

# Análisis de Confiabilidad de Sistemas de Distribución Eléctrica con Penetración de Generación Distribuida

Salazar G.\*, Chusin L.\*, Escobar B.\*

\*, Escuela Politécnica Nacional, Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador  
e-mail: gabriel.salazar@epn.edu.ec; luis.chusin@hotmail.com; Santiago7escobar@live.com

---

**Resumen:** Este proyecto presenta la evaluación de confiabilidad de los sistemas de distribución con penetración de generación distribuida de las empresas CNEL EP – EL ORO y EMELNORTE S.A. Para ello se realizará un modelado de la red a nivel de troncal, considerando a los ramales de la red como cargas concentradas y estableciendo el escenario de estudio a demanda media. Mediante el software DIGSILENT Power Factory 14.1.3 con su módulo de confiabilidad se determina los índices de confiabilidad de cada alimentador con y sin la penetración de generación distribuida, Luego se realiza una comparación y análisis de resultados obtenidos, sugiriendo además donde sea posible, la ubicación de un punto de conexión adicional para los generadores y/o inserción de equipos de seccionamiento a nivel de troncal para la creación de tramos; con propósitos de tener una idea de cómo mejoraría la confiabilidad de la red con las adecuaciones mencionadas.

**Palabras clave:** Generación Distribuida, Operación en Isla, Confiabilidad en Sistemas de Distribución, Índices de Confiabilidad, Alternativa de Carga

**Abstract:** The objective of this project is to evaluate the systems distribution reliability with distributed generators about two electric enterprises such as CNEL EP – EL ORO and EMELNORTE SA. For this purpose, the networks will be modeled at the level of trunk considering the branch network as concentrated loads and setting the scene of study in average demand. By DIGSILENT 14.1.3 Power Factory software with reliability analysis module, the reliability indices of each feeder is determined “with and without” penetration of distributed generation

Then make a comparison and analysis of results, also if it is possible, an additional connection point is suggested for distributed generators and / or insertion of switching equipment at the level of trunk to create sections, to have an idea of how improve network reliability with the adjustments mentioned.

**Keywords:** Distributed Generation, Island Operation, Distribution System Reliability Analysis, Performance Indices, Loading Alternative.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El Ecuador es rico en recursos naturales alternativos como son: el viento, pequeñas vertientes, biomasa, una de las más altas radiaciones solares del planeta, que hace posible el desarrollo de energías no convencionales en distintos puntos topográficos.

En la actualidad, el avance tecnológico ha hecho posible la implementación de pequeñas fuentes de energía en lugares lo más próximos posibles a las cargas, este tipo de generación denominada “Generación Distribuida (GD)” permite reducir el costo del servicio, mejorar la calidad de la energía suministrada y confiabilidad de la red eléctrica, estos aspectos desde un punto de vista teórico. [1]

La GD da solución a problemas como la escasez de recursos energéticos convencionales y económicos y la contaminación

ambiental, convirtiéndose en una buena alternativa para la mejora de la calidad de suministro eléctrico.

Existe un gran desarrollo de aplicaciones, estudios e investigaciones sobre la Generación Distribuida en el mundo que han coincidido en promover sus fortalezas sobretodo en términos de eficiencia, flexibilidad operativa, seguridad [2]

Con la inserción de la GD en la red eléctrica surge nuevo escenario: la posibilidad de funcionamiento en isla de sistemas relativamente chicos (decenas de MVA), que incluyan estos nuevos generadores, dispersos geográficamente. Este nuevo escenario plantea retos y también oportunidades, ya que la formación controlada de islas eléctricas (islanding) puede constituir una estrategia de protección válida en algunos casos. [3]

Debido a que la cantidad de cortes de suministro se presentan en su mayoría en sistemas eléctricos de distribución por

diversas causas, se ha visto la necesidad de estudiar la confiabilidad de dichos sistemas, considerando a aquellos que en su red cuentan con la presencia de generación distribuida.

El presente estudio se basa en comparar la confiabilidad entre redes: con y sin GD, enfocándonos en el mejoramiento de la confiabilidad de la red, disminuyendo el tiempo de interrupción, frecuencia de fallas y por ende la energía no suministrada, mediante la inyección de potencia proveniente de la GD.

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Los términos generales relacionados con los análisis de confiabilidad de sistemas de distribución con penetración de generación distribuida necesarios para una mejor comprensión del presente proyecto se citan a continuación.

### 2.1 Confiabilidad de sistemas de distribución con GD

La confiabilidad en sistemas de distribución es la capacidad para abastecer de servicio de energía eléctrica con el mínimo de interrupciones, como calidad de servicio técnico comercial y producto.

### 2.2 Sistema radial con generación distribuida.

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

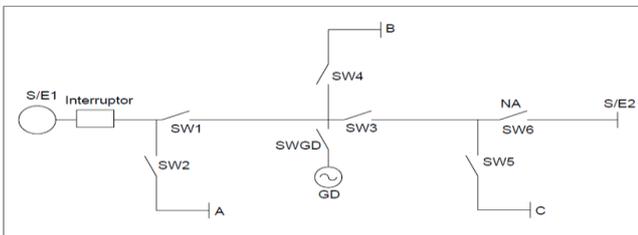


Figura 1. Sistema de Distribución Radial con GD.

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

### 2.3 Confiabilidad de un sistema en serie [4]

La función estructural de un sistema está dada por:

$$\phi(X_1, X_2, \dots, X_n) = \max(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

Donde:

$\phi$ : función estructural

$X_i$ : variables aleatorias

$n$ : número de componentes.

