

Diseño del Sistema de Distribución Primario de la Subestación Salinas de la Empresa Eléctrica Península de Santa Elena Basado en la calidad del Servicio

Francisco X. Rodríguez Veliz**
Christian A. Solano Villao**
Luis X. Solano Villao**
Cristóbal Mera*

*Phd., Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación (FIEC),
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

**Estudiantes, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación (FIEC), Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral, Apartado 09-01-5863, Guayaquil-Ecuador
chrisalbert40@hotmail.com, xavisv@hotmail.com, fxavieroedrodriguez@yahoo.com.

Resumen

En la actualidad, las empresas de distribución eléctrica deben encargarse no solo de llevar energía hasta sus clientes, sino también, de ofrecer un nivel aceptable de calidad de dicha energía. Esto se da porque cada vez existen más aparatos eléctricos que son sensibles a los disturbios, pero en especial, porque los entes de control exigen que se cumplan parámetros de calidad establecidos por medio de regulaciones. La interrupción del servicio eléctrico a causa de fallas en el sistema de distribución es uno de los acontecimientos más problemáticos y comunes que se presentan y que influyen directamente en la calidad del servicio. Disminuir este problema, un beneficio tanto para la empresa como para los clientes, es lo que se busca conseguir con el desarrollo de este proyecto. En este proyecto se presenta un análisis técnico-económico de la Subestación Salinas, perteneciente a la Empresa Eléctrica Península de Santa Elena (EMEPE), para el rediseño de su red primaria de distribución, tomando como principal parámetro la Calidad del Servicio. Se muestran índices probabilísticos cuyo propósito es evaluar cuan confiable es un sistema de distribución eléctrico. Estos índices tienen la habilidad de medir la frecuencia de las interrupciones y los efectos de los disturbios que se presenten en el sistema. Los índices calculados para los diferentes diseños expuestos en este proyecto, constan en regulaciones de países como Ecuador y Argentina y de organismos como la IEEE y CEA

Palabra claves: *Distribución, calidad, disturbios, regulación, confiabilidad, frecuencia*

Abstract

At the present time, the companies of electrical distribution must be in charge not only to take energy to their clients, but also, to offer an acceptable level of quality of this energy. This occurs because every time more electrical apparatuses appear, and they are sensible to the disturbances, but in special, because the control demands quality established parameters by regulations. The interruption of the electrical service because of faults in the distribution system is one of the most problematic and common events that appear and that influence directly in the quality of the service. Decreasing this problem, a benefit for the company as for the clients, it is what we are looking for to obtain with the development of this project. In this project a technical-economic analysis of Substation Salinas appears, pertaining to the Electrical Company Peninsula of Santa Elena (EMEPE), for the redesign of their primary network of distribution, taking as main parameter the Quality of the Service. We present values which their intentions are to evaluate how reliable is an electrical system of distribution. Those values have the ability to measure the frequency of the interruptions and the effects of the disturbances that appear in the system. The calculated values for the different designs exposed in this project, belongs in regulations of countries like Ecuador and Argentina and organisms like IEEE and CEA.

Keywords: *Distribution, disturbances, regulation, reliability, frequency.*

1. Introducción

Es evidente que las fallas que se suscitan en el sistema no ocurren constantemente durante el transcurso del año. La forma de cómo estas interrupciones afectan a todos los componentes de la red dependerá del tiempo de duración y la frecuencia de ocurrencia de las mismas.

Las redes de distribución radiales de la Subestación Salinas son sistemas cuyo funcionamiento es continuo, que falla aleatoriamente y que es reparable. Estos atributos dan lugar a una serie de índices de confiabilidad probabilísticos que están relacionados con los componentes del sistema y el tiempo de reposición del servicio.

