ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE UNA CENTRAL FOTOVOLTAICA A PARTIR DE INFORMACIÓN HISTÓRICA DE OPERACIÓN DE SUS COMPONENTES

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

SALAZAR FIERRO EDGAR PATRICIO

patricio_sf@hotmail.com

DIRECTOR: DR. ING. GABRIEL BENJAMÍN SALAZAR YÉPEZ

gsalazaryepez@gmail.com

Quito, junio 2019

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Edgar Patricio Salazar Fierro, bajo mi supervisión.

Dr. Ing. Gabriel Salazar Y.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo Edgar Patricio Salazar Fierro, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Edgar Patricio Salazar Fierro

DEDICATORIA

A mis padres por creer siempre en mí, por el apoyo, formación y motivación que me han dado la convicción para salir adelante y plantearme nuevas metas.

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por la vida, las circunstancias que me rodean, la oportunidad de convertirme en un profesional y aportar a la sociedad.

A mis padres Alba y Edgar quienes siempre me han apoyado, brindándome una educación con valores y son ejemplo de amor y entrega.

A mi hermana Solmayra por su cariño, los bellos recuerdos de nuestra niñez y su alegría.

A mi amada Verónica por su motivación, fortaleza y paciencia para caminar juntos por la vida recordándome que el esfuerzo lleva a grandes éxitos.

A todos mis familiares y amigos que han estado presentes en los momentos difíciles, para compartir alegrías y regalarme buenos consejos.

A Gransolar S.A. y su talento humano que me han brindado las facilidades para la realización del presente trabajo.

A la Escuela politécnica nacional y sus profesores por haberme dado la oportunidad de recibir valiosos conocimientos, en especial al Dr. Gabriel Salazar quien me ha guiado en este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen ..... **IX**

1. Introducción **1**

1.1. Objetivos 1

1.2. Alcance 2

1.3. Marco Teórico 2

1.3.1 Antecedentes 2

1.4. Central fotovoltaica Gransolar S.A. 5

1.4.1 Paneles fotovoltaicos 9

1.4.2 Equipo de conexión de paneles 10

1.4.3 Inversor 13

1.4.4 Transformador 17

1.4.5 Conexión en medio voltaje y protecciones 19

1.4.6 Sistema de cableado general 19

1.5. Confiabilidad 20

1.5.1 Costo de la Confiabilidad 27

1.6. Estudio de la confiabilidad 27

1.6.1 Método determinístico 27

1.6.2 Método de bloques de frecuencia y duración 28

1.6.3 Métodos estocásticos 29

1.7. Distribución de probabilidad 30

1.7.1 Variables aleatorias 30

1.7.1.1 Variables aleatorias discretas 30

1.7.1.2 Variables aleatorias continuas 30

1.7.2 Distribución de probabilidad para variables aleatorias discretas 31

1.7.2.1 Distribución binomial 31

1.7.2.2 Distribución de Poisson 32

1.7.2.3 Distribución de probabilidad para variables aleatorias continuas 32

1.7.2.4 Distribución normal 33

1.7.2.5 Distribución exponencial 34
1.7.3 Modelo de confiabilidad de los componentes 35
1.8. Confiabilidad en Plantas Fotovoltaicas 37
2. Metodología 37
2.1. El método de Montecarlo y análisis de sensibilidad 37
2.2. Herramientas de almacenamiento y procesamiento de datos. 39
2.2.1 Descripción del software @Risk 39
2.2.1.1 Información de utilización y técnica 40
2.2.2 Índices 43
2.2.2.1 Número de fallas/período 43
2.2.2.2 Número de Incidencias / Período 43
2.2.2.3 Tiempo Total Falla (h) 43
2.2.2.4 Disponibilidad del Equipo 43
2.2.2.5 Frecuencia de Interrupciones (FI) 43
2.2.2.6 DI Duración de Interrupciones Promedio (h) 45
2.2.2.7 MTTF Tiempo Medio hasta la Falla (h) 45
2.2.2.8 Tasa de falla (λ) 45
2.2.2.9 MTTR Tiempo Medio de Reparación (h) 46
2.2.2.10 Tasa de Reparación (μ) 46
2.2.2.11 Disponibilidad de la Planta 46
2.2.2.12 Generación de tiempos de falla con números aleatorios. 47
2.2.2.13 Generación de tiempos de reparación de cada componente 47
2.2.2.14 Trenes de operación 48
2.2.2.15 VENS Planta 49
2.2.3 Modelación 49
2.2.3.1 Los Paneles Solares. 49
2.2.3.2 Los Strings 51
2.2.3.3 Los Inversores. 52
2.2.3.4 Los Transformadores. 52
2.2.3.5 La central fotovoltaica. 53

2.2.3.6 Fechas de operación e Información estadística 53

2.2.3.7 Formulación del Método de Montecarlo. 54

2.2.3.8 Salida de datos..... 57

2.2.3.9 Resultados Energéticos y económicos 58

2.2.3.10 Análisis de Sensibilidad 59

3. Resultados y Discusión 60

3.1. Índices de confiabilidad 60

3.2. Simulaciones 70

3.2.1 Ejemplo del sistema en condiciones normales 71

3.2.2 Análisis de sensibilidad del sistema, reduciendo tasas de falla y reparación 73

3.2.3 Análisis de sensibilidad del sistema, con la salida de componentes importantes 74

3.3. Análisis de frecuencia de fallas e incidencias en la línea de tiempo para planificación de mantenimiento 76

3.3.1 Transformadores e Inversores 76

3.4. Propuesta de plan de mantenimiento 79

4. Conclusiones Y Recomendaciones 83

4.1. Conclusiones 83

4.2. Recomendaciones 84

5. Referencias Bibliográficas 86

6. Anexos 92

RESUMEN

El presente estudio está basado en el análisis de cada uno de los subsistemas y componentes que comprenden la planta fotovoltaica de Gran Solar S.A. ubicada en Imbabura, con la finalidad de determinar los índices de confiabilidad obteniendo información histórica de fallas, determinando las tasas, tiempos de fallas y reparaciones de la planta solar y conociendo sus partes constitutivas.

A partir de la recopilación de información histórica se procede a la obtención de los índices de confiabilidad, se ha propuesto presentar un análisis de sensibilidad en relación a la confiabilidad de los elementos constitutivos de la planta, mediante la modelación matemática del sistema de generación de energía de la misma. Utilizando para ello, el método de Montecarlo y como herramienta para generación de dichas simulaciones el software @Risk.

Elaborada la herramienta útil para la proyección y planificación de escenarios de fallas, se procede al análisis de resultados para proponer mejoras a los esquemas de mantenimientos preventivos y correctivos.

PALABRAS CLAVE: confiabilidad, planta fotovoltaica, método de Montecarlo, @Risk

ABSTRACT

The present study is based on the analysis of each one of the subsystems and components, which comprise the photovoltaic plant Gransolar S.A. located in Imbabura, with the purpose of determining the reliability indexes obtaining historical fault information, determining rates, times of failures and repairs of the solar plant and knowing its constituent parts.

From the collection of historical information proceeds to obtain the reliability indices, it has been proposed to present a sensitivity analysis in relation to the reliability of constituent elements of the plant, through the mathematical modeling of the power generation system of the same. Using the Montecarlo method and the @Risk software as a tool for generating such simulations.

Elaborated the useful tool for the projection and planning of failure scenarios, proceeds to the analysis of results to propose improvements to the preventive and corrective maintenance schemes.

KEYWORDS: reliability, photovoltaic plant, Montecarlo method, @Risk

1. INTRODUCCIÓN

En el primer capítulo se establece la problemática del presente estudio, sus objetivos y el alcance, se presenta la recopilación de la información teórica y del proceso de información histórica de fallas de la Central Gransolar S.A. ubicada en Salinas, Imbabura con la finalidad de poder determinar las tasas y tiempos de fallas y reparaciones del sistema y sus partes constitutivas.

En el segundo capítulo se explican los métodos utilizados para determinar los índices de confiabilidad y, el modelo matemático desarrollado para representar el sistema de generación de energía en estudio. A partir de la aplicación del método Montecarlo para realizar diferentes simulaciones y obtener variedad de posibles escenarios con la modelación. Para la planificación y toma de decisiones en el área de mantenimiento predictivo y preventivo.

Se presentan los índices de confiabilidad de la planta fotovoltaica, a partir de la información histórica de tres años, los resultados del uso de la herramienta informática de simulaciones @Risk, para la aplicación del análisis de sensibilidad por medio del método de Montecarlo.

En el tercer capítulo se hace uso de los resultados obtenidos de la modelación, analizando los hallazgos de interés de dichos índices y simulaciones, presentado al lector significativos escenarios a considerar como casos de estudio para proyectarse sobre el desempeño de la planta a futuro.

En el cuarto y último capítulo se han elaborado una serie de conclusiones que se desprenden de los resultados obtenidos y de la información recabada de la planta solar; a partir de éstas se ofrecen recomendaciones que se han considerado pertinentes con el fin de aportar mejoras al complejo de generación de energía fotovoltaica en estudio.

1.1. Objetivos

El objetivo general de este Proyecto Integrador es: Proponer una metodología que permita obtener los índices de confiabilidad y realizar análisis de sensibilidad de los componentes de una central fotovoltaica para mejorar la disponibilidad de la misma.

Los objetivos específicos de este Proyecto Integrador son:

- Conocer los componentes y principios de funcionamiento de la generación fotovoltaica.
- Obtener y procesar la información histórica de fallas para determinar las tasas y tiempos de fallas y reparaciones de la planta solar y sus partes constitutivas.
- Establecer una metodología para calcular los índices de confiabilidad de la planta y sus componentes.
- Presentar un análisis de sensibilidad en relación a la confiabilidad de cada elemento constitutivo de la planta.
- Proponer mejoras a los esquemas de mantenimientos preventivos y correctivos.

1.2. Alcance

Se determinarán índices de confiabilidad para los diferentes componentes de una central fotovoltaica y se determinará la confiabilidad de la central completa.

Estos índices se calcularán metodológicamente utilizando información histórica de más de tres años de trabajo, desarrollado por esta Central dedicada a la generación fotovoltaica.

El cálculo se hará para las dos etapas de la central de generación, la primera es Tren Salinas de 1 MW y la segunda es Salinas de 2 MW, ubicadas en la provincia de Imbabura. Luego del análisis de los resultados obtenidos, se realizará un análisis de sensibilidad por el método de simulaciones de Montecarlo.

Finalmente, se propondrán mejoras a los esquemas de mantenimiento preventivo y correctivo de ambas centrales.

1.3. Marco Teórico

1.3.1 Antecedentes

En la agenda energética global las prioridades se inclinan con más fuerza a impulsar dentro del sector, la disminución sostenida de las emisiones de carbono. La utilización de energías renovables y eficientes a través de la aplicación de tecnologías disruptivas está siendo la tendencia a nivel estratégico de quienes lideran las principales economías mundiales y otras economías en vías de desarrollo. [1]

En la realización de estudios recientes sobre el uso de energía renovable, se obtuvo que su utilización es cada vez mayor por las diferentes organizaciones que encabezan el mercado, pudiéndose obtener que para el 2015 más de 95 países se han sumado a su utilización, a través de 1200 diferentes organizaciones que producen y comercializan recursos energéticos. Destaca el incremento de la capacidad instalada para el uso de energía solar que llegó a estar en 227 GW para finales de 2015, sólo en este año se alcanzó 48,1 GW [1] [2]. Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE) para el 2016 la capacidad instalada de energía fotovoltaica alcanzó 74 GW, creciendo en un 50% con respecto al año anterior [3]. Para el 2017 se alcanzó 178 GW lo que implica que superó al 2016 por más del doble [4]. Estas cifras evidencian el compromiso de muchas naciones, con el cambio a energías limpias y la tendencia imparable al avance continuo de las tecnologías para la producción de las mismas.

En el Ecuador, el proceso de desarrollo de energías renovables no convencionales ha sido estudiado desde hace más de una década a nivel de planificación del Estado, abriendo la oportunidad de impulsar esta área mediante la Ley de Régimen del Sector Eléctrico (1996, 2006). En el 2011, a partir de las regulación N° 002/11 expedida por la ARCONEL [5], el sector eléctrico invita a la participación de inversión privada en la generación de energía eléctrica no convencional. A partir de esta convocatoria, se estimuló la realización de proyectos de generación de energía eléctrica a través de métodos no convencionales, presentándose ofertas de 140 proyectos para generación de energía alternativa en el año 2012, que fueron recibidos por el CONELEC y muchos de ellos aprobados para su desarrollo futuro.

De dicha convocatoria se aprobaron 15 propuestas para el área fotovoltaica en diferentes partes el país (Tabla 1.1), que conforman el primer paso hacia el uso de este tipo de tecnologías en el Ecuador. Por lo que el país ha dado importantes pasos en la reestructuración de la matriz productiva, las nuevas tecnologías en la producción de energía y su aplicación en beneficios ambientales.

Tabla 1.1. Proyectos de energía fotovoltaica suscritos a CONELEC – 2012.

PROVINCIA	COMPAÑÍA	PROYECTO	CAPACIDAD (MW)
Esmeralda	AENERDOR S.A.	Lagarto	20
Guayas	GUITARSA S.A.	Vaiana	20
Imbabura	ECUADOR ENERGÉTICO S.A.	Imbabura - Pimán	25
	RACALSER S.A.	Chota – Pimán	8
	SUPERGALEÓN S.A.	San Alfonso	6
	GRANSOLAR S.A.	Salinas	2
Loja	GALÁPAGOS POWER S.A.	Zapotillo	16
Manabí	ENERGÍA SOLAR S.A.	Manabí	30
	ENERGÍAS MANABITAS S.A.	Montecristi	12
Pichincha	SUN ENERGY ECUADOR S.A	Rancho Cayambe	8
	ENERCAY S.A.	Centro del Mundo	10
	CONDORSOLAR S.A.	Condorsolar	30
	SOLARCONNECTION S.A.	Solarconnection	20
	DESARROLLOS FOTOVOLTAICOS DEL ECUADOR S.A.	Shyri I	50
Santa Elena	ECUADOR ENERGÉTICO S.A.	Santa Elena I	25
Total (MW)			**282**

Fuente: Consejo Nacional de Electricidad [6]
Elaboración propia.

Para el 2013, la primera central en empezar sus operaciones fue la Central Paragachi, con una potencia de 1MW. En el 2014 entró en operaciones la Central de 3,6 megavatios de la empresa Smart Green Holding en Imbabura. Posteriormente, las instaladas por la compañía italiana Thesan con una potencia en conjunto de 7 MW ubicadas en El Oro y Loja y para el 2016, se sumó la central Baltra Solar ubicada en Galápagos con una potencia de 0,07 MW. [7]

Según estadísticas del ARCONEL, para el cierre del año 2016 el aporte de las centrales fotovoltaicas previsto era de 25,59 MW. La capacidad de generación se resume en la Tabla 1.2 a continuación:

Tabla 1.2. Potencia nominal y efectiva por tipo de fuente de generación – 2016.

Tipo de Fuente	Sunny Central 500CP XT	Tipo de Unidad	Potencia Nominal (MW)	Potencia Efectiva (MW)
Renovable	Hidráulica	Hidraulica	4.446,36	4.418,18
	Térmica Biomasa	Turbovapor	144,30	136,40
	Fotovoltaica	Fotovoltaica	26,48	25,59
	Eólica	Eólica	21,15	21,15
	Térmica Biogas	MCI	2,00	1,76
Total Renovable			4.640,29	4.603,08
No Renovable	Térmica	MCI	2.005,43	1.611,63
		Turbogás	1.118,85	969,43
		Turbovapor	461,87	422,74
Total no Renovable			3586,15	3003,8
Total			8.226,44	7.606,88

Fuente: Consejo Nacional de Electricidad [7]
Elaboración propia.

1.4. Central fotovoltaica Gransolar S.A.

Gransolar S.A. es la central fotovoltaica que figura con una potencia nominal de 3 MW, aunque la capacidad instalada es 3,6MW. Estas instalaciones están asentadas a 5 kilómetros de la vía Salinas Urcuquí, en la provincia de Imbabura. Con una ubicación estratégica, dado que la irradiación promedio en la zona de influencia del proyecto es de 5,1 kWh/m^2/día. [8]

En el primer semestre del 2014, Smart Green Holding, empresa encargada de implementar el complejo, culminó la construcción del proyecto (Figura 1.1). La energía originada se entrega a la subestación de Alpachaca, operada por EMELNORTE S.A. [8]

Figura 1.1 Patios de plantas fotovoltaicas Gransolar, Imbabura. [9]

Como se aprecia en el Tabla 1.3, la planta tiene una producción energética que supera los cinco millones de kilovatios-hora al año, lo que supone una reducción de 3,724 toneladas métricas de dióxido de carbono. [8]

Tabla 1.3. Ficha técnica de la Central Fotovoltaica ubicada en Salinas.

Central Gransolar S.A.	
Proyecto	Parque Fotovoltaico Gransolar
Ubicación	Salinas de Imbabura, Ecuador
Tamaño Total	3,6 MW
3.6 MW	3,6 MW
Modelo de paneles	Serie YGE 60 Cell
Cantidad de paneles	14.400 paneles
Instalador	Gransolar S.A.
Gransolar S.A.	Gransolar S.A.
Propietario	Grupo accionista compuesto
Conexión	Julio 2014
Especificaciones Técnicas	
Potencia nominal	3,6 MW
Producción anual de energía	5.400.000 kWh
Reducción aprox. De CO2	3.724 toneladas métricas

Fuente: Yingli Solar [9]
Elaboración propia.

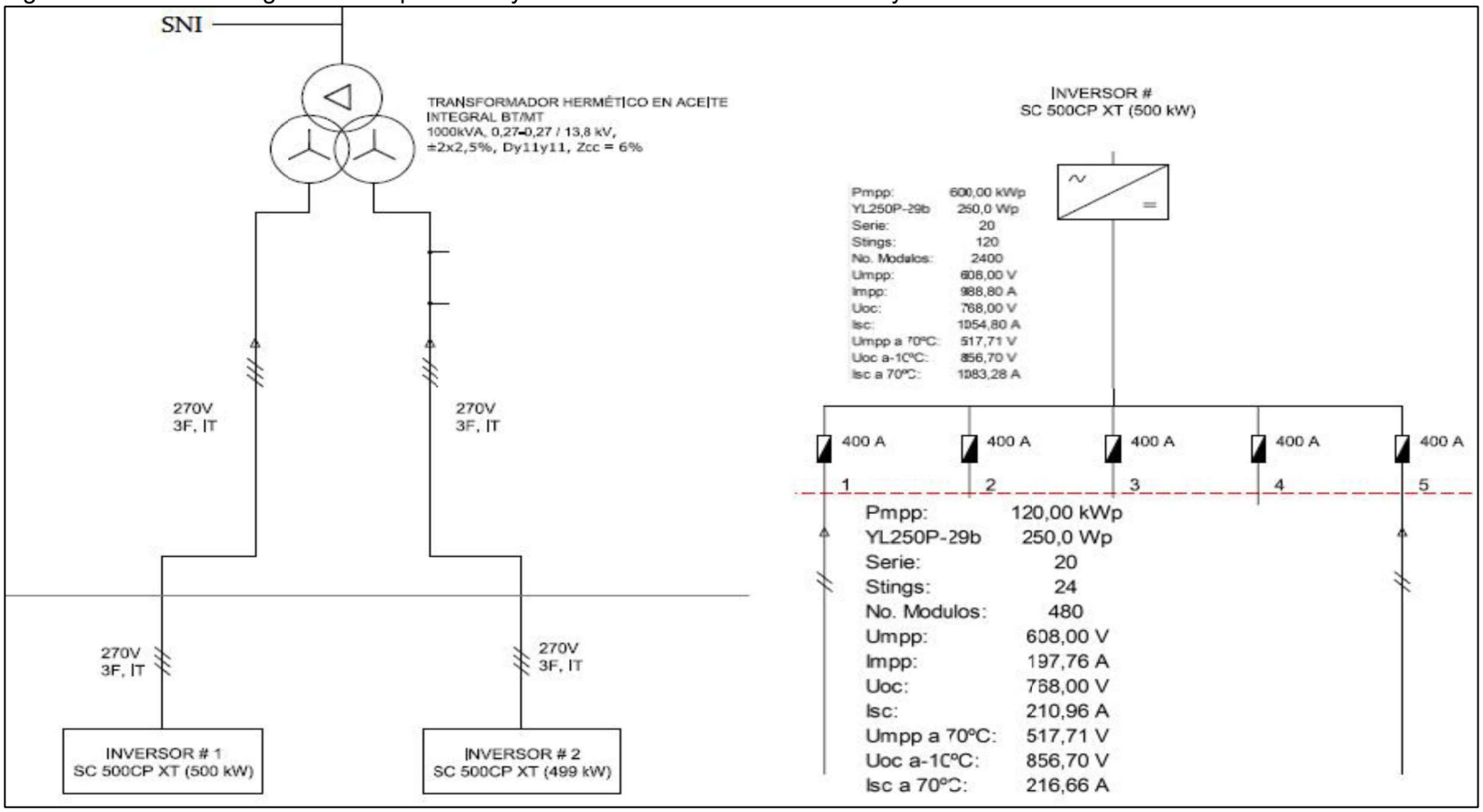
La extensión del parque fotovoltaico es de 4,12 hectáreas, que corresponden a la etapa Salinas y 2,22 hectáreas que pertenecen a la etapa Tren Salinas. Su propósito ha sido el incrementar la oferta de energía no convencional en los cantones para los cantones cercanos [8].

En referencia a la concesión y detalles contractuales establecidos entre Gransolar S.A. y el Estado, éstos se rigen por la Regulación de CONELEC 004/11 de fecha 14 de abril de 2011; que estipula las condiciones especiales para establecer las tarifas, permisos, tiempos de concesión y otros puntos que se desprenden de los acuerdos contractuales con el Consejo Nacional de Electricidad como ente regulador. Dentro de los acuerdos llevados a cabo, está el aporte total de la energía generada a la subestación Alpachaca, con una tarifa de preferencia establecida en la Regulación de CONELEC 004/11 de fecha 14 de abril de 2011 de 0,40 USD/kWh. [10] [11]

Un gran porcentaje del éxito radica en las condiciones favorables debido a la buena elección de la zona geográfica o espacio a ocupar y sus condiciones ambientales.

La conexión lógica entre los diferentes componentes de la central de generación Gransolar se presenta en el diagrama de la Figura 1.2.

Figura 1.2. Conexión lógica de componentes y sistemas de las Plantas Salinas y Tren Salinas



Fuente: Gran Solar [8]
Elaboración propia.

Para comprender el funcionamiento de las plantas de generación fotovoltaicas se presentan sus componentes fundamentales.

1.4.1 Paneles fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos consisten en una agrupación de células solares que tienen dos capas semiconductoras, tipo N-P, por medio éstas se convierte la energía solar en eléctrica. La función de las células solares en el panel fotovoltaico es cambiar la energía que los fotones tienen (radiación solar), en energía eléctrica mediante una reacción química [13]. Dicho proceso se puede apreciar en la Figura 1.3.

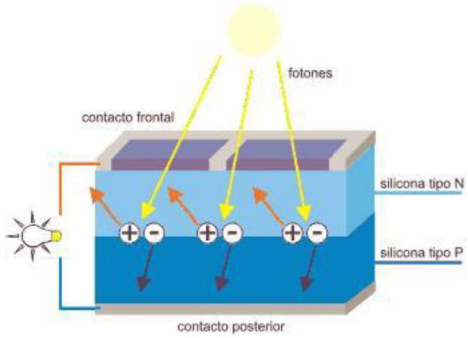


Figura 1.3. Generación de electricidad a partir de células solares o fotovoltaicas. [13]

Como se puede apreciar en la Figura 1.4, en una central fotovoltaica es necesaria la ubicación de patios para la instalación de las células solares, éstas son agrupadas por paneles y éstos, a su vez, se agrupan en cadenas. De ésta forma, a mayor tamaño de las cadenas, mayor será la cantidad de energía solar que se convertirá en eléctrica.

Las conexiones en serie de paneles permiten incrementar los valores de voltaje en los terminales, mientras que las conexiones en paralelo sirven para obtener intensidades de corriente mayores. Estos parámetros son considerados en el diseño para obtener las características eléctricas deseadas.

Figura 1.4. Colocación de las células solares por paneles. [13]

Los paneles instalados en los patios de Salinas y Tren Salinas son de la marca *Yingli Solar*, modelo “YGE 60 cell 40mm SERIES”.

1.4.2 Equipo de conexión de paneles

En el montaje de patios o parques fotovoltaicos se emplean grandes cantidades de paneles organizados por ramales en serie y paralelo. De la misma forma es necesario la instalación de equipos que permitan la protección y gestión de los paneles que faciliten las tareas de operación y recambio.

Los equipos de monitoreo permiten conocer de manera adecuada la corriente que circula por cada ramal y de esta forma, detectar de manera bastante exacta las averías, para la pronta detección de ramales defectuosos (Figura 1.5).

