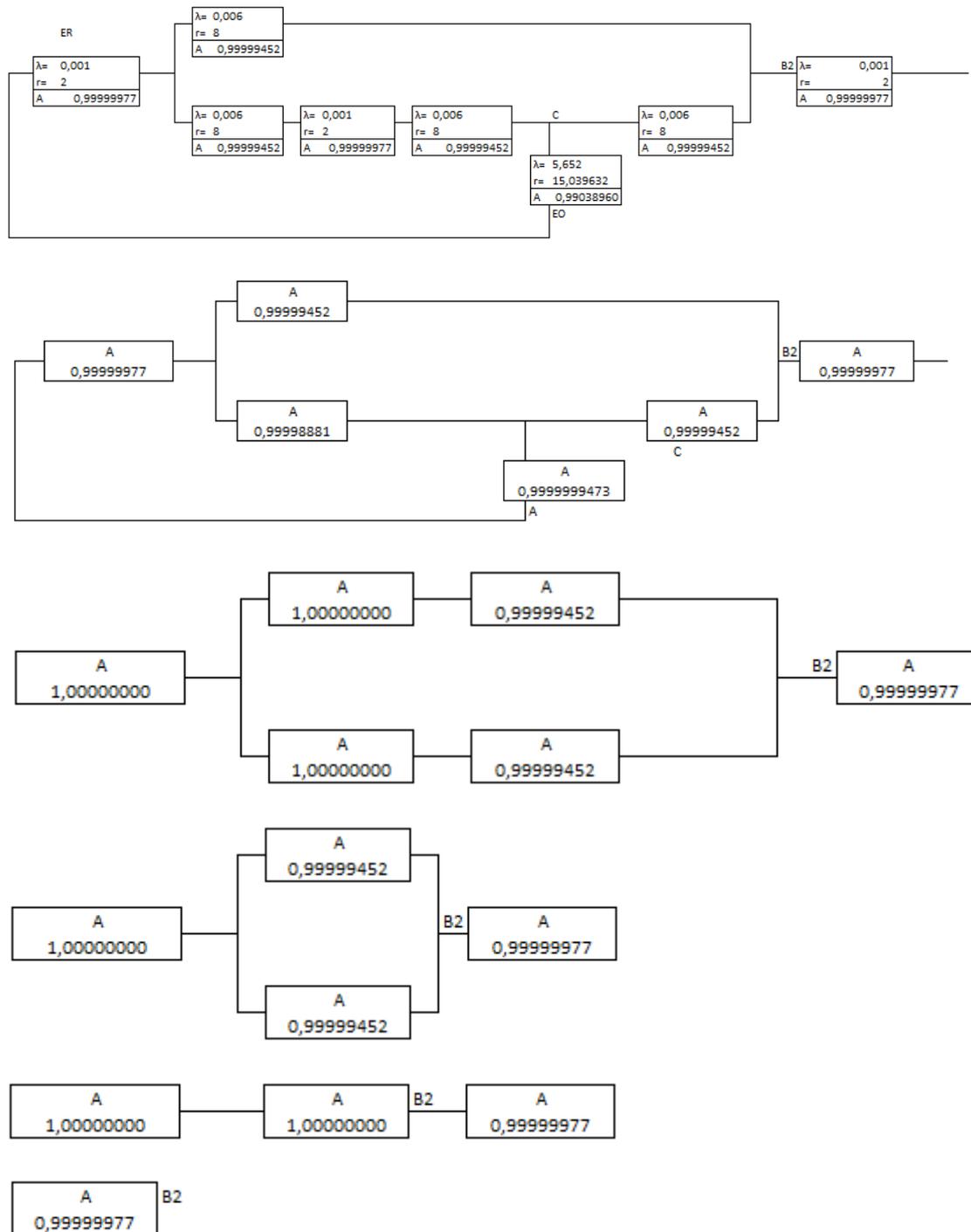


Figura 101. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con todos los generadores en operación, excepto la fotovoltaica y la síncrona, analizando barra 2.