Y la confiabilidad según la función estructural está dada por:

$$R(p_1, p_2, \dots, p_n) = P\{\max(p_1, p_2, \dots, p_n) = 1\} \quad (2)$$

$$R(p_1, p_2, \dots, p_n) = 1 - P\{\forall X_i = 0\} \quad (3)$$

$$R(p_1, p_2, \dots, p_n) = 1 - P\{X_1 = 0, X_2 = 0, \dots, X_n = 0\} \quad (4)$$

$$R(p_1, p_2, \dots, p_n) = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_n) \quad (5)$$

Donde:

R: confiabilidad de un sistema

$p_i$ : función independiente

P: probabilidad de un sistema

### 2.4 Análisis de confiabilidad de los elementos que conforman la red serie incluida con GD [5]

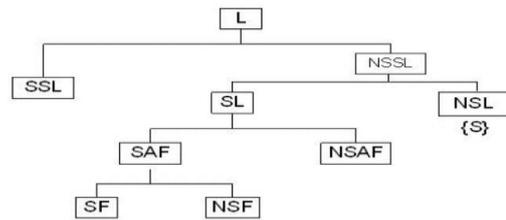


Figura 2. Análisis de confiabilidad en conjunto.

El siguiente análisis se considera; la falla de los elementos que puedan causar una pérdida de servicio a un punto de carga (Este punto se carga se presentará en términos de un segmento, la cual se llamará segmento S). Todos los componentes del sistema pueden encontrarse en la trayectoria continua entre la fuente y el segmento de interés, o no. La falla de cualquier componente de la trayectoria continuos puede causar una interrupción de carga.

La falla de los componentes que no estén en el camino también puede causar una interrupción de la carga en interés, a menos que el componente se separa de la trayectoria por un dispositivo de protección que responda automáticamente a la falla de un componente.

A continuación, considera en conjunto los efectos de los elementos que no estén en serie y restauración temporal como se muestran en la Fig. 2. El conjunto L que se muestra en la Fig. 2 contiene todos los segmentos dentro de un circuito cuya falla puede causar la pérdida de energía al segmento de interés S.

Este conjunto L incluye todos los segmentos que no se separan de la trayectoria continua entre la fuente (subestación, generador, etc.) y el segmento de interés S seccionado por un dispositivo de protección automática.

Ahora se divide el conjunto L en los conjuntos de SSL y NSSL:

- El conjunto SSL consta de los segmentos que se pueden aislar de la trayectoria continua entre S y la fuente original

–El conjunto NSSL consta de los segmentos que no se pueden aislar de la trayectoria continua entre S y la fuente original.

El conjunto SSL contiene al menos un segmento seccionado en la trayectoria continua por los interruptores de accionamiento manual. Si algún elemento de este conjunto falla, el segmento de interés S se puede restaurar temporalmente de la fuente original antes de que el componente fallado sea reparado o reemplazado.

Examinando aquellos segmentos que no pueden ser separados de la trayectoria continua, se puede dividir aún más el conjunto NSSL en SL y NSL.

–El conjunto SL se compone de los segmentos que pueden ser separados del segmento de interés S a una distancia determinada, por lo que, si la fallo se produce en el conjunto SL, S pueden seguir alimentándose por una fuente alternativa.

–El conjunto NSL consiste de los segmentos que no se pueden separar del segmento de interés S a una distancia determinada. Esto es el segmento de interés en sí, por lo tanto, este segmento contiene solamente al elemento {S}.

Si algún elemento del conjunto NSL falla, el resto de componentes dentro de ese segmento tienen que someterse al tiempo que conllevaría la reparación sustitución del componente que ha fallado. Una restauración provisional no es posible.

Teniendo en cuenta el conjunto SL, se puede dividirla en SAF y NSAF:

–Conjunto SAF: si el componente fallido se encuentra en estos segmentos, es posible restaurar la energía a S por una fuente alternativa.

–Conjunto NSAF: si el segmento fallido pertenece a este conjunto, el segmento de interés S no se puede restaurar temporalmente desde una alimentación.

El conjunto SAF contiene los segmentos que se pueden aislar tanto del segmento de interés S y la fuente alternativa, que hacen que la restauración provisional topológicamente sea posible. A veces, las restricciones del sistema puede limitar las opciones de restauración; la fuente alternativa podría no tener la capacidad necesaria para alimentar el punto de carga particular o de interés. Así el conjunto SAF se subdivide en SF y NSF:

El conjunto SF consiste de todos los segmentos que se pueden aislar del punto de interés S y de una fuente alternativa, permitiendo que la energía se restaure a S desde la fuente alternativa (para los segmentos de este conjunto, las violaciones de restricción del sistema no se producen durante la restauración).

El conjunto NSF consta de todos los segmentos que pueden ser aislados a partir de S y una fuente alternativa, pero no es posible restaurar la potencia de S debido a que hay violaciones de las restricciones del sistema.

El conjunto L, incluye todos los segmentos para el cálculo de los índices de confiabilidad, la misma es descompuesto en una serie de conjuntos como sigue a continuación: [5]

$$L = SSL \cup NSSL; \quad (6)$$

$$NSSL = SL \cup \{S\}; \quad (7)$$

$$SL = SAF \cup NSAF; \quad (8)$$

$$SAF = SF \cup NSF \quad (9)$$

De las ecuaciones (6), (7), (8) y (9), se tiene que:

$$L = SSL \cup SF \cup \{S\} \cup NSAF \cup NSF \quad (10)$$

En resumen, si el componente defectuoso del conjunto L se coloca en el conjunto SSL, es posible restablecer la energía al punto de carga del segmento de intereses S desde la fuente original. Si el fallo se produce en el conjunto de SF, la potencia puede ser restaurado a S desde una fuente alternativa sin violar restricciones del sistema, pero si el componente defectuoso se localiza en cualquiera de los conjuntos {S}, NSAF o NSF, entonces componente fallado debe ser completamente reparado antes de poder ser restaurado a S.