2. Sistema Eléctrico de la Subestación

La Subestación Salinas es la responsable de suministrar energía de forma continua a los diferentes tipos de usuarios presentes en su sistema eléctrico. El nivel de voltaje de 69 KV que llega a la subestación es reducido a 13.8 KV a través del transformador de potencia, cuya capacidad es de 10/12 MVA. Posee barras de 13.8 KV, tipo METALCLAD, a las cuales están conectadas las 5 alimentadoras que conforman el sistema eléctrico de la Subestación.

Las alimentadoras son del tipo aéreo y forman una red de distribución eléctrica radial simple. El troncal principal de las alimentadoras es 3Ø con derivaciones 1Ø y 2Ø. La carga a la que alimenta estas alimentadoras es del tipo residencial-comercial, y lo hace por medio de transformadores 1Ø, cuyas capacidades están entre 15 y 100 MVA. Las alimentadoras no poseen reguladores de voltaje y se encuentran 2 bancos de capacitores desconectados, de conexión manual con capacidad de 300 y 600 KVAR.

2.1. Sistema de Protecciones

El sistema de Protección a nivel de 13,8 KV esta dado por un breaker con medio de interrupción en vacío con características para el nivel de voltaje mencionado. El breaker esta conectado al transformador. Los equipos de seccionamiento del trafo (cuchillas de puesta a tierra, interruptor, cuchillas de seccionamiento) utiliza como medio de interrupción gas SF6 y están incorporados al mismo formando una sola unidad.

La protección de las alimentadoras de la Subestación Salinas esta determinada por el conjunto interruptor-relé ubicado al inicio de cada una. En distintos puntos de las alimentadoras se encuentran fusibles con el propósito de proteger a las secciones y aislarlas de la troncal en caso de fallas.

Su sistema de protección contra rayos esta basado en la colocación de pararrayos para transformadores convencionales, dado el nivel isoceraúnico bajo que posee la zona.

3. Análisis del Sistema Eléctrico actual.

El número de fallas que se presentan en el sistema depende en gran parte de las condiciones en que se encuentren los diferentes elementos dispuestos en el sistema y de las condiciones ambientales donde este ubicado. Se requiere entonces que frente a una interrupción o disturbio en el sistema los elementos actúen de manera eficaz y rápida para mantener la continuidad del servicio.

Es necesario entonces realizar un diagnóstico del sistema actual y hacer una clasificación de las fallas que se tengan en el sistema para poder obtener parámetros que permitan realizar los ajustes necesarios para aumentar la confiabilidad del sistema.

3.1. Diagnóstico del Sistema.

Actualmente las condiciones del sistema de distribución eléctrico de la Subestación Salinas no son las más adecuadas, Esto se lo puede apreciar en la figura 4.1, donde se puede apreciar que el número de interrupciones han ido incrementando conforme pasan los años. Gran parte se debe al poco mantenimiento preventivo o que ciertos elementos de protección no se encuentran en funcionamiento, como los relés asociados a los interruptores ubicados al inicio de cada alimentador, lo cual aumenta la zona afectada en caso de que se produzca una falla.

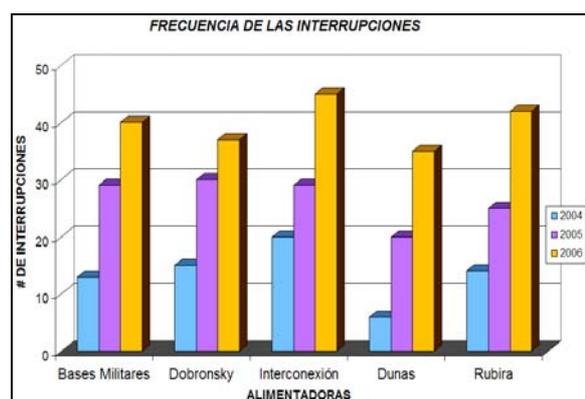


Figura 1. Frecuencia de las Interrupciones

Sin embargo, la empresa EMEPE se encuentra realizando múltiples proyectos enfocados a mejorar el servicio para sus clientes. Algunos son realidad como la nueva Subestación La Carolina, construida para expansión del sistema y transferencia de carga, y el plan para mantenimiento correctivo.

