



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

“Análisis y Rediseño de la subestación Eléctrica Machala, de la Actual Empresa Eléctrica CNEL El Oro”

Julio Jonnathan Feijoo Ajila, Danny David Macías Villamar, Marcos Isaías Yaulema Suquilanda
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
Escuela Superior Politécnica del Litoral
Km.30.5 Vía Perimetral, Guayaquil
feijoo_6@hotmail.com, dannymv10@hotmail.com, jl_chc@hotmail.com

PhD. Cristóbal Mera Gencón
Escuela Superior Politécnica del Litoral
cmera@espol.edu.ec

Resumen

Este trabajo de investigación se basa en el análisis actual de la Empresa Eléctrica CNEL El Oro, para ello hemos seleccionado una de sus Subestaciones Eléctricas y hemos analizado su área de influencia. Luego, calculamos los índices de confiabilidad del servicio y los comparamos con índices internacionales de otras subestaciones eléctricas lo cual nos indicara cual es el estado actual de la subestación eléctrica Machala. Finalmente, analizamos varios casos en los cuales se implementan soluciones y elegiremos la mejor opción para rediseñar el sistema de la subestación Eléctrica Machala con un nivel en la calidad de servicio que esté acorde con los índices internacionales, normas del sistema eléctrico y la economía de la empresa.

Palabras claves: *Análisis, Índices Internacionales, Rediseño y Calidad de Servicio.*

Abstract

This research is based on the current analysis of the CNEL El Oro Electric Company, for this we have selected one of its electrical substations and analyzed the influence area. Then, we calculate and compare the service reliability indices with international rates from other electrical substations which will tell us the current state of Machala electrical substation. Finally, we analyze several cases in which solutions were implemented and we choose the best option to redesign Machala electrical substation system with a quality service level that is consistent with international rates, electrical system standards and company's economy.

Key words: *Analysis, International Ratings, Redesign and Quality Service.*

1. Introducción

Para las empresas eléctricas es esencial suministrar la energía eléctrica sin interrupciones, muchas veces las interrupciones ocasionan daños de la materia prima de una línea de producción, daños a equipos costosos y en el hogar daños a equipos electrónicos.

Con el presente trabajo se espera aportar para al mejoramiento de energía suministrada basados en la calidad del servicio desde la subestación Machala hacia las cuatro alimentadoras de ésta, tomando en cuenta las normas, reglamentos y la economía de la empresa.

2. Descripción del Sistema

La empresa eléctrica de la provincia de El Oro tiene 16 subestaciones a su cargo. Posee dos barras EMELORO1 Y EMELORO2, la primera se conecta con la subestación San Idelfonso y de allí al SIN y la segunda se conecta con la interconexión con Perú.

La subestación Machala de la empresa eléctrica Regional El Oro, se encuentra ubicada en la avenida Ferroviaria Km. 1½. Trabaja con una configuración de barra simple. Su barra de 69 Kv está conectada con las subestaciones El Cambio, Los Pinos y Machala Centro. Posee dos (2) transformadores de Potencia de 10/12.5 MVA conectado en paralelo, que son los encargados de transformar los 69 Kv a 13.8 KV. De la barra de 13.8KV salen las alimentadoras (Unioro, M. Vargas, Expreso 2 y Emproro) que dan servicio eléctrico a gran parte de Machala y sus alrededores.

La alimentadora Expreso2 se conecta a dos unidades generadoras de 2MW, dando así 4MW entre las dos, en caso de necesitarse. La alimentadora tiene 2.43 Km de longitud desde la barra de 13.8 KV de la subestación Machala, hasta las unidades generadoras indicadas.

