

Estudio de Transitorios Electromagnéticos Originados por Maniobras de Condensadores utilizando ATP. Caso: Subestación Eléctrica AMANA

Luis Vergel, Carlos Vásquez, Dr. Carlos Muñoz.

Resumen—En este trabajo, se describe una metodología para el estudio de transitorios electromagnéticos en una red eléctrica de potencia originados por maniobra con bancos de condensadores mediante la utilización del *Alternative Transient Program* (ATP). La metodología es aplicada al sistema eléctrico asociado a la subestación Amana 115/13,8 kV perteneciente a PDVSA Producción Oriente. El sistema es modelado desde la barra a 115 kV con un equivalente de Thevenin hasta las subestaciones de proceso en 13,8 kV. Se simulan las maniobras de energización de los condensadores definidas en los casos de estudio y así, poder evaluar el impacto de los transitorios electromagnéticos originados sobre el equipamiento del sistema. En el análisis de los resultados obtenidos se puede verificar que los equipos instalados en las subestaciones del sistema eléctrico evaluado son capaces de soportar los requerimientos de voltaje y de corriente originadas por las maniobras con los bancos de condensadores.

Palabras claves—Maniobras con Condensadores, Simulación en ATP, Sobretensiones, Transitorios Electromagnéticos.

I. INTRODUCCIÓN

El progresivo aumento en la demanda del sector petrolero, asociado a la instalación en el sistema de motores de mediana y gran capacidad, implican un incremento en los requerimientos de reactivos a la red debido a los factores de potencia típicos en régimen permanente y durante la energización de estas máquinas (FP: 80% y 20% respectivamente). Esto trae como consecuencia la disminución de los perfiles de voltaje en el sistema de transmisión y

Artículo recibido el 03 de Febrero de 2012. Este artículo fue financiado por Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA)

L. Vergel. está con Ingeniería Bucros C.A., Av. Alirio Ugarte Pelayo, Maturín, Estado Monagas, Venezuela, Tlf. +58-414-7058281, E-mail: ing.lvergel@gmail.com

C. Vásquez. está con Petróleos de Venezuela S.A, Centro Comercial Petroriente, Maturín. Estado Monagas, Venezuela, Tlf. +58-424-9287257, E-mail: vasquezcp@pdvsa.com

C. Muñoz. está con la Universidad de Los Andes, Sector La Hechicera, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Mérida, Estado Mérida, Venezuela, Tlf. +58-414-7463766, E-mail: cmunoz@ula.ve

distribución de energía eléctrica, así como también un aumento de las pérdidas tanto en las líneas como en los transformadores. Una solución adoptada por la industria para la problemática expuesta, es la instalación de Banco de Condensadores como fuente local de reactivos, cuyos beneficios están asociados a la disminución de la carga y a las pérdidas eléctricas, además de una mejora en los perfiles de voltaje del sistema [1].

No obstante, la desventaja de utilizar bancos de condensadores como fuente local de reactivos, es que las maniobras asociadas a la conexión o desconexión de estos equipos ocasionan sobretensiones transitorias que en teoría pueden alcanzar valores picos fase a tierra en el orden de 2,00 p.u., condición que puede agravarse más debido a la amplificación de estas sobretensiones en otros puntos del sistema donde están instalados otros bancos de condensadores. Adicionalmente, pueden presentarse corrientes transitorias de gran magnitud y alta frecuencia capaces de superar hasta 10 veces la corriente nominal del condensador por varios milisegundos [2],[3].

Basado en lo antes expuesto y dada la necesidad de instalación de Bancos de Condensadores en el Sistema Eléctrico de PDVSA Producción Oriente, es necesario disponer de una metodología para la ejecución eficaz y acelerada de los estudios de transitorios electromagnéticos, empleando la herramienta computacional de análisis de transitorios electromagnéticos (por sus siglas en ingles, *Alternative Transient Program*), específicamente los fenómenos asociados a las maniobras con condensadores determinando los efectos originados en la red.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A. Maniobra de Energización

La energización de los bancos de condensadores origina transitorios de voltaje y de corriente. Debido a los fenómenos de propagación de las ondas de voltaje se hace necesario su estudio tanto en el sitio donde se conectan los bancos como en sitios lejanos a este [4],[5].