4. Análisis desde el punto de vista de la Confiabilidad del Sistema Eléctrico.

Los índices que nos permiten evaluar si el sistema eléctrico de distribución es confiable, basan su cálculo en la información estadística de las interrupciones, es decir en la información que tenga la empresa en lo que se refiere a cuantas veces fallo el sistema y a la indisponibilidad del servicio durante un periodo de tiempo, para nuestro caso se tiene un análisis de 3 años (2004, 2005, 2006).

Se propone entonces realizar un diseño de la topología del sistema donde se consideren parámetros para los diferentes elementos del sistema, como la probabilidad de que operen o no correctamente estos elementos frente a una falla y el tiempo de reposición del servicio.

4.1. Rediseño de la topología del sistema de Media Tensión basado en la Calidad del Servicio.

En este literal se pretende representar los aspectos más importantes de la red de distribución de la Subestación Salinas desde el punto de vista de la confiabilidad. El modelado de la red es un esquema sencillo que toma en cuenta la configuración radial simple del sistema, considerando que solo existe un camino entre la fuente de energía o alimentación y cualquier punto de carga. Si se presenta una falla en el sistema y uno de sus elementos falla, provoca que todo el sistema falle, por lo que se dice que todos los elementos del alimentador están en serie desde el punto de vista de la confiabilidad.

Los elementos que se pretende representar para modelar el sistema son los tramos o longitudes de las alimentadoras, la potencia instalada (número de consumidores) y los equipos de protección y seccionamiento.

4.2. Cálculo de índices de Confiabilidad.

Cada componente de la red tiene asociado una longitud, un tiempo de reparación y una tasa de falla distinta, siendo este el parámetro más significativo desde el punto de vista de la confiabilidad. Estos parámetros nos permiten establecer indicadores que miden o estiman la frecuencia y duración de las interrupciones, así como la indisponibilidad del servicio.

Los indicadores más comunes de confiabilidad son el SAIFI, SAIDI, CAIDI y ASAI y están orientados a los consumidores. Los indicadores ENS y AENS están orientados a la carga y se relacionan con la energía que no suministra el sistema cuando se encuentra expuesto a una falla. Las formulas para su cálculo son las siguientes:

SAIFI: Índice de frecuencia de interrupción promedio del sistema.

$$SAIFI = \frac{\text{Número total de consumidores int errumpidos}}{\text{Número total de consumidores servidos}}$$

SAIDI: Índice de la duración de la interrupción promedio del sistema.

$$SAIDI = \frac{\text{Suma total del tiempo de duración de la interrupción para cada consumidor}}{\text{Número total de consumidores servidos}}$$

CAIDI: Índice de la duración de la interrupción promedio de consumidores.

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} = \frac{\text{Suma total del tiempo de duración de la interrupción para cada consumidor}}{\text{Número total de consumidores int errumpidos}}$$

ASAI: Índice de la duración de la interrupción promedio de consumidores.

$$ASAI = \frac{SAIDI}{SAIFI} = \frac{\text{Consumidores} - \text{horas de servicio disponible}}{\text{Consumidores} - \text{horas demandadas}}$$

ASUI: Índice de la indisponibilidad promedio del servicio.

$$ASUI = 1 - ASAI$$

ENS: Energía no suplida.

$$ENS = \sum La_i \times U_i$$

Donde :

$$La_i = C \text{ arg a promedio conectada al punto de c arg a i}$$

AENS: Energía no suplida o índice de corte promedio del sistema.

$$AENS = \frac{\text{Energía total no sup lida}}{\text{Número total de clientes servidos}}$$