Figura 1.5. Equipo de conexión, maniobra y protección de paneles fotovoltaicos (String). [15]

Este equipo también se le conoce con el nombre de string box y permite maniobrabilidad y eficiencia en las actividades de control y mantenimiento. En la Figura 1.6, se pueden apreciar los diferentes componentes del equipo de conexión, maniobra y protección de paneles fotovoltaicos. Es necesario que contenga dispositivos de comunicaciones, con la finalidad de realizar el monitoreo del funcionamiento; tanto de dicho equipamiento, como el de los paneles.

Figura 1.6. Componentes que comprenden el equipo de conexión de strings.

Estructura Armario	Cajón que contiene y protege a los equipos internos. La estructura armario, además, cumple la función de soporte de los equipos internos por lo cual deberá ser instalada en la estructura de fijación destinada para soportarla.	
Interruptor de DC	Éste equipo cumple con la función de interruptor, conectando o desconectando las ramas paralelo de paneles bajo carga, debe ser capaz de seccionar la corriente del conjunto de paneles que controla. También debe soportar el arco eléctrico producido por la operación del mismo, razón por la cual se debe esperar por lo menos un segundo para asegurar su operación.	
Fusibles	Los fusibles son los que protegen a los ramales de paneles de la circulación de corrientes en sentido inverso. Son de acción instantánea y no pueden conectar o desconectar ramales de paneles bajo carga. Se ubican dentro de portafusibles, lo que implica la necesidad de desarrollar un adecuado sistema para monitorear el estado de éstos.	
Descargador de sobrevoltajes	Es necesario un equipo de protección contra sobrevoltajes transitorios conectado a tierra, con la finalidad de evitar estos cambios afecten el inversor. La función es de proteger al inversor y no al equipo de maniobra o a los paneles.	
Sistema de monitoreo	Se debe contar con una tarjeta de comunicaciones para monitorear parámetros como corriente instantánea o media de los ramales paralelo de paneles. También permite activar leds indicadores ante: • Operación del descargador de sobrevoltajes. • Error en el sistema de comunicaciones para monitoreo. • Error interno del equipo. • Robo del equipo.	
Puesta a tierra	Se deberá contar con una puesta a tierra en el dispositivo o cercana que permita la correcta operación del descargador de sobrevoltajes.	

Fuente: Novoa, Edison [15]
Elaboración propia.

1.4.3 Inversor

El inversor está considerado como el elemento de mayor valor dentro de una instalación fotovoltaica. Es un aparato electrónico que cambia un voltaje determinado de entrada de Corriente Continua, en un voltaje de salida de Corriente Alterna, es el equipo más costoso de un parque fotovoltaico debido a la complejidad y la electrónica de potencia incorporada [16]. En la Figura 1.7 se puede apreciar las instalaciones que contienen a los inversores.

Figura 1.7. Instalación de inversores y transformador de subsistema en Central Gransolar S.A. [17]

La función principal de éstos es garantizar la operación perpetua del sistema durante su tiempo de vida útil. En la Figura 1.8 se puede apreciar cómo están ordenados los subsistemas que están en el inversor y las funciones de cada uno.

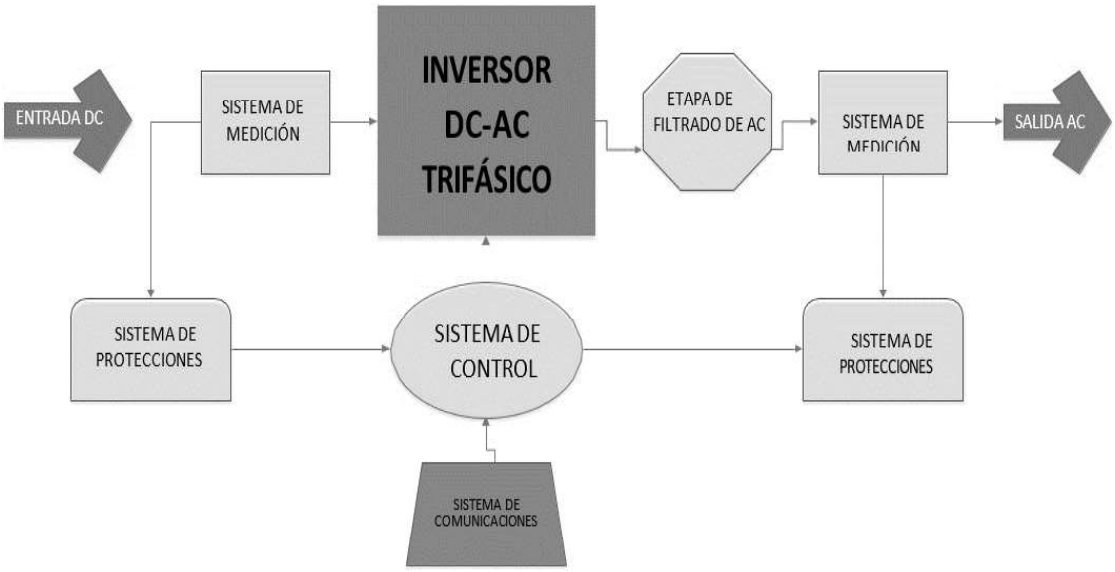


Figura 1.8. Esquema de lo equipos internos en un inversor. [15]

Funcionamiento

El inversor DC – AC trifásico está diseñado para conectarse a la red en medio voltaje, mediante un transformador. Su función será entregar a la red el máximo de potencia que se pueda alcanzar, partiendo de la energía generada por los paneles fotovoltaicos.

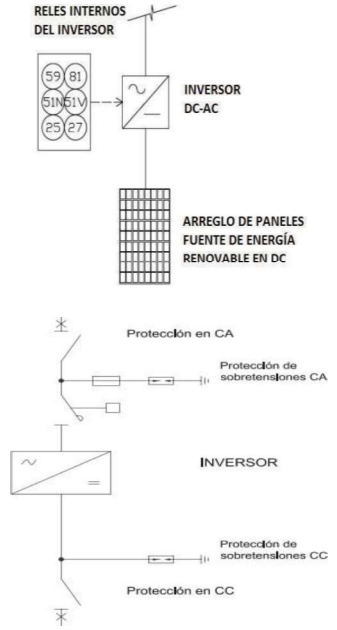
El inversor está sujeto al cumplimiento de los códigos de red y las normativas vigentes en cada país, para el caso de Ecuador se ciñe a requerimientos mínimos, dado que aún está por crearse el marco normativo pertinente, dichos requisitos son inherentes a la capacidad del Inversor [19]:

1. Capacidad de soportar huecos de tensión.
2. Capacidad de operar cuando la variación del voltaje en el punto de conexión sea de ± 10% del voltaje nominal.
3. Capacidad de operar ante variaciones de frecuencia.
4. THD < 3%.

Los componentes más importantes del inversor se describen en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Elementos y sistemas que comprenden el Inversor

Módulo Inversor DC – AC Trifásico	Su trabajo consiste en la transformación de la corriente continua en corriente alterna mediante la electrónica de potencia y sus concernientes controles. [20]
Sistema de Control	En relación al papel del sistema de control es la de desempeñarse como cerebro del inversor. Está constituido por microprocesadores, que se mantienen monitoreando los subsistemas de manera que éstos se mantengan trabajando en conjunto.
Sistema de Medición	La tarea del sistema de medición es la de hacer seguimiento a los parámetros eléctricos y no eléctricos con el propósito de asegurar su operación de manera permanente. A través de este sistema se puede monitorear [18]: • Número de operaciones de los distintos componentes. • Temperatura. • Corriente, voltaje, potencia activa, potencia reactiva, frecuencia en el lado de AC • Corriente, voltaje, potencia recibida de los paneles fotovoltaicos en el lado de DC.
Sistema de Comunicación	Lo conforman los equipos de telecomunicaciones conexos a la red de internet, permitiendo: • La manipulación de forma remota de los diferentes componentes y subsistemas del inversor. • Enviar y recibir información del inversor. • La configuración remota del modo de operación de los componentes del inversor.

Sistema de Protecciones  	Su función es proteger al inversor contra fallas de carácter eléctrico. A través del uso de dispositivos tales como: relés, fusibles, interruptores, disyuntores entre otros. Dispositivos de protección [18]: • Mando de potencia de DC. • Seccionador para los fusibles del lado de DC. • Verificación de la resistencia de aislamiento a tierra en el lado de DC. • Descargador para los sobrevoltajes tanto del lado de DC como de AC. • Mando de potencia de AC. • Seccionador para los fusibles con alto poder de ruptura para el lado de AC. • Relés de protección
Sistema de Filtrado 	Este sistema cumple un papel esencial a la hora de otorgar energía de calidad a la red ya que permite eliminar los armónicos presentes en la señal de AC generada por el inversor.

Elaboración propia.

Los inversores con los que cuenta la central fotovoltaica de Salinas son de marca “SMA Solar Technology, modelo 500CP XT” [21]. A continuación, en la Figura 1.9 se muestra un ejemplo de conexión de strings al inversor y de éste al transformador:

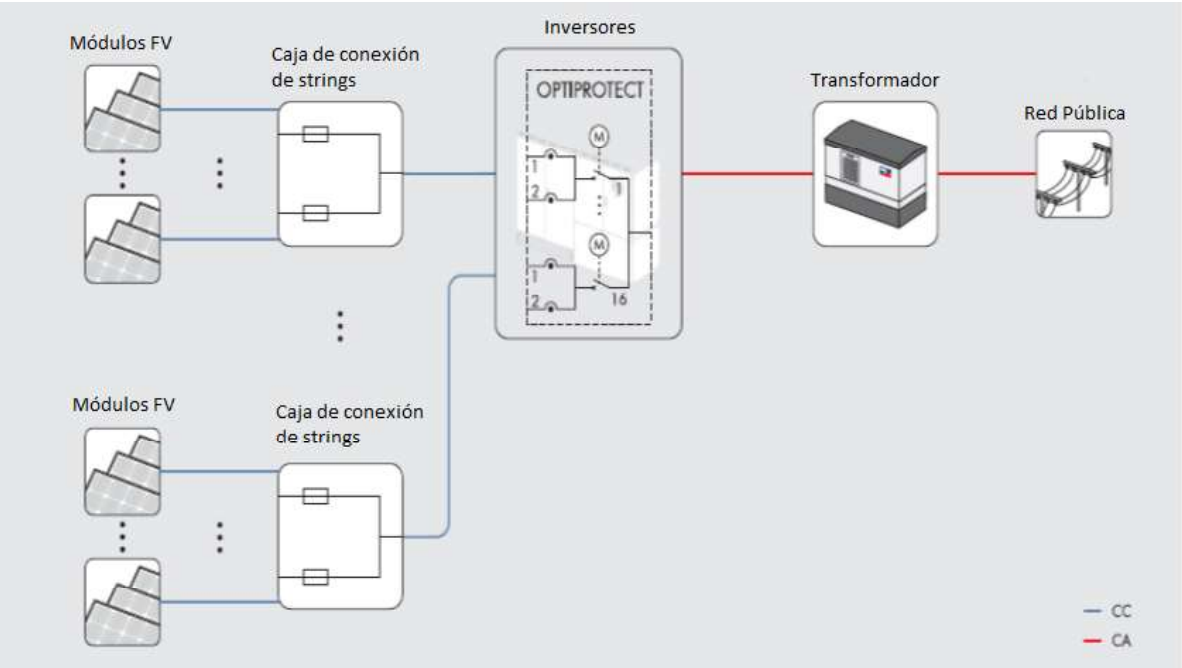


Figura 1.9. Esquema de ejemplo de conexión de las instalaciones del Inversor SMA Solar Technology, modelo 500CP XT. [21]

1.4.4 Transformador

El transformador es otro componente estático, que funciona bajo el principio de inducción electromagnética, siendo su función elevar el voltaje que recibe del inversor al nivel de voltaje en el punto de conexión demandado en la red de distribución. [22]

La capacidad del transformador viene dada según la totalidad de energía que recibe del parque fotovoltaico, para lo cual debe haber compatibilidad absoluta con el diseño del inversor. [22]

El transformador, además de tener la capacidad tanto de aumentar, como de reducir el voltaje según los requerimientos de la red, también se ocupa de brindar el aislamiento galvánico obligatorio en el punto de conexión, que debe haber entre el inversor y la red de distribución [22] la Figura 1.10 muestra un ejemplo de diagrama unifilar de un transformador que conecta dos inversores a la red.

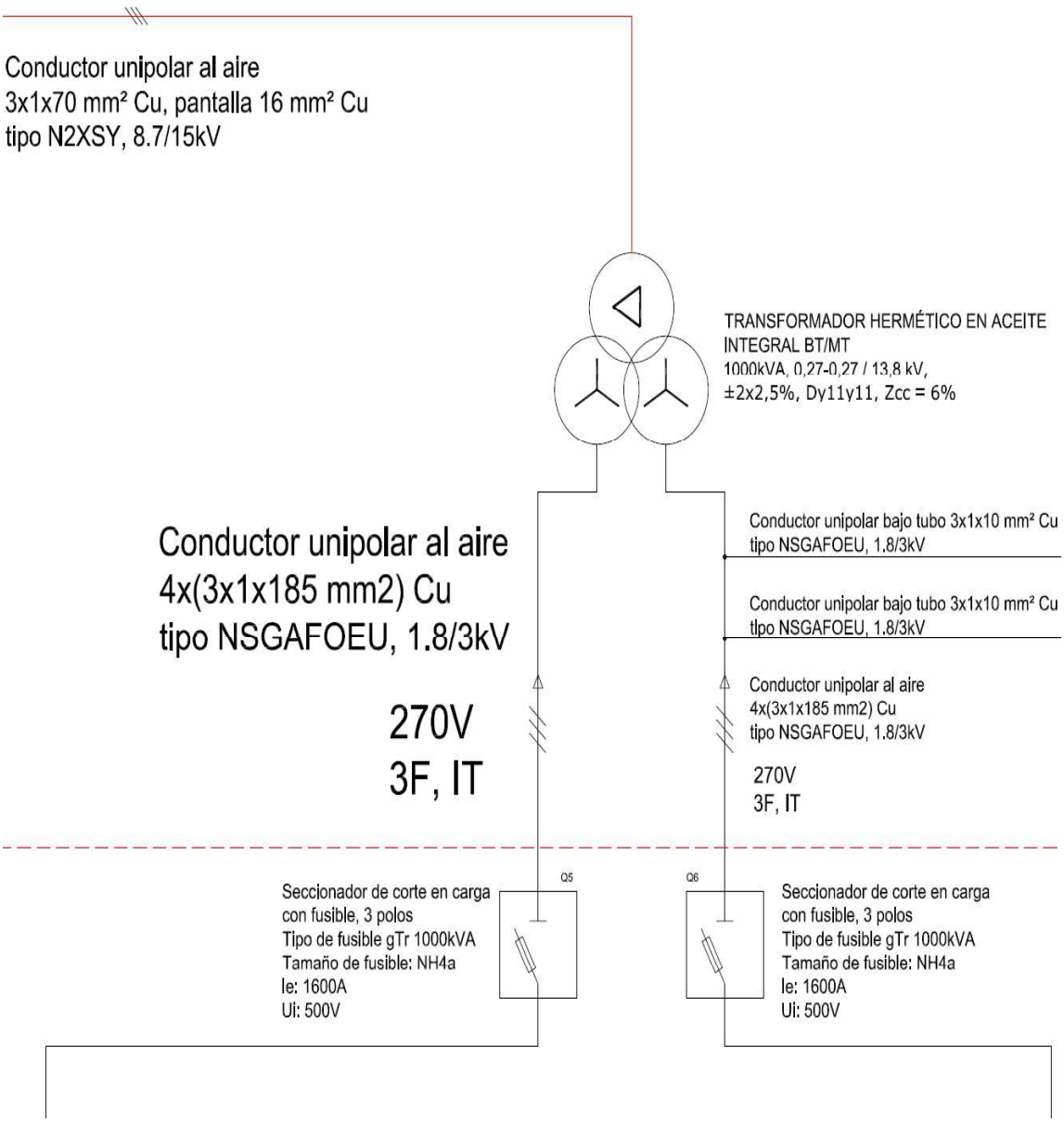


Figura 1.10. Detalle de transformador en instalación de Planta Salinas [17]

Los requerimientos básicos a los que está sometido el transformador devienen de las normativas y de las demandas operativas del inversor en uso, de allí existen diferentes características generales a tomar en cuenta [18]:

- El tipo de aislamiento del transformador puede ser seco o en aceite.
- El diseño del transformador debe tener como base el soporte de cambios de voltaje repentinos de hasta 500 V/uc.

- Otra particularidad del diseño es que permita la sobrecarga hasta por un 10% de su potencia nominal con una temperatura de trabajo de 25 °C.
- El diseño debe dimensionar la posibilidad de operación con carga asimétrica.
- El transformador debe contar con protecciones para: Sobrecorrientes, Sobrepresión del aceite y Sobrevoltajes.
- Sus características y grupo de conexión varían según el inversor instalado.

En la planta fotovoltaica existen tres transformadores, distribuidos en el patio de Salinas dos y en el patio de Tren Salinas una.

1.4.5 Conexión en medio voltaje y protecciones

Para la realización de la conexión en medio voltaje se necesita contar con una estación o celda de medio voltaje aislada en SF6. También puede ser otro medio aislante, que conecte al transformador y a la red de distribución en medio voltaje. [23]

Esta celda tiene que tener los equipos tanto para maniobra, como de protección para la operación en medio voltaje: disyuntor en vacío aislado en estación compacta de SF6, seccionadores de medio voltaje aislados en estación compacta de SF6, seccionadores de puesta a tierra, relé diferencial para la protección del transformador, relé de distancia para proteger la línea de distribución en medio voltaje y relé de sobrecorriente instantánea e inversa, entre otros. [23]

Este equipamiento es altamente sensible en lo que a manipulación se refiere, exigiendo rigurosas normas de manejo, para ello, cuenta con indicadores y accesorios que facilitan la operación de manera adecuada. Es importante destacar, que una mala operación de los equipos puede acarrear consecuencias catastróficas.

1.4.6 Sistema de cableado general

Este sistema comprende el conjunto de conductores eléctricos que conectan los diferentes dispositivos y equipos que se encuentran en la central fotovoltaica. El sistema de cableado general se puede considerar de dos tipos: cableado eléctrico para la transmisión de la energía generada en DC/AC y cableado eléctrico de comunicaciones, el uso de ambos está regulado y normado según las condiciones y necesidades de los sistemas donde se han de utilizar.

1.5. Confiabilidad

En la presente investigación se desea establecer procedimientos y cálculos necesarios, con el fin de determinar una metodología de obtención de índices de confiabilidad y realizar análisis de sensibilidad de los componentes, de una central fotovoltaica para poder mejorar la disponibilidad de la misma.

La siguiente subdivisión de confiabilidad en la Figura 1.11 se refiere a la amplitud del término confiabilidad y sus implicaciones en los diferentes procesos que se desarrollan en un sistema o subsistema:

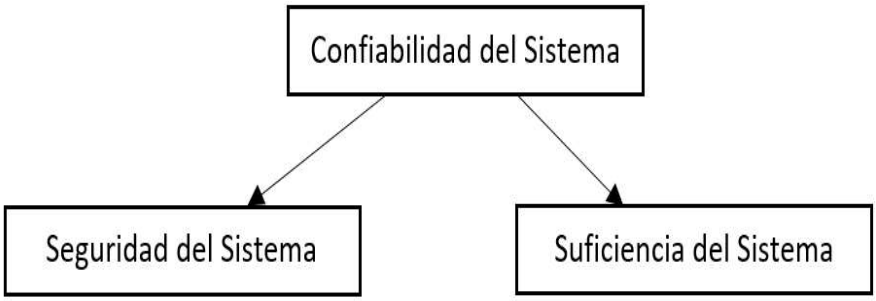


Figura 1.11. Subdivisión de Confiabilidad del Sistema [28]

La seguridad está relacionada a la capacidad del sistema de responder de forma apropiada ante posibles perturbaciones en el sistema. El autor que diseña esta subdivisión explica que “esto incluye las condiciones asociadas con las perturbaciones locales y dispersas, la pérdida de generación y los medios de la transmisión” [28].

Cuando se analizan las actuales técnicas probabilísticas utilizadas para la evaluación de la confiabilidad, se puede afirmar que están basadas en dos parámetros: *suficiencia* y *seguridad* [28].

La suficiencia implica la existencia de medios o herramientas necesarios dentro del sistema para satisfacer demandas de diferente índole. Esto incluye desde reparaciones, mantenimiento, producción, comunicación, etc [28].

Entonces la seguridad está relacionada a perturbaciones y se asocia a la respuesta del sistema, en cambio la suficiencia está ligada a condiciones de la estática que no contempla perturbaciones del sistema [28].

El Instituto de Ingeniería eléctrica y electrónica (IEEE) le define de la siguiente manera:

“Es la probabilidad de que un sistema cumpla adecuadamente su cometido, durante el tiempo deseado, en las condiciones de operación especificadas” [29].

“Es la probabilidad de que un componente o sistema pueda cumplir su función en las condiciones operativas especificadas durante un intervalo de tiempo dado” [30].

Existen otros términos relacionados a la confiabilidad que deben ser definidos con la finalidad de establecer su uso y consideración dentro de la investigación [30].

Causa: Es el evento o situación que ocasionó una interrupción del sistema.

Componente: Se refiere a cualquier parte de un todo, puede referirse a una pieza, un subsistema, equipo, etc.

Componentes no reparables: Son aquellos en los que no existe posibilidad de reparación. Su vida útil culmina después de su primera falla, las fallas de esta índole se conocen como falla catastrófica.

Consumo interno: Representa la energía absorbida por las instalaciones y dependencias de un sistema, organización o empresa.

Desempeño: Es la característica propia del comportamiento de un componente, subsistema o sistema por medio de pruebas de ensayo típicas. También se relaciona al comportamiento en el campo, bajo situaciones no controladas o bien bajo demandas que no necesariamente entran en los estándares preestablecidos.

Disponibilidad (A[1]): “Es la probabilidad de que un componente o sistema pueda cumplir su función en las condiciones operativas especificadas en un instante de tiempo dado”. [30]

Elemento o Parte: Es la última subdivisión de un sistema, es decir, un Ítem que no puede ser descompuesto en partes menores sin ser destruido.

Equipamiento: Es el conjunto unitario, completo y distinto que realiza, una o más funciones determinadas en funcionamiento.

---

[1] La designación de la letra A viene del término anglosajón: *Availability*. El término complemento u opuesto se le conoce como indisponibilidad y está designado por el literal U que proviene del inglés: *Unavailability*.

Estado disponible: Estado en que el componente, equipo o sub-sistema se encuentra conectado al sistema que pertenece operando o en capacidad plena de operar.

Estado indisponible: Cuando el componente o equipo se ha desconectado del sistema por diferentes razones, bien sea por mantenimiento programado o por desconexión forzada (reparación).

Falla y defecto: En relación a la falla se puede definir como la imposibilidad de un componente o sistema de desempeñar una función de manera óptima, éstas serán restauradas en los mantenimientos correctivos. Un defecto es una imperfección en el estado del componente o del sistema que puede derivar en una falla, éstos pueden ser eliminados mediante el mantenimiento preventivo.

Falla catastrófica: Es aquella que, una vez que ocurre en el sistema no tiene posibilidad de reparación.

Falla humana: Son aquellas ocasionadas por las personas involucradas en la operación debido a omisiones o mala práctica.

Frecuencia: Eventos producidos durante un tiempo determinado (por ejemplo, número de fallas o paradas por año, o por mes, etc.).

Fecha de entrada en operación: Día mes y año en que se inició operaciones comerciales.

Horas disponibles (HD): Total de horas en el cual la unidad en estudio estuvo en el estado disponible, dentro de un período estadístico determinado.

Horas indisponibles (HI): Total de horas en el cual la unidad en estudio estuvo en el estado indisponible, dentro de un período estadístico determinado.

Horas en servicio (HS): Total de horas en el cual la unidad en estudio estuvo conectada al sistema con o sin restricciones, dentro de un período estadístico determinado.

Horas del período estadístico (HE): Período de tiempo calculado en horas en el que se basa un estudio estadístico (Por ejemplo, 8760 horas para un año normal y 8784 horas en el año bisiesto).

Interrupción: Es la paralización de funciones o procesos de manera parcial o total debido a la salida de servicio de uno o más componentes.

Interrupción programada: Es la causada por una salida de servicio de uno o más componentes de manera planificada.

Interrupción forzada: Es la debida a una salida forzada.

Interrupción (Duración): Período de tiempo entre el instante que se detiene un componente o proceso hasta que se restablece el funcionamiento normal del mismo.

Interrupción momentánea: Es la que se realiza con una duración menor al tiempo estipulado por control de supervisión para maniobras de esa índole. Tienen una duración de segundos o minutos.

Interrupción sostenida: Todas las que no se consideran momentáneas.

Mantenibilidad (M[2]): "Es la probabilidad de que una operación dada de mantenimiento pueda ser realizada en un intervalo de tiempo dado". [30]

Mantenimiento: Son un conjunto de procedimientos y acciones realizadas con la finalidad de revisar y reparar un dispositivo o sistema con el fin de mantener sus condiciones óptimas para que opere normalmente.

Mantenimiento correctivo: Es aquel que se lleva a cabo con el propósito de enmendar daños o fallas.