Adicionalmente se utiliza otros subconjuntos para calcular los conjuntos pertenecientes a la (7), tales como:

- SIC = conjunto de todos los segmentos en el circuito
- SW=conjunto de todos los dispositivos de seccionamiento en el circuito.
- AF = conjunto de fuentes alternativas disponibles
- ES = conjunto de dispositivos de seccionamiento que pueden aislar el segmento de interés S de las fuentes originales.
- NIS = conjunto de interruptores que no pueden aislar la fuente original del segmento de interés.
- CE = conjunto de componentes que ponen fin al circuito.
- PD = conjunto de dispositivos de protección en el circuito que pueden aislar un punto de interés de su fuente de carga.

## 2.5 Parámetros básicos de confiabilidad [4]

Los siguientes indicadores forman parte de los parámetros básicos de confiabilidad para poder establecer el análisis de confiabilidad orientado al cálculo de los índices de confiabilidad de un sistema de distribución, estos parámetros básicos o indicadores se obtienen así:

2.5.1 Tramo total de la red

$$L_T = L1 + L2 + \dots + Ln \quad (11)$$

Donde:

L1: longitudes individuales en metros  
 L<sub>T</sub>: longitud total de la red en metros

2.5.2 Tasa de falla

$$\lambda = \frac{\text{Número de fallas verificadas en el periodo}}{\text{Número de equipamientos disponibles x unidad de tiempo}} \quad (12)$$

Donde:

λ está en (fallas/año)

2.5.3 Tasa de falla del sistema

$$\lambda_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (13)$$

Donde:

λ<sub>i</sub>: cantidad de interrupciones en el elemento Li  
 λ<sub>T</sub>: tasa de fallas totales  
 n: número de elementos considerados de la red

Para tramos de alimentadores, la tasa de falla es un parámetro que puede determinarse de la siguiente forma: [4]

- A través del historial de fallas, para el tramo individual
- Mediante una estimación, considerando el sistema completo

$$\lambda = b \times l \quad (\text{fallas / año}) \quad (14)$$

$$b = \frac{m}{L \times T} \left( \frac{\text{fallas}}{\text{km.año}} \right) \quad (15)$$

Donde:

m: cantidad de fallas,  
 L: longitud total de la línea, en km,  
 T: periodo de estudio, en años,  
 b: número de fallas, por kilómetro por año,  
 l: longitud de la línea de interés.

Para elementos individuales, tales como transformadores, interruptores, etc., se plantea la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{m}{N \times T} \left( \frac{\text{fallas}}{\text{año}} \right) \quad (16)$$

Donde.

m: cantidad de fallas,  
 L: cantidad de elementos expuestos a la falla  
 T: periodo de estudio, en años,

2.5.4 Duración de la falla promedio por tramo

$$r_{i\text{-esima}} = Tr_{Li} + \sum_{i=1}^j Td_{Li} + Ti \quad (\text{horas / falla}) \quad (17)$$

Donde:

i: primer nodo con seccionamiento  
 j: segundo nodo con seccionamiento  
 Tr<sub>Li</sub>: tiempo de reparación de los tramos fallados.  
 Td<sub>Li</sub>: tiempo de despeje de seccionadores.  
 Ti: tiempo de operación de las interrupciones.

2.5.4.1 Tiempo de despeje de seccionadores

$$Td = Tc + Tp + Tl \quad (18)$$

$$\Rightarrow Td = 0.25h$$

Donde:

Tiempo para el conocimiento de falla (Tc)  
 Tiempo de preparación (Tp)  
 Tiempo de localización (Tl)  
 Tiempo de operación de interruptores S/E

$$\Rightarrow Ti = 0.05h$$

Estos valores son tomados para realizar el caso práctico de análisis.

2.5.5 Duración de la falla promedio del sistema

$$r_T = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot r_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

Donde:

r<sub>i</sub>: tiempo equivalente de reparación del elemento i, horas  
 λ<sub>i</sub>: cantidad de interrupciones en el elemento i  
 r<sub>T</sub>: duración de la falla promedio.

2.5.6 Tiempo de interrupción por tramo

$$U_n = \lambda_i r_i \quad i = n \quad i = 1, \dots, n \quad (20)$$

Donde:

r<sub>i</sub>: tiempo equivalente de reparación del elemento i, horas  
 λ<sub>i</sub>: cantidad de interrupciones en el elemento i  
 U<sub>n</sub>: tiempo de interrupción

2.5.7 Tiempo de interrupción del sistema [4]

$$U_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

2.5.8 Variación de la Probabilidad

De acuerdo a la teoría Markoviana, la probabilidad de que un punto cualquiera disponga de energía eléctrica, se define como:

$$P_{oi} = \frac{u_i}{\lambda_i + u_i} \quad (22)$$

Donde:

u<sub>i=1/</sub> r<sub>i</sub>: inversa de la duración de la falla promedio (taza de reparación).

Dividiendo numerador y denominador de la (22) por la tasa de reparación, se tiene:

$$P_{oi} = \frac{1}{\lambda_i / u_i + 1} \quad (23)$$

Reemplazando las (11) y (19) en (23), se obtiene:

$$P_{oi} = \frac{1}{\frac{\sum_i^n \lambda_i}{r_i} + 1} \quad (24)$$

$$\Delta P_{r_j} = -\frac{\sum_j^n \lambda_j \cdot \Delta r_j}{C} \quad (32)$$

La ecuación (24), expresa la probabilidad de disponer de energía eléctrica en el elemento i, en estado estacionario.