- Energización de un banco simple: Para este caso la

amplitud y la frecuencia de la corriente dependen de la potencia de cortocircuito de la barra donde se energiza el banco. Suponiendo que las tres fases cierran simultáneamente y no existe carga atrapada en los condensadores. La frecuencia de oscilación suele estar entre 250 Hz y 900 Hz. Los transitorios de corriente no suelen ser de mayor importancia debido a que su amplitud y frecuencia se encuentran limitadas por la impedancia del sistema. Por su parte el transitorio de voltaje originado por la energización de un banco simple, asumiendo que no presenta carga atrapada y sabiendo que el voltaje en sus bornes no varía de forma instantánea, provocará una caída abrupta a cero de la tensión en la barra durante el primer instante e inmediatamente seguirá el proceso de carga de los condensadores mediante una oscilación de baja frecuencia, como se puede observar en la Fig. 1 [4],[5].

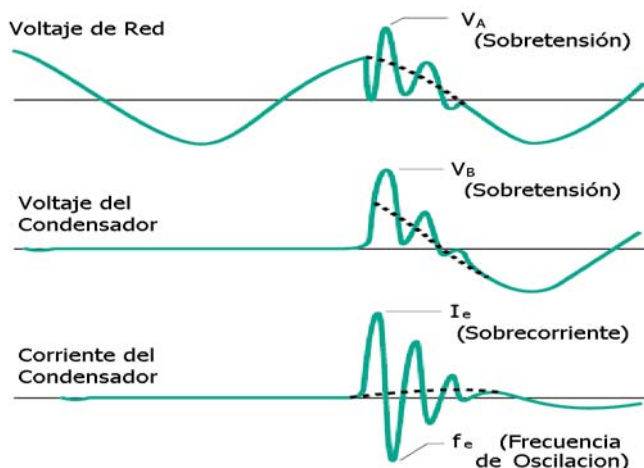


FIG. 1. VOLTAJE Y CORRIENTE DURANTE LA ENERGIZACIÓN DE UN BANCO SIMPLE.

- Energización de un banco múltiple (*back to back*): La energización de uno o más bancos en paralelo con otro ya energizado producirá sobretensiones, tanto en la barra como en puntos remotos, menores a las de energización del primer banco. Las sobrecorrientes originadas entre los bancos de condensadores son de gran importancia, debido a que el transitorio de descarga de los bancos energizados sobre el que se acaba de conectar se encuentra únicamente limitado por la inductancia entre los dos circuitos. Esta conexión origina dos fenómenos transitorios, el primero (alta frecuencia, f_1) corresponde a la descarga de los bancos que se encuentran en servicio sobre el que se está conectando, y el segundo (a frecuencia más baja, f_2) corresponde a la descarga de todos los bancos a la red igualando de esta forma la potencia en cada banco. Al aumentar el número de condensadores conectados la sobretensión disminuye y la sobrecorriente aumenta. Las sobretensiones originadas cuando están conectados todos los bancos no exceden un valor de 2 p.u. de la tensión de la red. Por otra parte las sobrecorrientes requieren de métodos que permitan eliminar los daños a los bancos de condensadores y demás equipos del sistema (ver Fig. 2) [4],[5].

