

# Propuesta para lograr la Operación en Isla Intencional de un Sistema real de Distribución que dispone de Generación Distribuida

Vásquez Miranda Paúl Fabricio, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador  
Fabara Tobar Nelson Ricardo, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador

**Resumen** -La operación en isla intencional de redes de distribución con generación distribuida, sería una alternativa para mejorar la calidad, eficiencia y confiabilidad del suministro de energía. Esta condición operativa exhibe el incremento de corrientes de cortocircuito provocado por flujos de corrientes bidireccionales así como variaciones en aportes de potencia a la red por la intermitencia en disponibilidad del recurso hídrico. Este trabajo aborda un estudio de diseño de isla, coordinación y modernización de protecciones, validado en un sistema de distribución real que posee la Mini Central Hidroeléctrica Perlabí conectada al alimentador 57E de la subestación de distribución Pomasqui de la Empresa Eléctrica Quito. Esta operación se garantiza con una banda de potencias de generación, basada en comportamiento histórico del recurso hídrico. Para el sistema de protecciones, se propone usar relés direccionales mediante cálculo de corrientes de carga y cortocircuito, por sus características de sobrecorriente direccional y detección de bajos voltajes.

**Índices** -Generación Distribuida, Isla Intencional Corrientes Bidireccionales, Alimentadores de Distribución, Salvado de Fusibles.

## I. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica desde siempre ha sido el motor de desarrollo económico en la sociedad. Es un recurso predominante en las diferentes economías a nivel mundial, debido a sus múltiples aplicaciones en procesos industriales, domésticos y de tecnologías de la información.

Los recursos naturales renovables han dejado de lado las formas tradicionales de producción de energía con gran impacto ambiental como son: el petróleo y gas natural. Hoy en día es común por parte de las empresas distribuidoras el incentivo al ahorro, eficiencia energética y nuevas formas de producción de energía limpia y renovable.

P.Vásquez, Profesor Principal en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de La Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, (e-mail: [paul.vasquez@epn.edu.ec](mailto:paul.vasquez@epn.edu.ec)).

R.Fabara, Funcionario del ECUACIER desempeña actividades como Analista Técnico y Gestor de Contenidos para el World Energy Council Ecuador (CECME), Quito-Ecuador, (e-mail: [nelson.fabara@epn.edu.ec](mailto:nelson.fabara@epn.edu.ec), [rfabara@wececuador.org](mailto:rfabara@wececuador.org)).

Estas fuentes de energía renovable se las encuentra de forma ilimitada en la naturaleza como son: la solar, hidráulica, eólica, biomasa, geotérmica, mareomotriz, etc.; permitiendo la

intervención de nuevas tecnologías en la construcción de centrales de generación.

Este tipo de generación a menor escala se la conoce como Generación Distribuida, con su operación cercana a los núcleos de consumo lo cual reduce las pérdidas por transporte, menores caídas de voltaje y continuidad del servicio eléctrico.

En el Ecuador el desarrollo de GD ha ido tomando fuerza debido al potencial de sus recursos naturales. Cada vez se acentúa la investigación e implementación de tecnologías amigables con el medio ambiente.

El país cuenta con algunos proyectos pioneros en el desarrollo de GD, uno de estos es la Central Hidroeléctrica Perlabí.

## II. MARCO TEÓRICO

### A. Que es la Generación Distribuida

La GD es un término que encierra una gran cantidad de factores como son: tipo de tecnología, nivel de penetración, sistema de interconexión a la red y su modo de operación.

El DPCA (Distribution Power Coalition of América), tiene una apreciación de la GD como: “cualquier tecnología de generación a pequeña escala que proporciona electricidad en puntos más cercanos al consumidor que la generación centralizada y que se puede conectar directamente al consumidor o a la red de transporte o distribución” [1].

La IEA (International Energy Agency), tiene una definición de GD como: “únicamente, la que se conecta a la red de distribución en baja tensión y la asocia a tecnologías como los motores, mini y microturbinas, pilas de combustible y energía solar fotovoltaica” [1].

### B. Operación en Isla

Uno de los aspectos fundamentales y relevantes del concepto de GD es su modo de operación, ya que de esto dependen las ventajas y desventajas a la hora de su funcionamiento.

Como se observa en la Fig. 1, la operación en isla consiste en la separación momentánea o permanente de la GD, de la red de distribución.

