

## **Dimensionamiento de Reactores Limitadores de Corrientes de Cortocircuitos ante la Instalación de Transformadores de Gran Porte en Subestaciones del Sistema Metropolitano de la ANDE.**

**Paul G. Bello Meza<sup>(1)</sup>**

**(1) ANDE; Administración Nacional de Electricidad;**

**[paul\\_bello@ande.gov.py](mailto:paul_bello@ande.gov.py)**

### **RESUMEN:**

El Plan Maestro de Obras de la ANDE contempla el aumento de la capacidad de transformación en la subestación Puerto Botánico 220/66/23 kV, previéndose el cambio de los dos bancos de transformadores de 120/60/60 MVA instalados por otros dos de 300/180/120 MVA. Esta adecuación implica una sustancial reducción de la impedancia equivalente del sistema y por lo tanto resultan corrientes de cortocircuito muy elevadas en el nivel de 23 kV.

El objetivo de este trabajo es presentar el análisis y dimensionamiento de reactores limitadores de corrientes de cortocircuito en el sistema de 23 kV de dicha subestación, de forma a mantener los niveles de cortocircuito dentro de valores aceptables por equipos convencionales, evitándose así la necesidad de interruptores con características fuera de padrones estandarizados normales.

El trabajo se basa en simulaciones realizadas con el *Programa de Análisis de Faltas Simultaneas* (ANAFAS), considerando la configuración del Sistema Interconectado Nacional (SIN) prevista por el Plan Maestro de Generación y Transmisión de la ANDE, Periodo 2014-2023.

### **PALABRAS CLAVES**

Corrientes de Cortocircuito, ANAFAS, Reactores.

## 1 – INTRODUCCIÓN

Los estudios de cortocircuito son aplicados en la etapa de planificación, proyecto y operación de los sistemas de potencia. Algunos detalles de cálculo pueden ser diferentes en cada etapa para atender los análisis específicos. El crecimiento del sistema eléctrico de potencia trae como consecuencia un aumento generalizado del nivel de cortocircuito, por lo tanto es importante hacer un acompañamiento periódico del nivel de soportabilidad de los equipamientos instalados y a ser instalados en el sistema.

El notable aumento de la capacidad de transformación prevista en la Subestación Puerto Botánico 220/66/23 kV impone la necesidad de evaluar las corrientes de cortocircuito en el nivel de 23 kV y de forma a mantener esos valores a niveles adecuados se evalúa la instalación de reactores limitadores de corriente de cortocircuito en dicho nivel de tensión, por lo que en este trabajo se presenta el análisis y dimensionamiento de dichos reactores.

## 2 – MODELADO DE ELEMENTOS

Conforme a premisas normalmente aceptadas, para el cálculo de los niveles de cortocircuito fue considerado el sistema operando en vacío, esto es, sin carga, y con una tensión de pre-falla igual a  $1,0\angle 0^\circ$  pu. para cada barra analizada. La suposición simplifica los cálculos considerablemente y está basada en que normalmente las corrientes de cortocircuitos son muy superiores a las corrientes de carga, por lo cual, éstas últimas pueden ser despreciadas.

El programa de cortocircuito está basado en el método de las componentes simétricas, con todos los elementos representados por sus impedancias de secuencia positiva y cero, asumiéndose que las impedancias de secuencia negativa son iguales a las de secuencia positiva.

Las líneas de transmisión son representadas por sus impedancias longitudinales de secuencia positiva y cero. Se desprecian las reactancias capacitivas. Los valores son representados en % (por ciento), en la base de 100 MVA y en la tensión de operación de la línea.

$$Z_1 = R_1 + jX_1$$
$$Z_0 = R_0 + jX_0$$

También se consideran las impedancias mutuas de acople de secuencia cero entre las líneas de transmisión de doble terna.

Los parámetros de las líneas de transmisión fueron obtenidos a través del programa Alternative Transients Program (ATP).

Para las líneas de transmisión existentes, las características mecánicas básicas, tales como longitud, conductor, tipo de torre, pararrayos, etc. son conocidos, lo que permite determinar con más precisión las características eléctricas.

Para las líneas de transmisión proyectadas se adoptaron las impedancias de líneas similares a las existentes.

