

# ESTUDIOS ELÉCTRICOS PARA EL RESTABLECIMIENTO DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO ANTE EL DISPARO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DEL ANILLO TRONCAL DE 230 kV

Kléver Villacrés  
Edison Javier Iza  
Dirección de Operaciones

## RESUMEN

Este trabajo se centra en el estudio del restablecimiento del Sistema Nacional Interconectado ecuatoriano – SNI - después de la ocurrencia de una contingencia simple de las líneas de transmisión del anillo troncal de 230 kV del SNI, estableciendo las maniobras a ejecutarse por parte del Centro de Control del CENACE, para obtener las condiciones de sincronización de la línea fallada y, determinando la sensibilidad de la transferencia de potencia activa por las líneas de transmisión disponibles, ante variaciones de generación en diferentes puntos de la red.

Los Estudios Eléctricos en estado estacionario se han realizado utilizando el programa DigSILENT Power Factory.

**PALABRAS CLAVE:** Contingencia, Líneas de Transmisión, Restablecimiento, Sincronización, Sensitividad.

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo esencial de la operación de un sistema de potencia es satisfacer la demanda del consumidor en cualquier instante y con las mejores condiciones de seguridad, calidad y economía. La consecución de este objetivo involucra un continuo proceso de toma de decisiones y acciones de control en tiempo real sobre el sistema de potencia.

En condiciones de alta generación de la central Paute (época lluviosa), se presentan las máximas transferencias de potencia por las líneas de transmisión que salen de la S/E Molino, mínimos voltajes especialmente en la zona de Guayaquil y mayores diferencias angulares entre las barras del sistema.

Bajas estas condiciones de operación, el SNI se encuentra operando la mayor parte del tiempo en un estado de **alerta**, y que de ocurrir el disparo de un circuito de las líneas de transmisión del anillo troncal de 230 kV del SNI, el sistema pasa a operar en un estado de **emergencia**.

### 1.1. Definición de Términos

- **CARGABILIDAD:** Es la máxima transferencia por la líneas de transmisión, considerada como el mínimo valor entre el límite térmico de los conductores, la máxima capacidad de los transformadores de corriente, el límite de transmisión por regulación de voltaje y el límite por estabilidad transitoria y dinámica.
- **OPERACIÓN NORMAL:** Régimen de operación que satisface los requerimientos de calidad de servicio y de energía sin poner en riesgo las instalaciones del sistema.
- **OPERACIÓN ANORMAL O DE ALERTA:** Aquel estado que adquiere el sistema cuando el nivel de seguridad llega a un punto, en el que si bien todas las restricciones están siendo satisfechas, los márgenes de reserva son reducidos y potencialmente sujetos a la violación de límites operativos ante una contingencia. En este estado se deben tomar acciones de control tendientes a recobrar el estado normal del sistema, en caso contrario el sistema puede llegar a un estado emergente.
- **OPERACIÓN DE EMERGENCIA:** Régimen de operación fuera de lo normal.
- **SENSITIVIDAD:** Mide el efecto de la variación de una variable de control sobre una variable dependiente.
- **SINCRONIZACIÓN:** conjunto de acciones que deben realizarse para cerrar un elemento eléctrico, que se encuentra energizado en uno de sus extremos, o conectar dos subsistemas separados del sistema.
- **CONTINGENCIA n-1:** Desconexión de un elemento del SNI.

### 1.2. Consideraciones

- 1.2.1. Para el estudio se consideran interconectados los sistemas eléctricos de Colombia y Ecuador.

- 1.2.2. Se analiza la contingencia n-1 de las líneas de transmisión de doble circuito Molino – Pascuales y Molino – Milagro de 230 kV, en horas de demanda media de un día laborable y, en condiciones de alta hidrología de la central Paute.
- 1.2.3. El sistema eléctrico se mantiene estable posterior a la contingencia y no existe variación del intercambio por la interconexión Colombia - Ecuador.
- 1.2.4. La normativa asociada establece que los límites de calidad de servicio de voltaje para las barras de 230 kV para operación normal son de +/- 5% del voltaje nominal y para operación en situaciones de emergencia son de +/- 10% del voltaje nominal.
- 1.2.5. La calibración de los relés de sincronización de las líneas de transmisión del SNT es de 20 grados de diferencia angular, 10% de diferencia en voltaje y 0,1 Hz de diferencia en frecuencia.