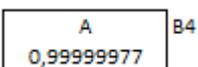
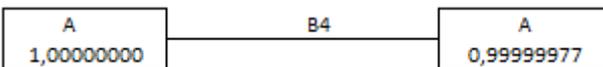
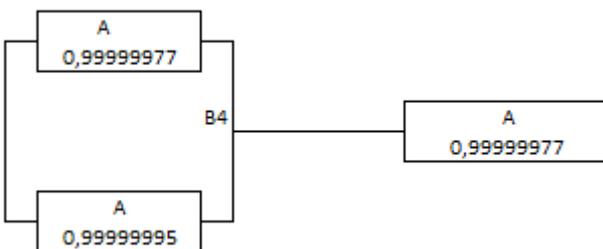
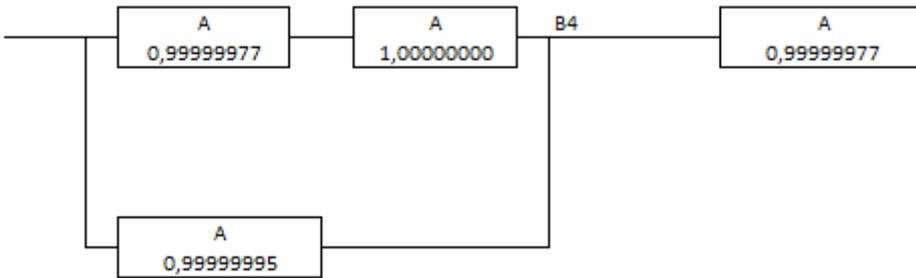
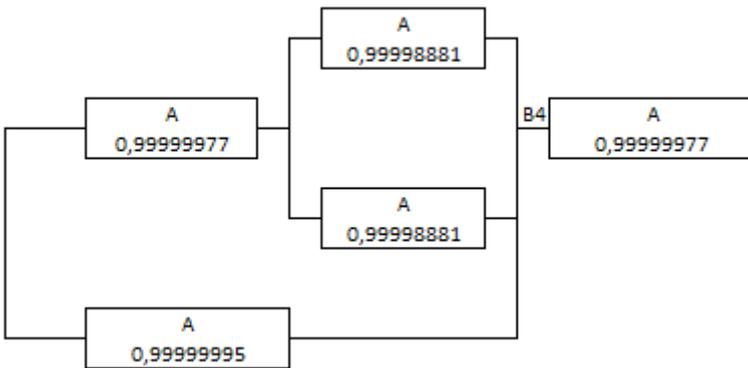
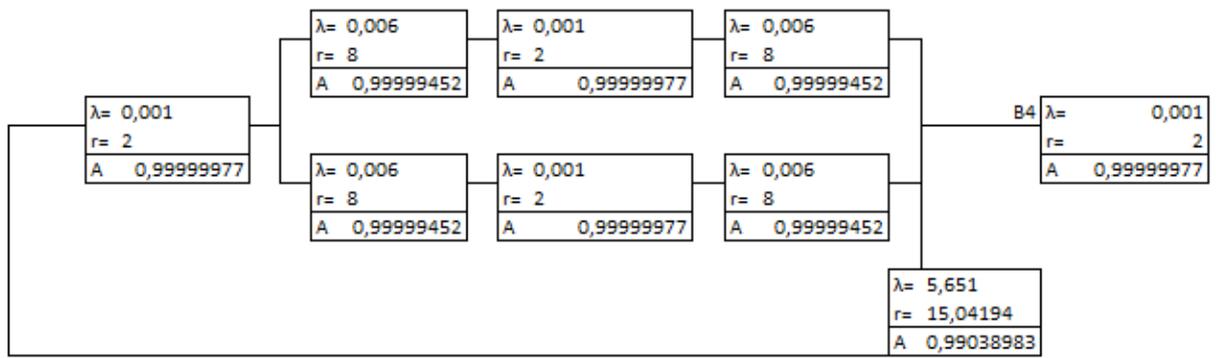


Figura 102. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con todos los generadores en operación, excepto la fotovoltaica y la síncrona, analizando barra 4.