4.3. Rediseño de la topología del sistema de Media Tensión basado en la Calidad del Servicio.

El propósito de realizar un rediseño de este tipo es la disminución de las interrupciones, en su duración y frecuencia. El problema que se presenta al tener una configuración serie (si falla un componente del sistema entonces falla todo el sistema) puede ser resuelto por el uso de equipos de protección y seccionamiento. A continuación se exponen 4 modelos con los cuales se pretende mejorar los índices de calidad del servicio del sistema:

- CASO 1: Rediseño utilizando reconectores y fusibles en las derivaciones de las alimentadoras.
- CASO 2: Rediseño utilizando seccionalizadores, reconectores y fusibles en las derivaciones de las alimentadoras.
- CASO 3: Rediseño utilizando seccionalizadores, reconectores, fusibles en las derivaciones de las alimentadoras y equipos de transferencia de carga con retorno manual.
- CASO 4: Rediseño utilizando seccionalizadores, reconectores, fusibles en las derivaciones de las alimentadoras y equipos de transferencia de carga con retorno automático.

5. Análisis de Resultados

Para poder realizar una mejor interpretación de los resultados que se obtienen al calcular los índices de

confiabilidad para el sistema actual y los rediseños propuestos, se procede a realizar un *benchmark* con una empresa de similares características a la Subestación Salinas (empresa modelo), además de realizar una comparación con los índices referenciales que constan en la regulación Argentina, debido a que presenta una regulación semejante a la nuestra; ambas regulaciones establecen etapas de aplicación y están enfocadas a la calidad del suministro.

En la tabla 1 se muestran los valores de los índices del SAIDI, SAIFI y CAIDI tanto para la empresa modelo y los que se señalan en la regulación Argentina.

Tabla 1. Índices de Confiabilidad

	SAIFI	SAIDI	CAIDI
EMPRESA MODELO	1,38	2,53	1,85
REGULACIÓN ARGENTINA	4	3	---

Para el análisis de los demás índices de confiabilidad se realiza un estudio comparativo con los índices calculados para el sistema actual (CASO BASE). En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para el sistema actual.

Tabla 2. Índices de Confiabilidad CASO BASE

ALIMENTADORES	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ASUI	ENS	AENS
RUBIRA	6,4425	5,0251	0,7800	0,9994	0,0006	8,8098	6,6148
DOBRONSKY	6,2757	6,9033	1,1000	0,9992	0,0008	7,8283	10,3549
INTERCONEXIÓN	9,3426	5,6990	0,6100	0,9993	0,0007	10,7450	7,8622
LAS DUNAS	6,1741	5,1863	0,8400	0,9994	0,0006	5,5291	7,0977
B. MILITARES	6,8915	6,8915	1,0600	0,9992	0,0008	11,2932	10,0908

5.1 Análisis de resultados desde el punto de vista de la Confiabilidad.

En la figura 2 se puede apreciar los valores calculados del SAIFI por alimentador para los casos de estudio. En este gráfico también se muestran los valores “límites” del SAIFI que permiten evaluar el desempeño del sistema de la Subestación Salinas desde el punto de vista de la calidad del servicio. De esta figura se desprende que para los casos de rediseños propuestos, todos los valores del índice SAIFI están dentro de los valores referenciales de la empresa modelo y la regulación argentina. Este comportamiento también se lo puede apreciar en la figura 3 y 4 donde se muestran los valores obtenidos del SAIDI y CAIDI respectivamente.