### 1.3. Estados del Sistema

Un estado del sistema se puede definir en términos de las unidades generadoras que se encuentran en servicio y sus correspondientes condiciones de operación, de la cargabilidad de la red de transmisión y sus opciones de importación o exportación de energía y, del nivel de la carga servida. En la operación de sistemas de potencia los estados del sistema varían con el tiempo, considerándose los siguientes:

#### *Estado Pre-falla*

Es el estado de operación normal del sistema antes de presentarse la falla.

#### *Estado Post-falla*

Es el estado en el cual se estabiliza el sistema luego de ocurrida la falla. El estado post-falla se caracteriza por ser una condición degradada del estado pre-falla, con limitadas condiciones de operación.

### 1.4. Sistema Objetivo

Es el sistema que se desea alcanzar al concluir el proceso de restablecimiento. Este se caracteriza por estar en un estado de operación normal que puede coincidir o no con el estado pre-falla, de acuerdo con las condiciones y disponibilidad del equipo y con la duración del proceso de restablecimiento.

Conocidos los estados pre-falla y post-falla del sistema, únicamente un grupo restringido de configuraciones es válido en la determinación del sistema objetivo. La selección del sistema objetivo dentro de las posibles configuraciones se lleva a cabo a través de herramientas de simulación de flujos de potencia y de la experiencia de los operadores del sistema.

## 2. CASOS ANALIZADOS

### 2.1. Disponibilidad de todas las Líneas de Transmisión

- Disparo de un circuito de la L/T Molino – Pascuales,
- Disparo de un circuito de la L/T Molino – Milagro.

### 2.2. Indisponibilidad de un circuito de la L/T Molino – Pascuales o de la L/T Molino – Milagro

- Disparo de un circuito de la L/T Molino – Pascuales,
- Disparo de un circuito de la L/T Molino – Milagro.

## 3. MEDODOLOGÍA

Mediante flujos de potencia se simula la contingencia, las maniobras para controlar los bajos voltajes, el ingreso de generación para disminuir la transferencia de potencia por las líneas de transmisión de forma de obtener una diferencia angular de máximo 20°, el cierre del circuito fallado en la barra de menor voltaje y la determinación de la diferencia de voltaje y ángulo entre el extremo abierto de la línea y la barra de 230 kV de la S/E Molino.

## 4. METAS Y PRINCIPIOS DEL RESTABLECIMIENTO

Las metas generales del proceso de restablecimiento son:

- Reconstruir un sistema de potencia estable con los niveles de seguridad y calidad establecidos para condiciones de operación normal.
- Restaurar el suministro de energía si es el caso.

Con el propósito de alcanzar estas metas se deben tener en cuenta los siguientes principios:

- Garantizar la seguridad del proceso,
- Mantener la estabilidad del sistema,
- Minimizar la duración del proceso,
- Minimizar el impacto socioeconómico adverso.

## 5. PROCESO DE RESTABLECIMIENTO

### 5.1. Restablecimiento Según las Características del Sistema

La determinación de la estrategia de restauración a seguir depende de varios factores, entre los más importantes están: la configuración de la red de transmisión, el despacho de generación, la disponibilidad de unidades de generación.

## 5.2. Plan de Restablecimiento

El restablecimiento requiere el diseño de planes de restauración flexibles, de fácil entendimiento y de rápida ejecución.

Un plan de restablecimiento es un grupo coordinado de acciones preestablecidas que deben ser ejecutadas por los operadores para alcanzar el sistema objetivo.

Su realización contempla la determinación y el orden de ejecución de estas acciones.

## 6. DESARROLLO DEL ANÁLISIS

De todos los casos analizados se determina que las contingencias más críticas son el disparo de un circuito de la línea de transmisión Molino – Pascuales de 230 kV y un circuito de la línea de transmisión Molino – Milagro de 230 kV.

Para todas las contingencias, las maniobras generales de control de voltaje se describen a continuación:

- Incremento de potencia reactiva de las unidades de generación y de los compensadores sincrónicos,
- Desconexión de reactores y conexión de capacitores,
- Coordinación con el Centro de Despacho de Colombia (CND) para subir el voltaje de la S/E Jamondino,

### 6.1. Datos Pre-falla

La diferencia angular entre las subestaciones Molino – Milagro y Molino – Pascuales es de 13,1° y 16,1° respectivamente.

En las Tablas 1, 2 y 3, se indican los valores de generación, voltajes y transferencias por las líneas de transmisión previos a la contingencia.

TABLA 1: Generación

CENTRAL	GENERACIÓN (MW)
Paute	1025
Agoyán	154
Marcel Laniado	40
Machala Power	17,5
Esmeraldas	65
Gonzalo Zevallos TV2	18
Gonzalo Zevallos TV3	18
Aníbal Santos TV1	15
Importación Colombia	180

Las unidades TG1 y TG2 de la central Santa Rosa y la unidad TG4 de la central Gonzalo Zevallos operando como compensadores sincrónicos.