A continuación se detallan las longitudes de las alimentadoras y su capacidad instalada:

Tabla 2.1. Información de Alimentadoras SE Machala

Nombre de Alimentadora	Longitud (Km)	Capacidad (KVA)
Madero Vargas	22.53	11400
Unioro	20.05	2950
Expreso 2	7	1485
Emproro	48.47	17802.5

El dimensionamiento de los conductores de ACSR, es el siguiente:

Tabla 2.2 Información de los conductores de las alimentadoras

Fase	Calibre	Nombre	Capacidad Térmica (A)	
			Sin Viento	Con Viento
3φ	4/0	Penguin	225	340
Neutro 3φ	1/0	Raven	142	220
1φ	2	Sparrow	108	160
Neutro 1φ	4	Swan	78	123

A lo largo de las alimentadoras se encuentran transformadores de distribución monofásicos y bancos trifásicos que nos dan la capacidad instalada, se detalla el número de transformadores para cada alimentadora:

Tabla 2.3 Numero de Transformadores por Alimentadora

Alimentadora	Número de Transformadores	Capacidad (KVA)
Madero Vargas	233	11400
Unioro	76	2950
Expreso 2	35	1485
Emproro	381	17802.5

De la misma manera, a lo largo de las alimentadoras se conectan bancos de capacitores para la compensación de potencia reactiva.

En la alimentadora Unioro tenemos un banco de 600 KVAR ubicado en la circunvalación Norte entrando a la vía el limón. Existe otro banco de capacitores en esta misma alimentadora a la salida de la subestación Machala.

En la alimentadora M. Vargas existe un banco de capacitores de 600 KVAR también ubicado en la Marcel Laniado y Napoleón Mera.

Además se tiene un banco de capacitores de 1200 KVAR en la barra de 13,8 KV dentro de la subestación.

La carga de la subestación Machala se reparte a sus cuatro alimentadoras, a continuación se presenta una tabla con la capacidad instalada y sus máximos niveles de carga en (MW):

Tabla 2.4 Carga Máxima de cada alimentadora

Alimentadora	Capacidad Instalada (MVA)	Demanda Máxima (MW)
Madero Vargas	11.400	4.70951
Unioro	2.950	3.36975
Expreso 2	1.485	4.6688
Emproro	17.8025	3.522504

3. Análisis del Sistema Eléctrico Actual de la Subestación Eléctrica Machala

3.1. Cálculo de Voltaje

Lo primero que realizamos en nuestro análisis es el Cálculo del voltaje en las alimentadoras, de esa manera determinaremos si es necesario la utilización de capacitores y/o reguladores de voltaje.

Según la regulación No 004/01 del CONELEC referente a la calidad del servicio para las empresas distribuidoras, los límites del nivel de voltaje son los siguientes:

Tabla 3.1 Límites de regulación de Voltaje del CONELEC.

Nivel de Voltaje	Límites
Alto Voltaje	+/- 7,0 %
Medio Voltaje	+/- 10,0 %
Bajo Voltaje Urbano	+/- 10,0 %
Bajo Voltaje Rural	+/- 13,0 %

Con la ayuda del programa simulador SYNERGEE que se encuentra en las oficinas de la Empresa Eléctrica, determinamos el voltaje al final de cada una de las alimentadoras, además pudimos simular el escenario de utilizar bancos de capacitores en puntos seleccionados de la alimentadora obteniendo como resultado que la utilización de capacitores en las alimentadoras no era necesaria.

Tabla 3.2 Voltaje por fase al final de cada alimentadora

Voltaje por Fase al final de cada Alimentador (KV)				
Fases	Madero Vargas	Unioro	Expreso 2	Emproro
A	13,58	13,70	13,39	13,49
B	13,42	13,71	13,63	13,54
C	13,42	13,63	13,39	13,57

3.2. Factor de Utilización

Cada alimentador de la subestación tiene una capacidad nominal instalada, en que porcentaje está siendo utilizado, es lo que establece el factor de utilización.