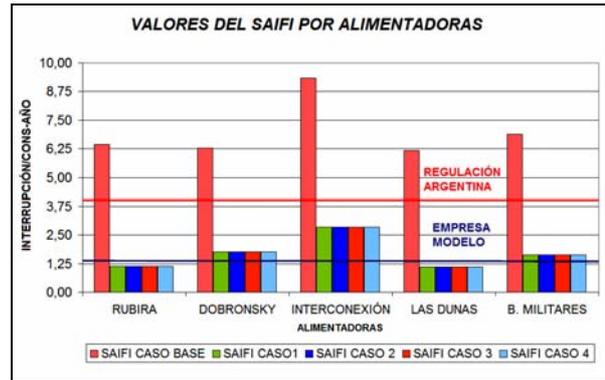


Figura 2. SAIFI calculado por alimentadoras

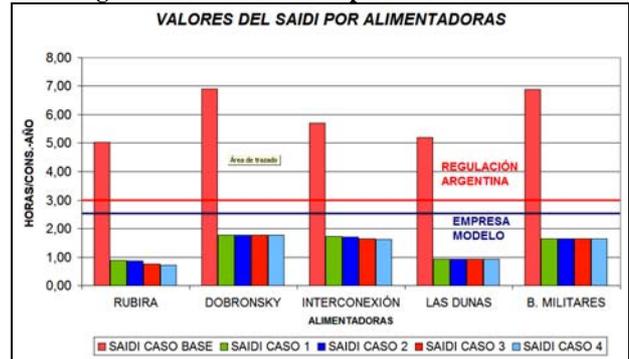


Figura 3. SAIDI calculado por alimentadoras

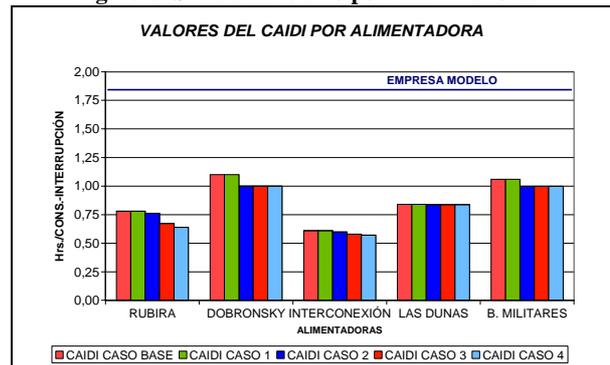


Figura 4. SAIDI calculado por alimentadoras

Para el análisis de los demás índices solo se establece una comparación con el CASO BASE. En las figura 5, 6 y 7 se puede apreciar que conforma vamos seccionando en tramos a los alimentadores y adicionando equipos de transferencia de carga sus valores se reducen considerablemente.