TABLA 2: Voltajes y Ángulos en Barras de 230 kV

SUBESTACIÓN	VOLTAJE (kV)	ÁNGULO (°)
Molino	239,6	-46,2
Milagro	226,9	-59,3
Dos Cerritos	223,8	-62,3
Pascuales	223,5	-62,7
Quevedo	229,6	-64,7
Santo Domingo	231,4	-63,5
Santa Rosa	231,1	-62,5
Pomasqui	232,2	-62,0
Totoras	236,6	-56,4
Riobamba	234,9	-54,5

TABLA 3: Flujo por la Líneas de Transmisión

LÍNEA	POTENCIA ACTIVA (MW)	POTENCIA REACTIVA (MVAR)
Molino – Milagro (1)	193	31
Molino – Pascuales (1)	174	28
Molino – Totoras	101	-9
Molino – Riobamba	105,2	-6

(1) Por circuito

### 6.2. Análisis de Sensitividad

Se realizan incrementos de generación de las centrales más representativas del SNI con el fin de determinar la sensitividad del flujo de potencia por las líneas de transmisión Molino – Milagro y Molino – Pascuales, considerando indisponible uno de los circuitos mencionados.

En las Tablas 4 y 5 se detallan los valores de sensitividad.

TABLA 4: Sensitividad del Flujo de Potencia Activa de la L/T Molino – Milagro ante Variaciones de Generación, por Apertura de uno de los Circuitos de esta Línea de Transmisión

VARIACIÓN DE GENERACIÓN	MW	Δ FLUJO		SENSITIVIDAD
		MW	%	
MACHALA POWER	50	18,0	36,0	
SALITRAL	50	16,2	32,4	
TRINITARIA	50	16,1	32,2	
PASCUALES	50	16,0	32,0	
MARCEL LANIADO	50	12,6	25,2	
ESMERALDAS	50	9,2	18,4	
INTERCONEXIÓN	50	5,0	10,0	

Como se observa en la Tabla 4, para disminuir la transferencia de potencia activa por la L/T Molino – Milagro, es más efectivo subir la generación de la central Machala Power.

TABLA 5: Sensitividad del Flujo de Potencia Activa de la L/T Molino – Pascuales ante Variaciones de Generación, por Apertura de uno de los Circuitos de esta Línea de Transmisión

VARIACIÓN DE GENERACIÓN	MW	Δ FLUJO	SENSITIVIDAD
		MW	%
SALITRAL	50	14,4	28,8
MARCEL LANIADO	50	10,7	21,4
MACHALA POWER	50	10,2	20,4
ESMERALDAS	50	7,9	15,8
INTERCONEXIÓN	50	4,8	9,6
INTERCONEXIÓN	100	11,7	11,7

Como se observa en la Tabla 5, para disminuir la transferencia de potencia activa por la L/T Molino – Pascuales, es más efectivo subir la generación de las centrales ubicadas en la zona de Guayaquil (Gonzalo Zevallos, Trinitaria).

### 6.3. Análisis en Demanda Media y con la disponibilidad de todas las líneas de transmisión

#### 6.3.1. Disparo de un circuito de la línea de transmisión Molino – Milagro de 230 kV

##### Consecuencias en el SNI

- Bajos voltajes en las subestaciones Milagro, Dos Cerritos, Pascuales y Milagro, obteniéndose el más bajo voltaje en la S/E Pascuales: 213 kV.
- Bajos voltajes en la zona norte del Ecuador. El voltaje en la S/E Pomasqui disminuye a 225 kV, sin producirse la apertura de la interconexión Colombia – Ecuador de 230 kV por actuación del esquema de separación de áreas por bajo voltaje.
- La transferencia de potencia activa por el otro circuito de la línea de transmisión Molino – Milagro sube de 193 MW a 274 MW y el flujo por la línea Molino – Pascuales sube de 174 MW a 218 MW en cada circuito.
- La diferencia de voltaje y ángulo entre las subestaciones Molino y Milagro es de 22,3 kV y 19,9° respectivamente.

##### Maniobras de Restablecimiento

- Realizando las maniobras de control de voltaje y cerrando la línea en la subestación Milagro (energización de la línea en vacío), la diferencia de voltaje y ángulo entre el extremo abierto de la línea y la S/E Molino es de 13,2 kV y 19,3°, condiciones que permiten la sincronización de la línea en la S/E Molino, sin necesidad de subir generación.