Mantenimiento emergente: Es el realizado a un equipo cuando se interrumpen sus funciones por una falla y es necesario que continúe operando.

Mantenimiento mayor: Es el realizado a profundidad y de manera global con el fin de que después del mismo, el componente o sistema esté lo más parecido a su estado inicial (como nuevo).

Mantenimiento preventivo: Es un mantenimiento periódico que se realiza con la finalidad de mantener su estado en condiciones óptimas.

Número de fallas: Es la suma del total de fallas ocurridas de un componente, equipo o sistema, contempladas en un período estadístico definido.

---

[2] La designación de la letra M viene del término anglosajón: *Maintainability.*

Período estadístico: Comprende el intervalo (o suma de intervalos) de tiempo, de los cuales se desprenden las observaciones, estudios y cálculos de los indicadores de desempeño.

Probabilidad: Medida del azar, que indica el número de veces de un total, en las que ocurre un evento determinado.

Salida: Es el estado de no disponibilidad de un componente para la realización de una función específica, a causa de un evento asociado con dicho componente. Esta salida puede o no ocasionar la interrupción del servicio.

Salida forzada: Es la aplicada en condiciones de emergencia, por causas asociadas directamente al componente, que obligan a que éste sea excluido de manera inmediata del sistema. También pueden ser la resultante de una o varias operaciones inadecuadas del equipo o de errores humanos.

Salida programada: Es aquella que se realiza bajo planificación previa bajo condiciones controladas con distintos propósitos, bien sea, por mantenimiento de tipo preventivo, cambios o reparaciones.

Seguridad (S[3]): "Es la probabilidad de evitar un evento peligroso" [30] . Esta probabilidad contiene dos consideraciones: La primera se refiere a la probabilidad que acontezca un evento peligroso y la otra, se relaciona al grado de peligro del mismo (Figura 1.12).

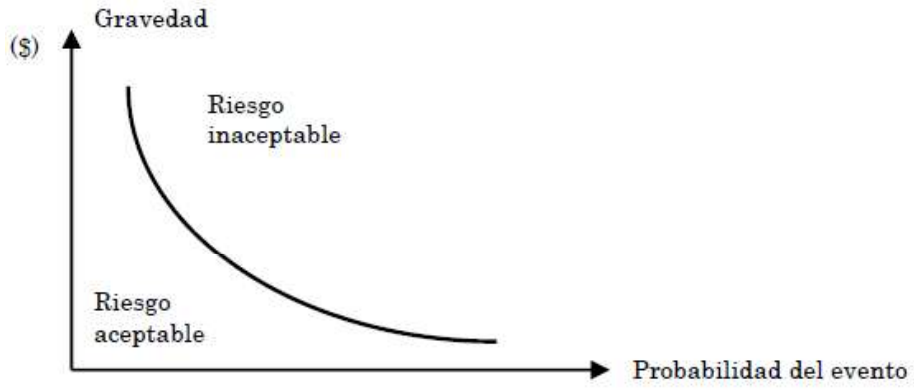


Figura 1.12. Función de riesgo en un análisis de seguridad [30]

[3] La designación de la letra S viene del término anglosajón: *Security.*

Sistema: Es el conjunto de elementos o componentes que interactúan con el propósito de cumplir fines u objetivos determinados.

Sistema de suministro: Es el sistema al que pertenecen las líneas de transmisión, los equipos de subestaciones, las estaciones que realizan la conversión CA/CC y CC/CA, los equipos de compensación reactiva, transformadores de fuerza y otros.

Tasa de fallas: Consiste en la suma total de las fallas ocurridas de un componente o sistema en el transcurso de las horas de servicio, durante un momento estadístico.

Tasa de salida forzada (FOR): Es una estimación referente a la probabilidad de encontrar el componente o sistema fuera de servicio en un tiempo futuro.

Tiempo medio de duración de la falla (MTTR[4]): Es la cantidad de tiempo requerido para reparar un sistema y ponerlo nuevamente en marcha.

Tiempo medio antes de la falla (MTTF[5]): Se refiere al promedio de vida previa a la ocurrencia de la primera falla en componentes no reparables.

Tiempo medio entre fallas (MTBF[6]): Es el promedio de los tiempos entre dos fallas consecutivas.

Tiempo medio de reparación: Media en el que cambia o recupera la función del componente o sistema que presentó falla.

Otras medidas: La probabilidad constituye la medida por excelencia para valorar la *confiabilidad*. Sin embargo, hay variedad de medidas que se utilizan para tal fin, según las necesidades del estudio, por lo tanto, el término "confiabilidad" es un sustantivo genérico que incluye todas estas medidas sin que obligatoriamente se relacionen con la probabilidad. La mayoría de dichos términos se corresponden a promedios estadísticos o valores esperados que se designan como "índices de confiabilidad" [30]. En el Tabla 1.5 se aprecian algunos ejemplos de índices de confiabilidad:

---

[4] Siglas del inglés *Mean time to repair*
[5] Siglas del inglés *Mean time to fail.*
[6] Siglas del inglés *Mean time between failures*.

Tabla 1.5. Ejemplo de términos relacionados con confiabilidad

Índice de confiabilidad	Definición	Ejemplo
Vida media	Tiempo esperado para que ocurra una falla en un componente no reparable	10000 horas
Frecuencia de fallas por año	Número de fallas esperadas por año	0.1 fallas/año
Indisponibilidad	Número esperado de horas de indisponibilidad por año	20 horas/año
Pérdida de carga	Valor esperado de carga no atendida por año	180.2 kW
Tiempo medio de reparación	Tiempo medio esperado para cada reparación	4 horas/reparación
LOLE	Número esperado de horas por año en que no se podrá atender la demanda	0.1 horas/año
Endurance	Número de operaciones que puede realizar un contactor, interruptor o seccionador antes de entrar en su periodo de obsolescencia	6000 operaciones

Fuente: Zapata, Carlos [30]
Elaboración propia.

Existen formas de mejorar la confiabilidad de los elementos de los sistemas y por ende, del sistema mismo. Dichas maneras o formas están directamente vinculadas con la calidad. [30]

La calidad estará observada desde los materiales utilizados, el sistema de producción, los ensayos o evaluaciones que se realicen al proceso o al producto final, la calibración, el transporte y la puesta en servicio. [30]

Sin embargo, aunque se tomen las previsiones de adherirse a las mejores prácticas de calidad, es necesario contar con reemplazos o posibles paliativos ante situaciones no deseadas, esta previsión recibe el nombre de redundancia y, consiste en colocar elementos de respaldo, de manera que, si un dispositivo o componente presenta fallas o paradas por alguna causa, su trabajo será realizado por un componente igual que estará designado como respaldo. [30]

Otras formas de mejorar la confiabilidad son la práctica del mantenimiento preventivo, tener componentes de uso vigente, contar con repuestos en stock.

Para obtener mejoras en la confiabilidad es necesario realizar mayor inversión económica en equipamiento y en cambios procedimentales que optimicen el funcionamiento del sistema o del componente. [30]

1.5.1 Costo de la Confiabilidad

El nivel de inversión es directamente proporcional al nivel de confiabilidad. El costo referido a la confiabilidad debe compararse con los beneficios a largo plazo que se desprenden del funcionamiento óptimo del sistema en cuestión y la calidad del producto generado. [30]

Un nivel aceptable de confiabilidad se relaciona con cuánto está dispuesto el consumidor o usuario a pagar por éste, dicho valor muchas veces no se acerca al determinado como óptimo matemáticamente. [30]

La manera de justificar inversiones para mejorar la confiabilidad está directamente relacionada a los costos asociados a las fallas o interrupciones del servicio (salidas) que se pueden reducir o evitar.

1.6.Estudio de la confiabilidad

1.6.1 Método determinístico

El método determinístico consiste en un modelo matemático donde no se observa el azar o el principio de incertidumbre, en este modelo los datos son conocidos tanto los de entrada como los de salida (son implícitos). Éste modelo se desarrolló con la finalidad de poder estudiar situaciones hipotéticas a través de simulaciones con la finalidad de reducir la incertidumbre en un sistema. [32]

A través de la inclusión de relaciones más complejas, que contengan mayor cantidad de variables y elementos ajenos a este modelo, se procura que el mismo se acerque a un modelo de tipo probabilístico o de enfoque estocástico.

En el Tabla 1.6 se especifican las ventajas y desventajas más relevantes del método determinístico:

Tabla 1.6. Ventajas y desventajas de métodos determinísticos

Método Determinístico	
Ventajas	**Desventajas**
Claridad conceptual	No tiene en cuenta la probabilidad de ocurrencia de los casos considerados
Número limitado de casos a examinar	La selección de la lista de los casos restrictivos depende inevitablemente de datos históricos
Herramientas matemáticas proveen una descripción del estado del sistema	Diferentes casos cambian constantemente con el tiempo de forma sutil y en pocos casos hasta de forma imperceptible

Fuente: Yañez, Medardo; Gómez, Hernado; Valbuena, Genebelín [32]
Elaboración propia.

1.6.2 Método de bloques de frecuencia y duración

Este modelo está orientado a la representación del sistema como una red, donde la misma está organizada por diversos componentes. Cada componente está considerado como un bloque o subsistema reparable con una tasa de fallas constante y un tiempo medio para reparación también constante. La conexión en dicha red se puede estudiar tanto en serie como en paralelo. [33]

La utilización de una tasa de falla y reparación constante involucra que las distribuciones obtenidas de la probabilidad de los tiempos de falla y tiempos de reparación sean exponenciales.

En el caso de redes eléctricas, los componentes pueden ser susceptibles de reparación o reemplazo después de presentada la falla, para luego, retornar a la condición de operación normal del sistema. Las condiciones de reparación o de salida caracterizan al sistema de manera continua en el tiempo, con estados discretos finitos. La condición de salida y reparación da al sistema una característica continua en el tiempo, con estados discretos finitos.

La Figura 1.13 representa los momentos de dos elementos con dos estados (on/off), donde las transiciones de un estado a otro se consiguen cambiando cada uno a la vez.

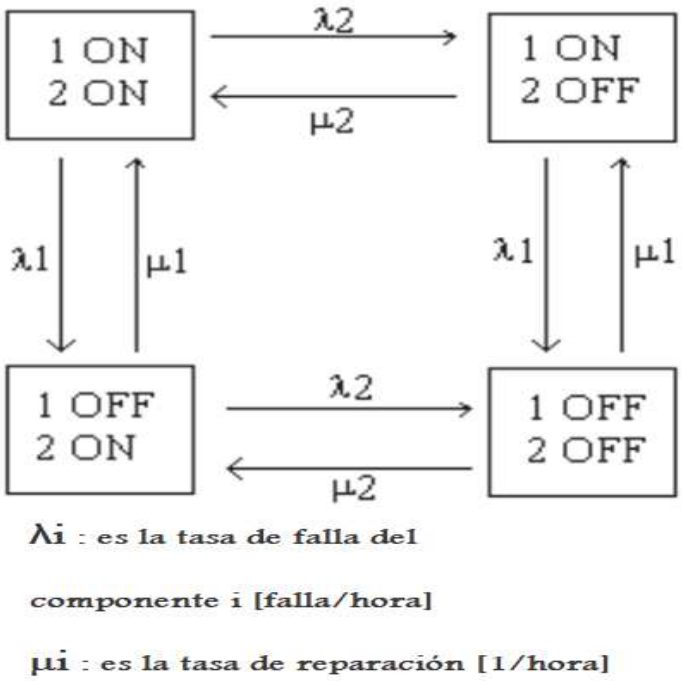


Figura 1.13. Diagrama de estados de un sistema con dos elementos [33]

La utilización de esta metodología en sistemas de gran tamaño resulta compleja dado que se toma en cuenta cada uno de los posibles estados del sistema.

1.6.3 Métodos estocásticos

Éstos métodos simulan diferentes casos de operación del sistema de manera probabilística, comúnmente, partiendo de las distribuciones de probabilidad de cada uno de los componentes del mismo, el método de simulación más utilizado es el **método Montecarlo.** [32]

La metodología aplicada es no determinista, dado que su aplicación en la simulación es basada en el comportamiento aleatorio del sistema, para el logro de esta simulación se utiliza un programa computacional. Esta aplicación es ampliamente utilizada en el estudio de sistemas y sus rendimientos en el área de ingeniería.

Lo que caracteriza a Montecarlo como un método versátil es que puede utilizarse el tipo de distribución de probabilidad que se desee. Pudiendo servir tanto para las tasas de falla como para la reparación de los componentes.

Este método de simulación admite la estimación de un rendimiento específico a través de un conjunto dado de parámetros del sistema. La sensibilidad del mismo a la variación de los parámetros, se puede examinar a través de la repetición de simulaciones.

El valor de Montecarlo radica en que consigue ser aplicado a sistemas extensos y complejos. Está considerado como un medio muy eficaz, en situaciones en que los métodos analíticos son de gran complejidad o no están disponibles. La exactitud del método de Montecarlo dependerá del número de muestreos, lo que implica gran cantidad de datos para acercarse a resultados más confiables.

1.7. Distribución de probabilidad

Mediante la utilización la teoría de probabilidades se puede determinar la distribución de probabilidad de una variable aleatoria, función que establece a cada suceso determinado de la variable la probabilidad de que suceda o no.

1.7.1 Variables aleatorias

Este tipo de función toma como dominio el espacio muestral total y el rango de análisis es el grupo de los números reales. Estas variables se pueden clasificar en: discretas y continuas. [34]

1.7.1.1 Variables aleatorias discretas

Este tipo de variable cuyos valores constituyen un conjunto de tipo finito o son ordenados en una lista secuencial infinita contable[7]. Regularmente están definidos en el conjunto de los números enteros positivos. [34]

1.7.1.2 Variables aleatorias continuas

Una variable aleatoria se considera continua, cuando los valores posibles a tomar están compuestos de todos los números existentes en el intervalo sobre la línea de numeración, pudiendo resultar posible la extensión infinita. Éstos están contemplados dentro de los números reales. [34]

[7] Infinita contable: Es una lista que comprende un primer elemento, luego un segundo elemento y así sucesivamente.

1.7.2 Distribución de probabilidad para variables aleatorias discretas

Los posibles valores que puede tener una variable aleatoria "X" están asociados a las probabilidades de que ocurran variedad de resultados dentro de un espacio muestral. La distribución de probabilidad de "X" indica cómo está distribuida (determinada) la probabilidad total de 1 en los posibles valores de "X". [34]

Es decir, esta función específica la probabilidad de observar el valor posible de "X" de la variable aleatoria, cuando se realiza alguna simulación.

1.7.2.1 Distribución binomial

La distribución binomial se aplica ante la existencia de condiciones específicas:

- La prueba radica en una serie de "n" experimentos de tamaño menor llamados ensayos, donde "n" se establece antes de la prueba.
- Hay la posibilidad de que cada uno de los ensayos pueda obtener como resultado uno de los mismos resultados posibles, los cuales comúnmente se expresan como: Éxito (E) y Falla (F).
- La realización de los ensayos es independiente uno de otro, un resultado no influye en los resultados de los demás ensayos realizados.
- Para cada uno de los ensayos, la probabilidad de éxito es constante, puesto que son independientes y se denota como "p".

La variable aleatoria binomial "X" para la distribución binomial está definida como el número de éxitos sucedidos en "n" ensayos.

Entonces, la función basada en los parámetros n y p, se denota por $b_{(x;\ n,\ p)} = P_{(X)}$. Donde se obtiene la siguiente expresión (Ecuación 1.1):

$$P_{(x)} = b_{(x;n,p)} = \left\{ \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \right\}$$

Ecuación 1.1. Distribución binomial

x = 0, 1, 2, … n
0 de lo contrario

1.7.2.2 Distribución de Poisson

Este tipo de distribución representa la prueba en la cual, es constante la probabilidad de éxito. El parámetro de la distribución de Poisson de la variable aleatoria "X" es λ (λ>0) para la función de probabilidad (Ecuación 1.2). [34]

$$P_x = p_{(x;\lambda)} = \frac{e^{-\lambda}\lambda^x}{x!}$$

Ecuación 1.2. Distribución de Poisson

X = 0, 1, 2, …

El valor λ a menudo es un valor por unidad de tiempo.

Si x = 0, la expresión indicará que la probabilidad de presentar cero fallas en un cierto tiempo es:

$$P_{(x=0)} = e - \beta$$

Ecuación 1.3. Distribución de Poisson con *x* igual a cero

1.7.2.3 Distribución de probabilidad para variables aleatorias continuas

Está definida como una función f(x) tal que, dado dos números cualesquiera a y b donde a ≤ b, se tiene (Ecuación 1.4):

$$P_{(a \leq X \leq b)} = \int_a^b f_{(x)} dx$$

Ecuación 1.4. Distribución de probabilidad para variables aleatorias continúas

La probabilidad de que "X" tenga un valor en el intervalo [a, b] compone el área del intervalo y bajo la gráfica de la función, como se aprecia en la Figura 1.14. Esta gráfica $f_{(x)}$ se le denomina también curva de densidad. [34]

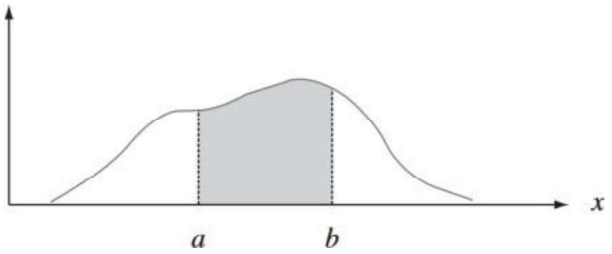


Figura 1.14. P(a ≤ X ≤ b) = el área bajo la curva de densidad entre a y b. [34]

Para que $f_{(x)}$ se considere una función de probabilidad legítima, debe cumplir con las condiciones a continuación:

- $f_{(x)} \geq 0$ con todas las x.
- $\int_a^b f_{(x)} dx =$ área bajo la curva = 1

1.7.2.4 Distribución normal

La variable aleatoria continua "X" poseerá una distribución normal bajo los consecuentes parámetros μ y σ (o μ y σ^2), donde $-\infty \leq \mu \leq \infty$ y > 0, si f(x) es (Ecuación 1.5). [34]

$$f_{(x;\mu,\sigma)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}\, e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$

Ecuación 1.5. Distribución normal

Donde:

μ: es el valor medio de x.

σ: es la desviación estándar de x.

Como se puede apreciar en la Figura 1.15, la función de distribución de probabilidad normal tiene como propiedad la simetría alrededor del valor medio. Para calcular la disposición de esta distribución se realiza a través de desviaciones estándar.

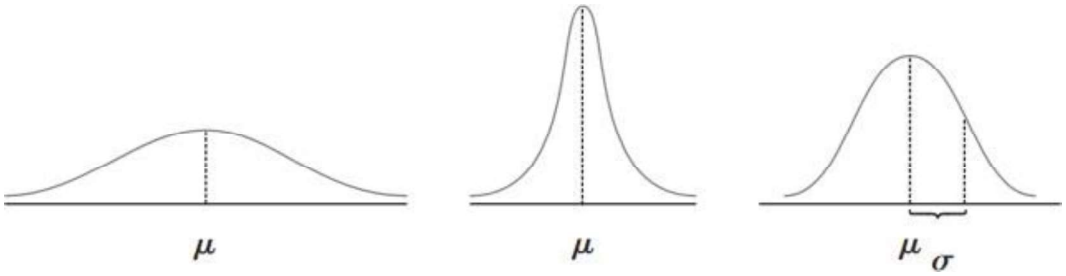


Figura 1.15. Modelos de curvas para la distribución normal

Para los valores de cuantificación se $\mu = 0$ y $\sigma = 1$ denomina distribución normal estándar. Las variables aleatorias con una distribución normal estándar se expresan con *"Z"*. Su función se representa (Ecuación 1.6):

$$f_{(z;0,1\sigma)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}\ e^{-z^2/2}$$

Ecuación 1.6. Distribución normal estándar de variable aleatoria

1.7.2.5 Distribución exponencial

Para que este tipo de variable presentará una distribución exponencial con parámetro siempre y $\lambda\ (\lambda>0)$ cuando la función sea (Ecuación 1.7). [34]

$$f_{(x;\lambda)}=\begin{cases}\lambda e^{-\lambda x}\\ 0\end{cases}$$

Ecuación 1.7. Distribución Exponencial

Donde:

$x \geq 0$ de lo contrario

Siendo el valor esperado para una variable "X" de tipo aleatoria exponencialmente distribuida sería (Ecuación 1.8):

$$E_{(x)}=\int_0^{\infty} x\lambda e^{-\lambda x}dx$$

Ecuación 1.8. Valor esperado para una variable exponencialmente distribuida

La media y la desviación estándar en este tipo de distribución son guales a $1/\lambda$. Su función es de fácil combinación para la obtención de una función acumulativa. Para

fácil referencia la Figura 1.16 se aprecia tres gráficas diferentes de funciones de distribución de probabilidad exponenciales:

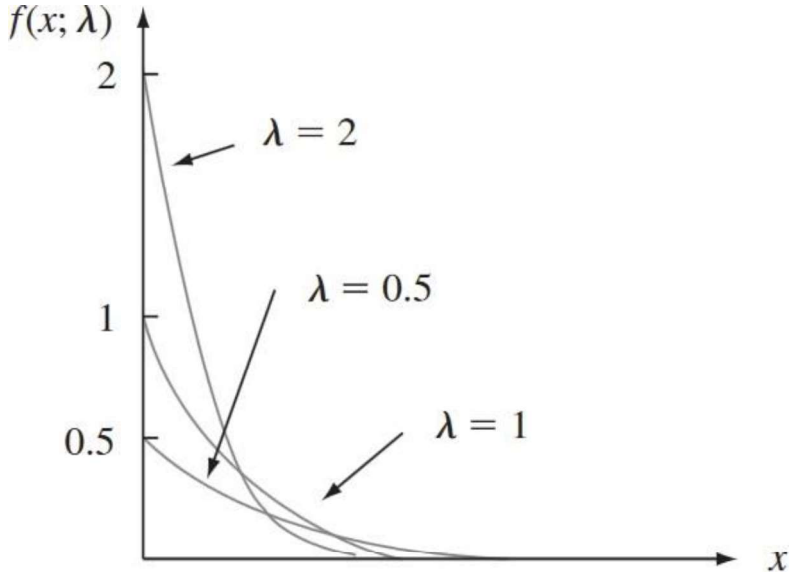


Figura 1.16. Curvas de distribución exponencial

$$f_{(x;\lambda)}=\begin{cases}0\\1-e^{-\lambda x}\end{cases}$$

Ecuación 1.9. Distribución exponencial de tiempos entre ocurrencias de eventos sucesivos

Donde:

$x < 0$

$x \geq 0$

Este tipo de distribución es utilizado comúnmente cuando se desea modelar la distribución de tiempos entre la ocurrencia de eventos sucesivos, como es el caso de las llamadas a una central telefónica, o consumidores que entran a un restaurante.

1.7.3 Modelo de confiabilidad de los componentes

Para los componentes del sistema se usa el modelo de los dos estados que se observa en la Figura 1.17; el cual, está definido a través de las distribuciones de probabilidad para los tiempos de salida y restauración. [32]

Para construir el modelo que se plantea es necesario ajustar los datos operativos referentes a tiempos de salida y restauración de cada componente a una función de probabilidad propuesta (Gausiana, Weibull, etc.).

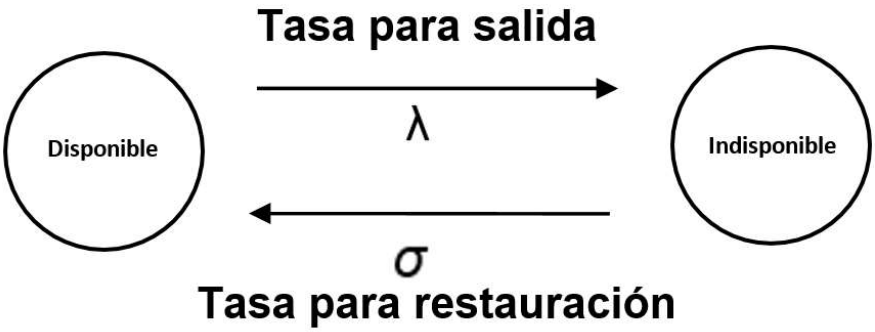


Figura 1.17. Modelo de los dos estados

Se pueden implementar dos tipos de modelo de este tipo para cada uno de los componentes:

- **Análisis de disponibilidad:** Toma en cuenta las salidas planeadas tales como el mantenimiento preventivo y las inspecciones programadas y, no planeadas como las fallas, situaciones de vandalismo, accidentes entre otras. Se refiere entonces a: tiempos para salida y tiempos para restauración.

- **Análisis de fallas:** Bajo esta óptica de análisis, solo se toma en cuenta las salidas no planeadas que estén directamente asociadas a fallas propias del componente. Para este caso se toman los términos: tiempo para falla y tiempo para reparación.

- **Recursos primarios de generación:** Esta modelación está basada en el uso de una variable aleatoria sencilla, que constituya el recurso primario de producción en las ecuaciones de potencia bien sea como variable o como proceso estocástico. Un ejemplo puede ser la velocidad del viento *v*, la energía radiante del sol £, etc.