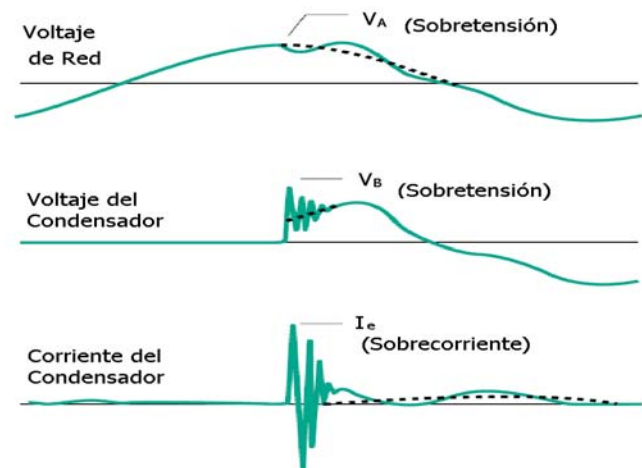


FIG. 2. VOLTAJE Y CORRIENTE DURANTE LA ENERGIZACIÓN DE BANCO MÚLTIPLE

B. Maniobra de Desenergización

Durante la desenergización de los bancos de condensadores las perturbaciones transitorias más comunes que se pueden presentar son los re-encendidos (*Restrike*). Al desconectar un banco de condensadores se produce un arco eléctrico en el interruptor asociado a éste. Si el arco es extinguido en un cruce por cero de corriente, para que el medio se convierta rápidamente en aislante, el banco queda cargado con un valor máximo de voltaje. El banco de condensadores es descargado por unas resistencias de descarga aproximadamente en un tiempo entre 1 y 5 minutos. El voltaje de recuperación transitorio (TRV por sus siglas en inglés *Transient Recover Voltage*) creado en los terminales del interruptor, asumiendo un tiempo muy bajo ($1/2$ ciclo), tendrá un valor máximo de $2V_M$. Para que se lleve a cabo una interrupción normal de la corriente, la regeneración dieléctrica debe aumentar más rápido que el TRV, de lo contrario se produciría una ruptura. La desenergización de un banco con interruptor ideal, debería ser capaz de interrumpir la corriente pasando instantáneamente de un estado conductor a un estado aislante, para lo cual su resistencia debería cambiar de un cero a infinito, de esta forma no origina transitorios de voltaje. Sin embargo, un interruptor real no garantiza una posibilidad nula de re-encendido del arco luego de la interrupción de la corriente [4],[5].

III. METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA INDUSTRIAL

Para desarrollar el modelo digital en ATP se hace necesario especificar la red que es de interés para el caso bajo estudio, de tal forma de modelar detalladamente sólo esa parte del sistema eléctrico, con la finalidad de incorporar en los modelos correspondientes de cada elemento sus características propias de funcionamiento. El resto del sistema se modela mediante el uso de equivalentes de Thevenin, conformado por una fuente ideal en serie con una impedancia ($R_e + jX_e$). Para el presente trabajo el cálculo de la resistencia y la inductancia

se obtuvo mediante un estudio de cortocircuito a 30 ciclos, utilizando el programa grafico de análisis transitorio de sistemas eléctricos de potencia (ETAP por sus siglas en inglés *Electrical Transient Analyzer Program*), con el cual se determinaron los valores de la corriente de cortocircuito, las resistencias y reactancias de secuencia cero y positiva.

Luego de tener modelados todos y cada uno de los elementos necesarios para hacer la simulación del sistema eléctrico, es importante validar el mismo comparando los datos obtenidos por medición en condiciones operativas con resultados obtenidos de la simulación del modelo bajo las mismas condiciones. Una vez comprobado el funcionamiento del modelo se definen las premisas y casos de simulación. (ver Fig. 3).

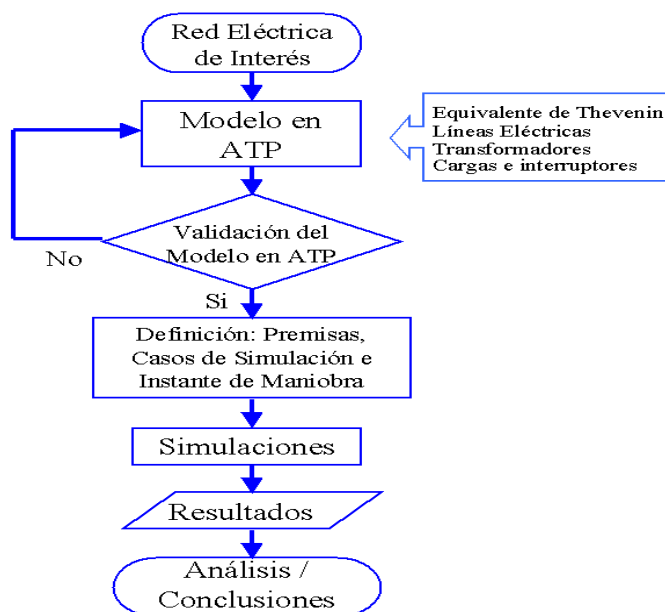


FIG. 3. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS UTILIZANDO ATP.