#### 6.3.2. Disparo de un circuito de la línea de transmisión Molino – Pascuales de 230 kV

##### Consecuencia en el SNI

- Bajos voltajes en las subestaciones Milagro, Dos Cerritos, Pascuales y Milagro, obteniéndose el más bajo voltaje en la S/E Pascuales: 213,5 kV.
- Bajos voltajes en la zona norte del Ecuador. El voltaje en la S/E Pomasqui disminuye a 226 kV, sin producirse la apertura de la interconexión Colombia – Ecuador de 230 kV por actuación del esquema de separación de áreas por bajo voltaje.
- La transferencia de potencia activa por el otro circuito de la línea de transmisión Molino – Pascuales sube de 174 MW a 223 MW y el flujo por la línea Molino – Milagro sube de 193 MW a 242 MW en cada circuito.
- La diferencia de voltaje y ángulo entre las subestaciones Molino y Pascuales es de 23,7 kV y 22,2° respectivamente.

##### Maniobras de Restablecimiento

- Realizando las maniobras de control de voltaje y cerrando la línea en la subestación Pascuales (energización de la línea en vacío), la diferencia de voltaje y ángulo entre el extremo abierto de la línea y la S/E Molino es de 13,6 kV y 21,9°, condiciones que no permiten la sincronización de la línea en la S/E Molino por condiciones de ángulo, requiriéndose subir generación en el sistema.
- Para conseguir una diferencia angular de máximo 20°, es necesario disminuir la transferencia por la L/T Molino – Pascuales a un valor de 205 MW.
- Para lograr dicho objetivo se debe subir la generación en las unidades más rápidas y que dispongan de reserva de generación (Marcel Laniado, Interconexión Colombia – Ecuador, Álvaro Tinajero) y posteriormente en las centrales que tengan un mayor coeficiente de sensibilidad (Tabla 4). En la Tabla 6 se detalla la generación a incrementarse.

TABLA 6: Incremento de Generación para Disminuir la Transferencia por la L/T Molino – Pascuales a 205 MW

CENTRAL	POTENCIA INICIAL (MW)	POTENCIA FINAL (MW)
Marcel Laniado	40,0	60,0
Interconexión Colombia – Ecuador	180,0	235,0
Machala Power	17,5	65,0
Gonzalo Zevallos TV2	18,0	30,0
Gonzalo Zevallos TV3	18,0	30,0

#### 6.4. Análisis en Demanda Media e Indisponibilidad de uno de los circuitos de la L/T Molino – Pascuales o Molino - Milagro

Considerando que por trabajos de mantenimiento, un circuito de la L/T Molino – Milagro o Molino – Pascuales se encuentra indisponible, se analiza el restablecimiento del SNI ante el disparo del circuito disponible.

##### 6.4.1. Disparo de un circuito de la línea de transmisión Molino – Milagro de 230 kV

###### Consecuencias en el SNI

- Bajos voltajes en todo el sistema, especialmente en la subestaciones Milagro, Dos Cerritos, Pascuales.
- Altas transferencias de potencia por la L/T Molino – Pascuales de 230 kV, llegando a valores cercanos a su capacidad térmica.

###### Maniobras de Restablecimiento

- Subir los voltajes de todo el sistema con los elementos de control disponibles.
- Subir la generación de la Central Marcel Laniado a 60 MW, y solicitar el ingreso de 2 unidades restantes. Generación total de 150 MW.
- Coordinar con el CND para incrementar el intercambio por la interconexión Colombia – Ecuador a 235 MW y subir el voltaje de la S/E Jamondino.
- Solicitar el ingreso de la unidad TG3 de la Central Santa Rosa, ingresando con 4 MW para el control del voltaje de la zona norte
- Solicitar el ingreso de las dos unidades de la Central Pucará. Generación total de 70 MW.
- Subir la generación a potencia máxima en las unidades TV2 y TV3 de la Central Gonzalo Zevallos y en la unidad a Vapor de la central Aníbal Santos.
- Solicitar el arranque de las unidades TG1, TG2 y TG3 de la Central Aníbal Santos. Una vez que TRANSELECTRIC declare disponible el circuito fallado, se debe energizar el mismo desde la S/E Milagro.
- Para conseguir una diferencia angular de 20°, es necesario disminuir la transferencia por la L/T Molino – Pascuales a un valor de 195 MW, por cada circuito.

##### 6.4.2. Disparo de un circuito de la línea de transmisión Molino – Pascuales de 230 kV

Para este caso se presentan similares consecuencias en el SNI, y las maniobras de restablecimiento son idénticas a las descritas en el numeral 6.4.1.