- **Despacho de las unidades internas:** Para obtener esta modelación se debe relacionar la potencia con la variable aleatoria que constituya el recurso primario de producción en las ecuaciones. Como ilustración se puede mencionar el cálculo de la potencia en unidades eólicas ($P = k * v^{2)}$

o en el caso de la energía radiante se expresaría en unidades solares (P = *k* * £). Donde *k* es una constante que representa componentes constructivos de la unidad y de la planta, tomando las restricciones de capacidad máxima nominal y mínima de generación.

1.8. Confiabilidad en Plantas Fotovoltaicas

La evaluación del sistema en cuanto a la confiabilidad y funcionamiento de planta tiene dos componentes. El primero es el procesamiento de datos, con el fin de establecer indicadores cuyo objeto es evaluar el funcionamiento, de cada uno de los elementos que constituyen los subsistemas e identificar los equipos críticos, que son determinantes en la parada total de los subsistemas.

De este primer paso se genera un indicador global del funcionamiento de la planta, relacionando la potencia nominal y los valores verdaderamente generados, es el valor de la Energía no suministrado (VENS), valores de eficiencia y disponibilidad de la planta.

El segundo aspecto considerado en esta evaluación está centrado en la valoración de la confiabilidad de los sistemas de generación de energía eléctrica en el largo plazo, basados en métodos no convencionales como es la captación de energía solar.

Por la comprensión del funcionamiento del sistema, se determinaron las variables aleatorias que definen el funcionamiento del mismo y utilizando el método Montecarlo, se podrá obtener diferentes escenarios de la operación de la planta fotovoltaica y su análisis de sensibilidad.

2. METODOLOGÍA

2.1.El método de Montecarlo y análisis de sensibilidad

En el momento de tomar decisiones factores como la incertidumbre, ambigüedad y variabilidad impiden predecir lo que sucederá a futuro. La ingeniería no está exenta por lo que se puede acudir al uso de simulaciones de Monte Carlo para reducir el riesgo y optar por opciones acertadas. [36]

La simulación de Monte Carlo es una técnica matemática computarizada usada en finanzas, producción, energía, medio ambiente, transporte, desarrollo de proyectos, etc.

Este método permite considerar un rango de posibles resultados y la probabilidad de que una selección contribuya a que dichos resultados se concreten.

Muestra las posibilidades más extremas, permite sondear lo que puede suceder si las decisiones tomadas son arriesgadas o conservadoras y sus consecuencias sobre la marcha.

El método de Monte Carlo hace un análisis de riesgo mediante la construcción de modelos de posibles resultados mediante la sustitución de rangos de valores en una distribución probabilística.

Para un factor de incertidumbre realiza varios cálculos iterativos, en cada ocasión usa diferentes valores aleatorios acorde a la función de probabilidad. Dependiendo de la incertidumbre, los rangos especificados para la simulación, el método de Monte Carlo puede implicar miles de cálculos antes de presentar un resultado que se obtiene en sólo segundos.

La selección de las distribuciones de probabilidad incide en el comportamiento de las variables, una distribución bien modelada llevará a resultados acertados en el análisis de riesgos. Las probabilidades más conocidas son: Normal, Uniforme, Triangular, Logarítmica, Poisson, sus variaciones pueden ser continuas o discretas.

El método de Monte Carlo presenta algunas ventajas en relación a los métodos determinísticos.

- Resultados probabilísticos que indican un resultado y adicionalmente la probabilidad de que suceda.
- Gráficos de resultados que muestran de forma simplificada el producto de una gran cantidad de cálculos computacionales, es fácil crearlos y de simplifican el análisis de resultados.
- Análisis de sensibilidad para determinar los valores de entrada en el sistema que tienen un mayor impacto en el sistema.
- Análisis de escenario para visualizar que valores de entrada repercuten en el sistema y sus resultados. Es de gran importancia cuando se persigue un objetivo y brinda gran exactitud.
- Correlación de entradas. Este método permite modelar relaciones interdependientes entre las variables de entrada. Es importante para representar como en realidad suben o bajan algunos factores en consecuencia.

2.2. Herramientas de almacenamiento y procesamiento de datos.

Para el manejo de datos se utilizará Microsoft Excel, que permite crear tablas, analizar y realizar cálculos, usándolo inicialmente para el cálculo de los índices y como base para la modelación. [37]

Para la simulación de Montecarlo se utilizará la herramienta informática: *@Risk*[8]; dicho programa elabora análisis de riesgos, usando la simulación para revelar múltiples resultados posibles, plasmados a través de un modelo realizado en una hoja de cálculo, indicando la probabilidad de que se produzcan.

@Risk es un software que se utiliza bajo licencia de uso privada, lo que implica que para su utilización se debe pagar por derechos de uso. En la realización de esta investigación se solicitó una licencia de prueba temporal sin límite de usos de herramientas por 15 días.

Este programa calcula y controla matemáticamente, de forma paralela gran número de escenarios futuros posibles, indicando posteriormente las probabilidades y riesgos asociados a cada escenario previsto. Este tipo de información es importante tanto para la planificación, como para la toma de decisiones, minimizando riesgos a partir de situaciones de incertidumbre.

2.2.1 Descripción del software @Risk

Este programa informático es una herramienta que asiste en la elaboración de estrategias para la administración de la planta, combinando la simulación Montecarlo, con variedad de herramientas en resolución de problemas optimizando la información contenida en la hoja de cálculo y previendo que contenga valores inciertos. [37]

Igualmente, puede utilizar algoritmos genéticos (AG) o el *OptQuest*, que sirve para determinar la asignación de recursos más adecuada, la repartición óptima de activos, el calendario más eficaz entre otros.

Otra facilidad para el usuario, es que este software está totalmente traducido al español. Tanto los menús, como cuadros de diálogo y los archivos de ayuda al igual

[8] De Palisade Corporation

que el material de apoyo, están en español. Para fácil referencia se muestra una pantalla de ejemplo del @Risk en la Figura 2.1.

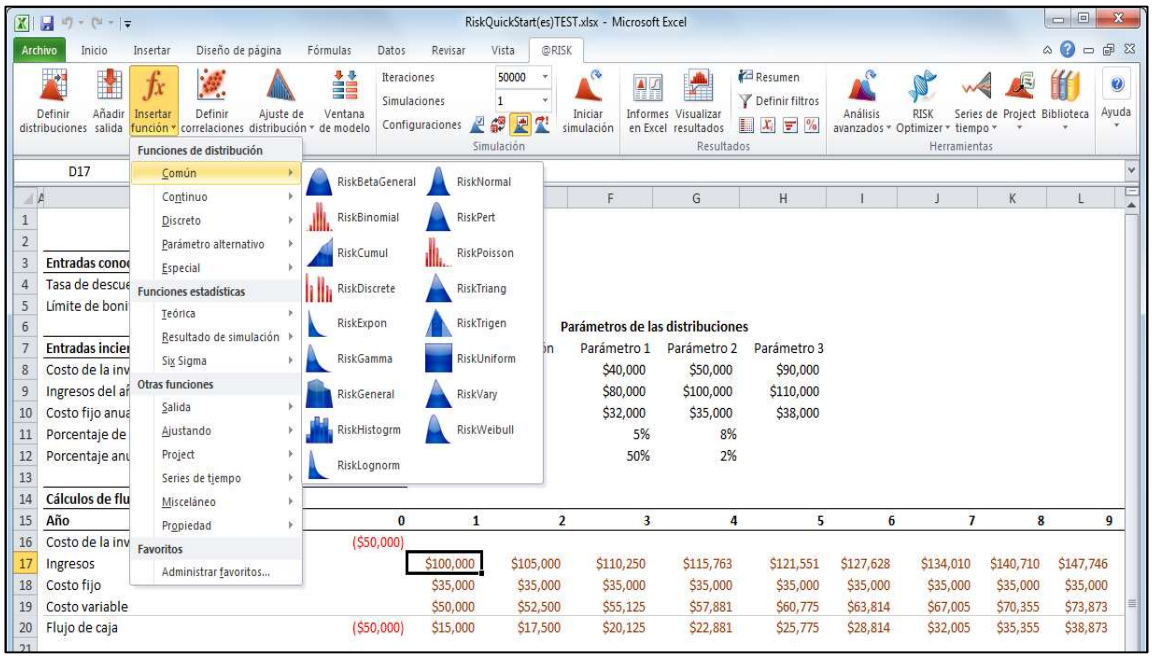


Figura 2.1. Pantalla de ejemplo del programa @Risk [37]

2.2.1.1 Información de utilización y técnica

- Se reemplaza los valores inciertos que aparecen en la hoja de cálculo por las funciones de distribución de probabilidad creadas por @Risk (Normal, Uniform, etc.), éstas representan posibles valores que pueden aparecer en la celda y de esta forma el cálculo no es limitado a un solo valor. Luego, se selecciona la distribución de las diferentes opciones ofrecidas en el menú, también se puede definir distribuciones a partir de datos históricos, inclusive se realizan combinación de funciones por medio del instrumento *Compound@Risk*. Posteriormente, se escogen los resultados o salidas: las celdas de los "totales" cuyos valores son de interés para el estudio.

- Para la utilización de datos históricos, con ayuda de la herramienta de ajuste de datos integrada, es posible escoger la función de distribución y los parámetros más apropiados. Se puede ajustar el tipo de datos denotándolos como: independientes, continuos o acumulativos, también filtrarlos, escoger los tipos de distribución que se van a ajustar o especificar y cuáles se utilizarán para probar el Chi-cuadrado.

– Las distribuciones ajustadas están catalogadas basándose en tres diferentes ensayos de tipo estadístico, pudiéndose comparar descriptivamente, sobreponiendo los gráficos generados por la variedad de distribuciones previamente ajustadas. Dichos resultados de ajuste son vinculables a las funciones de @Risk pudiéndose actualizar.

– Con sólo escoger la opción de Simular @Risk se puede recalcular el modelo de la hoja de cálculo infinidad de veces. Para cada simulación, @Risk tomará valores aleatorios, obteniendo modelos distintos que se registrarán en resultados (Ver Figura 2.2).

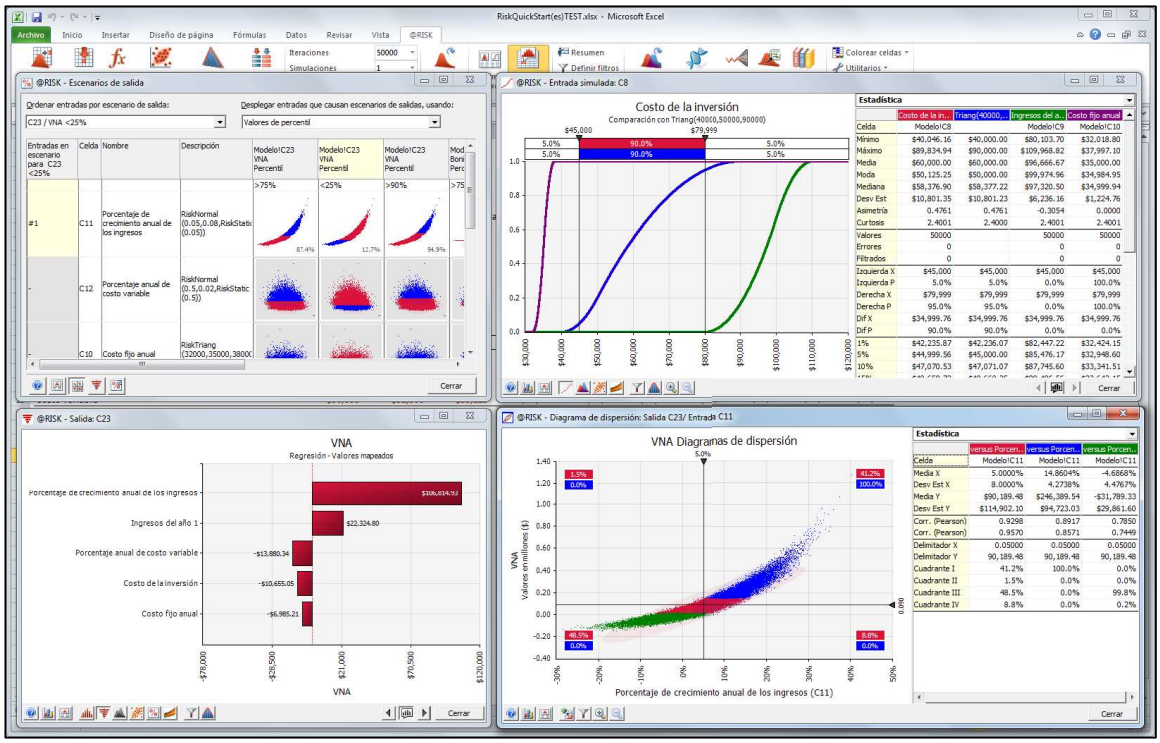


Figura 2.2. Ejemplo de simulaciones posibles mediante el uso de @Risk [37]

– El resultado obtenido de la realización de una simulación es una apreciación de la gama completa de los resultados posibles, comprendiendo la probabilidad de que los mismos ocurran. Se puede añadir gráficos a los resultados como histogramas, diagramas de dispersión o de cuadro, igualmente las curvas acumulativas entre otros. Los factores críticos pueden ser fácilmente identificados a través de gráficos Tornado y mediante el análisis de sensibilidad. La opción de copia de los resultados está disponible,

pudiendo trasladarlos a los programas de Microsoft Office, o también colocarlos en la Biblioteca de @RISK para el uso de los mismos por otros usuarios (Ver

– Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Ficha técnica de @Risk

Descripción	@RISK Industrial	@RISK Pro	@RISK Standard
Generador de simulación avanzado	•	•	•
Respaldo para 2 CPU o núcleos procesadores	•	•	•
Más de 40 funciones de distribución incorporadas	•	•	•
Galería integrada de distribuciones	•	•	•
Comando Insertar Función	•	•	•
Permutación de funciones de @RISK	•	•	•
Funciones Compound y Six Sigma	•	•	•
Variedad de gráficos y tablas de resultados	•	•	•
Actualización en vivo durante la simulación	•	•	•
Análisis de sensibilidad y escenarios	•	•	•
Correlación de entradas	•	•	•
Artista de Distribuciones para dibujar distribuciones	•	•	•
Ajuste de distribuciones integrado	•	•	
Integración con Microsoft Project			
Biblioteca de @RISK	•	•	
Juego de programación de Excel (XDK)	•	•	
Análisis de tendencia	•	•	
Análisis de sensibilidad avanzado	•	•	
Búsqueda de objetivo @RISK	•	•	
Respaldo completo al uso de múltiples CPU	•		
Simulación de pronósticos de series de tiempo	•		
RISKOptimizer en Español	•		
Optimización con incertidumbre	•		
Rangos para celdas ajustables y restricciones	•		
Algoritmos genéticos	•		
Seis métodos de resolución, incluyendo algoritmos genéticos y OptQuest	•		
Observador de RISKOptimizer	•		
Supervisión de convergencia y operadores genéticos	•		
Actualización de modelo Original, Mejor y Última	•		

Fuente: SDI [38]
Elaboración propia.

2.2.2 Índices

Se consideraron los siguientes índices para el estudio:

2.2.2.1 Número de fallas/período

Es la suma de fallas contabilizadas de cada uno de los equipos y sistemas que comprenden la central durante el período de tiempo del estudio.

2.2.2.2 Número de Incidencias / Período

Número de incidencias totales, contabilizadas de cada uno de los equipos y sistemas que comprenden las plantas Salinas y Tren Salinas durante el período de tiempo del estudio.

2.2.2.3 Tiempo Total Falla (h)

Suma de horas contabilizadas de las fallas ocurridas en cada uno de los equipos y/o sistemas que comprenden las plantas Salinas y Tren Salinas durante el período de tiempo del estudio, expresado en horas.

2.2.2.4 Disponibilidad del Equipo

Número de horas totales, contabilizadas disponibles de cada uno de los componentes y/o subsistemas que comprenden las plantas Salinas y Tren durante el período de tiempo del estudio, expresado en horas.

2.2.2.5 Frecuencia de Interrupciones (FI)

En el transcurso de la vida útil se pueden apreciar patrones de frecuencia de fallas en los sistemas o en sus elementos [39].

Curva de la Bañera

Al inicio, durante los primeros años de operación conocido como infancia, se tiene una elevada frecuencia de interrupciones que decrecerá con el tiempo. Dichas fallas se presentan debido a defectos de fábrica, daños por transportación e instalación de los componentes. Posteriormente la frecuencia de fallas tiende a estabilizarse en el período de operación y se vuelven más impredecibles por su aleatoriedad. Siendo éste el período de estudio más relevante en términos de confiabilidad. Finalmente, el período de vejez muestra un incremento en la frecuencia de fallas debido al desgaste del uso y el paso del tiempo. En la práctica este período no es muy relevante ya que los componentes se pueden reemplazar en su mayoría y sus características les otorgan tiempos de vida útil muy elevados (Ver Figura 2.3).

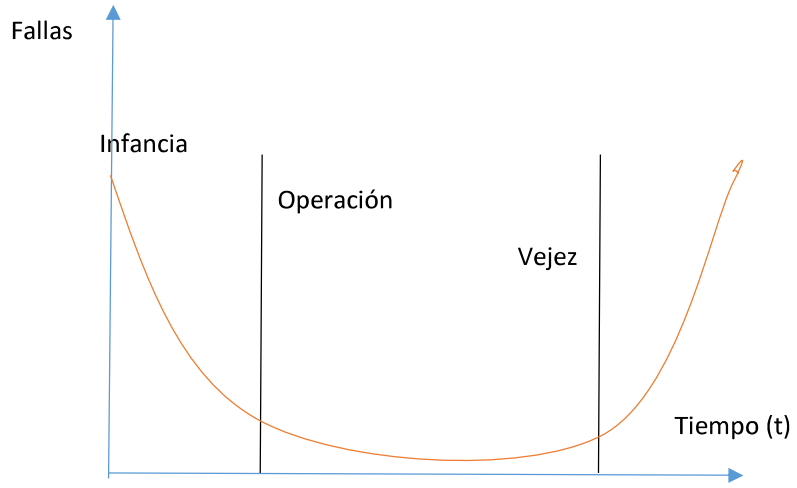


Figura 2.3. Curva de la bañera en la vida de una planta [40]

La frecuencia de interrupciones es la probabilidad de que en un período de tiempo los componentes o la planta presenten una falla representado en una tasa.

$$FI = \frac{Número\ de\ fallas\ presentadas\ en\ un\ período\ de\ tiempo}{Número\ de\ equipamientos\ registrados\ en\ el\ periodo}$$

Ecuación 2.1. Frecuencia de Interrupciones

Las unidades dadas en $\frac{fallas}{equipamiento\ por\ año}$

Las horas consideradas por años deben ser 8760 – 8784.

Para Unidades o componentes:

$$FIi = \frac{Número\ de\ fallas\ del\ equipamiento\ i * Número\ de\ horas\ del\ período\ de\ tiempo}{Número\ de\ horas\ de\ servicio\ del\ equipamiento\ i}$$

Ecuación 2.2. Frecuencia de interrupciones para unidades o componentes

Para la planta:

$$FIp = \frac{\sum_{i=1}^{N} Número\ de\ fallas\ i}{\sum_{i=1}^{N} Número\ de\ horas\ de\ servicio\ del\ equipamiento\ i} * Horas\ del\ período\ de\ tiempo$$

Ecuación 2.3. Frecuencia de interrupciones para Planta

2.2.2.6 DI Duración de Interrupciones Promedio (h)

La duración de interrupciones indica el tiempo medio de reparación de un equipo o reposición de su funcionamiento, su unidad dimensional dada en horas [h]. [41]

$$DI = \frac{Horas\ de\ indisponibilidad\ de\ un\ equipo}{Número\ de\ fallas\ en\ el\ período\ de\ tiempo}$$

Ecuación 2.4. Duración de Interrupciones promedios de los componentes

Para los componentes:

$$DIi = \frac{\sum_{k=1}^{R} Número\ de\ horas\ indisponibles\ del\ equipo\ i\ debdo\ al\ mantenimiento\ k}{Número\ de\ fallas\ del\ componente\ i}$$

Ecuación 2.5. Duración de Interrupciones para cada unidad o componente

Donde:

i = Identificador del componente

k = Indicador del evento de mantenimiento

R= Número total de eventos de mantenimiento.

2.2.2.7 MTTF Tiempo Medio hasta la Falla (h)

Promedio obtenido del total de fallas contabilizadas de cada uno de los equipos y sistemas que comprenden las plantas Salinas y Tren Salinas divididas entre el período de tiempo del estudio. [41]

2.2.2.8 Tasa de falla (λ)

Es la inversa del Tiempo Medio hasta la Falla (MTTF), dado en fallas/año. [39].

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}$$

Ecuación 2.6. Tiempo Medio hasta falla

$Función\ de\ Densidad\ de\ Falla = \lambda e^{-\lambda t}$, dada en (1/hora)

2.2.2.9 MTTR[9] Tiempo Medio de Reparación (h)

Es el tiempo promedio requerido para hacer una reparación, dado en horas. [39]

$$MTTR = \frac{Tiempo\ de\ reparación\ de\ un\ componente}{Número\ de\ fallas}$$

Ecuación 2.7. Tiempo Medio de Reposición

2.2.2.10 Tasa de Reparación (μ)

Es el número de reparaciones que se hace a un componente para un periodo de tiempo, siendo el inverso del MTTR, dado en número de reparaciones por año. [39]

$$\mu = \frac{1}{MTTR}$$

Ecuación 2.8. Tasa de reparación

$Función\ de\ Densidad\ de\ Reparación = \mu e^{-\mu t}$, dada en (1/hora)

2.2.2.11 Disponibilidad de la Planta

La disponibilidad es la probabilidad de que la planta fotovoltaica opere satisfactoriamente por un período determinado de tiempo, su unidad es adimensional. [39]

$$DISPi = \frac{Número\ de\ horas\ disponibles\ por\ período\ de\ tiempo}{Número\ de\ horas\ en\ el\ período\ de\ tiempo}$$

Ecuación 2.9. Disponibilidad de la Planta

[9] Del inglés: Mean Time To Repair

Dónde:

$DISP_i$: Disponibilidad del componente, equipamiento o unidad i.

Disponibilidad de la planta fotovoltaica.

$$DISP = \frac{\sum_{i=1}^{N}(Número\ de\ horas\ disponibles\ por\ período\ de\ tiempo * Pe_i)}{\sum_{i=1}^{N}(Pe_i * Número\ de\ horas\ en\ el\ período\ de\ tiempo)}$$

Ecuación 2.10. Disponibilidad de la planta fotovoltaica

Dónde:

Pe_i: Potencia efectiva del componente, equipamiento o unidad i.

N: Numero de componentes, equipamientos o unidades considerados.

2.2.2.12 Generación de tiempos de falla con números aleatorios.

Para calcular los índices de confiabilidad con el método de Montecarlo es necesario generar números aleatorios, las tasas calculadas y los estados para el desarrollo de las simulaciones.

Para obtener el tiempo de falla de cada componente:

$$TFi = -\frac{ln(U)}{\lambda}$$

Ecuación Tiempo de falla de cada componente

Dónde:

Tfi: Tiempo de falla para el componente i del sistema

U: Número aleatorio entre 0 1

λ: Tasa de falla del componente del sistema

2.2.2.13 Generación de tiempos de reparación de cada componente

El cálculo de los tiempos de reparación de cada componente se realiza con la siguiente cálculo.

$$TRi = -\frac{ln(U)}{\mu}$$

Ecuación Tiempo de reparación de cada componente

Dónde:

TRi: Tiempo de reparación para el componente i del sistema

U: Número aleatorio entre 0 1

μ: Tasa de falla del componente del sistema

2.2.2.14 Trenes de operación

Al obtener series de tiempos de falla y reparación se pueden formar trenes de operación dónde los tiempos de operación y falla determinan el estado de un componente, Figura 2.4.

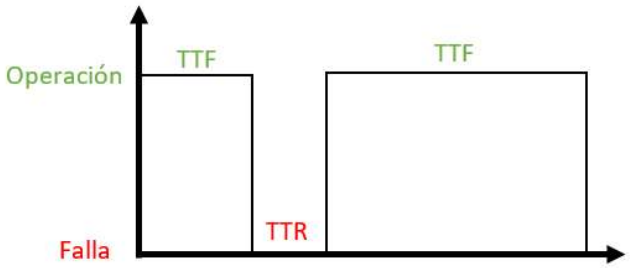


Figura 2.4. Tiempos de falla TTF y reparación TTR.

Elaboración propia

Sirven para evaluar la disponibilidad del sistema en su conjunto con gran eficiencia ya que los trenes de operación de cada componente se pueden superponer en la línea temporal para encontrar intervalos de tiempo con fallas múltiples y las consecuencias de esas coincidencias en el sistema según su dependencia en serie o paralelo para aproximarse más a las condiciones reales. Figura 2.5.