Operando la (24) resulta:

$$P_{oi} = \frac{1}{\sum_i^n \lambda_i \cdot r_i + 1} \quad (25)$$

Derivando parcialmente la (25) respecto a la tasa de falla y el tiempo de reparación, respecto a en elemento j cualquiera, se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial P_{oi}}{\partial \lambda_j} = \frac{-r_j}{(\sum_i^n \lambda_i r_i + 1)^2} \quad (26)$$

$$\frac{\partial P_{oi}}{\partial r_j} = \frac{-\lambda_j}{(\sum_i^n \lambda_i r_i + 1)^2} \quad (27)$$

Linealizando la (26) y (27) analizándolas entorno a un punto de operación específico, por lo que los valores de  $\lambda_i$  y  $r_i$  de todos los elementos de la red se pueden considerar cuasi-constantas en el denominador y en el numerador se considera pequeñas variaciones para el punto "i" respecto al elemento "j":

$$\Delta P_{o\lambda_j} = -\frac{r_j \Delta \lambda_j}{C} \quad (28)$$

$$\Delta P_{or_j} = -\frac{\lambda_j \Delta r_j}{C} \quad (29)$$

$$C = (\sum_i^n \lambda_i \cdot r_i + 1)^2 = cte \quad (30)$$

Donde:

$\Delta \lambda_j$ : la variación de tasa para el punto "i" respecto al elemento "j"

$\Delta r_j$ : la variación de tasa medio reparación para el punto "i" respecto al elemento "j"

Si se quiere considerar todos los elementos del sistema, se tiene las siguientes expresiones:

$$\Delta P_{\lambda_j} = -\frac{\sum_j^n r_j \cdot \Delta \lambda_j}{C} \quad (31)$$

Finalmente, la variación total se obtiene como la suma de las (31) y (32):

$$\Delta P_o = -\frac{1}{C} (\sum_j^n \lambda_j \cdot \Delta r_j + \sum_j^n r_j \cdot \Delta \lambda_j) \quad (33)$$

Se deduce de lo anterior que, para un punto de carga determinado, la probabilidad de disponer de energía eléctrica aumenta si las variaciones en las tasas de falla o tiempos de reparación son pequeñas.

## 2.6 Índices de confiabilidad. [6]

### 2.6.1 Índice medio de frecuencia de interrupción del sistema.

$$SAIFI = \frac{\sum_i \lambda_i N_i}{\sum_i N_i} \text{ (fallas / cliente.año)} \quad (34)$$

Donde:

$\lambda_i$ : es la tasa de fallas del punto de carga i.

$N_i$ : es el número de usuarios del punto de carga i

### 2.6.2 Índice medio de frecuencia de interrupción del sistema.

$$SAIDI = \frac{\sum_i U_i N_i}{\sum_i N_i} \text{ (horas / cliente.año)} \quad (35)$$

Donde:

$U_i$ : es el tiempo de interrupción anual del punto de carga i

### 2.6.3 Índice medio de duración de interrupción del sistema.

$$CAIFI = \frac{\sum_i \lambda_i N_i}{\sum (\text{Usuarios Afectados})} \text{ (fallas / clien _afec.año)} \quad (36)$$

### 2.6.4 Índice medio de duración de interrupción a los usuarios.

$$CAIDI = \frac{\sum_i U_i N_i}{\sum_i N_i} \text{ (horas / cliente)} \quad (37)$$

### 2.6.5 Índice medio de disponibilidad del sistema.

$$ASAI = \frac{N_T \cdot 8760 - \sum_{i=1}^N U_i N_i}{N_T \cdot 8760} \quad (38)$$

Donde:

i: Interrupción i-ésima.

$N_T$ : es el número total de usuarios.

### 2.6.6 Índice medio de indisponibilidad del sistema

$$ASUI = 1 - ASAI \quad (39)$$

2.6.7 Energía No Suministrada

$$ENS = \sum_{i=1}^n L_i U_i \text{ (MWh / año)} \tag{40}$$

Donde:

$L_i$ : carga en kW por cliente.

$U_i$ : es el tiempo de interrupción anual del punto de carga  $i$

2.6.8 Variación de la indisponibilidad de energía [4]

Podría resultar complicado relacionar directamente una variación en el nivel de probabilidad de abastecimiento en algún punto de carga con parámetros como: tasas de falla o tiempos de interrupción, se plantea entonces, como contra partida analizar un cambio en la indisponibilidad de energía. Una disminución en la indisponibilidad de servicio, tiene una directa incidencia en la Energía No Suministrada.

Derivando parcialmente la ecuación de  $U$  respecto a la tasa de falla y tiempo de reparación de un elemento  $j$  cualquiera, se tiene (41) y (42):

$$\frac{\partial U_i}{\partial \lambda_j} = r_j \tag{41}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial r_j} = \lambda_j \tag{42}$$

Linealizando las ecuaciones y considerando a todos los elementos del sistema como en el caso anterior se tiene:

$$\Delta U_i = \sum_j^n r_j \cdot \Delta r_j \tag{43}$$

$$\Delta U_i = \sum_j^n \lambda_j \cdot \Delta r_j \tag{44}$$

De esta manera se llega a determinar la (45) para la variación total de la indisponibilidad, así:

$$\Delta U_i = \sum_j^n r_j \cdot \Delta r_j + \sum_j^n \lambda_j \cdot \Delta r_j \tag{45}$$

2.6.9 Energía No Suministrada por cliente [6]

$$AENS = \frac{ENS}{N_r} \text{ (MWh / cliente.año)} \tag{46}$$

3. CASO PRÁCTICO DE ANÁLISIS.

Mediante las aplicaciones de las ecuaciones definidas se procede a calcular los índices de confiabilidad.

El siguiente es un ejemplo de un alimentador que dispone de cinco tramos en la troncal donde se aplica el criterio de restablecimiento de carga post-falla mediante alternativa de alimentación GD.