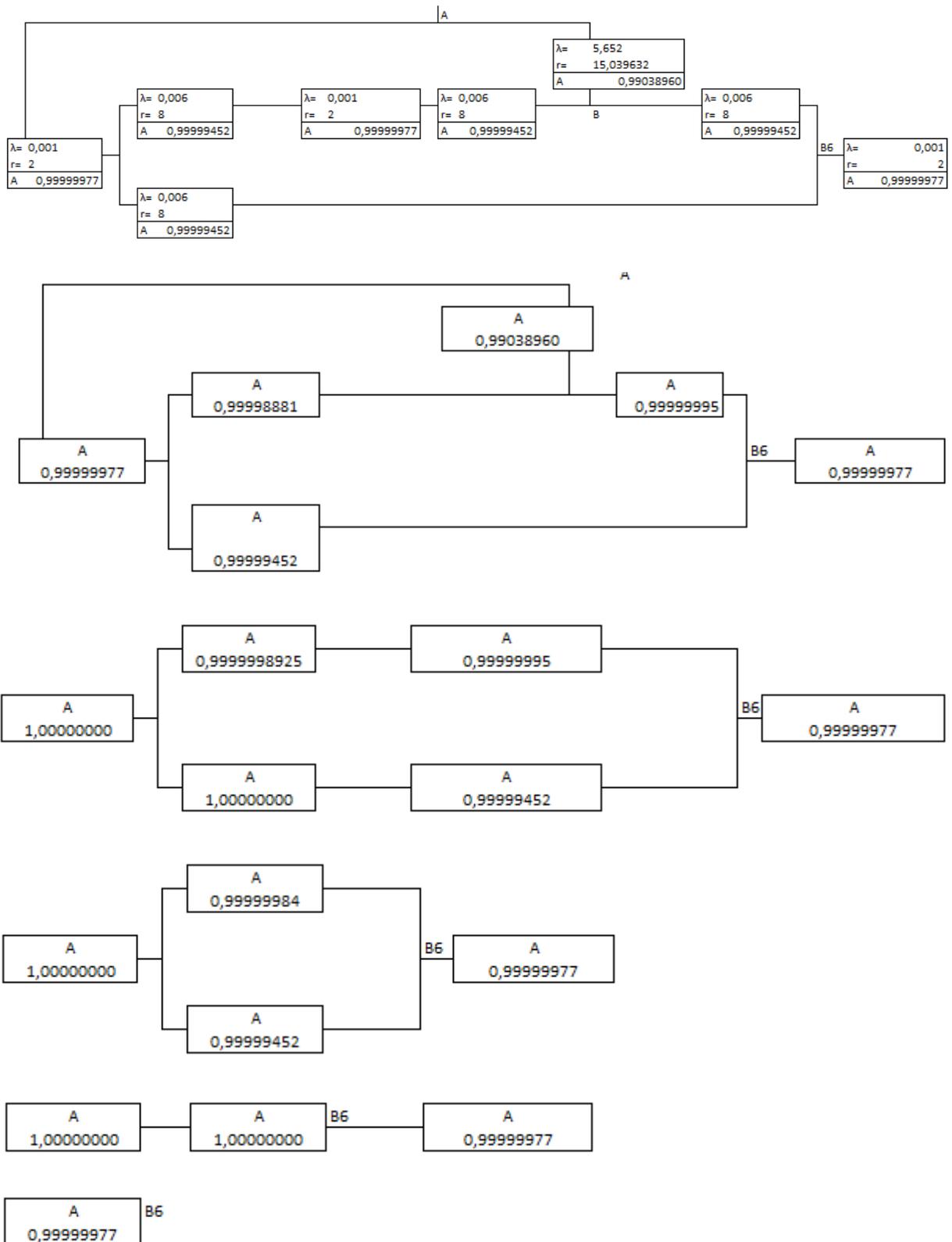


Figura 103. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con todos los generadores en operación, excepto la fotovoltaica y la síncrona, analizando barra 6.