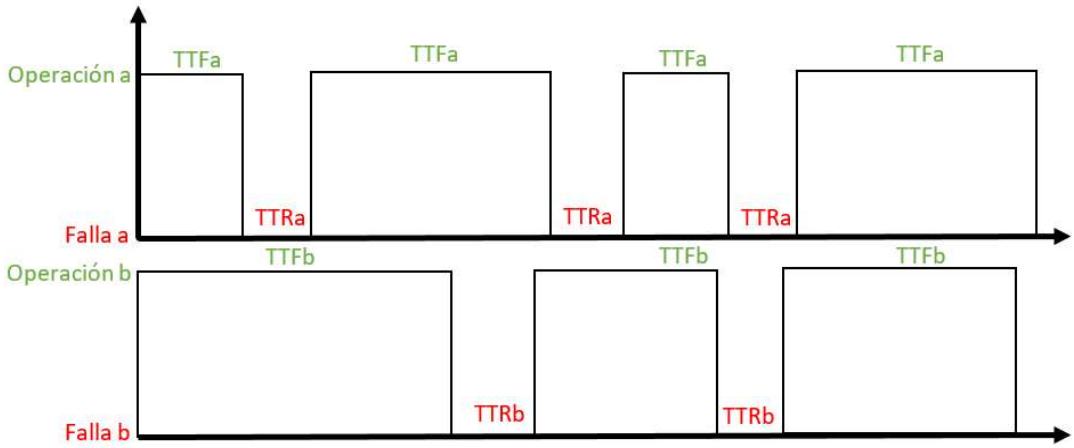


Figura 2.5 Trenes de operación múltiples componentes.

Elaboración propia.

2.2.2.15 VENS Planta

Es el costo promedio por cada Megavatio hora MWh en dólares ($), causado a los consumidores de un sistema eléctrico no consumido ante un corte imprevisto del suministro. Se puede estimar como la disposición media de los consumidores a pagar por evitar cortes en el suministro de la energía eléctrica [39].

2.2.3 Modelación

Con el conocimiento de las conexiones físicas y lógicas de la central fotovoltaica se establece un modelo matemático para los cálculos eléctricos, estadísticos y la simulación de Montecarlo usando Microsoft Excel y @Risk como se detalla a continuación se debe ingresar la información y características de sus componentes.

2.2.3.1 Los Paneles Solares.

Debido a que los paneles solares captan la radiación solar, constituyen la principal entrada para la modelación del sistema

Con la finalidad de estimar la producción Individual de un panel solar, se toma la información del catálogo proporcionada por el fabricante Yingli del modelo YL250P-29b 60 Cell series.

Rendimiento: 90%

Potencia Máxima o nominal: 250 W

Aunque no se utiliza para la simulación el fabricante toma como referencia STC = 1000 W/m^2

La fórmula para calcular la potencia de un panel es:

$$Potencia\ Panel = Potencia\ Maxima * Rendimiento\ (90\%)$$

Ecuación 2.11. Cálculo de Potencia Panel

Potencia Panel = 250W * 0.90 = 225 W

Adicionalmente se especifica el desempeño de los paneles ante el paso del tiempo, relacionando un coeficiente de desgaste al año de uso, a partir del primer año decrece apenas un 0.7% anual, como se muestra en el Tabla 2.2:

Tabla 2.2. Producción de potencia mínima de celda anual.

Período en años desde donde comienza a correr la garantía	Producción de potencia mínima al final de cada año
0	100%
1	97.50%
2	96.80%
3	96.10%
4	95.40%
5	94.70%
6	94.00%
7	93.30%
8	92.60%
9	91.90%
10	91.20%
11	90.50%
12	:89.80%
13	89.10%
14	88.40%
15	87.70%
16	87.00%
17	86.30%
18	85.60%
19	84.90%
20	84.90%
21	83.50%
22	82.80%
23	82.10%
24	81.40%
25	80.70%

Fuente: Yingli Solar [14]
Elaboración propia.

Los paneles solares son elementos que tienen componentes no reparables por lo que al ser recambiados retoman sus características iniciales sin desgaste.

La Insolación es la cantidad promedio de energía acumulada en un día que se puede aprovechar de la radiación solar, dada en (kWh/m^2/día). La insolación durante del día puede ser muy variable, pero se puede definir un rango adecuado para la zona dónde se ha establecido la planta.

La fuente de esta información es el Atlas Solar del Ecuador con fines de generación, esta variable representa la disponibilidad del recurso de la insolación por radiación solar (Ver Figura 2.6).

El promedio de insolación es de 5,1 kWh/m^2/día para Gransolar [42];

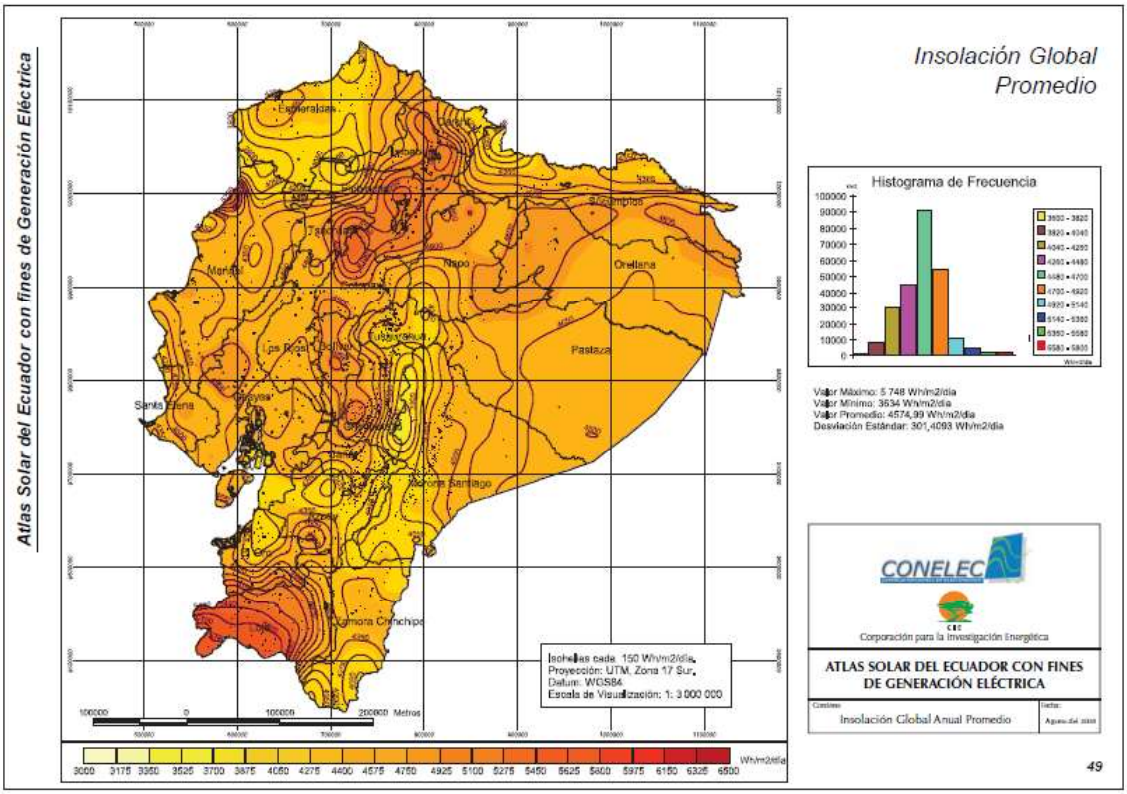


Figura 2.6. Insolación global promedio en Ecuador [42]

2.2.3.2 Los Strings

Cada string tiene un arreglo de veinte paneles conectados en serie, se suma la capacidad producida por cada unidad para obtener el del string completo. Como todos los paneles son iguales, se multiplica el aporte energético calculado para unidad.

En este caso cada string está conformado por 20 paneles solares.

Debido al cableado en Corriente Continua, en los strings, sus respectivas cajas de conexión y sus componentes se consideran las pérdidas de energía, aunque son pequeñas para la modelación en un 2%.

Pérdidas de Conductores y Conexión: 2%

Fórmula para cálculo de Potencia en una unidad String [kW]:

$$Potencia\ String = 20 * Potencia\ Panel * Pérdidas\ de\ Conductores\ y\ Conexión\ (2\%)$$

Ecuación 2.12. Cálculo de Potencia en una unidad de String

Potencia String = 20 * 225W * (100% - 2%) = 4.410 W = 4,410 kW

2.2.3.3 Los Inversores.

Cada Inversor concentra un grupo de ciento veinte strings, que llegan a sus entradas de corriente continua, cuya salida brinda corriente alterna rectificada.

Los arreglos de paneles en paralelo permiten alcanzar los niveles de corriente y voltajes determinados en el diseño.

De la información proporcionada del fabricante: la eficiencia del inversor es de 98,8% [21].

Calculando la potencia para cada uno de los seis Inversores [kW]:

$$Potencia\ Inversor = Potencia\ String * 120 * Eficiencia\ Inversor\ (98{,}8\%)$$

Ecuación 2.13. Cálculo de Energía del Inversor

Potencia Inversor = 4,410 W * 120 * 98,8% = 522,850 W

2.2.3.4 Los Transformadores.

Los transformadores reciben la corriente alterna enviada por los dos inversores correspondientes, elevan los niveles de voltaje al adecuado para su despacho y transporte, por lo que estos aportes energéticos se deben sumar.

Eficiencia Transformador [23]: 98.8%

Sumando el aporte de los dos inversores [kW]:

$$Potencia\ Transformadores = (Potencia\ Inversor\ 1 + Potencia\ Inversor\ 2) * Eficiencia\ del\ transformador\ (98{,}8\ \%)$$

Ecuación 2.144. Potencia Transformadores

Potencia Transformadores = (522.85 kW + 522.85 kW) * 98,8% = 1033,151 kW

2.2.3.5 La central fotovoltaica.

Es el aporte de Tren Salinas sumado al de las dos secciones de Salinas que se entrega a la Red Alpachaca en la salida de sus transformadores para obtener el total de la Central Gransolar..

$$Potencia\ Central = P\ Transformador\ Tren\ Salinas + P\ Salinas\ 1 + P\ Salinas\ 2$$

Ecuación 2.15. Potencia Central

Potencia Central = 1033,151 kW * 3 = 3.099,452 kW = 3,1 MW

En la Figura 2.7, se muestran las celdas con la información ingresada.

Datos de Entrada:							
Información y características de componentes:							
	Unidades		P Máx (kW)	Eficiencia	Rendimiento	Pérdidas	Potencia (kW)
Panel	1		0,25		90%		0,225
String	20	Paneles	5			2%	4,410
Inversor	120	Strings	600	99%			522,850
Transformador	2	Inversores	1200	99%			1033,151
Central	3	Transformadores	3600				3099,452

Figura 2.7. Información y características de componentes.

Elaboración propia.

2.2.3.6 Fechas de operación e Información estadística

A partir de la información histórica recolectada y organizada de los principales componentes del sistema como lo son los inversores y transformadores, se obtiene el número de fallas y duración de las mismas para calcular los índices de confiabilidad como se detalló anteriormente.

De la misma forma se considera los intervalos de tiempo del cual procede la información, en este caso tres años a partir de Julio de 2014, se detalla en la Figura 2.8.

Fechas de Operación:	Inicio: 15/11/2014	Fin: 14/11/2017	Horas del periodo: 26280

Información estadistica:									
Equipo	Número Fallas / Periodo	Tiempo Total Falla (h)	MTTF Tiempo Medio hasta la Falla (h)	Tasa de falla λ	MTTR Tiempo Medio de Reposición (h)	Tasa de Reparación μ	DI Duración de Interrupciones Promedio (h)	FI Frecuencia de Interrrupciones	Disponibilidad del Equipo
Inversor 1 Tren Salina	11	18,08333333	2387,45	0,000418857471	1,23	0,811059907834	1,64	11,00757434	0,999311898
Inversor 2 Tren Salina	9	24	2917,33	0,000342778793	2,00	0,500000000000	2,67	9,008226691	0,999086758
Inversor Maestro 1 Sa	7	15,75	3752,04	0,000266521983	1,69	0,592592592593	2,25	7,004197721	0,999400685
Inversor Maestro 2 Sa	19	31,25	1381,51	0,000723843993	1,23	0,810666666667	1,64	19,02262012	0,998810883
Inversor Esclavo 1 Sali	8	17,25	3282,84	0,000304613949	1,62	0,618357487923	2,16	8,005254591	0,999343607
Inversor Esclavo 2 Sali	8	16,25	3282,97	0,000304602351	1,52	0,656410256410	2,03	8,004949788	0,999381659
Transformador Tren S	2	10,5	13134,75	0,000076133920	3,94	0,253968253968	5,25	2,000799406	0,999600457
Transformador Maest	2	10,5	13134,75	0,000076133920	3,94	0,253968253968	5,25	2,000799406	0,999600457
Transformador Esclav	2	10,5	13134,75	0,000076133920	3,94	0,253968253968	5,25	2,000799406	0,999600457

Figura 2.8. Fechas de operación e Información estadística
Elaboración propia.

2.2.3.7 Formulación del Método de Montecarlo.

En base a la información estadística procesada se procede a calcular el tiempo de falla y tiempo de reparación para lo cual son muy importantes las tasas de falla y reparación.

Para las simulaciones del Método de Montecarlo se ha usado @Risk ya que facilita la composición de las funciones a usar indicadas en la Figura 2.9.

Formulación de Método de Montecarlo:						
Equipo	Tiempo de falla tFi (h)	Tiempo de reparación tRi (h)	Disponibilidad	# Aleatorio	Primera falla (h)	Marcha (1) / Paro (0)
Inversor 1 Tren Salina	1654,852	1,732867951	0,998953952	0,97	73,32	1
Inversor 2 Tren Salina	2022,141	1,732867951	0,999143787	0,33	3240,32	1
Inversor Maestro 1 Sa	2600,713	1,732867951	0,999334139	0,82	739,69	1
Inversor Maestro 2 Sa	957,592	1,732867951	0,998193659	0,68	525,70	1
Inversor Esclavo 1 Sali	2275,494	1,732867951	0,999239045	0,08	8265,33	1
Inversor Esclavo 2 Sali	2275,581	1,732867951	0,999239074	0,80	734,10	1
Transformador Tren S	9104,315	3,465735903	0,999619475	0,89	1507,18	1
Transformador Maest	9104,315	3,465735903	0,999619475	0,68	5038,87	1
Transformador Esclav	9104,315	3,465735903	0,999619475	0,57	7460,78	1

Figura 2.9. Formulación de método de Montecarlo

Elaboración propia.

Debido a la naturaleza del método de Montecarlo es necesario crear números aleatorios comprendidos entre cero y uno, mediante el uso de una distribución uniforme creamos números aleatorios para introducirlos en las fórmulas que determinan el tiempo de falla y reparación ver la Figura 2.10.

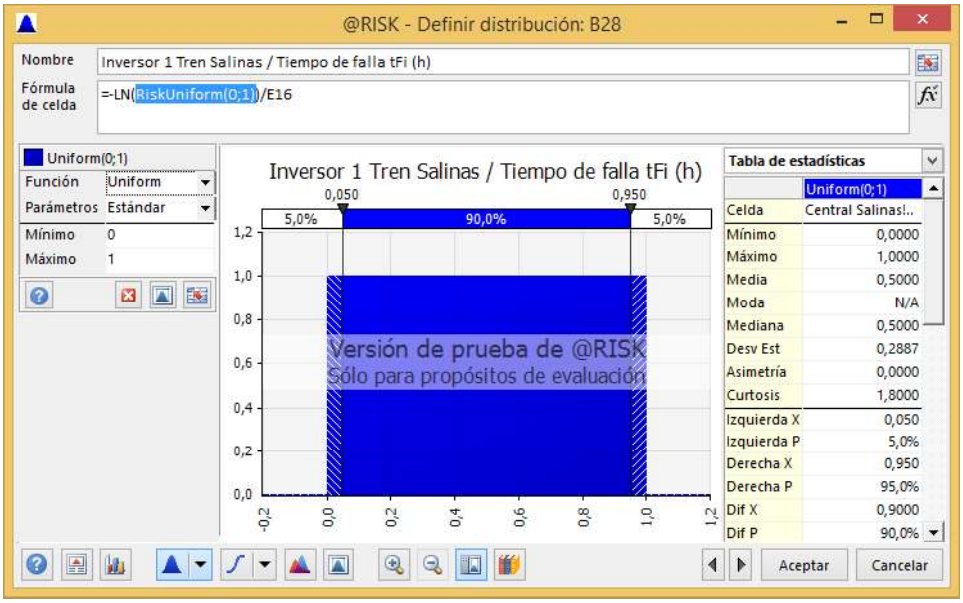


Figura 2.10. Definición de función uniforme

Elaboración propia.

Primera falla

Se genera un número aleatorio para cada componente mediante la función "=ALEATORIO()", en Excel cada vez que se modifique el documento se renovarán los números aleatorios por lo que se debe almacenar los datos con fines de estudio.

La función de disponibilidad no se relaciona con los valores obtenidos anteriormente para cada componente, es el Promedio de las iteraciones de las funciones del tiempo de falla tFi y de reparación tRi, adicionalmente se introduce una Variable discreta M para cada componente en Marcha M=1 o Paro M=0 con la finalidad de tener mejores posibilidades en el análisis de sensibilidad y otros casos.

La función de disponibilidad se obtiene:

$$Disponibilidad = \frac{\sum_0^i \frac{tFi}{tFi + tRi}}{i} * M$$

Ecuación 2.16. Función de Disponibilidad

La simulación está programada para 1000 iteraciones, por esa razón i toma como máximo valor 1000. La función compuesta tiene carácter logarítmico y refleja una

mayor probabilidad de que los valores de disponibilidad obtenidos se asemejen a los calculados anteriormente.

La modelación de Montecarlo reduce los errores y se aproxima de mejor forma a una solución real en la salida del sistema, ver Figura 2.11.

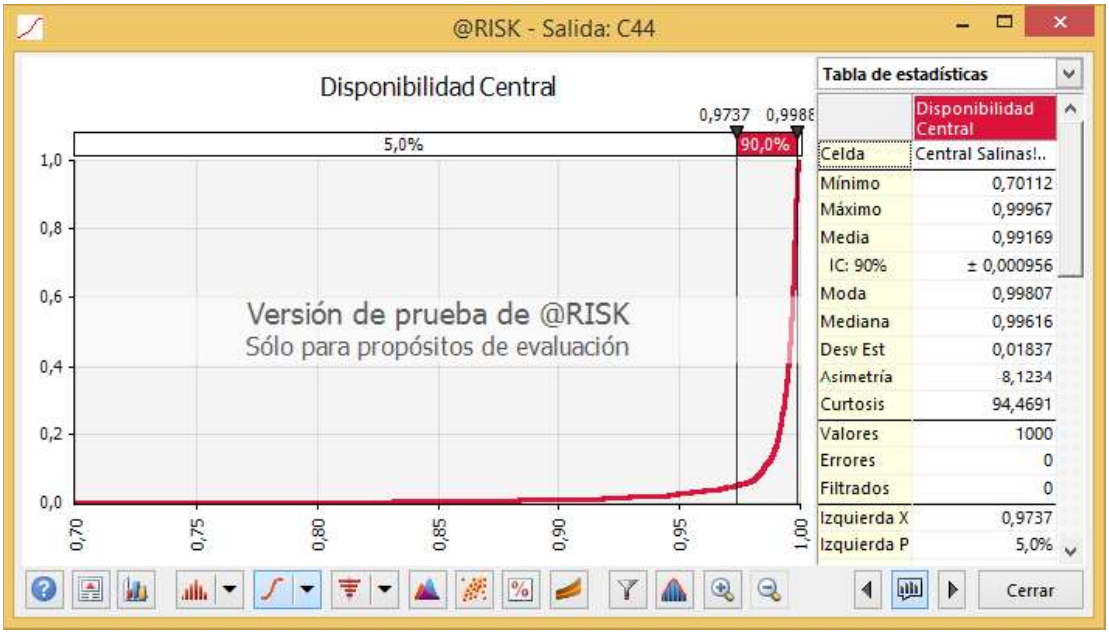


Figura 2.11. Función de Disponibilidad

Elaboración propia.

Las funciones de disponibilidad de cada componente sirven para calcular la Disponibilidad al tomar el valor Medio de la tabla estadística de las salidas o la de la disponibilidad del sistema completo.

Para obtener la disponibilidad de la central fotovoltaica se debe operar los valores de sus componentes considerando las probabilidades de operación para los tramos de los componentes que tengan conexión en serie o paralelo.

Las disponibilidades que llegan a un componente (Paralelo) se promedian y las que están en serie se multiplican

En cada par de inversores al llegar al transformador:

$$Dinv_i = \frac{Dinv_{i1} + Dinv_{i2}}{2}$$

Ecuación 2.17. Función de Disponibilidad Inversores

En cada transformador:

$$Dtrafo_j = Dinv_i + Dtrafo_{ij}$$

Ecuación 2.18. Función de Disponibilidad transformadores

En la central completa:

$$Dcentral = \frac{Dtrafo_1 + Dtrafo_2 + Dtrafo_3}{3}$$

Ecuación 2.19. Función de Disponibilidad Central

2.2.3.8 Salida de datos

Con la disponibilidad de la central ya se pueden obtener los datos de salida como se ve en la Figura 2.12.

Salida de Datos:	
Aplicación Teoría de Confiabilidad:	
Inversores	Trafo serie
0,9990	0,998668706
0,9988	0,998383844
0,9992	0,998858824
Disponibilidad Central	0,9986371248946

Figura 2.12. Salida de datos, disponibilidad completa de la central.

Elaboración propia

La función de salida de la disponibilidad se muestra a continuación en la Figura 2.13.

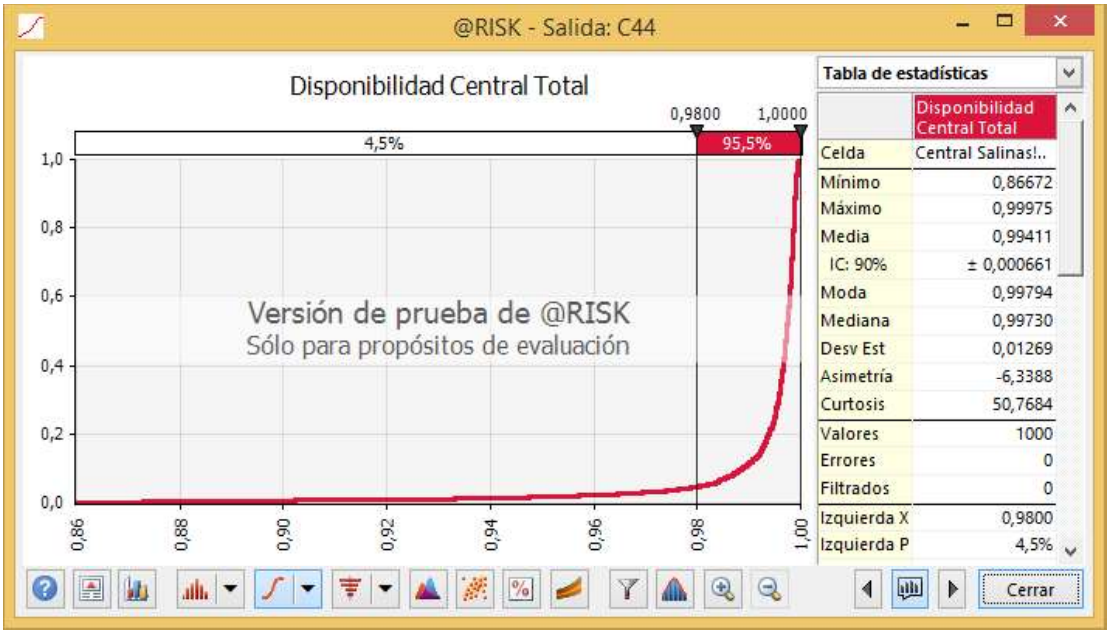


Figura 2.13. Función de salida de disponibilidad de la central fotovoltaica.

Elaboración propia.

2.2.3.9 Resultados Energéticos y económicos

A partir de la disponibilidad de la central fotovoltaica se calculan los índices de confiabilidad restantes mostrados en la figura 2.14.

Resultados Energéticos y Económicos								
Potencia Central Salinas	3096,72 (kW)	3,10 (MW)						
Rendimiento Central	86,02%							
Energía por periodo	6781809,24 (kW/h)	6,781809239 (MW/h)		Tiempo	365 días		Horas Hábiles/día	6
Venta por periodo	2712723,70 $	Costo kW/h	0,40 $					
VENS	2396,63 $	Tiempo	365 días					

Figura 2.14.

Elaboración propia

La potencia real de la central Salinas se obtiene al multiplicar de disponibilidad de la central y evaluando su media en la salida.

El rendimiento de la central se obtiene de la relación entre la potencia Calculada para la central y la potencia real obtenida.

La energía por periodo se calcula al multiplicar la potencia de la central por las horas hábiles diarias en las que recibe mejor radiación la central (6h) y el periodo en días.

Las ventas por periodo se calculan con la energía por periodo multiplicando al costo fijado para el kW/h (0,40 USD).