CASO DE ESTUDIO

A. Descripción del Sistema Eléctrico

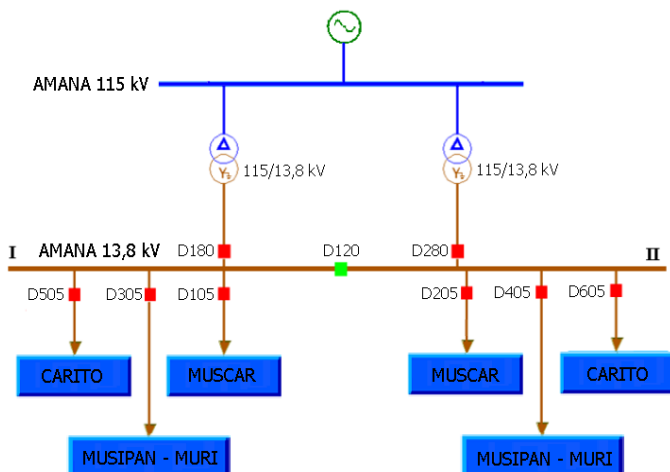


FIG. 4. DIAGRAMA EQUIVALENTE DE LA SUBESTACIÓN AMANA 115/13,8 KV.

La Subestación eléctrica Amana es operada y mantenida por PDVSA. Está interconectada en 115 kV con las Subestaciones Furrial, Jusepín II, Muscar y Travieso, estas últimas pertenecientes a CORPOELEC. Posee un esquema de barras en anillo combinado en 115 kV y secundario selectivo en 13,8 kV, como se puede observar en la Fig. 4. Desde las barras de 13,8 kV alimenta las siguientes subestaciones de procesos: Muscar PDVSA, Carito, Musipán, Muri y COA (a través de la subestación Muscar PDVSA).

B. Casos de Simulación

En la tabla I, se presentan los casos de simulación para el estudio de transitorios electromagnéticos que pueden originarse como consecuencia de la energización de un banco de condensadores estando conectados o no otros bancos. Para el estudio se consideran cuatro (04) bancos de condensadores de 4,8 kVAR; dos (02) ubicados en la Subestación Muscar PDVSA y dos (02) en la Subestación MUC-10.

TABLA I
CASOS DE SIMULACIÓN PARA EL ESTUDIO DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS

Casos	Maniobras	Bancos Energizados al momento de la Maniobra			
		C1	C2	C3	C4
1	Energización C ₁				
2	Energización C ₁		X		
3	Energización C ₁			X	
4	Energización C ₁				X
5	Energización C ₁		X	X	
6	Energización C ₁			X	X
7	Energización C ₁		X		X
8	Energización C ₁		X	X	X
9	Energización C ₂				
10	Energización C ₂	X			
11	Energización C ₂			X	
12	Energización C ₂				X
13	Energización C ₂	X		X	
14	Energización C ₂			X	X
15	Energización C ₂	X			X
16	Energización C ₂	X		X	X
17	Energización C ₃				
18	Energización C ₃	X			
19	Energización C ₃		X		
20	Energización C ₃				X
21	Energización C ₃	X	X		
22	Energización C ₃		X		X
23	Energización C ₃	X			X
24	Energización C ₃	X	X		X
25	Energización C ₄				
26	Energización C ₄	X			
27	Energización C ₄		X		
28	Energización C ₄			X	
29	Energización C ₄	X	X		
30	Energización C ₄		X	X	

31	Energización C ₄	X		X	
32	Energización C ₄	X	X	X	

S (MVA)	f (Hz)	I _{CC} (kA)	X/R	Z (Ω)	Re (Ω)	Xe (Ω)	L (mH)
100	60	17,047	0,166	3,895	3,842	0,639	1,694

Siendo;

C₁: Banco conectado en la barra 1 de la subestación Muscar.