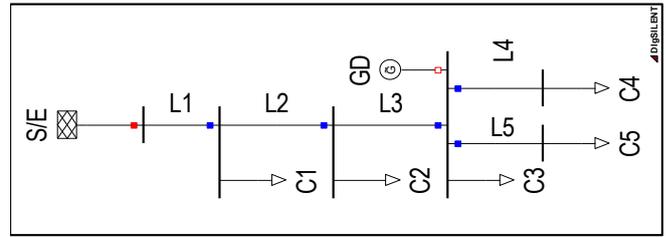


Figura 3. Ejemplo de Estudio: Sin GD

Tabla 1. Parámetros de Confiabilidad

Datos de Elementos		
Componente	$\lambda$ (fallas/año)	$r$ (horas/falla)
L1	0.20	4
L2	0.25	3
L3	0.30	2
L4	0.35	2.5
L5	0.15	3.5

Tabla 2. Características de las Cargas

Datos de Cargas		
Carga	Potencia kW	Usuarios
CG1	40	20
CG2	30	15
CG3	60	30
CG4	80	40
CG5	100	50

3.1 Análisis sin GD

Para este caso se empieza por considerar que el sistema es netamente radial, es decir, no existe ningún generador de donde pueda provenir energía.

Luego se calcula el efecto que tendría en las cargas (una a la vez) la presencia de alguna falla en cada tramo del sistema.

En la Tabla 3 se muestra un ejemplo de cálculo con el método a seguir.

Tabla 3 Criterio de Cálculo, Caso de Estudio: Carga 1

Carga 1			
Comp	$\lambda$ (f/año)	$r$ (horas/falla)	$\mu$ (h/año)
L1	$\lambda_{L1}$	$Tr_{L1}$	$\lambda_1 * r_1$
L2	$\lambda_{L2}$	$Tr_{L2}$	$\lambda_2 * r_2$
L3	$\lambda_{L3}$	$Td_{L2} + Td_{L3} + Ti$	$\lambda_3 * r_3$
L4	$\lambda_{L4}$	$Td_{L4} + Ti$	$\lambda_4 * r_4$
L5	$\lambda_{L5}$	$Td_{L5} + Ti$	$\lambda_5 * r_5$
Total	$\sum_{i=1}^n \lambda_{Li}$	$(\sum_{i=1}^n \lambda_{Li} * r_i) / (\sum_{i=1}^n \lambda_i)$	$\sum_{i=1}^n \lambda_i * r_i$

Se realiza el mismo criterio de cálculo para cada carga y se obtiene lo siguiente.

Tabla 4. Caso de Estudio, Parámetros de Confiabilidad: Carga 1

Carga 1			
Componente	$\lambda$ (f/año)	$r$ (h/falla)	$\mu$ (horas/año)
L1	0.2	4	0.800
L2	0.25	3	0.750
L3	0.3	0.55	0.165
L4	0.35	0.3	0.105
L5	0.15	0.3	0.045
Total	1.25	1.492	1.865

**Tabla 5.** Caso de Estudio, Parámetros de Confiabilidad

Resumen: todas las cargas			
Comp.	$\lambda$ (fallas/año)	r(horas/falla)	$\mu$ (horas/año)
Carga 2	1.25	1.840	2.30
Carga 3	1.25	1.840	2.30
Carga 4	1.25	2.456	3.07
Carga 5	1.25	2.224	2.78

**Tabla 6.** Caso de Estudio, Parámetros de Confiabilidad

Energía No Suministrada		
ENS	808.278	kWh/año
AENS	0.005	kWh/(año*cliente)

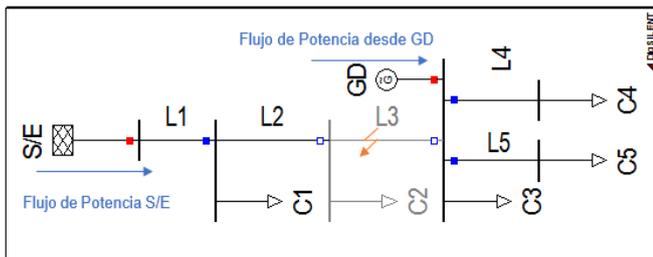
En la Fig. 4, muestran los parámetros de confiabilidad en cada punto de carga y los índices de confiabilidad de toda la red respectivamente. Estos resultados se obtuvieron luego de ejecutar el análisis de confiabilidad con Power Factory.

Caso de Estudio: Study Case		Anexo: ninguno / 1
Resumen del Sistema		
Índice de Frecuencia de Interrupción Promedio del Sistema AIFI	=	1.250000 1/Ca
Índice de Frecuencia de Interrupción Promedio del Cliente AIFI	=	1.250000 1/Ca
Índice de Duración de Interrupción Promedio del Sistema SAIDI	=	2.597 h/Ca
Índice de Duración de Interrupción Promedio del Cliente CAIDI	=	2.078 h
Índice de Disponibilidad del Servicio Promedio	: ASAI	= 0.9997034909
Índice de Disponibilidad del Servicio Promedio	: ASUI	= 0.0002965091
Energía no Suministrada	: ENS	= 808.278 MWh/a
Energía no Suministrada Promedio	: AENS	= 0.005 MWh/Ca

**Figura 4.** Índices de Confiabilidad: Caso Estudio sin GD, Power Factory

### 3.2 Análisis con GD

El principio de este análisis es que se cuenta con un generador cercano a la carga (GD) el cual cumple con la función de alternativa de carga y de existir una falla en L3 por ejemplo se procedería a abrir los seccionadores de L2 y L3 para despejar el componente fallido para luego restablecer la potencia con la ayuda de la GD.



**Figura 5.** Red con alternativa de carga (GD), condición post-falla

Como se puede ver, la única carga que se queda sin alimentación es la CG2. Se debe tomar en cuenta que en ningún caso quedarían sin alimentación todas las cargas aguas abajo del componente fallido, dado que el generador siempre tratará de alimentar al resto del sistema aguas debajo del componente fallido.