El factor de utilización de un sistema es la relación entre la demanda máxima para la capacidad nominal instalada del sistema.

$$FU = \frac{\text{Demanda Máxima}}{\text{Capacidad Nominal}}$$

Tabla 3.3 Factor de Utilización de las alimentadoras

F. Utilización (%)	A	B	C
Madero Vargas	71,29	60,37	55,51
Unioro	53,81	84	64,25
Expreso 2	58,38	60,05	77,87
Emproro	37,5	58,25	62,19

3.3. Protecciones eléctricas

Las protecciones del sistema del lado de 69KV las realiza el relé electrónico DPU 2000R que hace a su vez de relé de sobre-corriente 50 y 51.

Para la protección de el transformador se usa un TPU 2000R que trabaja como un relé de diferencial (87) que abre los interruptores de potencia ubicados a los lados de los transformadores, tanto del lado de 69KV como el de 13.8KV. Además el TPU 2000R también es usado con la función de un relé de Sobre corriente Instantánea (50) y un relé de Sobre corriente Temporizada (51), los cuales abren solo los interruptores de potencia del lado del bobinado secundario (13.8KV).

Las alimentadoras Unioro y Madero Vargas, están protegidas por el re-conectador Cooper Vacuum form5.

La alimentadora Expreso2, está protegida por un reconectador General Electric GEC CDG36EF5A5.

La alimentadora Emproro, está protegida por un Relé ABB de la serie OVR 3 seteados trifásicamente y no individualmente por fase.

3.4. Información de las interrupciones

Para nuestro estudio obtuvimos la información estadística de las fallas de las alimentadoras y de los transformadores de distribución instalados en la troncal y en los ramales de cada alimentadora:

Tabla 3.4 Número de Interrupciones (alimentadoras y transformadores)

	2007	2008
Madero Vargas	19	72
Unioro	20	33
Expreso 2	3	16
Emproro	22	45
Total	64	166

3.5. Parámetros de Diseño del Sistema

Para empezar la evaluación de la confiabilidad de los sistemas de distribución es necesario realizar los cálculos de los parámetros que nos ayudaran en nuestros cálculos.

La tasa de falla de un componente puede expresarse en términos de la longitud de este:

$$\lambda = b * L$$

λ = La tasa de falla estimada (falla/año).

b = Factor de escala de la tasa de falla.

L = Longitud de la alimentadora o un segmento de ella.

Realizando los cálculos obtenemos:

Tabla 3.5 Tasa de falla y tiempo de restauración

Aliment.	Troncal Principal		Ramal Monofásico	
	Tasa de Falla λ	Tiempo Medio de Reparación	Tasa de Falla λ	Tiempo Medio de Reparación
	(falla/Km-año)	(horas)	(falla/Km-año)	(horas)
Madero Vargas	0,425	0,769	0,131	1,38
Unioro	0,42	1,593	0,13	1,38
Expreso2	0,42	0,353	0,13	1,38
Emproro	0,152	1,159	0,13	1,38

Tabla 3.6 Duración de las interrupciones

Alimentadoras	Duración de interrupciones (horas)
Madero Vargas	10,767
Unioro	7,97
Expreso2	1,76
Emproro	8,12

3.6 Índices de Confiabilidad orientados al consumidor y a la energía

Índice de Frecuencia de Interrupción Promedio del Sistema (SAIFI)

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i * N_i}{\sum N_i}$$

Índice de la Duración Interrupción Promedio del Sistema (SAIDI)

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i}$$

Índice de la Duración de la Interrupción Promedio de Consumidor (CAIDI)

$$CAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum \lambda_i N_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI}$$

Índice de la Disponibilidad Promedio de Servicio (ASAI)

$$ASAI = \frac{\sum N_i * 8760 - \sum U_i * N_i}{\sum N_i * 8760}$$

Índice de Indisponibilidad Promedio del Servicio (ASUI)

$$ASUI = 1 - ASAI$$

Índice de Energía total no suplida (ENS)

$$ENS = \sum Lai * Ui$$

Donde:

λ_i = Tasa de falla en el punto de carga i .

N_i = Número de consumidores en el punto de carga i .

Lai = Carga promedio conectada al punto de carga i .