Los transformadores y auto-transformadores fueron representados por sus resistencias y reactividades de cortocircuito. Para equipos existentes, dichos parámetros son extraídos de los protocolos de ensayos correspondientes y referidos a la base de 100 MVA. Para transformadores a ser instalados en el futuro, se adoptaron las impedancias de equipos existentes similares.

Los transformadores del tipo zig-zag son normalmente utilizados como transformadores de aterramiento para dar referencia a tierra en aquellas barras ubicadas en el lado delta de los transformadores. Estos transformadores son representados únicamente en la red secuencia cero por su impedancia, expresada en la base de 100 MVA.

Los generadores fueron representados, en el diagrama de secuencia positiva por sus impedancias subtransitorias de eje directo en % (por ciento)  $x''_d$ , en la base de 100 MVA.

Los reactores conectados en estrella aterrada son representados como una impedancia constante, calculada a partir de su potencia nominal con la siguiente expresión:

$$X = \frac{P_{base}}{P_{no\ min\ al}} \times 100$$

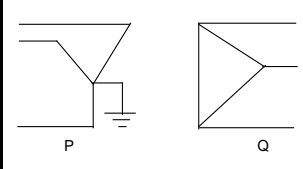
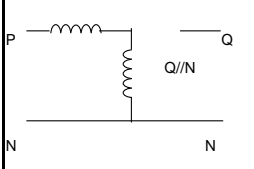
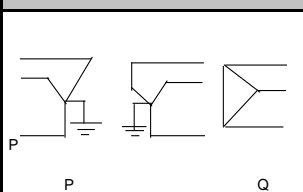
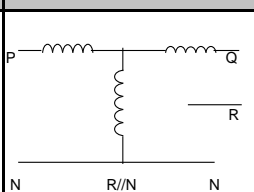
Para los reactores todas las impedancias de secuencia son iguales.

Los niveles de cortocircuito del SIN son obtenidos utilizando el programa computacional ANAFAS, desarrollado por CEPEL.

Ante la falta de datos de la impedancia de secuencia cero de algunos transformadores, en dichos casos se siguen algunas recomendaciones de literaturas renombradas [3] con relación al tema en cuestión. Dichas aproximaciones se aplican solamente para transformadores de dos y tres arrollamientos trifásicos, del tipo NÚCLEO de 220/23 kV y 66/23 kV respectivamente.

En la Tabla 1 dada a continuación, se presentan los circuitos equivalentes y las aproximaciones utilizadas en los parámetros de secuencia cero para los cálculos de las potencias de cortocircuito.

**Tabla 1: Circuito Equivalente de Transformadores de 3 devanados**

Conexión del Transformador (2 arrollamientos)	Circuito Equivalente de Secuencia Cero	Aproximación para Impedancias de Sec. Cero
		$Z_{PQ//N-0} = 0.85 \cdot Z_{PQ-1}$
Conexión del Transformador (3 arrollamientos)	Circuito Equivalente de Secuencia Cero	Aproximación para Impedancias de Sec. Cero
		$Z_{PQ-0} = 0.85 \cdot Z_{PQ-1}$ $Z_{PR//N-0} = 0.75 \cdot Z_{PQ-1}$ $Z_{QR//N-0} = 0.90 \cdot Z_{QR-1}$

### 3 – METODOLOGÍA APLICADA

Para las simulaciones fue empleado el programa ANAFAS, considerando la configuración del SIN para el año 2014, conforme establecido en el Plan Maestro de Generación y Transmisión de Corto y Mediano Plazo de la ANDE, Periodo 2014 – 2023.

Inicialmente se debe determinar las configuraciones para las cuales los cálculos fueron ejecutados, primeramente una configuración actual (sistema existente), una de mediano plazo (sistema previsto para los próximos 5 años) y una de largo plazo (sistema previsto para los próximos 10 a 15 años). Esos horizontes pueden variar dependiendo el horizonte de planificación adoptado.

El cortocircuito de corto plazo debe ser el primero a ser calculado conforme los siguientes pasos:

- Levantamiento de la configuración en forma gráfica con todos los detalles. Deben ser hechos dos diagramas, uno en secuencia positiva y el otro de secuencia cero;
- Levantamiento de datos: impedancias de secuencia positiva y cero de todos los elementos del sistema representado en % (porcentaje) en la base 100 MVA y tensión de operación del elemento, además del tipo de conexión de los transformadores;
- Un análisis cuidadoso de los resultados debe ser hecho verificándose los valores de cortocircuito en las barras y sus contribuciones, y siempre que sea posible comparándose con resultados anteriores.