A continuación, un ejemplo de cálculo. El criterio del análisis es similar al caso anterior en el que no se disponía de un generador distribuido.

**Tabla 7.** Criterio de Cálculo, Caso de Estudio: Carga 1

Carga 1			
Comp.	$\lambda$ (f/año)	r(horas/falla)	$\mu$ (h/año)
L1	$\lambda_{L1}$	$Td_{L1} + Ti_{GD}$	$\lambda_1 * r_1$
L2	$\lambda_{L2}$	$Tr_{L2}$	$\lambda_2 * r_2$
L3	$\lambda_{L3}$	$Td_{L2} + Td_{L3} + Ti$	$\lambda_3 * r_3$
L4	$\lambda_{L4}$	$Td_{L4} + Ti$	$\lambda_4 * r_4$
L5	$\lambda_{L5}$	$Td_{L5} + Ti$	$\lambda_5 * r_5$
Total	$\sum_{i=1}^n \lambda_{Li}$	$(\sum_{i=1}^n \lambda_{Li} * r_i) / (\sum_{i=1}^n \lambda_i)$	$\sum_{i=1}^n \lambda_i * r_i$

donde.

$Ti_{GD}$  Es el tiempo de operación del interruptor de la GD.

Se realiza el mismo criterio de cálculo para cada carga y se obtienen los siguientes resultados.

**Tabla 8.** Caso de Estudio, Parámetros de Confiabilidad: Carga 1

Carga 1			
Comp.	$\lambda$ (f/año)	r(horas/falla)	$\mu$ (horas/año)
L1	0.2	0.3	0.06
L2	0.25	3	0.75
L3	0.3	0.55	0.165
L4	0.35	0.3	0.105
L5	0.15	0.3	0.045
Total	1.25	0.900	1.125

**Tabla 9.** Caso de Estudio, Parámetros de Confiabilidad

Resumen: todas las cargas			
Componente	$\lambda$ (f/año)	r(horas/falla)	$\mu$ (horas/año)
Carga 2	1.25	0.758	0.948
Carga 3	1.25	0.41	0.513
Carga 4	1.25	1.026	1.283
Carga 5	1.25	0.794	0.993

**Tabla 10.** Caso de Estudio, Parámetros de Confiabilidad

Energía no suministrada		
ENS	307.816	kWh/año
AENS	1.9859	kWh/(año*cliente)

Con el fin de comparar entre los resultados obtenidos manualmente y los resultados que arroja el Power Factory, se presenta dichos resultados en las Figs. 6 y 7.

Caso de Estudio: Study Case		Anexo: ninguno / 1
Interrupciones de Carga		
Nombre	AID h	LPENS MWh/a
CG1	0.91	1.25
CG2	0.76	1.25
CG3	0.41	1.25
CG4	1.03	1.25
CG5	0.79	1.25

**Figura 6.** Parámetros de Confiabilidad: Caso Estudio con GD, Power Factory

Caso de Estudio: Study Case		Anexo: ninguno / 1
Resumen del Sistema		
Índice de Frecuencia de Interrupción Promedio del Sistema AIFI	=	1.250000 1/Ca
Índice de Frecuencia de Interrupción Promedio del Cliente AIFI	=	1.250000 1/Ca
Índice de Duración de Interrupción Promedio del Sistema SAIDI	=	0.989 h/Ca
Índice de Duración de Interrupción Promedio del Cliente CAIDI	=	0.791 h
Índice de Disponibilidad del Servicio Promedio	: ASAI	= 0.9998870876
Índice de Disponibilidad del Servicio Promedio	: ASUI	= 0.0001129124
Energía no Suministrada	: ENS	= 307.816 MWh/a
Energía no Suministrada Promedio	: AENS	= 0.002 MWh/Ca

**Figura 7.** Índices de Confiabilidad: Caso Estudio con GD, Power Factory

De los resultados se puede concluir lo siguiente:

–Un generador distribuido puede quedar en un estado de operación de isla intencional o no intencional luego de suscitarse una falla.

–La GD resulta mejor opción que transferir carga a un alimentador vecino, ya que no se invierte tiempo en la transferencia de carga ni en volver a la topología inicial.

#### 4. DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICA CONSIDERADAS PARA EL ESTUDIO DE LAS REDES.

Las hipótesis generales del estudio, se enumeran a continuación:

–El escenario de estudio es común para todos los alimentadores y se establece en “Demanda Media” por la presencia mayoritaria de generadores fotovoltaicos, estos generadores funcionan en horario diurno, es decir solo cuando hay incidencia de la luz solar.

–Se considera a Demanda Media, porque 5 de 7 alimentadores tienen en sus redes incorporadas generadores fotovoltaicos.

–Se asume que los generadores distribuidos generan toda la capacidad para la que fueron diseñados.

–El estudio se hace a nivel de troncal. El circuito va desde la barra de 69 kV de la subestación de distribución. La “Red Equivalente” representa los circuitos de sub-transmisión interna/externa y transmisión con “confiabilidad ideal de todos sus componentes”.

–Se asume que los sistemas operan radialmente y que pueden suministrarse desde más de un punto manteniendo siempre la condición de radialidad de los tramos restablecidos.

#### 5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS.

El análisis está basado en los índices de confiabilidad SAIFI, SAIDI, CAIDI, ENS y AENS., los cuales son los más representativos y/o los que nos dan una mejor perspectiva de lo que sucede entorno de los clientes de las redes modeladas.

##### 5.1 Empresa eléctrica EMELNORTE

##### 5.1.1 Diagnóstico de sistema actual

Se analiza a continuación los índices que son de importancia y que reflejan las condiciones actuales de la empresa con respecto a sus consumidores.