U_i = Indisponibilidad del sistema en el punto i .

Realizando los cálculos obtenemos los índices de cada alimentadora los cuales los comparamos con los índices de varias empresas internacionales: CEA (Canadian Electrical Association), BC Hydro y COOPER.

Tabla 3.7 Índices de Confiabilidad de las alimentadoras

Índices de alimentadoras				
	Madero Vargas	Unioro	Expreso 2	Emproro
SAIFI	4,0933547	3,1613907	2,0364984	8,817153
SAIDI	7,5041885	3,347955	1,9495605	6,763679
CAIDI	1,8332613	1,0590134	0,9573101	0,7671047
ASAI	0,9991434	0,9996178	0,9997774	0,9992279
ASUI	0,0008566	0,0003822	0,0002226	0,0007721
ENS	36590,486	9038,9896	2237,1207	39278,772

Tabla 3.8 Índices de Confiabilidad de Sistemas de Distribución de Canadá

Índices Internacionales				
	CEA	BC Hydro	Cooper	
SAIFI	1,86	1,45	1	Int./Cons.-año
SAIDI	4,94	5,01	1	Hrs/cons.-año
CAIDI	2,66	3,44	1	Hrs./cons.-inter.
ASAI	0,99944	0,99943	0,99989	-
ASUI	-	-	0,011	-
ENS				Kwh/año

Es claro que los índices de nuestras alimentadoras no están en un rango adecuado, por lo que se deberá implementar soluciones que corrijan estos indicadores de calidad de servicio.

3.7. Reglamento Vigente de la Calidad de Servicio Técnico

Según la regulación No. CONELEC – 004/01 para el cálculo de los índices de calidad basados en la potencia instalada, en Ecuador, se consideran todas las interrupciones del sistema con duración mayor a tres 3 minutos, incluyendo las de origen externo, debidas a fallas en transmisión

Los índices de calidad son los siguientes:

Frecuencia Media de Interrupción por kVA nominal instalado (FMIK):

En un período determinado, representa la cantidad de veces que el kVA promedio sufrió una interrupción de servicio.

$$FMIK_{Aj} = \frac{\sum_i KVA_{iAj} f_{s_{iAj}}}{KVA_{instAj}}$$

Tiempo Total de Interrupción por kVA nominal instalado (TTIK):

En un período determinado, representa el tiempo medio en que el kVA promedio no tuvo servicio.

$$TTIK_{Aj} = \frac{\sum_i KVA_{iAj} f_{s_{iAj}} * T_{fs_{iAj}}}{KVA_{instAj}}$$

Los límites admisibles para dichos índices son los siguientes:

Tabla 3.9 Límites admisibles de FMIK y TTIK

Índices	FMIK	TTIK
Red	4	8
Alimentador Urbano	5	10
Alimentador Rural	6	18

La información recopilada es a partir del año 2002 hasta el año 2008, aquí les mostramos los índices del año 2008.

Tabla 3.10 Índices de FMIK y TTIK 2008 para alimentadoras

Alimentador	Nº Trafos	Índices Actuales	
		FMIK	TTIK
Madero Vargas	229	16,31	12,54
Unioro	186	17,11	27,26
Expreso 2	168	0,85	0,30
Emproro	207	12,03	13,95

Otra vez es claro que nuestras alimentadoras están fuera de los límites admisibles.

4. Rediseño del Sistema Eléctrico

4.7. Determinación de parámetros de diseño

Los parámetros de diseño para nuestro sistema de distribución son las tasas de fallas, tiempos de restauración y duración de la salida de servicio.

4.8. Resultados del rediseño

4.8.1. Presentación de los resultados de los índices

Para el rediseño del sistema se analizaron tres casos: Caso Base, Caso Uno y Caso Dos.

El Caso Base muestra los índices actuales de cada alimentadora.