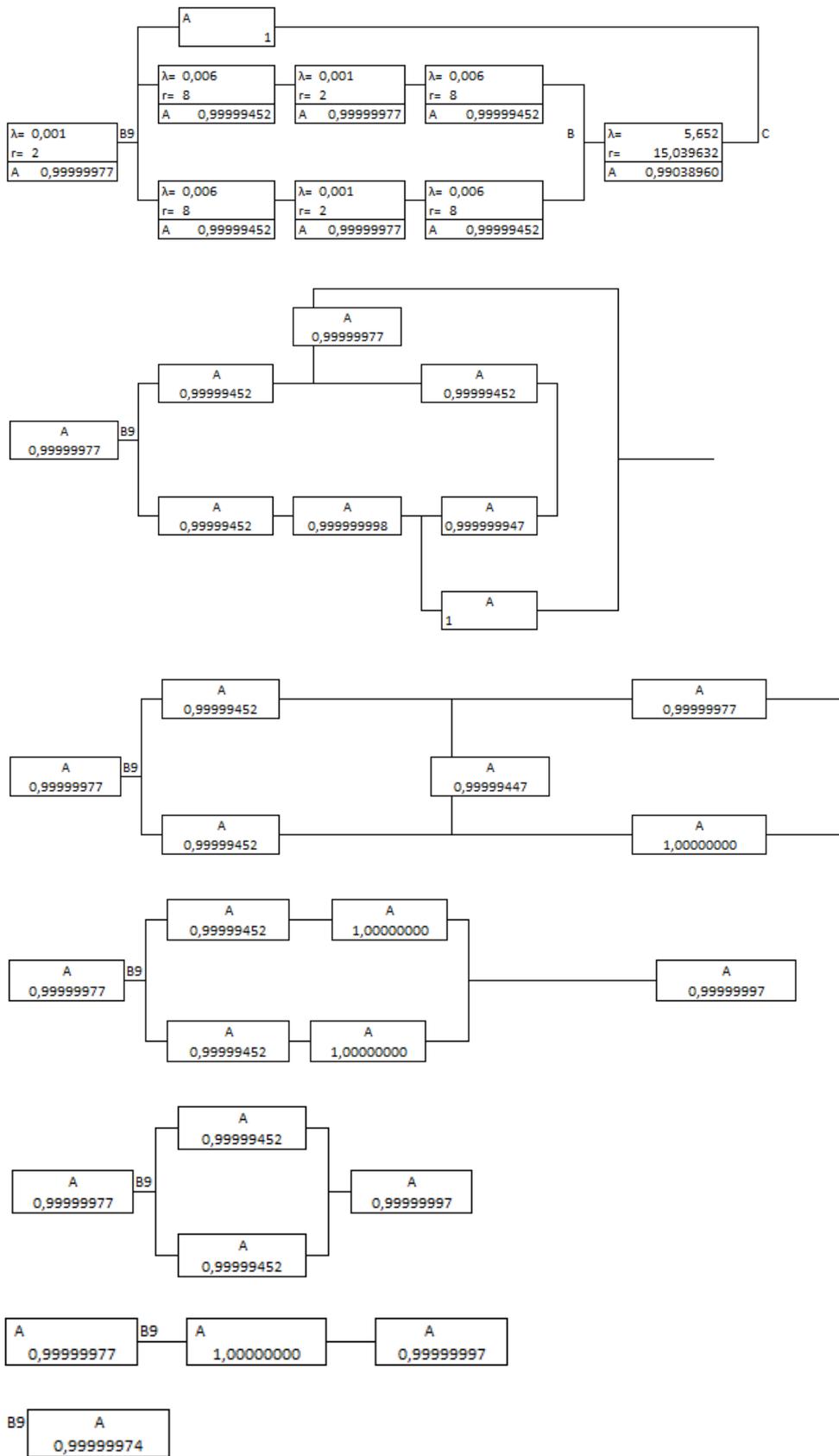


Figura 104. Diagrama de bloques, y cálculo de la confiabilidad con todos los generadores en operación, excepto la fotovoltaica y la síncrona, analizando barra 2.

Tabla 7. Datos de confiabilidad en cada una de las barras con toda la generación en operación.

CONFIABILIDAD EN DIFERENTES BARRAS CON GENERACIÓN COMPLETA	
BARRA	CONFIABILIDAD
BARRA 2	0,99999977
BARRA 4	0,9999997717
BARRA 6	0,99999977
BARRA 9	0,9999997403