**Tabla 11.** Índices de confiabilidad sin GD – alimentadores de EMELNORTE S.A.

Índices de confiabilidad sin GD - EMELNORTE S.A.						
Índice	Alpachaca C5	Alpachaca C6	La Carolina C1	El Chota C2	La Esperanza C4	El Ángel C1
SAIFI 1/c-a	8.72	8.25	2.198	10.329	30.989	3.114
SAIDI h/c-a	15.89	7.22	3.88	43.823	30.738	5.396
CAIDI h	1.82	0.88	1.739	4.243	0.992	1.733
ENS MWh/a	19.38	11.81	0.473	34.061	37.908	0.706
AENS kWh/c-a	5.98	4.54	0.41	3.944	9.165	1.107

##### 5.1.1.1 Alimentador Alpachaca C5.

La interpretación tipo de los resultados es la siguiente:

En el alimentador *Alpachaca C5* se tiene que:

–Un cliente promedio experimenta 8.72 fallas, o sea un aproximado de 9 fallas anualmente.

–Un cliente promedio experimenta 15.89 horas sin suministro de energía anual.

–La suspensión de suministro debido a alguna falla en el alimentador dura en promedio 1.82 horas.

–Anualmente no se suministra 19.38 MWh.

–Anualmente no se suministra 5.98 kWh por cliente.

##### 5.1.2 Índices de confiabilidad en presencia de GD

Luego de ejecutar el módulo de confiabilidad, con la inserción de la GD en la red, los resultados son de la tabla 12. La interpretación de los resultados, sigue la misma lógica de la sección 5.1.1.1

**Tabla 12.** Con Generación Distribuida.

Índices de confiabilidad con GD - EMELNORTE S.A.						
Índice	Alpachaca C5	Alpachaca C6	La Carolina C1	El Chota C2	La Esperanza C4	El Ángel C1
SAIFI 1/c-a	8.721	8.246	2.2	10.33	30.989	3.11
SAIDI h/c-a	13.92	7.175	3.48	43.82	24.494	4.59
CAIDI h	1.596	0.87	1.58	4.243	0.79	1.47
ENS MWh/a	16.98	11.73	0.43	34.06	30.124	0.61
AENS kWh/c-a	5.237	4.508	0.37	3.944	7.283	0.95

##### 5.1.3 Energía No Suministrada sistémica

En esta sección se establecerá una comparación entre el total de ENS sin GD y total del ENS con GD (sumando valores de todos los alimentadores), con el fin de establecer la conveniencia o no de considerar a la GD como alternativa de alimentación para esta empresa.

**Tabla 13.** Energía No Suministrada total: Sin GD vs. Con GD.

ENS Total: Sin GD - Con GD			
Alimentador	ENS sin GD	ENS con GD	Diferencia
	MWh/a	MWh/a	MWh/a
Alpachaca C5	19.38	16.979	2.401
Alpachaca C6	11.806	11.731	0.075
La Carolina C1	0.473	0.431	0.042
Chota C2	34.061	34.061	0
La Esperanza C4	37.908	30.124	7.784
El Ángel C1	0.706	0.605	0.101
<b>Total</b>	<b>104.334</b>	<b>93.931</b>	<b>10.403</b>

Como se puede apreciar en la Tabla 13, la influencia que tuvo la GD en el mejoramiento de la confiabilidad del sistema total es de alrededor de 10,403 MWh,

#### 5.1.4 Energía suministrada con GD y aplicación de mejoras en la topología de la red.

Únicamente los alimentadores Alpachaca C5 y El Chota C2 fueron objeto de análisis para el mejoramiento de la confiabilidad.

**Tabla 14.** Energía suministrada con GD en puntos de conexión adecuados.

Energía Suministrada Sistémica	
La Carolina C2	0.042
El Ángel C1	0.223
Alpachaca C5 y C6	4.938
La Esperanza C4	7.784
El Chota C2	15.764
<b>Total, MWh</b>	<b>28.751</b>

Al final del estudio de considerar los criterios de alternativa de alimentación con GD y mejoras en la configuración de los alimentadores (en los que fue posible), como se aprecia en la Tabla 14, la confiabilidad vista desde punto técnica tiene una mejora, estas mejoras son posibles debido a que los alimentadores tienen una demanda alta, tenga en su red equipos de seccionamiento, la GD debe estar en los tramos donde exista la mayor concentración de demanda, los tiempos medios de reparación sean altos.

Los alimentadores que cumplen estas características son: Alpachaca C5 y El Chota C2, como se muestra en la Tabla 15. En la Tabla 14, se aprecia que la empresa tiene mejora en la confiabilidad, es decir los alimentadores que cuenten en sus redes con la inserción de la GD, como fuente alternativa de alimentación, alimentan a sus usuarios ofreciendo una mejor calidad servicio, continuidad y tiempo de interrupciones menores que sin GD.

**Tabla 15.** Datos de demanda media y tiempo medio de reparación.

EMELNORTE Y CNEL EP- EL ORO			
Subestación	Alimentador	Demanda Media [MW]	Tiempo medio de reparación [h/f]
LA ESPERANZA	Alimentador 4	0.986	1.011
	Alimentador 5	1.219	3.364
ALPACHACA	Alimentador 6	1.635	1.17
	CHOTA	Alimentador 2	0.777
EL ANGEL	Alimentador 1	0.122	1.502
LA CAROLINA	Alimentador 1	0.124	1.937
SANTA ROSA	Puerto Jely	2.3	0.584
ARENILLAS	Arenillas	1.35	0.765

## 5.2 Empresa eléctrica CNEL EP – EL ORO

### 5.2.1 Diagnóstico del sistema actual

Se analiza a continuación los índices que son de importancia y que reflejan las condiciones actuales de la empresa con respecto a sus consumidores.