C₂: Banco conectado en la barra 2 de la subestación Muscar.

C₃: Banco conectado en la barra 1 de la subestación MUC-10.

C₄: Banco conectado en la barra 2 de la subestación MUC-10.

C. Modelado del Sistema

La tabla II, muestra los datos obtenidos en el estudio de cortocircuito en el ETAP 5.5.6 y los parámetros del equivalente de thevenin de secuencia positiva.

TABLA II
PARÁMETROS DEL EQUIVALENTE DE CORTOCIRCUITO EN LA
BARRA 115 KV DE LA SUBESTACIÓN AMANA

Una vez finalizada la fase de modelado de todas las subestaciones, líneas aéreas y demás componentes que integran la red eléctrica, se obtuvo el modelo completo en ATP del sistema eléctrico asociado a la Subestación Amana 115/13,8 kV (ver Fig. 5), incluyéndose los medidores de voltaje y corriente los cuales son necesarios para mostrar gráficamente los parámetros de voltaje y corriente en cada subestación y banco de condensadores analizados. Las líneas son modeladas mediante circuitos PI debido a que son líneas cortas (menores a 10 km), siendo la longitud de onda (λ) mayor que la longitud de la línea estas pueden ser modeladas mediante líneas con parámetros concentrados (Modelo PI) [6]