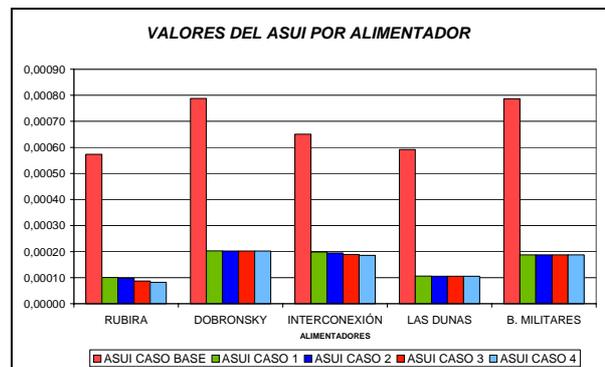


Figura 5. ASUI calculado por alimentadoras

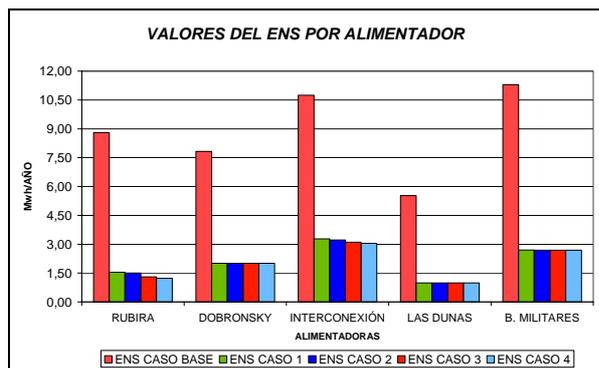


Figura 6. ENS calculado por alimentadoras

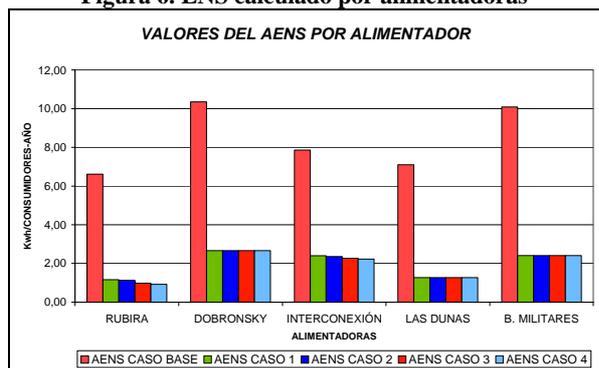


Figura 7. AENS calculado por alimentadoras

5.1 Análisis del costo de inversiones para la mejora de la confiabilidad del sistema.

Una vez propuestas las alternativas técnicas (CASOS) para la mejora de la confiabilidad del sistema de distribución primaria de la subestación Salinas, se hace necesario determinar el criterio para elegir la alternativa que resulte económicamente conveniente para la empresa.

Este criterio es el análisis costo-beneficio, es decir, con una determinada inversión en tecnología, cuantificar el nivel de beneficio que obtendrá la empresa. Los costos serán medidos a través de dos variables económicas: el costo de interrupción total de la alimentadora y el costo interrupción por consumidor. El beneficio será cuantificado a través de la mejora de la confiabilidad del sistema.

En la figura 8 se muestra el costo anual de interrupción para cada mejora técnica por alimentador. De esta figura se puede observar que el costo anual de interrupción para cada caso propuesto se mantiene por debajo del costo que se obtiene en el CASO BASE en todas las alimentadoras, a excepción de la alimentadora Las DUNAS.

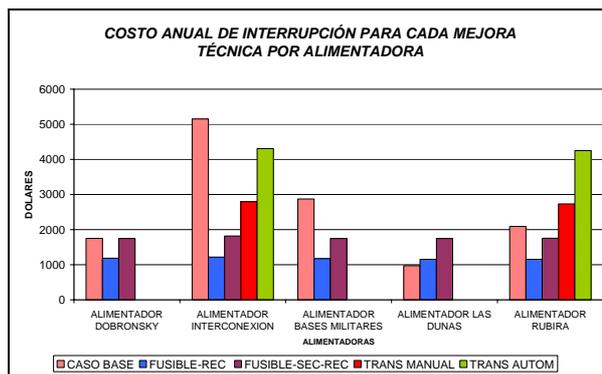


Figura 8. Costo anual de interrupción

En la figura 9 se muestra el costo anual de interrupción por consumidor para cada mejora técnica por alimentador. De esta figura se desprende que los costos anuales de interrupción por consumidor obtenidos para los CASOS 1 y 2 se disminuyen con respecto al costo que se tiene en el CASO BASE. Mientras que para el CASO 3 y 4 estos costos aumentan.

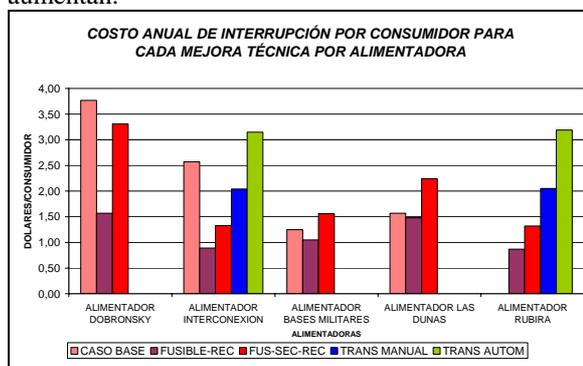


Figura 9. Costo anual de interrupción por consumidor

Luego de este análisis, la alternativa de equipos de protección escogidos para mejorar la calidad del servicio de cada una de las alimentadoras se muestra en la tabla 3, en donde se muestra que la mejor opción es adicionar fusibles y reconectores a todas las alimentadoras, a excepción del alimentador LAS DUNAS, en donde la inversión no se justifica.