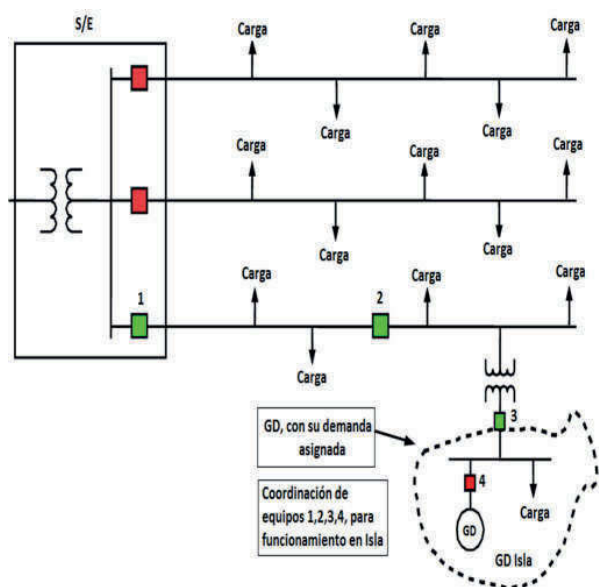


Fig.1. Operación en isla con GD.

Para la reconexión de la GD hacia la red se necesita una sincronización y cierre automático de elementos de protección, la cual esta monitoreada por el centro de control de la subestación en conjunto con el sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition System). La cantidad de generación requerida por los usuarios al momento del ingreso debe ser regulada, reconectándose al mismo nivel de voltaje y frecuencia [2].

*C. Operación en Isla Intencional*

El término isla intencional o planeada consiste en la separación de la GD, con su demanda asignada. Estas microredes se han desarrollado para aumentar la confiabilidad, reducción de pérdidas, costos y por ende la diversificación del suministro de electricidad.

La isla intencional no es riesgosa ya que está prevista o planeada. Isla planeada implica desconectar y volver a conectar a la red eléctrica según la necesidad requerida [2].

Para la operación en isla intencional es necesario realizar varios análisis, estudios y simulaciones en el alimentador seleccionado a distintas demandas y condiciones de funcionamiento. Se deben analizar varios factores como son: corrientes de falla, perfiles de voltaje, parámetros de operación y coordinación de los equipos de protección existentes.

Lo que está establecido en la norma IEEE Std 1547.4™ se refiere a la conexión y desconexión de las islas de la red principal, siempre y cuando el equipo de seguridad y protección este fijado correctamente. Dependiendo del grado de funciones de supervisión y control necesarios, este sistema de protecciones necesita ser muy sofisticado [3].

III. PROCEDIMIENTO PROPUESTO

En la Fig. 2 y 3 se plantea el procedimiento del estudio.

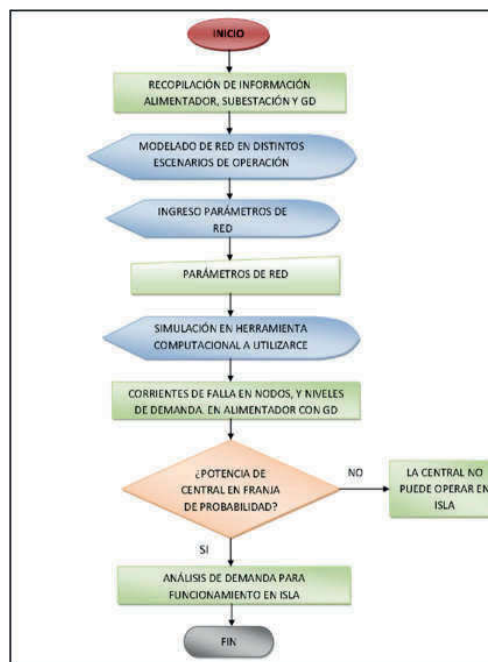


Fig.2. Procedimiento del estudio.

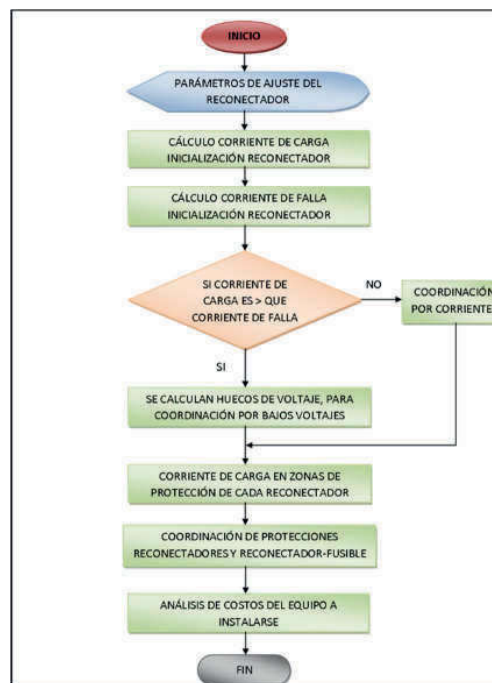


Fig.3. Coordinación de protecciones.