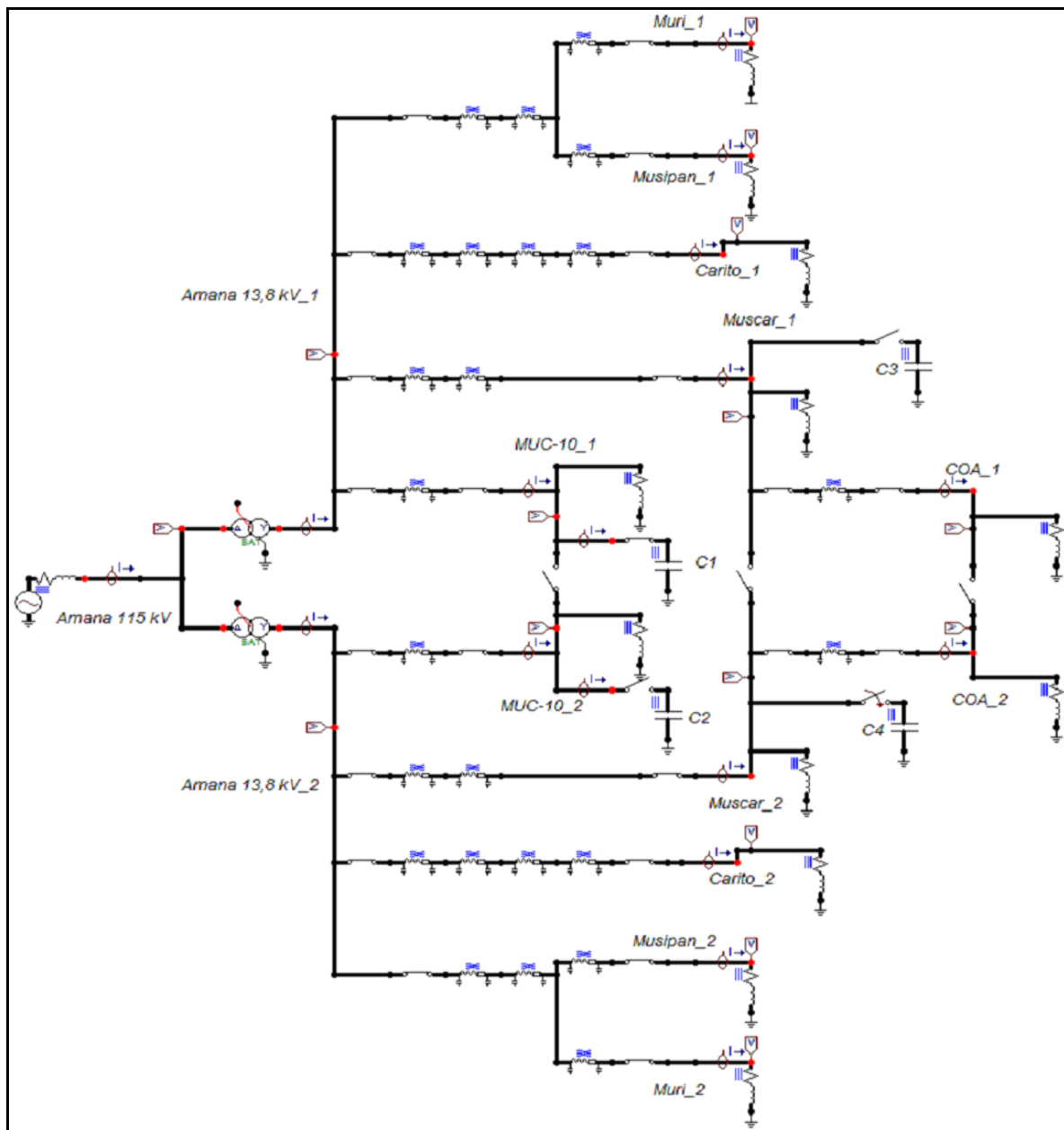


FIG. 5. MODELO EN ATP DE LA SUBESTACIÓN AMANA 115/13,8 KV Y SISTEMA ELÉCTRICO ASOCIADO.

En la tabla III se pueden observar los perfiles de voltajes obtenidos mediante un análisis de flujo de carga, utilizando el ETAP 5.5.6, para cada caso de simulación especificado.

TABLA III
PERFILES DE VOLTAJE PARA CADA CASO DE SIMULACIÓN

Casos	Voltaje (kV)
1, 2, 3, 4, 9, 10, 11, 12, 17, 18, 19, 20, 25, 26, 27, 28	114,1
5, 6, 7, 13, 14, 15, 21, 22, 23, 29, 30, 31	114,2
8, 16, 24, 32	114,3

A. Validación del Modelos en ATP

Se realizó un estudio de flujo de carga en la base del ETAP, con la finalidad de obtener los perfiles de tensión en cada subestación y los flujos de potencia activa y reactiva. Posteriormente se realizó la simulación con el modelo en ATP (bajo las mismas condiciones). Los resultados para ambos casos son muy cercanos entre sí (Ver Tabla IV), a excepción de la potencia reactiva en la Subestación Amana, cuya diferencia se debe al modelo del transformador de potencia utilizado en ATP, el cual no considera, la corriente magnetizante y las pérdidas en el núcleo que si considera el ETAP.

TABLA IV
PERFILES DE VOLTAJE Y FLUJOS DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA SUBESTACIÓN AMANA

Subestación		Amana 115 kV	Amana 13,8 kV		Muscar PDVSA		MUC-10	
Sección		-	1	2	1	2	1	2
Voltaje (kV)	ETAP	114,10	13,68	13,60	13,55	13,41	13,07	12,99
	ATP	112,90	13,54	13,54	13,42	13,36	12,99	12,98
Error (%)		1,07	0,97	0,42	0,93	0,32	0,64	0,08
Potencia Activa (kW)	ETAP	28,80	12,60	16,20	5,00	8,60	4,90	4,90
	ATP	28,00	12,00	16,00	5,00	8,50	4,90	5,00
Error (%)		2,78	4,76	1,23	2,00	1,16	0,00	2,00
Potencia Reactiva (kVar)	ETAP	18,30	8,30	10,00	3,30	4,70	2,50	2,50
	ATP	16,00	7,80	8,90	3,40	4,70	2,50	2,50
Error (%)		12,60	8,43	11,00	3,00	0,00	0,00	0,00

B. Instante de Maniobra

Para la selección del tiempo de maniobra, se simuló la red en condición normal de operación y se tomó el instante de tiempo en el cual el voltaje de la fase “A” (curva color rojo) en las subestaciones Muscar PDVSA y MUC-10 alcanzó su

valor máximo para realizar las maniobras. Este tiempo fue de 15,3 ms, ver Fig. 6.