ALIMENTADOR	CASO ESCOGIDO	COSTO TOTAL \$	COSTO POR CONSUM. \$/CONS
RUBIRA	CASO 1	1153,96	0,87
DOBRONSKY	CASO 1	1187,14	1,57
INTERCONEX.	CASO 1	1217,08	0,89
BASES	CASO 1	1176,46	1,05
LAS DUNAS	NINGUNA	975,53	1,25

Tabla 3. Caso escogido para cada alimentador

6. Conclusiones

- La confiabilidad depende de las condiciones del sistema, de hecho, el número de fallas que se

- presenten obedece al desempeño satisfactorio de los elementos dispuestos en la red.
- La recolección de datos es un parámetro que influye en la evaluación de los índices de confiabilidad del sistema. Para el caso en estudio se cuenta con datos de interrupciones de 3 años, este hecho dificulta la obtención de buenos resultados por medio de un benchmark con otras empresas, debido a que llevan un registro de interrupciones de 10 años o más.
 - El análisis de los diferentes casos expuestos (CASO 1, 2, 3 y 4) muestra que logramos reducir los índices de confiabilidad (SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, ASUI, ENS, AENS) considerablemente con respecto a los índices obtenidos en el CASO BASE, hasta ubicarlos en el rango de los índices indicados en la regulación argentina y los señalados en la empresa modelo.
 - La mejora en los índices de confiabilidad esta directamente relacionado con el costo de la inversión en los equipos de protección. Con el análisis económico se determinó que realizar mejoras del sistema de protección a través de inversiones de corto plazo (menores a un año) en equipos como fusibles y seccionadores (de bajo costo), representa una leve mejora en los índices de confiabilidad. Por el contrario, equipos como reconectores y de transferencia de carga (de alto costo), incrementan de manera considerable la confiabilidad del sistema.
 - No siempre grandes reducciones en los costos de interrupción implican una gran reducción en la frecuencia de las interrupciones. Adicionar equipos de protección como fusibles, una alternativa de bajo costo de inversión, no disminuye la frecuencia de las interrupciones en gran medida. Alternativas que implican un alto costo de inversión, como adicionar reconectores o equipos de transferencia de carga disminuyen sustancialmente la frecuencia de las interrupciones.
 - Finalmente, la alternativa escogida para el rediseño del sistema de distribución de la Subestación Salinas es adicionar fusibles y reconectores a todas las alimentadoras, a excepción del alimentador LAS DUNAS, donde el costo anual de interrupción presente en el sistema actual es menor que el costo anual de interrupción de cualquier mejora que se haga, por lo que no se justifica.

7. Agradecimientos

Se agradece a la empresa EMEPE por facilitar la información necesaria para el desarrollo de este proyecto y a los ingenieros Tomás Chávez Franco, Renato Rodríguez y Marco Rengifo. También a la importante colaboración de nuestro director de proyecto PHD. Cristóbal Mera.

8. Referencias

- [1] Delaware Public Service Comisión, *Electric Service Reliability and Quality Standards*, 2005.

- [2] EMEPE, *Informe de Labores del 2004*, Libertad, 2004.
- [3] EMEPE, *Informe de Labores del 2005*, Libertad, 2005.
- [4] IEEE Std. 1366-2000, *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices*.
- [5] IEEE Std. 493-1997, *IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (Gold Book)*.
- [6] IEEE Working Group on System Design, *Trial Use Guide for Power Distribution Reliability Indices, Report P1366*, IEEE, 1998.
- [7] Regulación del Servicio de Distribución en Argentina, *Calidad de servicio y Penalizaciones*, Actas del Aula de regulación, IIT, UPCO, Abril 1996.
- [8] Regulación del Servicio de Distribución en Ecuador, *Calidad de servicio eléctrico de Distribución*, Regulación No. CONENELEC – 004/01.