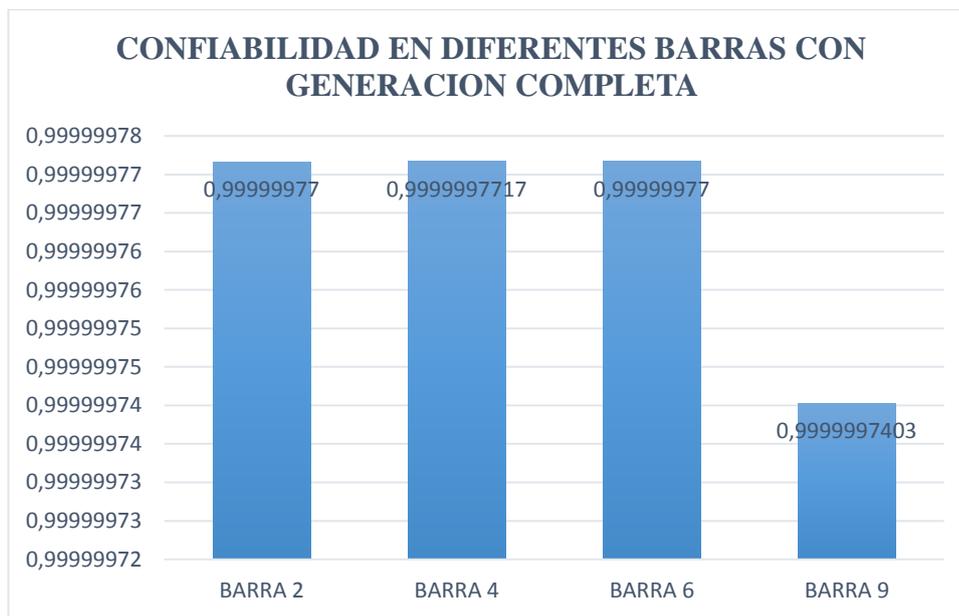


Figura 105. Análisis de la confiabilidad en un diagrama de barras con la combinación de generación en operación, excepto la fotovoltaica y la síncrona.

Tabla 8. Cuadro de resumen de confiabilidad del segundo método.

Cuadro de resumen de confiabilidad				
Combinación	Barra 2	Barra 4	Barra 6	Barra 9
Generación completa	0,999999772	0,999999745	0,999999809	0,999999771
Equivalente de red + Generador Eólico + Generador Fotovoltaico	0,999999771	0,999999717	0,999999676	0,999999772
Equivalente de red + Generador Fotovoltaico	0,999999772	0,999999772	0,999999676	0,999999772
Equivalente de red	0,998674027	0,998187078	0,998674027	0,999999772
Generador Síncrono + Generador Fotovoltaico+ Equivalente de red	0,999999771	0,999999676	0,999999904	0,999999772
Generador Síncrono + Equivalente de red	0,999999772	0,999999772	0,999999772	0,999999772
Generador Síncrono	0,99432418	0,993013431	0,994227219	0,993013431
Generador Eólico + Generador Síncrono + Equivalente de red	0,999999771	0,999999772	0,999999772	0,999999772
Generador Eólico + Equivalente de red	0,999999772	0,999999772	0,999999772	0,999999772
Generador Eólico	0,993291102	0,993422297	0,993291102	0,99167805
Generador Fotovoltaico	0,98086267	0,98086267	0,982569046	0,98086267