Para la simulación de los cortocircuitos de mediano y largo plazos se debe utilizar la configuración anterior como punto de partida.

Se tomaron los 10 mayores valores de Corrientes de cortocircuito en las barras de 220 kV y 66 kV para el año 2023.

Se verificaron valores que sobre pasan o se encuentran muy próximos a sus valores limites de los interruptores en ciertas Subestaciones en 66 kV.

Con relación a las barras de 220 kV, en general todas las corrientes de cortocircuito están por debajo de 40 kA, sin embargo las Subestaciones cuyos valores de corriente de cortocircuito que se encuentran próximos a los valores nominales de los interruptores son las Subestaciones de Margen Derecha y Acaray con 36,56 kA y 33,03 kA, respectivamente.

Con relación a las barras de 66 kV, surgen corrientes de cortocircuito que sobrepasan los 25 kA principalmente en las barras de las siguientes Subestaciones: Parque Caballero (con 29,44 kA), Puerto Sajonia (con 27,14 kA), Central (con 25,97 kA), San Miguel (con 27,45 kA), San Lorenzo (con 26,19 kA), Villa Aurelia (con 26,16 kA) y Barrio Parque (con 22,96 kA). ***Se recomienda verificar los límites de los interruptores de dichas subestaciones.***

## 4 – RESULTADOS

### 4.1 – Instalación

Con la futura instalación de los dos Bancos de Transformadores de 220/66/23 kV – 300/180/120 MVA en las Subestaciones de Puerto Botánico y Lambaré, fue constatada también la necesidad de instalación de Reactores Limitadores de corriente en 23 kV a ser instalados en serie con los mencionados Bancos de Transformadores. Con la inserción de los mencionados reactores limitadores, fue evaluada la correspondiente disminución de los niveles de corrientes de cortocircuito obtenidos en el año 2023. Para el efecto fueron comparados los niveles de cortocircuito con y sin el reactor limitador en las Subestaciones de Puerto Botánico y Lambaré. Los resultados obtenidos indican una disminución en las corrientes de cortocircuito en las barras de 23 kV de la Subestación Puerto Botánico en un 11,58 %, en tanto que en la Subestación Lambaré un 12,94 %. De esta forma, los valores finales obtenidos fueron menores a la capacidad nominal de 40 kA fijada para los equipos. A seguir en las tablas 6 y 7 se indican los valores de corrientes y potencias de cortocircuito obtenidos:

**Tabla 2:** Corrientes de Cortocircuito en las Subestaciones Puerto Botánico y Lambaré.

Barra	Nombre de la Barra	Niveles de tensión (kV)	CASO SIN REACTOR						CASO CON REACTOR					
			Corrientes Máx. (kA)	Trifásico Ia		Fase - Tierra Ia		Corrientes Máx. (kA)	Trifásico Ia		Fase - Tierra Ia			
				kA	°	kA	°		kA	°	kA	°	kA	°
206	PUERTO BOTANICO	23	32,8	32,8	-83,5	32,7	-85,7	29,0	27,5	-84,9	29,0	-86,4		

**Tabla 3:** Corrientes de Cortocircuito en los Reactores de Puerto Botánico y Lambaré.

Nombre de la Barra	Niveles de tensión (kV)	Corrientes Máx. (kA)		Trifásico Ia		Fase - Tierra Ia		Fase - Fase Ib = -Ic		Fase - Fase - Tierra					
		F	N	kA	°	kA	°	kA	°	Ib		Ic		In	
		kA	°	kA	°	kA	°	kA	°	kA	°	kA	°	kA	°
REACTOR(PBO)	23	13,7	9,9	13,7	-84,9	9,9	-86,2	11,9	-174,9	-12,0	-7,1	-12,305	-163	5,09	-88,12

Un sistema está efectivamente aterrado cuando se verifican, en cualquier punto del mismo, las siguientes relaciones:

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 3 \quad \text{y} \quad \frac{R_0}{X_1} \leq 1 \quad (1)$$