### A. Delimitación del sistema de distribución a ser separado en isla

#### 1) Alimentador 57e, Subestación Pomasqui

El alimentador en estudio es el 57E de la Subestación de Distribución Pomasqui, ubicado en la provincia de Pichincha en el cantón Quito, parroquia Pomasqui.

Este alimentador en configuración radial, abastece de energía eléctrica a 23.286 clientes de las parroquias Calderón, Pomasqui, San Antonio con una longitud aproximada de 50Km.

Los tipos de clientes a lo largo de todo el alimentador en su mayoría son residenciales, la carga servida al final del mismo (sector San José de Minas) está conformado por viviendas e industria florícola, la GD existente se encarga de dar soporte a la red en esta zona.

Las protecciones existentes en su mayoría son interruptores automáticos, reconectores, seccionadores y fusibles.

La demanda máxima del alimentador a lo largo de todo el año 2015 en condiciones normales de operación, es de 11129,273 (kVA).

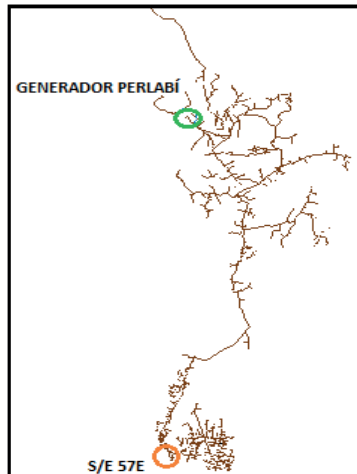


Fig.4. Red Alimentador 57E, S/E Pomasqui

#### 2) Características Central Hidroeléctrica Perlabi



Fig. 5. Central hidroeléctrica Perlabi, Generador [4].

La central hidroeléctrica Perlabi de 2,7 MW es uno de los primeros proyectos de GD implementados en el Ecuador. La central está ubicada en la región norte del cantón Quito, provincia de Pichincha (sector Jatumpamba de la parroquia San José de Minas).

Esta central cuenta con un salto de agua de 184 metros y un caudal de 1,801 metros cúbicos por segundo. Obtenidos por el potencial hidroenergético de la confluencia del río Perlabi y Cala, mediante una toma situada 700m aguas arriba de dicha confluencia hasta la casa de máquinas situada aguas abajo de la misma.

Los poblados más cercanos a la central son: San José de Minas, Atahualpa, Perucho y Chávez-pamba.

La infraestructura de la Central Hidroeléctrica Perlabi está compuesta por:

- Una toma que consiste en un azud de derivación, reconduciendo el agua hacia un canal diseñado para captar 1,5 metros cúbicos por segundo.
- Un desarenador de una cámara.
- Tanque de carga con una capacidad aproximada de 550 metros cúbicos.
- Conducción a presión mediante tubería de acero de aproximadamente 2200 metros, cuya longitud es de 0,9 y 0,8 metros de longitud y diámetro respectivamente.
- Chimenea de equilibrio con orificio restringido de 0,5 metros de diámetro, 38 metros de longitud y 1,5 metros de diámetro interior.
- Tubería de presión de 336 metros de longitud y 0,75 metros de diámetro.
- Casa de máquinas compuesta por dos turbinas Pelton de eje horizontal. Potencia instalada total de 2,7 MW con un generador de 3000 kVA, 720 rpm, 690 V a 60 Hz.
- Canal de restitución al cauce normal del río.

### IV. APLICACIÓN DE LA PROPUESTA DE OPERACIÓN EN ISLA INTENCIONAL

Mediante el ingreso de parámetros iniciales como son potencias, factores de potencia, kVA por fase de la subestación y GD, se recurrirá a su modelación en distintos escenarios de operación. Simulando distribuciones de carga y corridas de flujo en el alimentador con y sin GD.