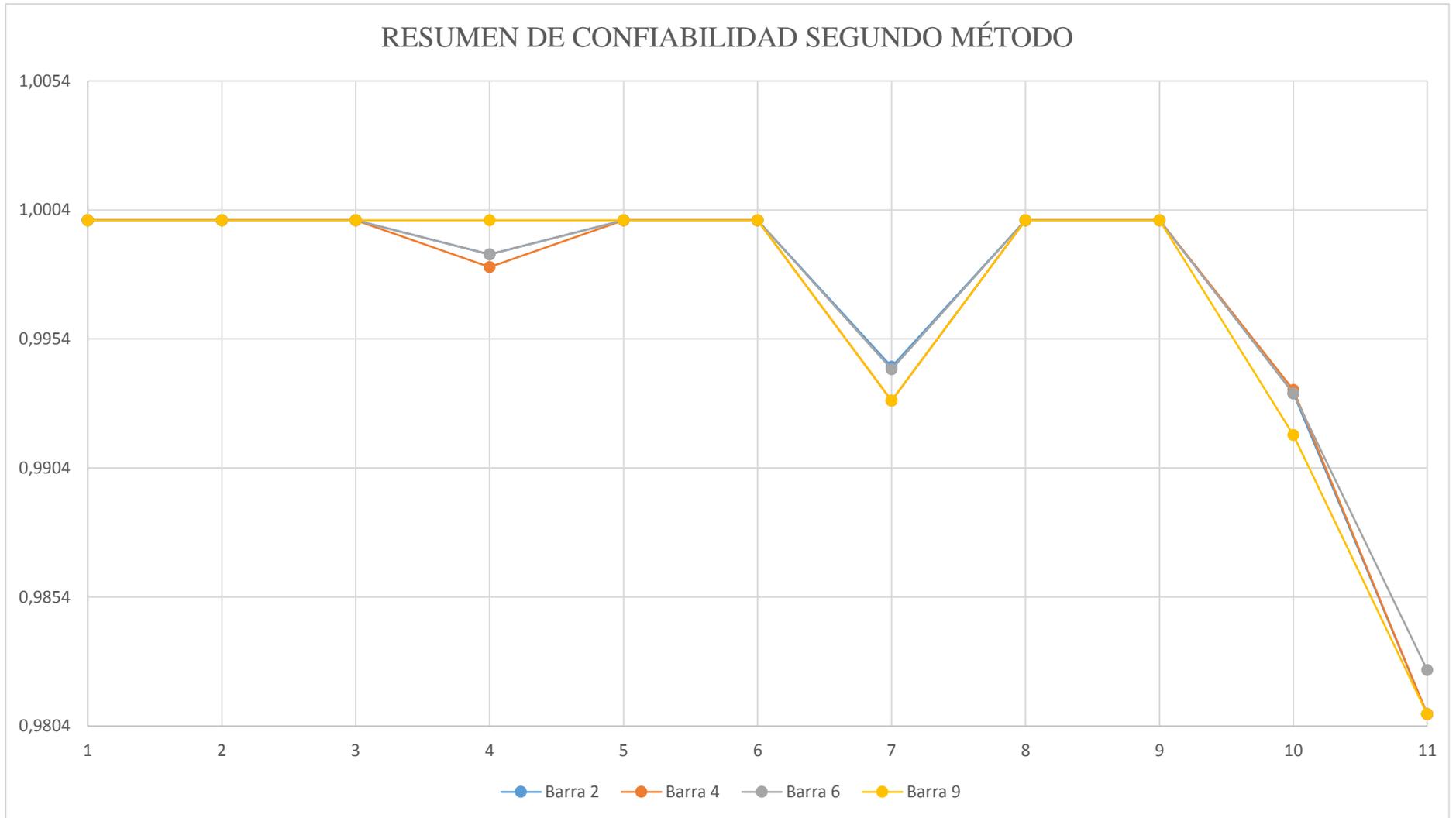


Figura 106 : Confiabilidad en cada escenario de operación

Descripción de la Figura 106

- 1 Escenario 1: Generación completa
- 2 Escenario 2: Equivalente de red + Generador Eólico + Generador Fotovoltaico
- 3 Escenario 3: Equivalente de red + Generador Fotovoltaico
- 4 Escenario 4: Equivalente de red
- 5 Escenario 5: Generador Síncrono + Generador Fotovoltaico+ Equivalente de red
- 6 Escenario 6: Generador Síncrono + Equivalente de red
- 7 Escenario 7: Generador Síncrono
- 8 Escenario 8: Generador Eólico + Generador Síncrono + Equivalente de red
- 9 Escenario 9: Generador Eólico + Equivalente de red
- 10 Escenario 10: Generador Eólico
- 11 Escenario 11: Generador Fotovoltaico

Se puede determinar que en cada barra de generación la confiabilidad son elevadas excepto de los escenarios 10 y 11 los cuales son realizadas en función a los generadores fotovoltaico y eólico.

Una de las confiabilidades bajas también se registra cuando aporta al sistema el generador síncrono, dentro de este método se puede considerar que la barra más confiable es la 6 ya que esta presenta variaciones menores con respecto a las demás.

Anexo 6: Reporte de confiabilidad del sistema con y sin carga obtenidas del simulador

Bus Input Data

Bus			λ_A	MTTR	Switch Time	Replacement	
ID	kV	Sub-sys	f / yr	hour	hour	Avail. Yes/No	Time hour
Bus1	6.300		0.0010	2.00	2.00	No	10.00
Bus2	69.000		0.0010	2.00	2.00	No	10.00
Bus3	0.600		0.0010	2.00	2.00	No	10.00
Bus4	69.000		0.0010	2.00	2.00	No	10.00
Bus5	0.220		0.0010	2.00	2.00	No	10.00
Bus6	69.000		0.0010	2.00	2.00	No	10.00
Bus9	69.000		0.0010	2.00	2.00	No	10.00

Figura 131. Datos de entrada de las barras.