Tabla 4.1 Resumen de Índices de Confiabilidad (Caso Base)

Subestación Machala (Caso Base)				
Índices	M. Vargas	Unioro	Expreso 2	Emproro
SAIFI	4,09	3,16	2,04	8,82
SAIDI	7,50	3,35	1,95	6,76
CAIDI	1,83	1,06	0,96	0,77
ASAI	0,9991434	0,9996178	0,9997774	0,999227891
ASUI	0,0008566	0,0003822	0,0002226	0,000772109
ENS	36590,49	9038,99	2237,12	39278,77

El Caso Uno muestra los índices luego de que implementamos fusibles en cada ramal con carga y usuarios significativos del modelo actual de el sistema (caso base).

Tabla 4.2 Resumen de Índices de Confiabilidad (Caso Uno)

Subestación Machala (Caso 1)				
Índices	M. Vargas	Unioro	Expreso 2	Emproro
SAIFI	2,18	2,91	1,87	8,42
SAIDI	3,35	3,00	1,71	6,22
CAIDI	1,54	1,03	0,92	0,74
ASAI	0,999617	0,999657	0,999804	0,9992896
ASUI	0,000382	0,000342	0,000195	0,0007103
ENS	16344,50	8100,54	1874,48	37361,31

Subestación Machala (Caso 2)				
Índices	M. Vargas	Unioro	Expreso 2	Emproro
SAIFI	2,18	2,91	1,87	8,42
SAIDI	2,96	2,84	1,78	5,90
CAIDI	1,36	0,98	0,95	0,70
ASAI	0,9996618	0,9996755	1,00	1,00
ASUI	0,0003382	0,0003245	0,00	0,00
ENS	14444,74	7679,68	1944,41	35954,26

El Caso Dos muestra los índices luego de que implementamos seccionamientos en algunos de los tramos de la troncal aprovechando el hecho que ya existe la infraestructura para hacer transferencia de carga.

Tabla 4.3 Resumen de Índices de Confiabilidad (Caso Dos)

4.8.2. Presentación de los resultados de los Costos

Para el estudio económico se usaran parámetros involucrados con el cálculo de los índices de confiabilidad, así como los precios de los dispositivos que se proponen para la mejora en la Calidad del Servicio Técnico.

A continuación se muestra la tabla de resumen para los casos propuestos:

Tabla 4.4 Análisis de Costos - Beneficios

Análisis de Costos - Beneficios (\$)			
Alimentadora	Caso Base	Caso Uno	Caso Dos
M. Vargas	268595,16	119977,97	106032,69
Unioro	37289,70	33418,21	31681,99
Expreso2	2817,28	2458,95	2550,69
Emproro	350479,19	333369,92	320815,03
Costo Total	659181,33	489225,05	461080,40

Se deberán escoger las opciones que satisfagan tanto a la empresa distribuidora como a los abonados de ella. Se debe tener en cuenta que la opción a escoger deberá presentar índices de confiabilidad con valores cercanos a los típicos y con menor cantidad de Energía no suplida.

Los valores seleccionados en la tabla son los casos en los que se obtiene una mayor reducción de pérdidas económicas, exceptuando la alimentadora Unioro en cuyo caso no se escogió la opción de mayor reducción de pérdidas porque la inversión era muy alta; por lo tanto; se escogió la opción más viable en términos económicos.

4.9. Análisis del rediseño

La reducción de las pérdidas en dólares se dio mediante la elección de entre los casos propuestos que nos dieron menos pérdidas de energía, USD y que disminuyeron más los índices.

Tabla 4.5 Reducción de Pérdidas en dólares

Reducción de Pérdidas en USD.	
Madero Vargas	106032,69
Unioro	33418,21
Expreso 2	2458,95
Emproro	320815,03
Total Ct	462724,88

La inversión total propuesta a pagarse a un año plazo es de 5626,68 USD para reducir la energía no suplida de 87055,88437 KW/año con un costo de 659181,327 USD dólares por año a solamente 60374 KW/año con un costo de 462724,8698 USD.