El VENS se obtiene de diferencia entre la potencia real y calculada previamente, multiplicarla por el costo del kW/h y el periodo de tiempo en horas,

2.2.3.10 Análisis de Sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad en el presente trabajo se propone realizar modificaciones drásticas en la disponibilidad de inversores y transformadores, así como variaciones más pequeñas en las tasas de falla y reparación con la finalidad de evaluar por medio de dichos escenarios la conveniencia de poner énfasis o reducir el cuidado de los equipos por medio de las tareas de mantenimiento.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos están analizados según el orden en que se ha realizado el estudio. Primero, se muestran los índices de confiabilidad que se calculan previamente a la simulación de Montecarlo y posteriormente, se presenta las simulaciones con el fin de probar el modelo propuesto y poder analizar posibles escenarios.

3.1. Índices de confiabilidad

Los índices de confiabilidad obtenidos en Microsoft Excel con la metodología establecida están organizados considerando los tres años que se dispone de información histórica de la planta fotovoltaica.

Los archivos que recopilan y organizan la información se encuentran en anexos digitales, así como la herramienta diseñada para la simulación de los posibles escenarios.

Tabla 3.1. Índices de confiabilidad para los componentes de la planta fotovoltaica

Equipo	Número Fallas / Periodo	Tiempo Total Falla (h)	MTTF Tiempo Medio hasta la Falla (h)	Tasa de falla λ	MTTR Tiempo Medio de Reposición (h)	Tasa de Reparación μ	DI Duración de Interrupciones Promedio (h)	FI Frecuencia de Interrupciones	Disponibilidad del Equipo
Inversor 1 Tren Salinas	11	18,08333333	2387,45	0,000418857471	1,23	0,811059907834	1,64	11,00757434	0,999311898
Inversor 2 Tren Salinas	9	24	2917,33	0,000342778793	2,00	0,500000000000	2,67	9,008226691	0,999086758
Inversor Maestro 1 Salinas	7	15,75	3752,04	0,000266521983	1,69	0,592592592593	2,25	7,004197721	0,999400685
Inversor Maestro 2 Salinas	19	31,25	1381,51	0,000723843993	1,23	0,810666666667	1,64	19,02262012	0,998810883
Inversor Esclavo 1 Salinas	8	17,25	3282,84	0,000304613949	1,62	0,618357487923	2,16	8,005254591	0,999343607
Inversor Esclavo 2 Salinas	8	16,25	3282,97	0,000304602351	1,52	0,656410256410	2,03	8,004949788	0,999381659
Transformador Tren Salinas	2	10,5	13134,75	0,000076133920	3,94	0,253968253968	5,25	2,000799406	0,999600457
Transformador Maestro Salinas	2	10,5	13134,75	0,000076133920	3,94	0,253968253968	5,25	2,000799406	0,999600457
Transformador Esclavo Salinas	2	10,5	13134,75	0,000076133920	3,94	0,253968253968	5,25	2,000799406	0,999600457

Fuente: Central Gransolar S.A. [17]
Elaboración propia.

Los equipos más importantes de la central son los inversores y transformadores por lo que se centrará el análisis de sus operaciones en los mismos.

Se analizará los índices obtenidos con ayuda de gráficos y la información proporcionada por el personal de Gran solar.

Figura 3.1 Comparativo de fallas de inversores y transformadores [17]

Análisis e Interpretación:

En referencia al número de fallas que se presentaron en los inversores (Figura 3.1), éstas han se puede apreciar que el inversor 4 correspondiente a Maestro 2 Salinas es el más fallado, por 19 ocasiones.

Los transformadores son equipos de alta confiabilidad en relación a otros componentes del sistema.

En general los equipos han tenido buen desempeño y las fallas en los primeros años se justifican con la curva de la bañera, a medida que transcurra el tiempo se logrará una madurez debido a la experiencia de los operarios, las soluciones a contingencias óptimas propias del aprendizaje y las labores de mantenimiento.

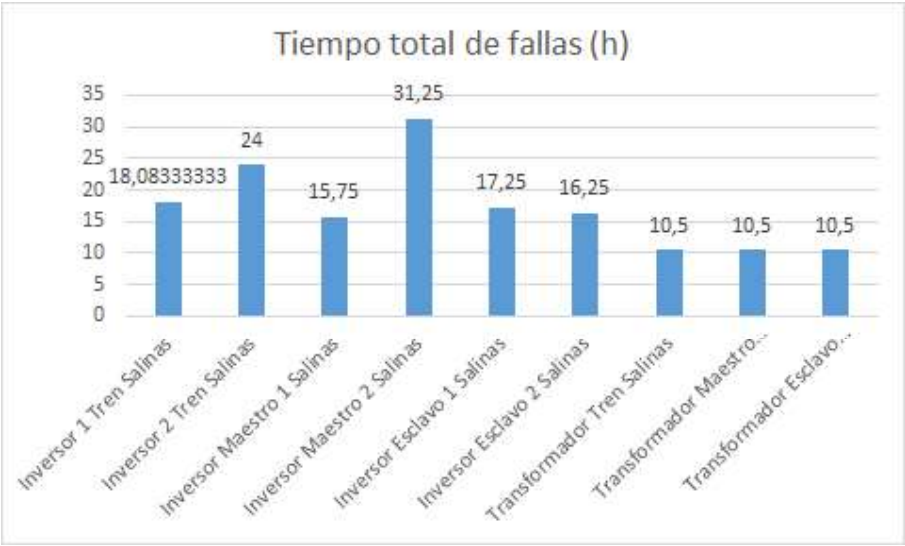


Figura 3.2. Comparativo del tiempo total de fallas de inversores y transformadores [17]

Análisis e Interpretación:

El equipo que ha fallado por más tiempo también es el inversor de Maestro 2 Salinas con más de 30 horas para el periodo de tres años como se aprecia en la Figura 3.2.

Las fallas de los inversores comenzaron el primer año y aumentaron en el siguiente año, ajustándose para el tercer año.

A diferencia de los transformadores que no tuvieron fallas el primer año y una sola en los años siguientes por agentes externos.

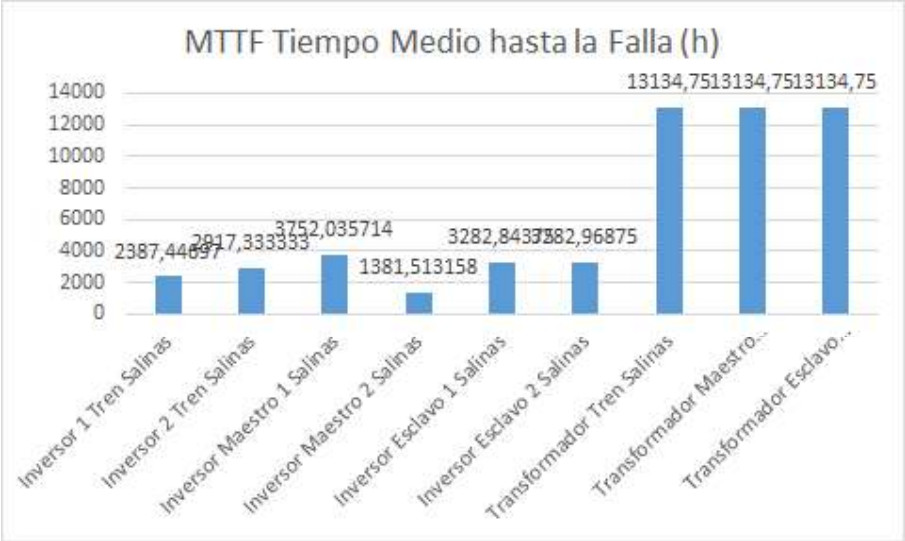


Figura 3.3. Comparativo de MTTF Tiempo Medio hasta la falla (h) [17]

Análisis e Interpretación:

Los transformadores presentan estadísticamente más confiabilidad por lo que el tiempo medio hasta la falla es mayor en comparación a los inversores, Figura 3.3.

El inversor Maestro 1 Salinas es el que mejor comportamiento muestra, lo cual es favorable para compensar las deficiencias del inversor Maestro 2 Salinas conectado al mismo transformador.

Figura 3.4.Comparativo tasas de falla [17]

Análisis e Interpretación:

Los inversores más estables son de Esclavo Salinas si consideramos las conexiones en paralelo, se debe poner particular atención al Inversor Maestro 2 Salinas ya que presenta la mayor tasa de falla, lo cual incide en la confiabilidad total de la central fotovoltaica. Esta tasa llega a duplicar a la mostrada para la mayoría de equipos similares.

Las tasas de falla definen en gran parte lo que sucederá en las simulaciones de Montecarlo, por lo que la información de la Figura 3.4 debe ser considerada para análisis futuro.

Figura 3.5. Comparativo de tasa de reparación [17]

Análisis e Interpretación:

Al menos uno de los dos inversores indicados en la Figura 3.5 se conectan a cada transformador presentan tasas de reparación elevadas en comparación a sus componentes en paralelo.

Los transformadores muestran buenos índices de confiabilidad en todos los parámetros.

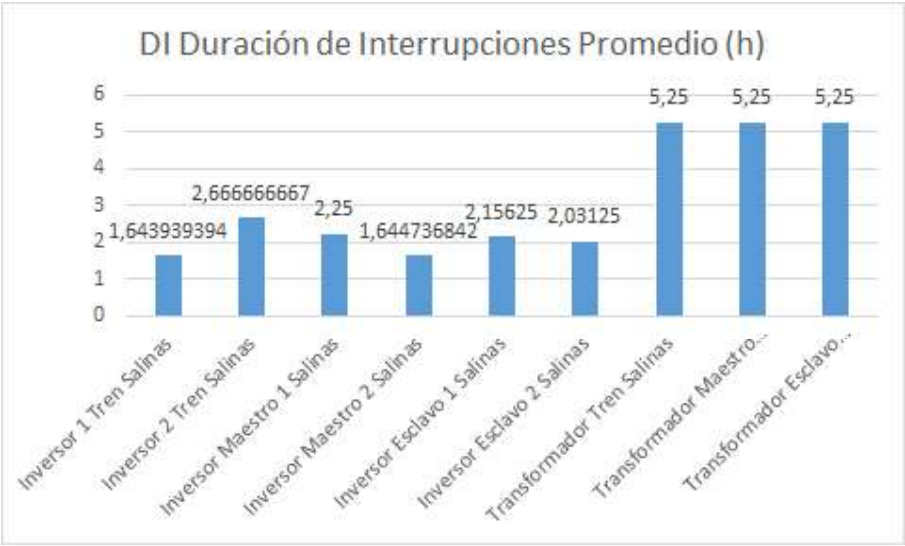


Figura 3.6. Comparativo de DI Duración de Interrupciones promedio [17]

Análisis e Interpretación:

Los transformadores tienen un valor más elevado de interrupciones promedio, debido a la reconexión del sistema y que están aguas abajo otros equipos y en caso de fallas externas pierde disponibilidad, Figura 3.6.

Los datos arrojados no representan alertas importantes debido a la alta confiabilidad de los equipos.

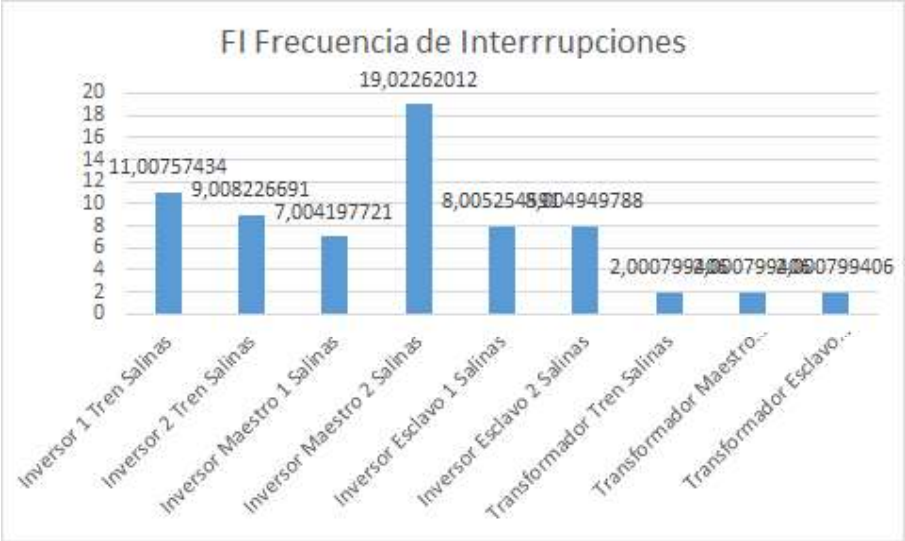


Figura 3.7. Comparativo de Frecuencia de Interrupciones [17]

Análisis e Interpretación:

El inversor Maestro 2 Salinas tiene la frecuencia de interrupciones más alta de los equipos evaluados, seguido del inversor 1 Tren Salinas. Los transformadores sin duda son los equipos que menos fallan en la central fotovoltaica, Figura 3.7.

Figura 3.8. Comparativo Disponibilidad del equipo

Análisis e Interpretación:

Entre los inversores el de mayor disponibilidad es Maestro 1 Salinas, seguido de Esclavo 2 Salinas. Incluso el equipo que ha presentado más inconvenientes Maestro 2 Salinas presenta un índice de disponibilidad alto como se aprecia en la Figura 3.8.

Los transformadores son los que se acercan más a la unidad en cuanto a disponibilidad, bajo estas circunstancias la disponibilidad total de la central se definirá por la operación de los inversores.

Este índice de disponibilidad no es producto de las simulaciones de Montecarlo.

3.2.Simulaciones

El modelo de la planta fotovoltaica utilizado para aplicar las simulaciones del método de Montecarlo ha sido alimentado con toda la información necesaria para ejecutar las tareas asignadas.

El software @Risk integrado a Microsoft Excel 2013, facilita observar los resultados obtenidos, ofrece gráficos que posibilitan el análisis y un informe de los parámetros relevantes de la salida del sistema.

En las corridas de simulaciones el sistema está cargado con los datos históricos de la planta fotovoltaica, la simulación se generó con 1000 iteraciones.

Cabe aclarar que la parte eléctrica del modelo opera con valores de Potencia, no de Energía para evitar confusiones.

A continuación, se presentan casos de estudio ejemplo de operación de la planta fotovoltaica.

3.2.1Ejemplo del sistema en condiciones normales

Para el sistema de la figura 3.9 en condiciones normales se considera un periodo de tiempo de 3 años, con la información histórica recogida sin alteraciones.

Modelación Sistema Planta Fotovoltaica Salinas

Fechas de Operación:	Inicio: 15/11/2014	Fin: 14/11/2017	Horas del periodo: 26280

Datos de Entrada:

Información y características de componentes:

	Unidades		P Máx (kW)	Eficiencia	Rendimiento	Pérdidas	Potencia (kW)
Panel	1		0,25		90%		0,225
String	20	Paneles	5			2%	4,410
Inversor	120	Strings	600	99%			522,850
Transformador	2	Inversores	1200	99%			1033,151
Central	3	Transformadores	3600				3099,452

Información estadistica:

Equipo	Número Fallas / Periodo	Tiempo Total Falla (h)	MTTF Tiempo Medio hasta la Falla (h)	Tasa de falla λ	MTTR Tiempo Medio de Reposición (h)	Tasa de Reparación μ	DI Duración de Interrupciones Promedio (h)	FI Frecuencia de Interrrupciones	Disponibilidad del Equipo
Inversor 1 Tren Salina	11	18,08333333	2387,45	0,000418857471	1,23	0,811059907834	1,64	11,00757434	0,999311898
Inversor 2 Tren Salina	9	24	2917,33	0,000342778793	2,00	0,500000000000	2,67	9,008226691	0,999086758
Inversor Maestro 1 Sa	7	15,75	3752,04	0,000266521983	1,69	0,592592592593	2,25	7,004197721	0,999400685
Inversor Maestro 2 Sa	19	31,25	1381,51	0,000723843993	1,23	0,810666666667	1,64	19,02262012	0,998810883
Inversor Esclavo 1 Sali	8	17,25	3282,84	0,000304613949	1,62	0,618357487923	2,16	8,005254591	0,999343607
Inversor Esclavo 2 Sali	8	16,25	3282,97	0,000304602351	1,52	0,656410256410	2,03	8,004949788	0,999381659
Transformador Tren Sa	2	10,5	13134,75	0,000076133920	3,94	0,253968253968	5,25	2,000799406	0,999600457
Transformador Maest	2	10,5	13134,75	0,000076133920	3,94	0,253968253968	5,25	2,000799406	0,999600457
Transformador Esclav	2	10,5	13134,75	0,000076133920	3,94	0,253968253968	5,25	2,000799406	0,999600457

Formulación de Método de Montecarlo:

Equipo	Tiempo de falla tFi (h)	Tiempo de reparación tRi (h)	Disponibilidad	# Aleatorio	Primera falla (h)	Marcha (1) / Paro (0)
Inversor 1 Tren Salina	1654,852	0,854618967	0,999483834	0,85	382,06	1
Inversor 2 Tren Salina	2022,141	1,386294361	0,999314912	0,18	5046,54	1
Inversor Maestro 1 Sa	2600,713	1,169685867	0,999550446	0,23	5582,97	1
Inversor Maestro 2 Sa	957,592	0,855033529	0,999107897	0,52	891,31	1
Inversor Esclavo 1 Sali	2275,494	1,120948956	0,999507625	0,94	218,79	1
Inversor Esclavo 2 Sali	2275,581	1,055966408	0,999536173	0,37	3235,09	1
Transformador Tren Sa	9104,315	2,729267023	0,999700313	0,09	31253,87	1
Transformador Maest	9104,315	2,729267023	0,999700313	0,58	7042,63	1
Transformador Esclav	9104,315	2,729267023	0,999700313	0,27	17356,97	1

Salida de Datos:

Aplicación Teoría de Confiabilidad:

	Inversores	Trafo serie
	0,9994	0,999099866
	0,9993	0,999029685
	0,9995	0,999222354
Disponibilidad Central		0,9991173017937

Resultados Energéticos y Económicos

Potencia Central Salinas	3096,72	(kW)	3,10	(MW)					
Rendimiento Central	86,02%								
Energía por periodo	6781809,24	(kW/h)	6,781809239	(MW/h)	Tiempo	365	días	Horas Hábiles/día	6
Venta por periodo	2712723,70	$	Costo kW/h	0,40	$				
VENS	2396,63	$	Tiempo	365	días				

Figura 3.9. Sistema en condiciones normales

Se puede visualizar la salida de sensibilidad total de la central en la figura 3.10

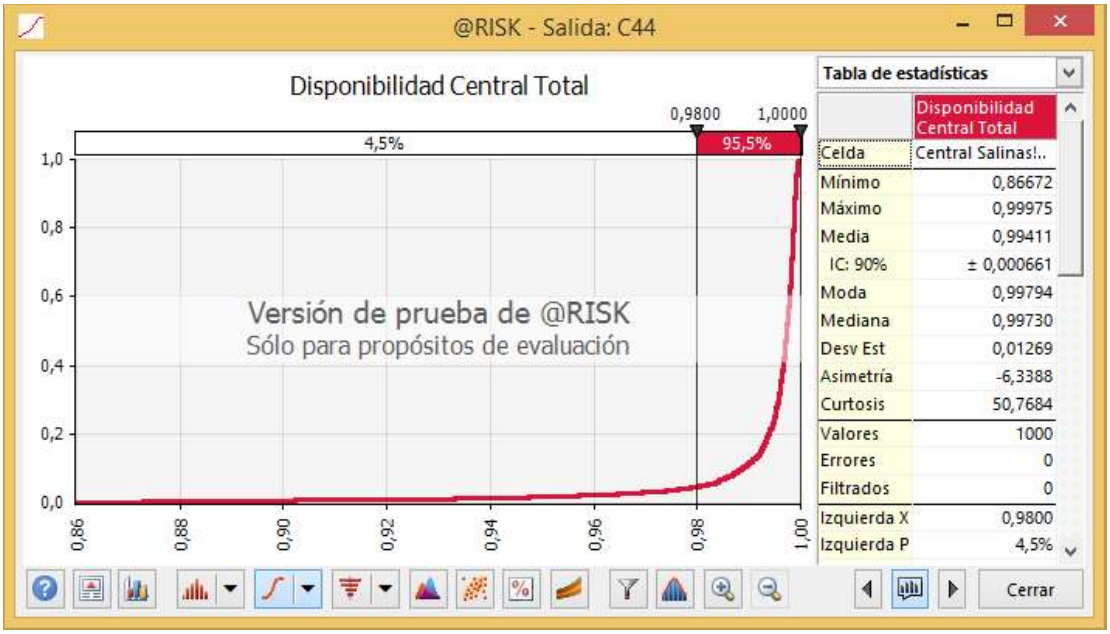


Figura 3.10 Disponibilidad total de la Central.

El valor medio en la tabla de estadísticas es 0.99411 y existe un 95,5% de posibilidades de que la disponibilidad sea mayor o igual al 98%.

En cuanto a la potencia real de la central se puede apreciar en la Figura 3.11, que dicha salida tiene una media superior a 3 MW y tiene un 90% de probabilidades de superar dicha potencia entregada en las condiciones de trabajo actuales.

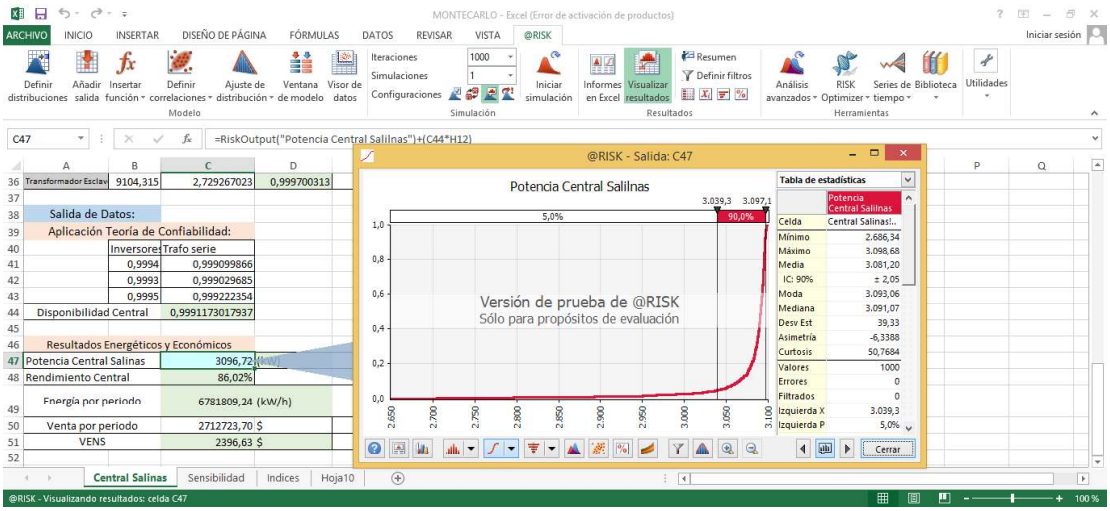


Figura 3.11. Potencia Real en la Simulación.

En cuanto a los valores del VENS son muy amplios en cuanto a lo simulado el mínimo $679,58, máximo $361.883,42 y media $15.991,56 que son

relativamente pequeños en relación las ventas que bordean los 2,7 millones de dólares anuales.

Se puede concluir que las condiciones son favorables al revisar los índices de confiabilidad y la rentabilidad que presenta.

3.2.2 Análisis de sensibilidad del sistema, reduciendo tasas de falla y reparación

Al manipular directamente los valores de las tasas de falla y reducción para el análisis de sensibilidad se puede verificar las siguientes salidas mostradas en la figura 3.12.

Entradas modificadas para el análisis de sensibilidad							
				Baja			
Equipo	Tasa de falla λ	Tasa de Reparación μ		Tasa de falla λ		Tasa de Reparación μ	
Inversor 1 Tren Salinas	0,000418857	0,811059908		0,0002		0,4	
Inversor 2 Tren Salinas	0,000342779	0,5		0,0002		0,4	
Inversor Maestro 1 Salinas	0,000266522	0,592592593		0,0002		0,4	
Inversor Maestro 2 Salinas	0,000723844	0,810666667		0,0002		0,4	
Inversor Esclavo 1 Salinas	0,000304614	0,618357488		0,0002		0,4	
Inversor Esclavo 2 Salinas	0,000304602	0,656410256		0,0002		0,4	
Transformador Tren Salinas	7,61339E-05	0,253968254		0,00005		0,2	
Transformador Maestro Salinas	7,61339E-05	0,253968254		0,00005		0,2	
Transformador Esclavo Salinas	7,61339E-05	0,253968254		0,00005		0,2	
Salidas del sistema para comparación							
Disponibilidad Central		0,999117302		0,99944423		0,998637125	
Potencia Central Salinas		3096,716548	(kW)	3097,72985	(kW)	3095,228262	(kW)
Rendimiento Central		0,860199041		0,86048052		0,859785628	
Energía por periodo		6781809,239	(kW/h)	6784028,38	(kW/h)	6778549,894	(kW/h)
Venta por periodo		2712723,696	$	2713611,35	$	2711419,958	$
VENS		2396,631843	$	1508,97466	$	3700,369903	$

Figura 3.12. Análisis de sensibilidad

Al bajar los valores de la tasa de falla se logra recrear los efectos positivos del mantenimiento en la central fotovoltaica, se logra apreciar un mejor rendimiento, con mayor disponibilidad, beneficios económicos por ventas, incremento en el despacho de energía y menor VENS, por lo que invertir para reducir el número de fallas y su duración es rentable.