#### A. Operación del Alimentador con GD en Estado Normal

En la Tabla I, se puede observar que la mayor corriente de cortocircuito se da en el nodo de la subestación, siempre y cuando esta tenga el aporte mayoritario de potencia en el alimentador. Esta corriente de corto circuito se incrementa con el ingreso de fuentes de GD y la cantidad de potencia que entregan al sistema.

TABLA I  
CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO.

Hora	Demanda (kVA)	Perlabi S(kVA)	S/E S(kVA)	Falla LLL (A)	Nombre Nodo
2:00 AM	5317,781	2315,534	3002,247	6625	S/E
2:00 PM	10906,959	FS	10906,959	6590	S/E
12:15 PM	11129,273	663,789	10465,481	6601	S/E
7:30 PM	10814,523	849,311	9965,212	6603	S/E
12:15 PM	11129,273	Sin GD	11129,273	6590	S/E

En la Tabla II, se puede observar el significativo incremento que se dan en las corrientes de cortocircuito cuando ingresa la Generación Distribuida.

TABLA II  
CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO.

Nombre Nodo	14130MS	425302MA	361305MA
Falla LLL (A) Sin GD	6590 (A)	950 (A)	575 (A)
Falla LLL (A) Con GD	6625 (A)	980 (A)	700 (A)

B. Regulación de Voltaje Ocasionado por el Ingreso de GD

En la Tabla III, se detalla los voltajes mínimos y máximos que se dan a diferentes niveles de potencia de la Generación Distribuida.

TABLA III  
VOLTAJES MÁXIMOS Y MÍNIMOS.

Perlabi S(kVA)	V máx. (p.u.)	V mín (p.u.)
Sin GD	0,997	0,879
663,789	0,998	0,907
849,311	1,021	0,958
2315,534	1,024	0,979

En la Fig. 6, se observa los perfiles de voltaje para las potencias establecidas en la Tabla III, presentándose una disminución en la caída de voltaje a medida que ingresa potencia por parte de la GD.

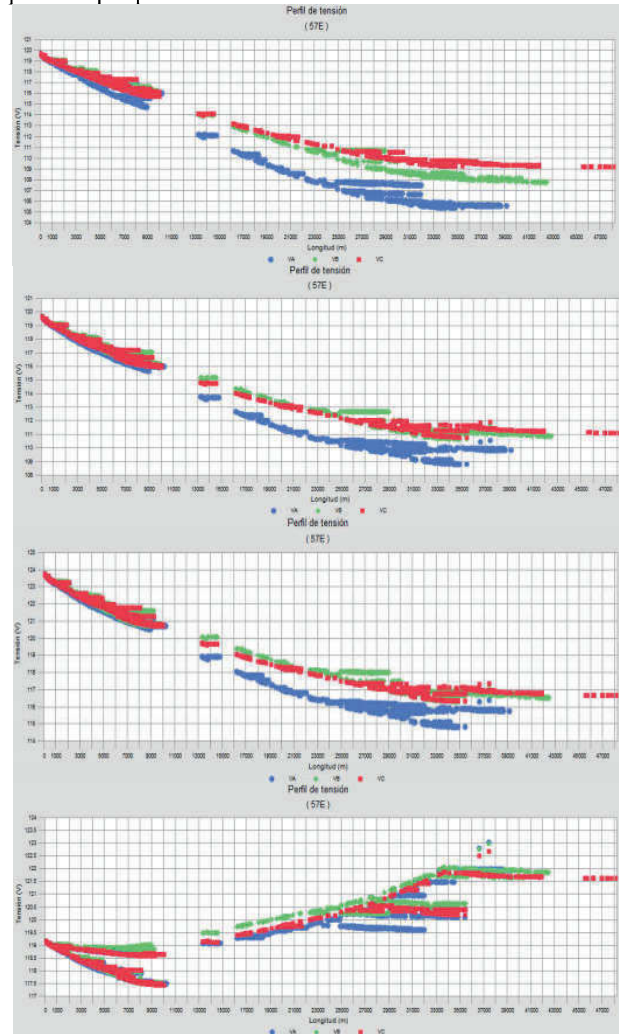


Fig. 6. Perfiles de voltaje a lo largo del alimentador

C. Probabilidad de Funcionamiento en Isla Intencional

Mediante la evaluación del comportamiento histórico anual de potencia de la GD, se establecen los límites de potencia que definen una franja del 100% de probabilidad de operación en isla intencional, de la GD con su demanda asignada.