Según los valores observados de las planillas de cortocircuito resultantes obtenidas, se puede concluir que el aterramiento en la gran mayoría de las Subestaciones del SIN es efectivo, según el software utilizado, y los mismos verifican las relaciones anteriores en los distintos niveles de tensión para las diferentes subestaciones del SIN, con excepción de Puerto Sajonia, San Juan Bautista y San Miguel en el nivel de tensión de 23 kV. Al respecto, estas Subestaciones requieren mayores análisis, con respecto a sus respectivos niveles de aterramiento futuro, de manera a tomar acciones tendientes a la minimización de efectos indeseados. En la tabla 4, se indican los respectivos valores resultantes de la ecuación (1) anterior:

**Tabla 4:** Niveles de Aterramientos en las Subestaciones Puerto Sajonia, San Juan Bautista y San Miguel

Parámetros	Subestación								
	Puerto Sajonia			San Juan Bautista			San Miguel		
	2014	2016	2023	2014	2016	2023	2014	2016	2023
Z1[%]	9,975/84,26	9,196/84,53	6,892/84,43	58,42/88,4	58,26/88,410	39,72/88,54	6,323/77,81	5,443/77,66	4,699/76,63
Z0[%]	144,800/90	144,800/90	7,750/90	58,42/88,4	616,21/81,310	186,86/72,97	14,322/88,4	14,322/87,80	14,322/87,80
X0/X1	14,588	15,817	1,129	1	10,457	4,5	2,315	2,691	3,131

## 5 – CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos por el programa ANAFAS con las premisas adoptadas para este estudio, muestran que los niveles de cortocircuito calculados son en su gran mayoría próximos a los valores extraídos de otros estudios realizados en años anteriores, y sobre una misma base de obras.

Para el año 2023, el SIN prevé un crecimiento considerable del número de líneas de 500 kV y consecuentemente, los niveles de cortocircuito para las subestaciones de 500 kV tendrán un incremento importante.

La corriente máxima de cortocircuito en la Subestación Villa Hayes es de 11,10 kA, que está muy por debajo del valor de la protección de 40 kA, de los interruptores instalados en dicha Subestación. La mayor corriente de cortocircuito encontrada fue en la Subestación Margen Derecha (30,43 kA). Con relación a las barras de 220 kV de todas las Subestaciones del SIN, todas las corrientes de cortocircuito obtenidas se encuentran por debajo de 40 kA, correspondiente a la capacidad padronizada de los interruptores de ANDE.

Con relación a las barras de 66 kV, para algunas Subestaciones, principalmente para las del Sistema Metropolitano, fueron obtenidas corrientes de cortocircuito que sobrepasan los 25 kA, correspondiente a la capacidad padronizada de los interruptores en dicho nivel de tensión estas Subestaciones fueron las siguientes, con los respectivos valores de corriente de cortocircuito: Parque Caballero (con 29,44 kA), Puerto Sajonia (con 27,14 kA), Central (con 25,97 kA), San Miguel (con 27,45 kA), San Lorenzo (con 26,19 kA), Villa Aurelia (con 26,16 kA) y Barrio Parque (con 22,96 kA). Se recomienda en la brevedad posible, verificar los respectivos límites de interrupción, para los equipos (interruptores) de dichas subestaciones.

En cuanto al estudio para el dimensionamiento del Reactor Limitador de 23 kV en las Subestaciones de Puerto Botánico y Lambaré, la correspondiente impedancia asociada a dicho equipamiento deberá estar próximo o igual a los 6%, calculada en la base del programa ANAFAS de 100 MVA, y con una soportabilidad de 25 kA a corrientes de cortocircuitos, valor que incluye un margen de seguridad y asegura una protección del equipo para el periodo de Mediano Plazo (Año 2023).

## 6 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Plan Maestro de Transmisión de Corto y Mediano Plazo – Periodo 2014-2023 DP/DEG.
- (2) CONSORCIO LEME – CEMIG – Nota técnica 16/95 – Análisis de Cortocircuito en Estudios de Planificación de Sistemas de Transmisión y Base de Datos.
- (3) Plan Maestro de Generación y Transmisión (2014-2023).
- (4) Informe de Cortocircuito 2014 – 2023.