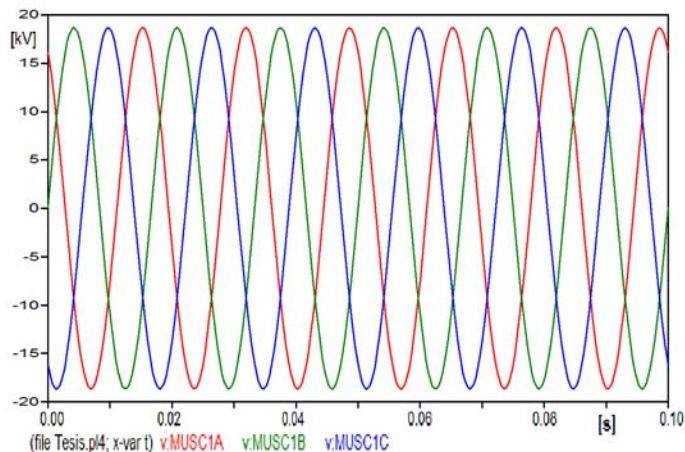


FIG. 6. PERFILES DE VOLTAJE EN LA SUBESTACIÓN MUSCAR PDVSA.

C. Simulaciones y Resultados

En las figuras 7, 8, 9 y 10; se muestran las simulaciones obtenidas para el caso N°28, específicamente las sobretensiones y las sobrecorrientes más significativas que se registraron en las subestaciones. Los resultados de otros casos de simulación se muestran en las Tablas V y VI, en las cuales se tabularon los parámetros característicos de los fenómenos transitorios (sobretensión, frecuencia de oscilación, tiempo de duración y sobrecorriente).

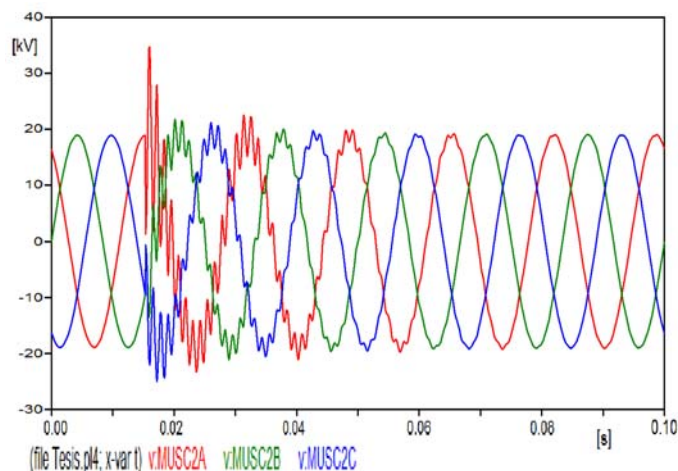


FIG. 7. VOLTAJE PICO EN LA BARRA 2 DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA MUSCAR PDVSA.

A. Análisis de los resultados

Como se puede observar en la Fig. 7 y en la tabla VI, se produce una sobretensión que alcanza un valor pico de 35,79

kV (25,31 kVRMS) correspondiendo a 1,89 p.u. en el lugar donde se lleva acabo la maniobra de energización del banco; Esta sobretensión ocurre a una frecuencia de 847 Hz. El transitorio dura aproximadamente 38 ms, tiempo en el cual el valor de la sobretensión decrece hasta alcanzar un valor pico de 18,96 kV (13,41 kVRMS).

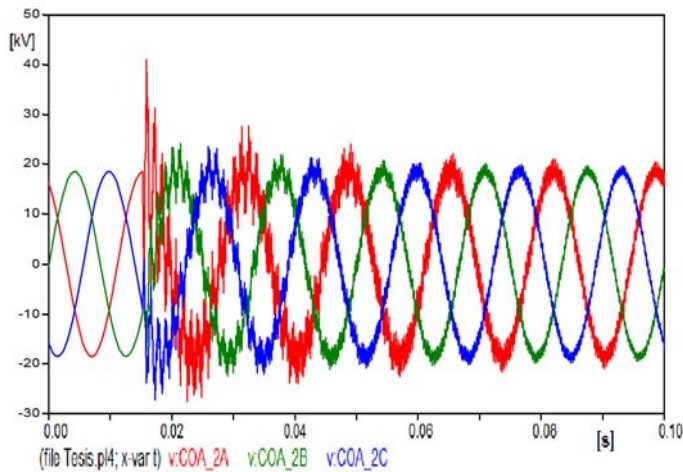


FIG. 8. VOLTAJE PICO EN LA BARRA 2 DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA COA.