Esto de acuerdo a la mayor ocurrencia de generación en todo el año, que va desde 599,034 (kVA) hasta 760,694 (kVA).

Como se observa en la Fig.7, el estudio se ha desarrollado para un valor de 663,789 (kVA) que está dentro de la franja de operación efectiva, este valor es el aporte del generador en el

instante de demanda máxima del alimentador a lo largo de todo el año.

Se especifica una probabilidad de cumplimiento del 100% para la operación en isla.

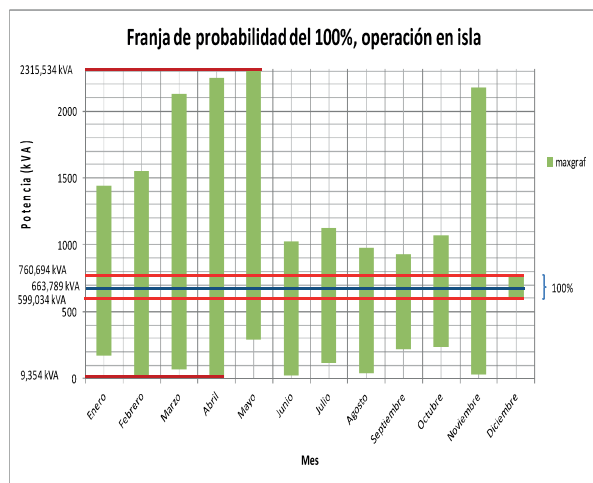


Fig.7. Franja de funcionamiento de GD en isla, con probabilidad del 100

*D. Análisis de Demanda para Funcionamiento en Isla*

Como se observa en la Fig. 8, se analiza la demanda que puede abastecer Perlabí de forma normal e ininterrumpida. Esta demanda será calculada cuando el generador entrega 663,789 (kVA) de potencia a la red, ya que con una probabilidad del 100% el generador puede quedar en isla con su demanda asignada, asegurando la sostenibilidad de la misma.

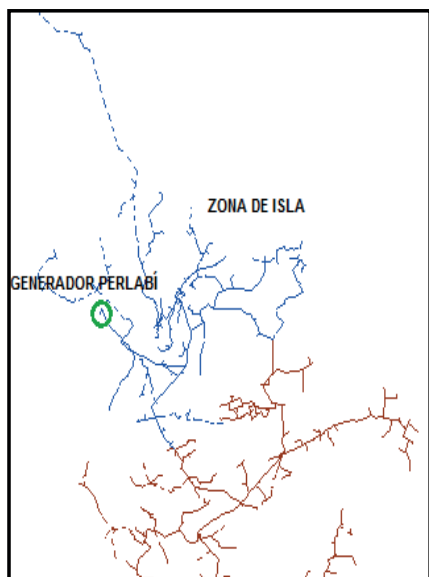


Fig.8. Zona de isla

V. COORDINACIÓN DE PROTECCIONES, FUNCIONAMIENTO EN ISLA

Para esto se ha fijado 4 zonas de operación a lo largo de todo el alimentador, las mismas que están delimitadas por dos reconectores situados aguas abajo del dispositivo a instalarse como se presenta en la Fig. 9.

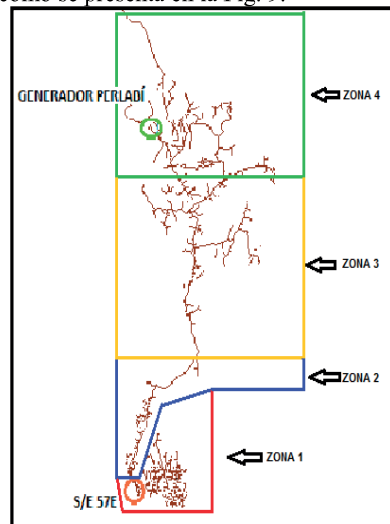


Fig.9. Zonas de protección establecidas, delimitadas por reconectores

*A. Corriente de Carga, Inicialización Reconector*

Para el cálculo y selección de los valores de corriente de carga que se utiliza para inicializar el reconector, y donde empieza la operación temporizada del mismo, se ha tomado varias condiciones operativas del alimentador. Como se observa las Tablas IV y V, la magnitud de corriente de carga vista por el reconector se incrementa con el ingreso de GD.

TABLA IV  
CORRIENTE DE CARGA, SENTIDO DIRECTO.