Por lo contrario al bajar la tasa de reparación los resultados son adversos, con menor disponibilidad de la central fotovoltaica, mayor VENS ya que el despacho disminuye, las pérdidas económicas pueden ser significativas si se produce una falla prolongada o si componentes importantes fallan frecuentemente.

3.2.3 Análisis de sensibilidad del sistema, con la salida de componentes importantes

Para el escenario que se ilustra en la Figura 3.13 se tiene alteraciones directas con la salida de operación del Inversor 1 Tren Salinas y el Transformador Maestro Salinas, con la finalidad de simular fallas graves que afecten fuertemente a la disponibilidad de la planta.

Formulación de Método de Montecarlo:

Equipo	Tiempo de falla tFi (h)	Tiempo de reparación tRi (h)	Disponibilidad	# Aleatorio	Primera falla (h)	Marcha (1) / Paro (0)
Inversor 1 Tren Salina	1654,852	0,854618967	0	0,38	2285,08	0
Inversor 2 Tren Salina	2022,141	1,386294361	0,999314912	0,27	3839,56	1
Inversor Maestro 1 Sa	2600,713	1,169685867	0,999550446	0,41	3349,05	1
Inversor Maestro 2 Sa	957,592	0,855033529	0,999107897	0,65	585,66	1
Inversor Esclavo 1 Sali	2275,494	1,120948956	0,999507625	0,49	2331,16	1
Inversor Esclavo 2 Sali	2275,581	1,055966408	0,999536173	0,54	2004,68	1
Transformador Tren Sa	9104,315	2,729267023	0,999700313	0,37	12906,83	1
Transformador Maest	9104,315	2,729267023	0	0,09	31798,15	0
Transformador Esclav	9104,315	2,729267023	0,999700313	0,05	39551,41	1

Salida de Datos:

Aplicación Teoría de Confiabilidad:

	Inversores	Trafo serie
	0,4997	0,499507715
	0,9993	0
	0,9995	0,999222354
Disponibilidad Central		0,4995766898035

Resultados Energéticos y Económicos

Potencia Central Salinas	1548,41	(kW)	1,55	(MW)			
Rendimiento Central	43,01%						
Energía por periodo	3391027,06	(kW/h)	3,391027064	(MW/h)	Tiempo	365	días
Venta por periodo	1356410,83	$	Costo kW/h	0,40	$		
VENS	1358709,50	$	Tiempo	365	días		

Figura 3.13. Sistema con falla en un transformador y un inversor

Las salidas del sistema decaen notablemente, y se puede apreciar que la disponibilidad de la central como conjunto está influenciada fuertemente por los componentes analizados, en la Figura 3.14 se puede apreciar la simulación de la salida de la disponibilidad de la central que decae aproximadamente a la mitad en comparación a las condiciones normales al igual que las variables eléctricas y económicas.

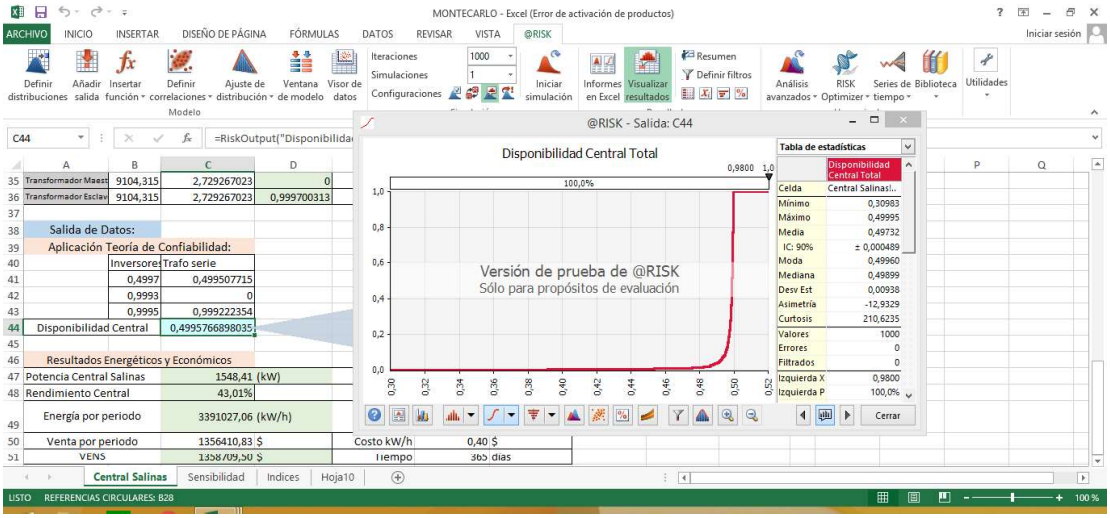


Figura 3.14. Simulación salida de disponibilidad central total.

Es importante relacionar el declive de los índices de confiabilidad como consecuencia de descuidos o una planificación de mantenimiento no apropiada.

3.3. Análisis de frecuencia de fallas e incidencias en la línea de tiempo para planificación de mantenimiento

El tamaño de la planta fotovoltaica es determinante para el esquema de mantenimiento y su organización en la línea de tiempo. Factores como las condiciones ambientales o de logística pueden forzar pequeñas modificaciones. Se deben cubrir todas las actividades pertinentes.

3.3.1Transformadores e Inversores

Considerando la línea de tiempo de las incidencias registradas se elaboran las siguientes figuras:

A continuación, en la Figura 3.15 se puede observar que los inversores en los meses de mayo y julio han presentado incidencias durante los últimos tres años como patrón repetitivo. Igualmente, los transformadores presentaron incidencias para comienzos del segundo semestre de los dos últimos años.

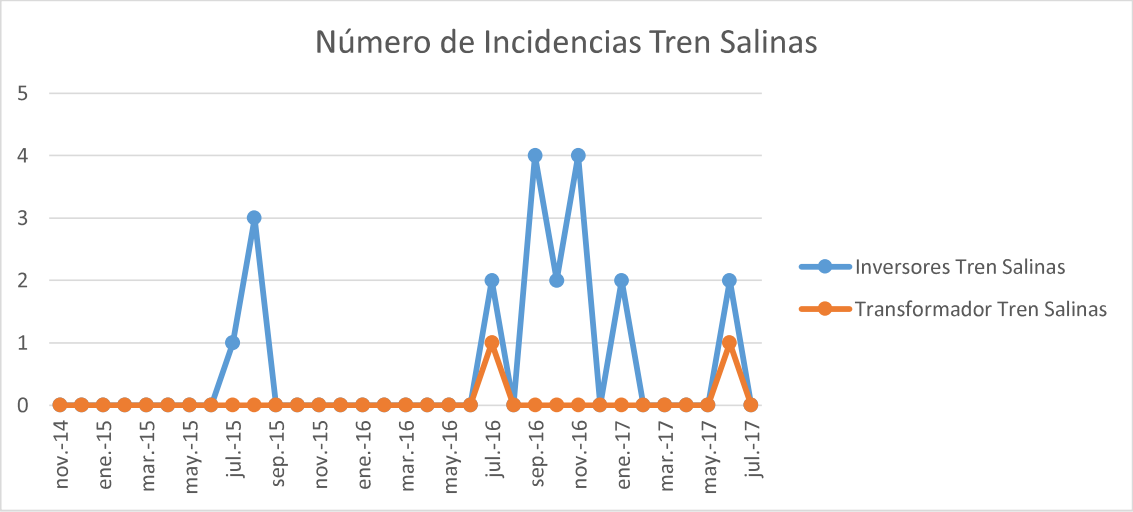


Figura 3.15. Incidencias Tren Salinas. [17]

A continuación, en la Figura 3.16 se puede observar que los inversores entre los meses de julio hasta enero del siguiente año han presentado incidencias durante para el mismo período, como patrón repetitivo. Igualmente, los transformadores presentaron incidencias para comienzos del segundo semestre de los dos últimos años.

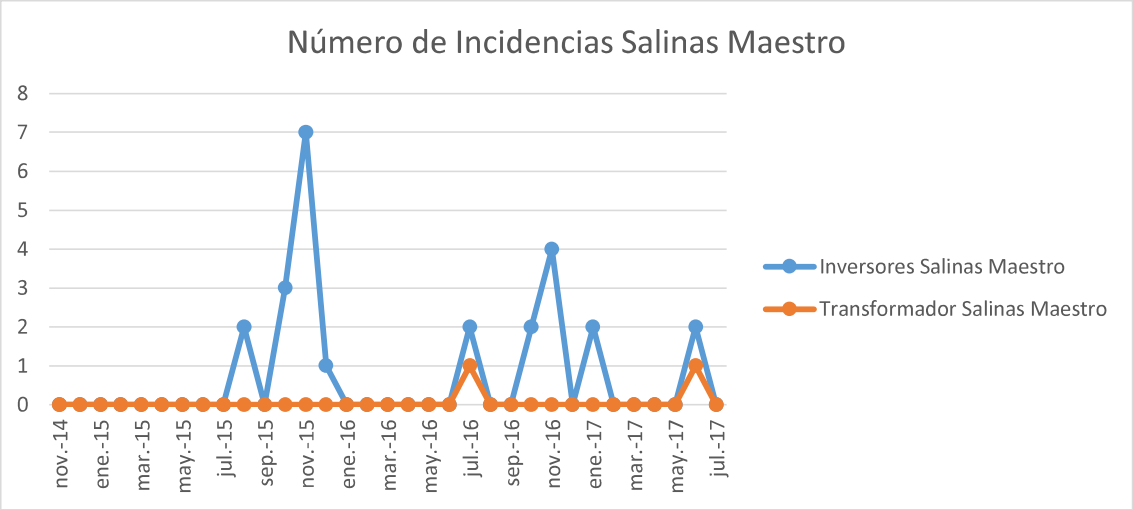


Figura 3.16. Incidencias Salinas Maestro. [17]

A continuación, en la Figura 3.17 se puede observar que los inversores entre los meses de mayo hasta enero del siguiente año han presentado incidencias durante para el mismo período, como patrón repetitivo. Igualmente, los transformadores presentaron incidencias para comienzos del segundo semestre de los dos últimos años.

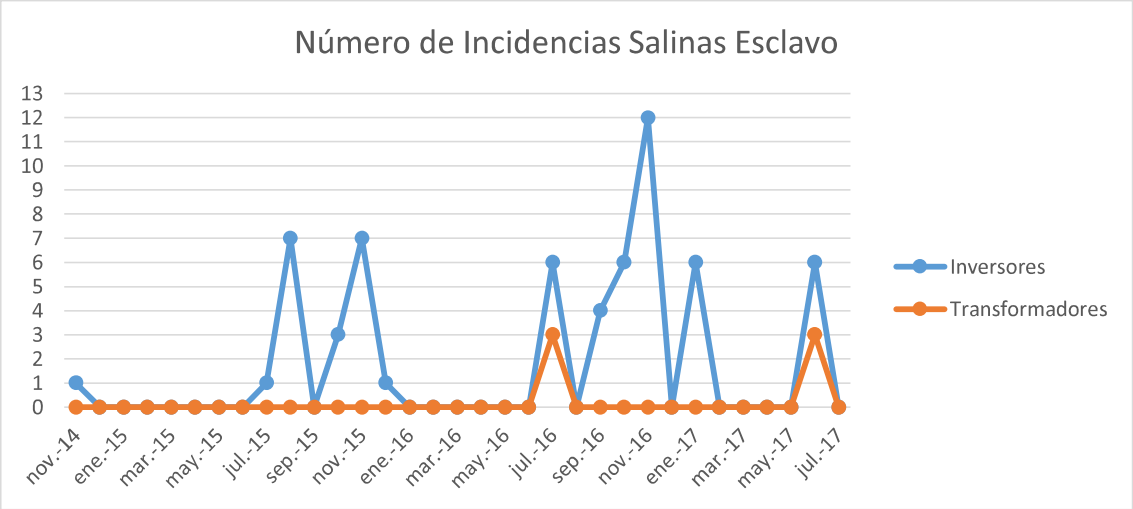


Figura 3.17. Incidencias Salinas Esclavo. [17]

A continuación, en la Figura 3.18 se puede observar que los inversores entre los meses de mayo hasta enero del siguiente año han presentado incidencias durante para el

mismo período, como patrón repetitivo. Igualmente, los transformadores presentaron incidencias para comienzos del segundo semestre de los dos últimos años.

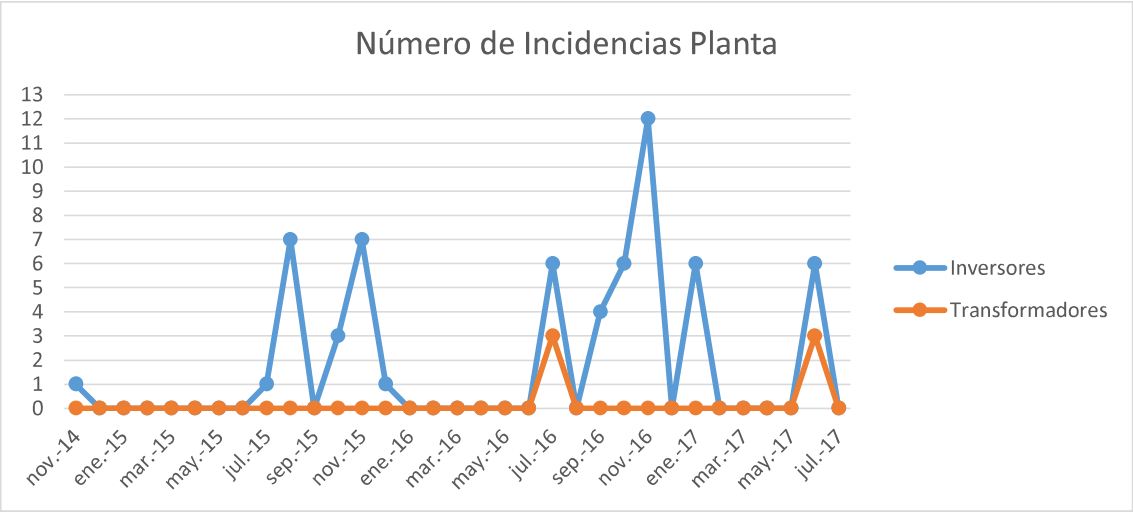


Figura 3.18. Incidencias Planta. [17]

A continuación, en la Figura 3.19 se puede observar que los inversores entre los meses de julio-agosto y octubre-noviembre presentan mayor cantidad de incidencias según los datos de los

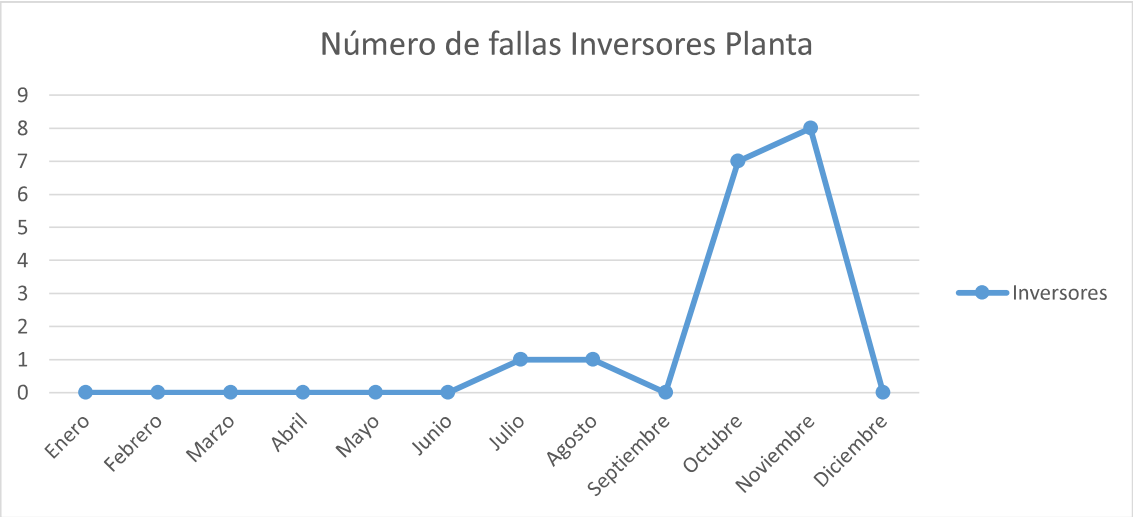


Figura 3.19. Fallas Inversores Planta (consolidado de los tres años). [17]

A partir de la información analizada, que se muestra en las figuras anteriores, se puede establecer los momentos oportunos para mantenimiento de los equipos más relevantes.

3.4. Propuesta de plan de mantenimiento

Los eventos registrados sobre los transformadores llevan a sugerir un mantenimiento anual en el mes de junio.

Por el comportamiento registrado de los inversores, aunque hay meses o períodos con más incidencias se recomienda un mantenimiento trimestral, dado que muchas incidencias se presentaron entre los meses de mayo-julio y nuevamente a finales del siguiente año, el poder realizar estas actividades en los meses de: enero, abril, julio y octubre puede lograr disminuir estos índices.

En el caso de los inversores, las revisiones visuales deben realizarse mensualmente, de manera de constatar que las condiciones de los mismos están aptas para su operación, verificando, además, la limpieza del lugar y sistema de ventilación.

Es importante mantener los protocolos de seguridad y que el personal que hace el mantenimiento sea calificado.

Con una muestra de las fallas en los inversores mensual, se observa que los meses más críticos son octubre y noviembre, por lo que el mantenimiento a comienzos del mes de octubre debe ser estricto.

Se debe cumplir con los mantenimientos sugeridos por los fabricantes, al igual que con los procedimientos para su realización contemplados por los mismos.

En el caso de los equipos que se encuentran en garantía y reciben revisiones y mantenimientos programados por el fabricante, deben mantenerse dichas pautas luego de culminado dicho servicio, de manera de continuar son los lineamientos del fabricante.

Adicional al mantenimiento preventivo se requiere las acciones en los inversores descritas en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2. Sustituciones programadas en inversores

Sustitución de fuentes de alimentación	Cada 10 años
Sustitución de ventiladores del puente del inversor	cada 13 años
Sustitución de ventiladores interiores	cada 13 años

Sustitución de interruptor automático de alto rendimiento/GFDI	100 disparos por cortocircuito
Sustitución de descargador de sobretensión	Al ser disparado

Fuente: Central Gransolar S.A. [17]
Elaboración propia.

Debido al elevado rendimiento de la planta, reflejado en sus índices de confiabilidad se puede lograr poco, ajustando los esquemas de mantenimiento de los equipos más importantes, por lo que se pueden mejorar las acciones en cuanto a paneles solares y sus conexiones.

Cajas de Conexión de Strings

El mantenimiento en las cajas de conexión de los strings debe ser semestral. Para lo cual se requiere inspección visual, realizar labores de limpieza, comprobación del par de ajuste de sus componentes y conexiones.

Se debe inspeccionar de manera visual los equipos a mitad del semestre, es decir, cumplidos los primeros tres meses es necesaria una inspección que asegure que dichos componentes están funcionando de manera óptima.

Paneles Solares

Para mantener una mayor captación y eficiencia de los paneles solares deben tener su superficie limpia. El diseño y arreglo de los paneles en el parque solar, permiten que la lluvia y el viento eliminen gran parte de las impurezas que pueden albergarse en la superficie, por lo que es necesario inspeccionar continuamente y remover ciertas suciedades no comunes manualmente.

Estas inspecciones deben tener una frecuencia mensual, de manera de constatar que se encuentren en buenas condiciones.

Adicionalmente, las nuevas tecnologías traen soluciones con precios accesibles, por lo que se puede adquirir robot para limpieza de los paneles solares. Un ejemplo es el de la Figura 3.20

Figura 3.20 Robot para limpieza de paneles solares [43]

También se debe cuidar el suelo, el cortado de la maleza que ayuda a reducir la acción de los insectos, controla la humedad, temperatura y el buen estado de las estructuras, conexiones y paneles solares.

Se define una frecuencia para su desbroce mensual, a pesar de que el asentamiento del suelo ha reducido el crecimiento de maleza.

Otros equipamientos

Los servicios de comunicaciones, estaciones meteorológicas, servicios generales, vallado perimetral y medidores requieren un mantenimiento semestral.

Termografías

Esta operación de supervisión de los equipos se realiza en los inversores, paneles solares, transformadores y las conexiones de las string box.

Para el máximo aprovechamiento de las termografías, se requiere la intervención de personal especializado o capacitado para la correcta interpretación de las imágenes y la información recopilada. El uso y disposición de los equipos han permitido una frecuencia de uso anual y se propone realizar termografías con mayor frecuencia.

Para lograr este objetivo se requiere involucrar más al poco personal disponible, teniendo como primera opción a la persona que cuida las instalaciones. Para lo cual hay que ejecutar un plan de capacitación y estímulos.

Otra opción es la adquisición de modernos equipos tecnológicos, ya comunes en el medio como un dron guiado por GPS dotado con equipamiento termográfico, este aparato puede vigilar fácilmente toda la planta en menor tiempo y con frecuencias muy reducidas, así como transmitir los datos recopilados fácilmente, como se aprecia en el ejemplo de la Figura 3.21.

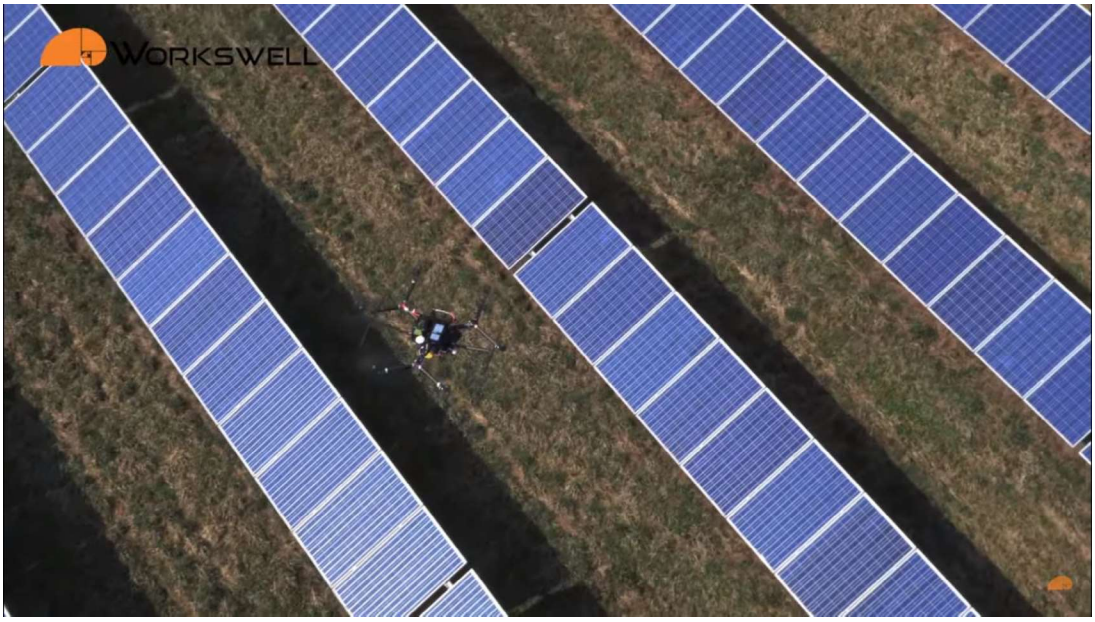


Figura 3.21. Drones para termodiagnóstico de plantas fotovoltaicas con cámaras Workswell Wiris. [44]

Medición de Ruido

El monitoreo de ruido debe ser minucioso y realizado semestralmente, para los inversores y transformadores que son los equipos más importantes y costosos del sistema.

Por lo que implementar dichas mediciones dos veces al año en estos equipos, puede contribuir a detectar inconvenientes en su funcionamiento.

En el Anexo III se presenta el resumen del esquema anual de mantenimiento para la planta fotovoltaica de Salinas.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Los equipos más importantes de la central fotovoltaica son los inversores y transformadores debido a la gran dependencia del conjunto, la parada de uno de estos equipos tiene un peso muy representativo en la producción y todos los esfuerzos deben enfocarse en mantenerlos operativos.
- Al analizar los resultados de las simulaciones se confirma la importancia del mantenimiento de la planta y sus partes constitutivas, ya que al recrear una disponibilidad baja se corre riesgo de no alcanzar las metas de la central de generación solar.
- Los transformadores sólo han tenido paradas para revisiones o mantenimiento preventivo durante los tres primeros años de vida de la planta fotovoltaica y tienen altos índices de confiabilidad.
- Después de los transformadores, los inversores se presentan como equipos críticos. Aunque en proporción a la planta cada uno es responsable de menores cantidades de energía en comparación al transformador, las múltiples tareas que cumple y su mayor vulnerabilidad debido a los componentes electrónicos que posee obligan a un monitoreo permanente y cuidadoso. Si un equipo importante deja de funcionar, todo el trabajo y aporte del resto de componentes sería desperdiciado.
- Los paneles solares con sus conexiones y equipos de protección son muy importantes, ya que son el fruto más tangible del desarrollo de la tecnología para obtención de energía eléctrica del sol.
- En caso de emergencia cuando se diagnostica paradas del inversor con largos tiempos de reparación o daños permanentes a largo plazo y el tiempo de vida útil de la planta ha transcurrido en gran proporción. Se puede aprovechar las entradas de los inversores que no han sido utilizadas y redimensionar su carga para asignarle más strings y aprovechar la distribución de los paneles solares correspondientes al inversor que no está disponible.
- Los índices de confiabilidad de la planta son muy altos, como en el caso de los inversores que supera el 99,8%, las sugerencias en el esquema de mantenimiento más que incrementar la confiabilidad ayudan a mantener esos valores elevados.