Branch Input Data

Cable/Line		λ_A	λ_P	MTTR	Switch Time	Replacement		Unit Length	Length	Unit
ID	Type	f / yr	f / yr	hour	hour	Avail. Yes/No	Time hour	for λ_A & λ_P		
Line1	Line	0.0060	0.2400	8.00	10.00	No	8.00	km	1.00	km
Line1-5	Line	0.0060	0.2400	8.00	10.00	No	8.00	km	1.00	km
Line20	Line	0.0060	0.2400	8.00	10.00	No	8.00	km	1.00	km
Line12	Line	0.0060	0.2400	8.00	10.00	No	8.00	km	1.00	km

Transformer		λ_A	λ_P	MTTR	Switch Time	Replacement	
ID	Type	f / yr	f / yr	hour	hour	Avail. Yes/No	Time hour
T1	2W XFMR	0.1500	0.0000	200.00	200.00	No	10.00
T2	2W XFMR	0.1500	0.0000	200.00	200.00	No	10.00
T3	2W XFMR	0.1500	0.0000	200.00	200.00	No	10.00

Figura 132. Datos de entrada de la línea y el transformador.

Source Input Data

ID	Source		λ_A f / yr	MTTR hour	Switch Time hour	Replacement	
	Type	Connected Bus ID				Avail. Yes/No	Time hour
Gen1	Syn. Gen	Bus1	1.0000	20.00	1.00	Yes	10.00
U2	Syn. Gen	Bus9	0.0000	0.00	2.00	No	10.00
WTG1	Syn. Gen	Bus3	5.5000	20.00	10.00	Yes	200.00
Inv2	Inverter	Bus5	12.5400	10.00	2.00	No	10.00

Figura 133. Datos de entrada de las fuentes de generación.

Load Point Output Report

ID	Bus		Average Interruptin Rate f / yr	Average Outage Duration hour	Annual Outage Duration hr / yr	EENS MW hr / yr	ECOST \$ / yr	IEAR \$ / kW hr
	Load Sector	Connected Bus ID						
Bus1	N/A		19.5210	17.19	335.6060	0.0000	0.00	0.000
Bus2	N/A		19.5210	17.19	335.6060	0.0000	0.00	0.000
Bus3	N/A		19.5210	17.19	335.6060	0.0000	0.00	0.000
Bus4	N/A		19.5210	17.19	335.6060	0.0000	0.00	0.000
Bus5	N/A		19.5210	17.19	335.6060	0.0000	0.00	0.000
Bus6	N/A		19.5210	17.19	335.6060	0.0000	0.00	0.000
Bus9	N/A		19.5210	17.19	335.6060	0.0000	0.00	0.000
Gen1	None	Bus1	19.5210	17.19	335.6060	0.0000	0.00	0.000
U2	None	Bus9	19.5210	17.19	335.6060	0.0000	0.00	0.000
WTG1	None	Bus3	19.5210	17.19	335.6060	0.0000	0.00	0.000
Inv2	None	Bus5	19.5210	17.19	335.6060	0.0000	0.00	0.000

Figura 134. Datos de reporte confiabilidad en las barras sin carga.

Load Point Output Report

Bus			Average Interruptin Rate	Average Outage Duration	Annual Outage Duration	EENS	ECOST	IEAR
ID	Load Sector	Connected Bus ID	f / yr	hour	hr / yr	MW hr / yr	\$ / yr	\$ / kW hr
Bus1	N/A		20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000
Bus2	N/A		20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000
Bus3	N/A		20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000
Bus4	N/A		20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000
Bus5	N/A		20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000
Bus6	N/A		20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000
Bus9	N/A		20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000
Load1	None	Bus2	20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000
Load2	None	Bus6	20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000
Load18	None	Bus4	20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000
Load20	None	Bus9	20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000
Gen1	None	Bus1	20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000
U2	None	Bus9	20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000
WTG1	None	Bus3	20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000
Inv2	None	Bus5	20.3210	18.48	375.6060	0.0000	0.00	0.000

Figura 135. Datos de reporte de confiabilidad en las barras con carga.