CORRIENTE DE CARGA SENTIDO DIRECTO				
Nombre alim.	Nombre nodo	IMAX (A)	In(A)	Sentido
57E	14130MS	437,85	22,35	Directo
57E	1365MA	208,8	12,3	Directo
57E	30402MA	128,1	20,55	Directo
57E	57001MA	35,85	13,5	Directo

TABLA V  
CORRIENTES DE CARGA, SENTIDO INVERSO.

CORRIENTE DE CARGA SENTIDO INVERSO				
Nombre alim.	Nombre nodo	IMAX (A)	In(A)	Sentido
57E	14130MS			Inverso
57E	1365MA			Inverso
57E	30402MA	43,65	10	Inverso
57E	57001MA	76,2	13,5	Inverso

#### B. Corriente de Falla, Inicialización Reconector

Se definirán las corrientes de corto circuito que son vistas en el punto de instalación del reconector.

Esto se logra realizando fallas localizadas en los puntos de corriente de cortocircuito máxima y mínima de cada zona, observando la corriente de falla que pasa por dicho nodo, como se observa en las Tablas VI y VII.

TABLA VI  
CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO EN RECONECTOR, APORTE ÚNICO DESDE EL GENERADOR, (ZONA 1)

CORRIENTE DE FALLA, ZONA 1					
	Nombre Nodo	Icc, Nodo(A)	Icc, por el Reconector (A)		
			A	B	C
Icc máxima	14130MS	6601(3F)	10,2	10,3	10,3
Icc mínima	78250MA	953(LT)	45,2	40,3	38,5

TABLA VII  
CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO EN RECONECTOR, APORTE DESDE EL GENERADOR Y S/E, (ZONA4).

CORRIENTE DE FALLA, ZONA 4					
	Nombre Nodo	Icc, Nodo(A)	Icc, por el Reconector (A)		
			A	B	C
Icc máxima	57001	778(3F)	571,4 (S/E)	654,3 (S/E)	549,8 (S/E)
			181,8 (G)	163,5 (G)	184,5 (G)
Icc mínima	72830MA	359(LT)	90,1 (S/E)	79,2(S/E)	252,7 (S/E)

Con los resultados anteriores se establece la no coordinación por corrientes en sentido inverso del reconector implementado, ya que la corriente de carga que está fijada en 76,2 (A) supera a la corriente de corto circuito cuyo valor mínimo es 10,2 (A). Esto no sucede en sentido directo ya que su corriente de carga de 35,85 (A) es muy inferior a la corriente de corto circuito que es de 778 (A).

#### C. Corriente de Carga para Salvado de Fusibles

Se procede a verificar la mayor corriente de carga en la zona de protección de cada reconector, esto con el fin de asignar un fusible con las características de operación requeridas en dicha zona.

TABLA VIII  
CORRIENTE DE CARGA MÁXIMA, ZONA DE PROTECCIÓN DEL RECONECTOR.

Nombre alim.	Zona Reconector	IMAX carga (A)	Fusible
57E	57001MA	19,25	20
57E	30402MA	38,125	40
57E	1365MA	6,625	12

#### D. Huecos de Voltaje

El mayor voltaje y valor desde el cual la protección de bajo voltaje actuará es de 0,851 debido a una falla en el nodo cercano a la S/E.

#### E. Curvas de Equipos de Protección Coordinados

##### 1) Coordinación Reconectores:

La coordinación entre reconectores debe tener un tiempo mínimo de 200 milisegundos entre las curvas de estos dos equipos, para evitar un funcionamiento inadecuado y asegurar que se cumpla su operación temporizada [7].

A continuación, se expone la coordinación entre los equipos, detallando los nodos donde se encuentran ubicados.

En la Fig. 10, se observa la coordinación de todos los equipos en sentido directo-fases, con sus operaciones temporizadas de sus curvas rápidas y lentas.