Por otro lado, se redujo el Ca (Costo de energía no suplida por consumidor) de 58,05 USD al año a 40,80 USD al año.

5. Conclusiones y Recomendaciones

Luego de realizar los estudios técnicos y económicos para la Subestación Machala, podemos concluir:

1. La reducción de pérdidas económicas es un punto clave que debe ser tomado en cuenta y usarlo para tomar las decisiones en cuanto a la implementación de nuevas protecciones para los sistemas de distribución.
2. Para la alimentadora Madero Vargas, se debe realizar la implementación de las mejoras en el sistema de protecciones propuestas en el caso dos. Realizando una inversión de USD\$ 4,190 se logra reducir las pérdidas por energía no suplida en USD\$ 162,563.
3. Para la alimentadora Unioro, se debe realizar la implementación de las mejoras en el sistema de protecciones propuestas en el caso uno. Realizando una inversión de USD\$ 141 se logra reducir las pérdidas por energía no suplida en USD\$ 3,871.
4. Para la alimentadora Expreso2, se deben realizar implementaciones de las mejoras en el sistema de protecciones propuestas en el caso uno. Realizando una inversión de USD\$ 423 se logra reducir las pérdidas por energía no suplida en USD\$ 359; aunque en el primer año luego de la implementación de las mejoras no se vea reflejada la reducción.
5. Para la alimentadora Emproro, se debe realizar la implementación de las mejoras en el sistema de protecciones propuestas en el

caso dos. Realizando una inversión de USD\$ 871 se logra reducir las pérdidas por energía no suplida en USD\$ 29,664.

6. En cuanto al nivel de voltaje y compensación de potencia reactiva, no es necesario instalar bancos de capacitores en ninguna de las alimentadoras. El nivel de voltaje está dentro de los límites permitidos según la reglamentación del CONELEC.
7. En cuanto a la cargabilidad de las líneas, no existe ninguna sobrecarga y según el factor de utilización la única fase que podría estar un poco cargada es la fase B del circuito alimentador Unioro con un Factor de Utilización de 84%.
8. El máximo desbalance de corriente se dio en el mes de Abril en todas las alimentadoras excepto Madero Vargas que disminuyó en 1.80 %.
9. Los valores calculados de los índices FMIK y TTIK para los años 2002 al 2006, no están dentro de los límites establecidos por la regulación del CONELEC. En los años 2007 y 2008; disminuyeron acercándose a los valores límites permitidos, pero aun fuera de estos. Este hecho es atribuido a los cambios realizados en la potencia instalada.
10. En cuanto a la estadística de fallas por año, se nota un aumento considerable en el número de interrupciones cuando se incluyen las fallas de los transformadores de distribución y sus componentes (fusibles, puente, crucetas, etc.).

Se puede recomendar lo siguiente:

1. Realizar con más frecuencia el mantenimiento preventivo a los transformadores de distribución.
2. Cambiar los fusibles por seccionadores, en los puntos donde se realizan los seccionamientos de las alimentadoras.

6. Bibliografía

- Glover J. Duncan y Mulukutla S. Sarma - Sistemas de Potencia Análisis y Diseño, Tercera Edición, Editorial Thomson ,2004
- Grainger Jhon J. y William D. Stevenson, Jr - Análisis de Sistemas de Potencia, Mc Graw Hill Interamericana Editores S.A de
- C.V, 1996.

- Harper Enríquez - Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctrica, Segunda Edición, Editorial Limusa,2002
- Masón C. Russell - El Arte y la Ciencia de la Protecciones por Relevadores, México, D.F. Continental, 1990
- Mc Graw-Edison Company - Distribution Systems Protection Manual
- Ramírez Castaño Samuel, Redes de Distribución de Energía, Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Manizles, 1988.
- REGULACION No. 004/01 – CONELEC- Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución.
- Yebra Morón Juan Antonio, Compensación de Potencia Reactiva en Sistemas eléctricos, México , Mc Graw-Hill,1987