**Tabla 16.** Índices de confiabilidad sin GD – alimentadores de CNEL EP – EL ORO.

Índices de confiabilidad sin GD CNEL EP - EL ORO		
Índice	Puerto Jely	Arenillas
SAIFI 1/c-a	14.6336	18.2148
SAIDI h/c-a	8.986	14.175
CAIDI h	0.614	0.778
ENS MWh/a	20.456	19.253
AENS kWh/c-a	8.712	4.487

La interpretación tipo de los resultados tiene la misma lógica de la sección de 5.1.1.1

### 5.2.2 Variación de la confiabilidad por presencia de la generación distribuida.

**Tabla 17.** CNEL EP - EL ORO. Índices de confiabilidad con GD.

Índices de confiabilidad con GD CNEL EP - EL ORO		
Índice	Puerto Jely	Arenillas
SAIFI 1/c-a	14.634	18.215
SAIDI h/c-a	5.640	6.967
CAIDI h	0.385	0.382
ENS MWh/a	12.148	9.33
AENS kWh/c-a	5.174	2.174

#### 5.2.2.1 Energía No Suministrada sistémica

Se establece una comparación entre el total de ENS sin GD y total del ENS con GD; de todos los alimentadores analizados, con el fin de establecer la conveniencia o no de considerar a la GD como alternativa de carga para esta empresa.

**Tabla 18.** Energía No Suministrada total: Sin GD – Con GD

ENS Total: Sin GD vs. Con GD			
Alimentador	ENS sin GD	ENS con GD	Diferencia
	MWh/a	MWh/a	MWh/a
Jely	20.456	12.148	8.308
Arenillas	19.253	9.33	9.923
<b>Total</b>	<b>39.709</b>	<b>21.478</b>	<b>18.231</b>

Los resultados en cuanto a ENS pudieron haber disminuido aún más debido a la concentración de carga de estos alimentadores los cuales tienen una demanda media total de 3,66 MW, pero los tiempos medios de reparación según los datos entregados por la empresa son cercanos a 0,5 horas (lo mínimo que se podría tardar en restablecer la energía con GD), es decir estos tiempos son “casi inmejorables”.

#### 5.2.4 Energía suministrada con GD y aplicación de mejoras en la topología de la red.

Únicamente el alimentador Arenillas fue objeto de análisis para el mejoramiento de la confiabilidad

### 5.2.4.1 Alimentador Arenillas

El alimentador “Arenillas” si fue objeto de análisis para el mejoramiento de la confiabilidad por medio de la inserción de un seccionador en la troncal para dividir el tramo 1 en dos tramos por la alta concentración de carga que presenta este tramo.

**Tabla 19.** Energía suministrada con gd en puntos de conexión adecuados.

Energía Suministrada	
Puerto Jely	8.308
Arenillas	10.302
<b>Total MWh</b>	<b>18.61</b>

Finalmente, considerando los mejoramientos planteados, todo el sistema entregaría un valor adicional de energía de 18,61 MWh. como se aprecia en la Tabla 19, la confiabilidad desde punto de vista técnica, tiene una mejora, estas mejoras son posibles debido a que los alimentadores tienen una demanda alta, tenga en su red equipos de seccionamiento, la GD debe estar en los tramos donde exista la mayor concentración de demanda, altos tiempos medios de reparación.

El alimentador que cumple con las características adecuadas para el mejoramiento de la confiabilidad es Arenillas, como se muestra en la Tabla 15.

Mediante la Tabla 19, se observa que empresa mejora en la confiabilidad, es decir el alimentador que cuentan en su red con la inserción de la GD, como fuente alternativa de alimentación, alimentan a sus usuarios ofreciendo una mejor calidad servicio, continuidad y horas de interrupción menor que sin GD.

## 6. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de confiabilidad, efectuar el análisis de confiabilidad con GD contribuyó al mejoramiento de la confiabilidad en todos los alimentadores de las empresas consideradas en este estudio

De considerar a la GD como una alternativa de alimentación frente a fallas en lugar de realizar transferencia de carga a un alimentador vecino, relativamente se obtendrían mejores beneficios económicos, ya que, una disminución del índice ENS se traduce en una mayor energía facturada o vendida por la empresa distribuidora.

## 7. RECOMENDACIONES

Es recomendable que se realice un rediseño de las troncales, en lo referente al aumento de tramos en las mismas, permitiendo un mayor número de tramos y con concentraciones de carga equilibradas, para de esta manera mejorar la confiabilidad de las redes facilitando el restablecimiento de potencia proveniente de alguna alternativa de alimentación a los tramos que no fallaron.

Hoy por hoy por limitaciones técnico – económicas no se recomienda el uso de la GD como alternativa de alimentación frente a fallas en los alimentadores del presente estudio,

quizás con el tiempo los avances tecnológicos y los costos los permitan.

## REFERENCIAS.

- [1] D. Treballe, "La Generación Distribuida en España", M.S. Tesis, Madrid, Enero 2006.
- [2] G. Casaravilla, M. Vignolo, "Generacion Distribuida en el Uruguay: Evaluacion de Fortalezas, Oportunidades y Tratamiento Regulatorio" Informe, Uruguay, Junio 2006.
- [3] J. Munsch, "Formación Intencional de Islas en Sistemas Eléctricos de Potencia con Generación Eólica", M.S. Tesis, Montevideo, agosto 2014.
- [4] A. G. Arriagada, "Evaluación de Confiabilidad en Sistemas Eléctricos de Distribución", M.S. Tesis, Santiago de Chile, 1994.
- [5] D. Zhun, "Power System Reliability Analysis with Distributed Generators" M.S. Thesis, USA, May 2013
- [6] R. Billinton and R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", 2nd ed., New York, Plenum Press, pp. 223-228, 1996