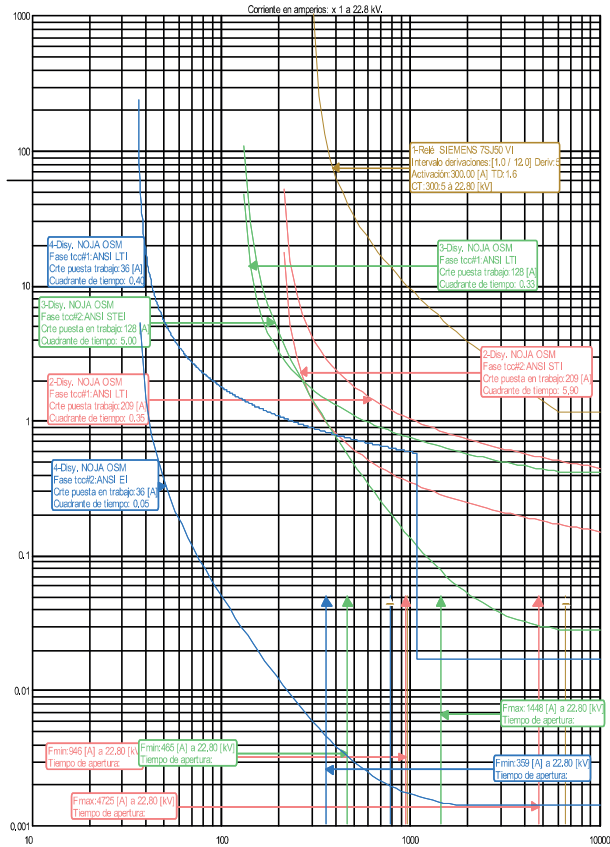


Fig. 10. Coordinación, sentido directo fases

2) Coordinación Reconectores-Fusibles (Salvado de fusibles):

En la Fig. 11, se presenta la coordinación Reconector-Fusible la cual debe tener un tiempo mínimo de 120 milisegundos entre las curvas de estos dos equipos, para evitar que entren en su etapa de fusión, de esta manera asegurar el cumplimiento en el salvado de fusibles [7].

El principal motivo para que un fusible se funda es la falta de coordinación, debido a corrientes de carga muy pequeñas en su zona de operación.

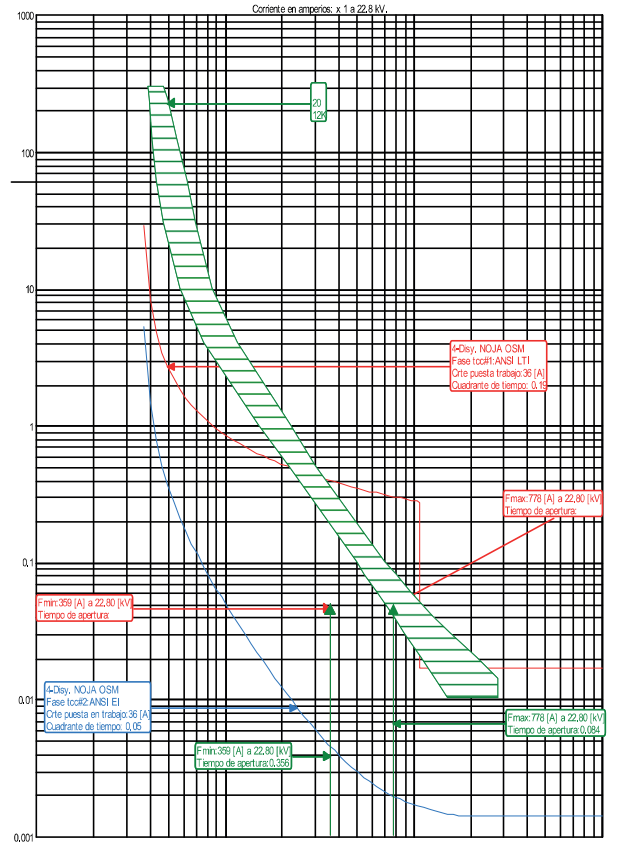


Fig. 11. Curvas de equipos coordinados

VI. CONCLUSIONES

Para la operación en isla intencional es necesario estimar la demanda que puede ser abastecida con niveles aceptables de confianza por el generador. Caso contrario debe contar con regulación de frecuencia para funcionar en isla a cualquier nivel de potencia.

La ubicación del reanclador que realizará el seccionamiento, se elige estratégicamente de acuerdo a la potencia de la GD, estableciendo el tramo de red que opere en isla.

El ingreso de GD mejora la calidad, eficiencia y confiabilidad de la energía eléctrica en cargas cercanas a su interconexión, debido a la circulación de corriente en ambos sentidos y la disminución en la caída de voltaje en dichas cargas.

En alimentadores que cuenten o se planee incorporar GD, es imprescindible la realización de nuevos estudios de flujos de potencia, ya que aparecen cambios significativos en niveles de voltaje, corrientes de cortocircuito y funcionamiento de equipos de protección.