- Hay un comportamiento irregular en cuanto a la presentación de fallas debido a que la central fotovoltaica es relativamente nueva, se puede explicar mediante la Curva de la bañera y se espera una mayor estabilidad en el comportamiento a partir del año 5 cuando haya alcanzado madurez
- Considerando la energía producida por periodos en la central de Salinas y los posibles efectos de la parada de equipos, se concluye que cualquier inversión en mantenimiento o esfuerzo para mantener su óptimo funcionamiento es irrisorio ante las ventajas de mantener la planta fotovoltaica funcionando con niveles de disponibilidad elevados.

- La importancia de esta central de generación de energía fotovoltaica también implica que se fortalece la investigación y por ende los conocimientos relacionados a fuentes no convencionales de energía. Además de cumplir con los acuerdos y metas gubernamentales.

- La riqueza y abundancia de recursos en el Ecuador se manifiesta también en las condiciones favorables para implementaciones en el campo de la energía no convencional, Promover la investigación, buenas condiciones para inversionistas y una buena socialización de proyectos puede llevar al país a ser un líder en temas energéticos y de conservación del ambiente.

- La generación de energía no convencional y el desarrollo tecnológico implica la restructuración de las regulaciones del sector eléctrico, para considerar compensaciones por autoconsumo y la cobertura de servicios para sectores alejados con dificultades de integrarse al SIN.

- El presente trabajo brinda la posibilidad para Gransolar S.A. de una integración con fines de desarrollo y cooperación con otras empresas de actividades similares. Ya que se cuenta con información importante que resume el desempeño de la planta solar.

4.2. Recomendaciones

- Existen plantas de generación de energía que no cuentan con índices de confiabilidad, se recomienda implementar el uso de estas herramientas por su importancia y contribución para tomar decisiones administrativas.
- Los mantenimientos se deben hacer en lo posible fuera de los horarios de máxima irradiación de energía solar, desde las 18 horas a 6 horas del siguiente día. Para

reducir posibles pérdidas por energía no generada y mantener altos los niveles de disponibilidad de la planta fotovoltaica.

- Se sugiere realizar inspecciones visuales frecuentes a los paneles solares para ayudar a disminuir los tiempos de indisponibilidad, para complementar el monitoreo de los equipos y contribuir en la detección de daños o fallas.

- Es recomendable medir los niveles de ruido de los inversores y transformadores, lo cual nos permitirá detectar cualquier anomalía que cause pérdidas de energía, a través de la detección del aumento de los decibeles de la resonancia producto de la operación de los equipos, que en ocasiones no son perceptibles por el personal de la planta fotovoltaica.

- El personal requerido en la Central Gransolar S.A. para que realice recorridos de vigilancia es de una persona, sin embargo, se puede capacitar a la misma en el conocimiento de búsqueda de irregularidades más comunes (roturas de paneles, bandalaje, etc.) y en el uso de la pistola termográfica, pudiendo encargarse de verificar las condiciones de los paneles, detectando además, mediante la inspección con la pistola termográfica cualquier anomalía reportando de forma pronta a los responsables inmediatos superiores.

  Así, los ingenieros (03) encargados de mantenimientos preventivos y correctivos y de supervisión pueden estar al tanto de cualquier novedad o incidencia, fuera de los períodos programados para inspecciones y mantenimiento, lográndose minimizar los tiempos de reposición e incrementando la disponibilidad de los equipos.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] World Energy Council, «Consejo Mundial de Energia: las tendencias y tecnologías disruptivas emergentes encabezan la agenda energética mundial,» 2017. [En línea]. Available: https://www.worldenergy.org/news-and-media/press-releases/consejo-mundial-de-energia-las-tendencias-y-tecnologias-disruptivas-emergentes-encabezan-la-agenda-energetica-mundial/. [Último acceso: 15 enero 2018].

[2] Energías Renovables, «La solar fotovoltaica bate récords en 2015,» https://www.energias-renovables.com, 2016. [En línea]. Available: https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/la-solar-fotovoltaica-bate-records-en-2015-20160414. [Último acceso: 13 junio 2017].

[3] Energía Estratégica, «El mapa de la fotovoltaica en el mundo: las cifras actualizadas del mercado,» http://www.energiaestrategica.com, 2017. [En línea]. Available: http://www.energiaestrategica.com/mapa-la-fotovoltaica-mundo-cifras-actualizadas-mercado/. [Último acceso: 13 noviembre 2017].

[4] Energías Renovables, «La fotovoltaica sumó en 2017 en todo el mundo más que el carbón, el gas natural y la nuclear juntos,» https://www.energias-renovables.com, 2018. [En línea]. Available: https://www.energias-renovables.com/panorama/la-fotovoltaica-sumo-en-2017-en-todo-20180604. [Último acceso: 13 enero 2018].

[5] CONELEC, «Regulación Nº 002/11,» 2011. [En línea]. Available: http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/CONELEC_002_11_EXCEPCIONALIDAD.pdf. [Último acceso: 02 mayo 2017].

[6] CONELEC, «Las energías renovables, análisis del regulador,» 2013. [En línea]. Available: https://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/03_Las-energ%C3%ADas-renovables-an%C3%A1lisis-regulador_RC.pdf. [Último acceso: 03 mayo 2017].

[7] ARCONEL, «Estadística anual y multianual del sector eléctrico ecuatoriano,» 2016. [En línea]. Available: http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/08/Estad%C3%ADstica-anual-y-multianual-sector-el%C3%A9ctrico-2016.pdf. [Último acceso: 03 mayo 2017].

[8] Yingli Solar, «Parques Solares Salinas y Tren Salinas,» 2017. [En línea]. Available: http://d9no22y7yqre8.cloudfront.net/assets/uploads/projects/downloads/Caso%20de%20Exito%20Yingli_%20Salinas%20Ecuador_LR.pdf. [Último acceso: 13 mayo 2017].

[9] Yingli Solar, «Caso éxito parques solares Salinas y Tren Salinas,» 2013. [En línea]. Available: http://d9no22y7yqre8.cloudfront.net/assets/uploads/projects/downloads/Caso%20de%20Exito%20Yingli_%20Salinas%20Ecuador_LR.pdf. [Último acceso: 03 mayo 2017].

[10] CONELEC, «Regulación Nº 003/11,» 2011. [En línea]. Available: http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/CONELEC-plazos.pdf. [Último acceso: 02 mayo 2017].

[11] CONELEC, «Regulación Nº 004/11,» 2011. [En línea]. Available: http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/CONELEC_004_11_ERNC.pdf. [Último acceso: 02 mayo 2017].

[12] R. Salgado, «Paneles solares: generadores de energía eléctrica,» *Saber más,* vol. 17, nº 133, 2017.

[13] ABB, «Plantas fotovoltaicas. Cuaderno de aplicaciones técnicas Nº 10,» 2011. [En línea]. Available:

https://library.e.abb.com/public/e703d99268365a43c125791f002ce826/1TXA007109G0701_CT10.pdf. [Último acceso: 10 mayo 2018].

[14] Yingli Solar, *YGE 60 Cell 40mm SERIES catálogo,* 2017.

[15] E. Novoa, *Manual de operación y mantenimiento preventivo y correctivo para parques fotovoltaicos en el ecuador,* Quito: Escuela Politécnica Nacional; Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2015.

[16] Departamento técnico de ABB, «El papel de los inversores solares en la generación de energía,» *Energética XXI,* nº 107, p. 132, 2010.

[17] Central Gransolar S.A. , *Datos de mantenimiento y producción,* Imbabura, 2017.

[18] IDAE, «Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red,» 2011. [En línea]. Available: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_5654_FV_pliego_condiciones_tecnicas_instalaciones_conectadas_a_red_C20_Julio_2011_3498eaaf.pdf. [Último acceso: 26 mayo 2017].

[19] A. Cardozo, N. Yedrzejewski, M. Vignolo y I. Afonso, «Comparación entre la reglamentación de Uruguay y la de otros países de América y Europa sobre los requerimientos exigidos a un parque generador eólico conectado al sistema eléctrico. Segunda Parte,» 2010. [En línea]. Available: https://iie.fing.edu.uy/publicaciones/2010/CYVA10/. [Último acceso: 13 mayo 2017].

[20] M. Abella, «Sistemas Fotovoltaicos, Valencia: CIEMAT,» 2008. [En línea]. Available: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45337/componente45335.pdf. [Último acceso: 14 mayo 2017].

[21] SMA Solar Technology, «Sunny Central 500CP XT / 630CP XT / 720CP XT / 760CP XT,» 2017. [En línea]. Available:

https://www.sma.de/es/productos/inversor-fotovoltaico/sunny-central-500cp-xt-630cp-xt-720cp-xt-760cp-xt.html. [Último acceso: 13 mayo 2018].

[22] I. Portabella, «Proceso de creación de una planta solar fotovoltaica conectada a red,» 2010. [En línea]. Available: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/10756/PFC%20Ixtebe%20Portabella%2020100830.pdf. [Último acceso: 15 mayo 2017].

[23] Siemens, *Medium-Voltage Switchgear. Type 8DA10 Extendable Fixed-Mounted Circuit-Breaker Switchgear up to 40.5 kV,* Alemania, 2017.

[24] CONELEC, «Regulación Nº 005/06,» 2006. [En línea]. Available: http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/CONELEC-005-06-SISMEC_REF.-JUL.09.pdf. [Último acceso: 23 mayo 2017].

[25] CENACE, «Nuevo Sistema de Medición Comercial del Ecuador,» 2017. [En línea]. Available: https://smec.cenace.org.ec/SMEC/jsp/doc_formato1.jsp. [Último acceso: 30 mayo 2017].

[26] ARCONEL, «Regulación Nº 005/08,» 2008. [En línea]. Available: http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/10/Proyecto-de-Regulacion-005_08_21_vf.pdf. [Último acceso: 13 junio 2017].

[27] SMA Solar Technology, «Sunny Central 500CP XT / 630CP XT / 720CP XT / 760CP XT,» 2017. [En línea]. Available: http://files.sma.de/dl/18859/SC500CP-760CP-DES1751-V23web.pdf. [Último acceso: 13 enero 2017].

[28] M. Gualotuña, *Principios básicos de confiabilidad en sistemas de distribución,* Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2001.

[29] IEEE, «Confiabilidad,» Institute of Electrical and Electronics Engeneering, 2017. [En línea]. Available: https://www.ieee.org/. [Último acceso: 15 mayo 2017].

[30] C. Zapata, Confiabilidad en Ingeniería, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2011.

[31] SIE, «Glosario de términos de electricidad,» 2017. [En línea]. Available: http://sie.energia.gob.mx/docs/glosario_elec_es.pdf. [Último acceso: 03 julio 2017].

[32] M. Yañez, H. Gómez y G. Valbuena, Ingeniería de confiabilidad y análisis probabilístico de riesgo, Maracaibo: Reliability and Risk Management, S. A., 2004.

[33] A. Falcón, *Evaluación de la reducción de la vida útil de transformadores de potencia que trabajan en paralelo mediante el análisis de confiabilidad basado en el método de montecarlo,* Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2017.

[34] J. L. Devore, Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencia, Madrid: Ediciones Paraninfo, 2005.

[35] C. Zapata y E. Campos, «Valoración de confiabilidad de sistemas de generación con recursos limitados de energía utilizando simulación de Montecarlo,» *Scientia et Technica,* vol. XI, nº 29, pp. 43-48, 2005.

[36] D. Anderson, T. Williams y D. Sweeney, Métodos cuantitativos para los negocios, Madrid: Itemex, 2004.

[37] Palisade, «Nueva versión @Risk,» palisade-lta.com, 2017. [En línea]. Available: http://www.palisade-lta.com/risk/. [Último acceso: 13 junio 2017].

[38] SDI, «Ficha técnica @RISK,» Software de Ingeniería, 2017. [En línea]. Available: http://softwaredeingenieria.es/@risk/ficha-tecnica-risk/. [Último acceso: 03 junio 2017].

[39] reliabilityweb.com, «Definición de las frecuencias para un plan de mantenimiento,» 2017. [En línea]. Available:

https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/definicion-de-las-frecuencias-para-un-plan-de-mantenimiento/. [Último acceso: 11 agosto 2017].

[40] F. Castela, «Mantenimiento Industrial: Evolución del mantenimiento,» 2016. [En línea]. Available: https://mantenimientoindustrialweb.wordpress.com/tag/curva-banera/. [Último acceso: 30 junio 2017].

[41] buscadortransporte.com, «Tiempo de trabajo efectivo y tiempo de presencia,» 08 diciembre 2017. [En línea]. Available: https://buscadortransportes.com/tiempo-de-trabajo-efectivo-tiempo-presencia/. [Último acceso: 09 enero 2018].

[42] CONELEC, *Atlas Solar del Ecuador,* Quito: Corporación para la Investigación Energética, 2008.

[43] Serbot Swiss Innovations, «GEKKO Solar Robot,» 2018. [En línea]. Available: https://www.serbot.ch/en/solar-panels-cleaning/gekko-solar-robot. [Último acceso: 03 junio 2018].

[44] Workswell, «Thermodiagnosis of photovoltaic power plants,» 2018. [En línea]. Available: http://www.merici-technika.com/drone-uav-thermography-inspection-photovaltaic/. [Último acceso: 05 junio 2018].

[45] NEMA, «Normas,» National Electrical Manufacturers Association , 2017. [En línea]. Available: https://www.nema.org/pages/default.aspx. [Último acceso: 05 agosto 2017].

[46] ARCONEL, «Estadística anual y multianual del sector eléctrico ecuatoriano,» 2015. [En línea]. Available: http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/11/Estad%C3%ADsticaAnualyMultianual2015.pdf. [Último acceso: 13 agosto 2017].

6. ANEXOS

Anexo I. Glosario términos técnicos [23]

Celda solar o celda fotovoltaica: Elemento que transforma la luz solar (fotones) en electricidad. Es el insumo fundamental de los módulos solares fotovoltaicos.

Conexión a la red: Sistema de generación conectado a la red pública de electricidad.

Conexión en paralelo: Método de conexión en el cual todos los bornes positivos y negativos se juntan. Si los módulos son todos iguales, la corriente se suma y la tensión permanece igual.

Conexión en serie: Método de conexión en el cual el borne positivo de un módulo se conecta al borne negativo del siguiente y así sucesivamente. Si los módulos son todos iguales, el voltaje se suma y la corriente permanece igual.

Constante solar: Cantidad de energía solar que incide sobre una superficie de 1 m2 por segundo, cuando ésta se halla en el tope de la atmósfera a la distancia media sol-tierra. Su valor es aproximadamente 1,36 kW/m2.

Consumo eléctrico: Número de Vatios hora (Wh) o Kilovatios hora (kWh) utilizados para que funcione un aparato eléctrico durante un tiempo. Depende de la potencia del aparato y del tiempo que esté funcionando.

Corriente alterna: En la corriente alterna (CA o AC, en inglés) los electrones, a partir de su posición fija en el cable (centro), oscilan de un lado al otro de su centro, dentro de un mismo entorno o amplitud, a una frecuencia determinada (número de oscilaciones por segundo).

Corriente continua: La corriente continua (CC o DC, en inglés) se genera a partir de un flujo continuo de electrones (cargas negativas) siempre en el mismo sentido, el cual va desde el polo negativo de la fuente al polo positivo. Al desplazarse en este sentido los electrones, los huecos o ausencias de electrones (cargas positivas) lo hacen en sentido contrario, es decir, desde el polo positivo al negativo.

Eficiencia energética: Está asociada al concepto de conservación de la energía, pero no puede entenderse solamente como una reducción del consumo. Los países de América Latina tienen un desafío doble, crear las condiciones para una adecuada calidad de vida de toda la población, que en muchos casos necesita aumentar su consumo de energía, y al mismo tiempo reducir la cantidad de energía que es convertida en bienes y servicios.

Energías alternativas: Se considera energías alternativas a las que pueden sustituir a la energía convencional (fósiles, grandes centrales hidroeléctricas, energía nuclear), y que no implican impactos negativos significativos. Son consideradas como alternativas entre otras la energía solar, eólica, biomasa, pequeñas centrales hidroeléctricas.

Energía limpia: Una energía se considera limpia cuando su utilización no tiene riesgos potenciales añadidos, y suponen un nulo o escaso impacto ambiental. Prácticamente no existe una energía limpia 100%. La alteraciones que pueda provocar una energía limpia - considerando su ciclo de vida-, no son relevantes como para alterar ecosistemas, ciclos hidrológicos, o generar residuos que la naturaleza no pueda asimilar previamente tratados. Con esta definición quedan excluidas por ejemplo, las grandes represas y la energía nuclear. La energías limpias, son renovables y compatibles con sociedades sustentables.

Energía pico: Electricidad abastecida cuando la demanda está en su nivel más alto.

Energía primaria: Se entiende por energía primaria a las distintas fuentes de energía tal como se obtienen en la naturaleza, ya sea: en forma directa como en el caso de la energía hidráulica, eólica o solar, la leña y otros combustibles vegetales; o después de un proceso de extracción como el petróleo, carbón mineral, geoenergía, etc.

Energía renovable: Las energías de origen renovable, son consideradas como fuentes de energía inagotables, con las siguientes características: suponen un nulo o escaso impacto ambiental. Utilizan para la generación de energía recursos continuos o renovables. Se entiende como recursos continuos a los recursos inagotables y corresponden a fuentes de energía cuya oferta no se ve afectada por la actividad humana. ej.: la radiación y la energía eólica. Son recursos renovables los recursos que pueden continuar existiendo, a pesar de ser utilizados por la actividad económica, gracias a los procesos de regeneración. Sin embargo pueden ser agotados, cuando están siendo consumidos más rápidamente de lo que se regeneran (sobreexplotación), o por alteración de los ecosistemas. ej.: plantas, animales, agua, suelo. Gigavatio: Mil millones de vatios (1 GW = 1 000 000 000 W)

Intensidad eléctrica: Magnitud eléctrica definida como la cantidad de electricidad que pasa a través de la sección de un cable conductor en un segundo. Se mide en Amperios (A) Kilovatio: Unidad de potencia, equivale 1000 Vatios.

Kilovatio hora: La potencia de mil vatios aplicada durante una hora (o una potencia equivalente). 1 kWh es una unidad de energía - 1 kWh = 3600 Joules.

Megavatio: Un millón de vatios (1 MW = 1 000 000 W)

Módulo o panel solar fotovoltaico: Conjunto de celdas solares interconectadas dentro de una unidad sellada.

Potencia nominal: Potencia máxima, en régimen continuo, para la cual fue prevista y dimensionada la instalación.

Potencia eléctrica: Capacidad de los aparatos eléctricos para producir trabajo (la cantidad de trabajo realizado en la unidad de tiempo). La unidad de medida es el Vatio (W), el kilovatio (kW) o el megavatio (MW)

Potencial energético: Cantidad total de energía presente en la naturaleza, independiente de cuál sea la fuente energética, posible de ser aprovechada mediante el uso de tecnología.

Insolación: Cantidad de energía solar que llega a una superficie, medida en Vatio/hora/metro cuadrado. La Insolación que llega a la superficie terrestre puede ser directa o difusa. Mientras la insolación directa incide sobre cualquier superficie con un único y preciso ángulo de incidencia, la difusa cae en esa superficie con varios ángulos. Cuando la insolación directa no llega a una superficie a causa de la presencia de un obstáculo, el área en sombra no se encuentra completamente a oscuras gracias a la insolación difusa. Por ello, los dispositivos fotovoltaicos pueden funcionar incluso solamente con insolación difusa.

Insolación difusa: Radiación proveniente del cielo como resultado de la dispersión de la radiación solar por la atmósfera. Es la radiación solar difundida por la atmósfera (por lo que no llega directamente del sol). La insolación difusa es aquella recibida de la atmósfera como consecuencia de la dispersión de parte de la radiación del sol en la misma. Esta energía podría suponer aproximadamente un 15% de la insolación en los días soleados, pero en los días nublados, en los cuales la insolación directa es muy baja, la insolación difusa supone un porcentaje mucho mayor. Por otra parte, las superficies horizontales son las que más insolación difusa reciben, ya que "ven" toda la semiesfera celeste, mientras que las superficies verticales reciben menos porque solo "ven" la mitad de la semiesfera celeste.

Insolación Directa: Como su propio nombre indica, la que proviene directamente del sol. Es la que recibimos cuando los rayos solares no se difuminan o se desvían a su paso por la atmósfera terrestre.

Insolación Global: Será la suma de las insolaciones directa y difusa. Regulador de carga: También llamado unidad de control o controlador de carga. Componente que controla el flujo de corriente hacia la batería y de la batería hacia los equipos para proteger la batería de sobrecargas y sobredescargas.

Tensión eléctrica: Diferencia de potencial eléctrico que tiene que existir entre los bornes de conexión o entre dos partes activas de una instalación, para que la corriente eléctrica circule por dicha instalación. La unidad de medida es el Voltio (V)

Voltaje de circuito abierto: Voltaje que se mide en los terminales sin carga de un sistema fotovoltaico.

Voltaje de máxima potencia: Voltaje correspondiente al punto de máxima potencia.

Vatio pico: Unidad de medida de un módulo solar fotovoltaico, que significa la cantidad de potencia máxima que puede generar el módulo a condiciones estándar de funcionamiento (1000 W/m^2, 25°C y 1,5 de masa de aire)

Anexo II. Energía bruta y potencia efectiva de las generadoras solares

Tipo de Generación	Empresa	Central	Potencia Efectiva (MW)	Energía Bruta (GWh)
Fotovoltaica	Altgenotec	Altgenotec	0,99	0,92
	Brineforcorp	Brineforcorp	1,00	1,40
	Electrisol	Paneles Electrisol	1,00	1,71
	Enersol	Enersol 1-500	0,49	0,69
	Epfotovoltaica	Mulalo	0,98	1,50
		Pastocalle	1,00	1,50
	Genrenotec	Genrenotec	0,99	1,09
	Gonzanergy	Gonzanergy	1,00	1,56
	Gransolar	Salinas	2,00	3,87
		Tren Salinas	1,00	1,93
	Lojaenergy	Lojaenergy	0,70	1,08
	Renova Loja	Renovaloja	0,70	0,95
	Sabiangosolar	Sabiango Solar	0,72	0,59
	San Pedro	San Pedro	1,00	1,58
	Sanersol	Sanersol	1,00	1,34
	Sansau	Sansau	1,00	1,29
	Saracaysol	Saracaysol	1,00	1,35
	Solchacras	Solchacras	1,00	0,99
	Solhuaqui	Solhuaqui	1,00	1,21
	Solsantonio	Solsantonio	1,00	1,15
	Solsantros	Solsantros	1,00	1,38
	Surenergy	Surenergy	1,00	1,46
	Valsolar	Central Paragachi	1,00	1,46
	Wildtecsa	Wildtecsa	1,00	1,29
Total Fotovoltáica			**23,55**	**33,30**

Fuente: ARCONEL [44]

Anexo III. Propuesta mantenimiento Planta fotovoltaica Gransolar S.A.

Gran Solar Salinas													
		Mantenimiento Anual Planta Fotovoltaica por meses											
Componente	**Acción**	**Enero**	**Febrero**	**Marzo**	**Abril**	**Mayo**	**Junio**	**Julio**	**Agosto**	**Septiembre**	**Octubre**	**Noviembre**	**Diciembre**
Transformadores	Mantenimiento						Anual						
	Termografías						Semestral						Semestral
Inversores	Mantenimiento, comprobación de conexiones y limpieza	Trimestral			Trimestral			Trimestral			Trimestral		
	Termografías						Semestral						Semestral
Cajas de Conexión de Strings	Mantenimiento, comprobación de conexiones y limpieza	Semestral						Semestral					
	Termografías						Semestral						Semestral
Paneles Solares	Inspección superficie	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual
	Limpieza	Trimestral			Trimestral			Trimestral			Trimestral		
	Comprobación Conexiones	Semestral						Semestral					
	Comprobación estructuras	Semestral						Semestral					
Suelo	Limpieza	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual
Sistema de comunicaciones	Mantenimiento	Semestral						Semestral					
Estaciones Metereológicas	Mantenimiento	Semestral						Semestral					
Servicios Generales	Mantenimiento	Semestral						Semestral					
Medidores	Mantenimiento	Semestral						Semestral					
Vallado Perimetral	Mantenimiento	Semestral						Semestral					

Observaciones:

El mantenimiento anual o más relevante se encuentra a mitad del año, por los meses de Junio y Julio.

El clima, factores de logística, disponibilidad de repuestos o del personal pueden modificar el cronograma establecido.

Pueden hacerse ajustes por conveniencia pero es importante cubrir todas las actividades.