## 7. CONCLUSIONES

- Al producirse la contingencia n-1 de las líneas de transmisión de 230 kV, el sistema eléctrico pasa a operar en estado de emergencia, con condiciones de operación críticas (bajos voltajes, sobreexcitación de unidades de generación, altas transferencias de potencia por líneas de transmisión, oscilaciones amortiguadas de potencia por la interconexión Colombia - Ecuador).
- Las acciones subsecuentes a la contingencia, son normalizar las variables eléctricas del sistema (voltajes, cargabilidad de líneas de transmisión, potencia reactiva de las unidades de generación) de forma de mantener la continuidad del servicio y evitar que el sistema ingrese en un estado de inestabilidad y se produzca el colapso parcial o total del mismo.
- Una vez estabilizado el sistema, es necesario cerrar la línea de transmisión fallada lo más pronto posible, para brindar una mayor confiabilidad y seguridad al sistema.
- Para disminuir la diferencia angular es necesario disminuir la generación de la central Paute, para lo cual se incrementa la generación de potencia activa en las centrales de la zona de Guayaquil, Quevedo, zona Norte y se aumenta la transferencia por la interconexión Colombia – Ecuador (importación), hasta los límites máximos establecidos.
- Es en el periodo lluvioso donde se debe maximizar las acciones de seguridad del sistema, debido a que se presentan los mayores transferencias de potencia activa por las líneas de transmisión Molino – Milagro y Molino - Pascuales, en consideración a que se maximiza la generación de la central Paute.
- En horas de demanda media se presentan las mayores diferencias angulares entre las subestaciones Molino – Milagro y Molino – Pascuales, ya que la generación térmica del sistema se encuentra despachada al mínimo. Por despacho económico la generación de las centrales Machala Power y unidades de la zona de Guayaquil (Trinitaria, Gonzalo Zevallos) son despachadas en horas de demanda máxima.
- La contingencia que presenta mayores problemas de sincronización es el disparo de un circuito de la L/T Molino – Pascuales. Posterior a la contingencia la diferencia angular entre las subestaciones Molino y Pascuales es de 22,2°. Para conseguir una diferencia angular de 20° o menos, es necesario disminuir la transferencia por el otro circuito de la L/T Molino – Pascuales a un valor de 205 MW.

- Ante la contingencia de un circuito Molino – Milagro, la diferencia angular entre las subestaciones Molino y Milagro es inferior a los 20°, por lo cual no es necesario incrementar generación en el sistema.
- Ante el disparo de un circuito de la L/T Molino – Milagro, para disminuir un grado de diferencia angular entre las subestaciones Molino y Milagro, se deben subir aproximadamente 50 MW de generación en la central Machala Power o 60 MW de generación en las centrales de la zona de Guayaquil.
- Con respecto a la influencia de las variaciones de las transferencias por la Interconexión con Colombia, se observa que el hecho de subir la importación hacia Ecuador ayuda a bajar la diferencia angular en cualquier contingencia que involucre el disparo de la L/T de la zona Molino – Milagro – Pascuales. La relación aproximada es que por cada 50 MW que se sube en la importación, se baja en 1 grado la diferencia angular.



**Klever Efrén Villacrés Paredes.-** Nació en Quero, Ecuador, en 1969. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional, Quito en 2001.

Actualmente es Supervisor de Operaciones del Centro Nacional de Control de Energía, CENACE, Organismo Operador del Sistema Nacional Interconectado. De

1995 a 1999: Instituto Ecuatoriano de Electrificación, Operador de Generación y Transmisión del Sistema Nacional Interconectado. De 1999 a 2004, CENACE, Coordinador de Operación. Estudios Eléctricos de la Interconexión Colombia – Ecuador de 230 kV, 2002. Estudios Eléctricos para el Restablecimiento del Sistema Nacional Interconectado luego de un Colapso Total, 2004. Especialista en la operación del SNI.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Regulación CONELEC No. 007-00 “Procedimientos del Mercado Eléctrico Mayorista”, 2000.
- [2] Regulación CONELEC No. 006-00 “Procedimientos de Despacho y Operación”, 2000.
- [3] Caicedo Gilberto, Rueda Ernesto, Zafra John “Servicios Complementarios: Restauración del Sistema de Potencia”, IEEE – ANDESCON99, Porlamar, Venezuela



**Edison Javier Iza.-** Nació en Quito, Ecuador, en 1972. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, 2001.

Actualmente trabaja como Supervisor de Operaciones en el Área Centro de Operaciones de la Dirección de Operaciones del CENACE. Sus intereses

son los estudios eléctricos enfocados a la Operación, Confiabilidad y Estabilidad de SEP.