Las protecciones en alimentadores tradicionales están calibradas para operar con una sola fuente de generación,

donde dispositivos de sobrecorriente de tiempo inverso o definido satisfacen las funciones requeridas. El ingreso de GD exige el uso de equipos que combinen funciones de sobrecorriente direccional y voltajes, que operen tanto en sentido directo como inverso.

La mayor corriente de cortocircuito se da en el nodo de la subestación, siempre y cuando esta tenga el aporte mayoritario de potencia en el alimentador. Esta corriente de corto circuito se incrementa con el ingreso de fuentes de GD y la cantidad de potencia que entregan al sistema.

Con los resultados obtenidos en este estudio se establece la coordinación por voltajes en sentido inverso, ya que la corriente de carga es mayor a la corriente de corto circuito. El mecanismo de protección del reconector contra bajos voltajes funcionará de acuerdo al incremento de la corriente de cortocircuito ocasionada por una falla.

#### VII. REFERENCIAS

- [1] Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, << Guía Básica de la Generación Distribuida, y su aplicación en las redes de distribución >>, [En línea]. Disponible: <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-basica-de-la-generacion-distribuida-fenercom.pdf>. [Último acceso: 20 Febrero 2016].
- [2] CONELEC, << Regulación No. CONELEC 004/01, Calidad del servicio eléctrico de distribución, >> El Directorio del Consejo Nacional de Electricidad, Ecuador, 2001, [En línea]. Disponible: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/Regulacion-No.-ARCONEL-004-15.pdf>[Último acceso: 20 Junio 2016].
- [3] IEEE, Thomas S. Basso, << Interview with Thomas S. Basso, Smart Grid, >> [En línea]. Disponible: <http://smartgrid.ieee.org/resources/interviews/359-interview-with-thomas-s-basso?highlight=WyJkaXN0cmliZXI2ZCIsImdlbmVyYXRpb24iLCJnZW51cmF0aW9uJ3MiLCJnZW51cmF0aW9uJyIsImRpc3RyaWJldGVkIGdlbmVyYXRpb24iXQ==>. [Último acceso: 12 Diciembre 2015].
- [4] CYME<< Análisis de Sistemas de Distribución, CYMDIST, >>, [En línea]. Disponible: <http://www.cyme.com/es/software/cymdist/>. [Último acceso: 18 Marzo 2016].
- [5] R. Gallegos y S. Rodríguez, << Generación Distribuida en transformación del mercado eléctrico >> Instituto Mexicano para la Competitividad. [En línea]. Disponible: [http://imco.org.mx/wpcontent/uploads/2015/04/2015\\_Generaci%C3%B3nDistribuida\\_DocumentoCompleto.pdf](http://imco.org.mx/wpcontent/uploads/2015/04/2015_Generaci%C3%B3nDistribuida_DocumentoCompleto.pdf). [Último acceso: 10 Diciembre 2015].
- [6] WKV, << Proyectos en Centrales Hidroeléctricas, >>, WassercraftVolk AG [En línea]. Disponible: <http://www.wkv.cl/proyectos.html>. [Último acceso: 3 Junio 2016].
- [7] IEEEStd 242-2001, << IEEE Recommended for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems, >>. Review of IEEE Std 242-2986, Ecuador, Octubre, 2001.

#### VIII. BIOGRAFÍAS



Profesor Escuela Politécnica Nacional.

**Dr. Vásquez Miranda Paúl Fabricio**, nació en Ambato, Ingeniero Eléctrico (2001) de la Escuela Politécnica Nacional; Doctor of Philosophy PhD (2009) del Instituto de Energía Eléctrica- Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Investigador invitado (2009) en Otto-Von-Guericke-UniversitatMagdeburg. Ingeniero Eléctrico (2003-2004) Movistar. Agencia de Regulación y Control de Electricidad (2009-2015).



Energética, Planificación de Sistemas Eléctricos de Distribución.

**Ing. Fabara Tobar Nelson Ricardo**, nació en San Juan de Puerto Quito el 10 de Diciembre de 1988. Realizó sus estudios secundarios en el colegio "Eloy Alfaro". Los estudios superiores los curso en la Escuela Politécnica Nacional. Temas de interés: Sistemas de Distribución, Protecciones Eléctricas, Sistemas Eléctricos de Potencia, Operación y Planificación de Sistemas Eléctricos de Potencia, Energías Renovables, Eficiencia Energética, Planificación de Sistemas Eléctricos de Distribución.