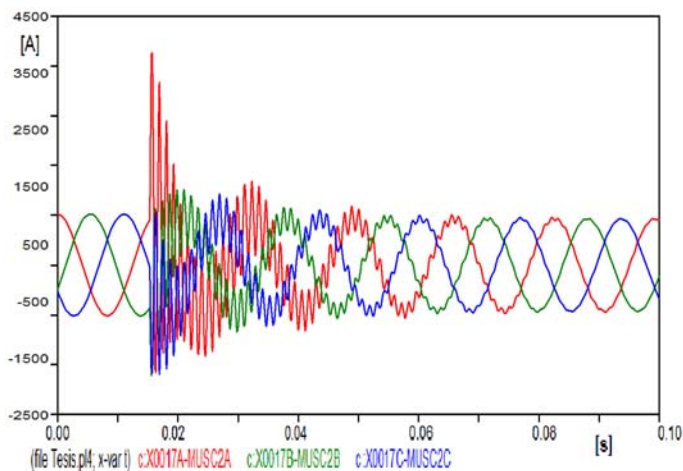


FIG. 9. CORRIENTE EN LA BARRA 2 DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA MUSCAR PDVSA.

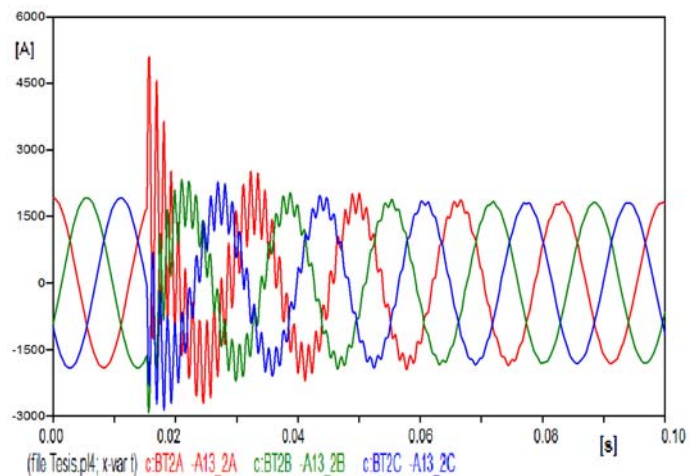


FIG. 10. CORRIENTE EN LA BARRA 2 DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA AMANA 13,8 kV.

TABLA V
PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS TRANSITORIOS EN LA SUBESTACIÓN MUC-10

Casos	MUC-10				
	Vt (kV)	f (Hz)	t (ms)	Vp (kV)	It (A)
2	23,69	418	21	13,29	2131
4	23,68	419	21	13,29	2131
10	23,68	418	21	13,27	2136
13	23,68	418	21	13,28	2139

TABLA VI
PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS TRANSITORIOS EN LAS SUBESTACIONES MUSCAR PDVSA Y COA

Casos	Vt (kV)	f (Hz)	t (ms)	Vp (kV)	It (A)
	Muscar PDVSA				
20	24,75	845	38	13,48	4263
23	24,77	840	38	13,48	4266
28	25,31	847	38	13,41	4263
32	24,65	847	38	13,31	4268
Casos	COA				
20	29,11	714	38	13,21	-
23	29,13	714	38	13,22	-
28	29,09	714	38	13,16	-
32	29,15	714	38	13,14	-

En las figuras 8, 9 y 10, se puede visualizar que se produce sobrecorriente en la barra 2 de la subestación Muscar PDVSA con un valor pico de 4263 A, en la barra 2 de la subestación Amana 13,8 kV de 5086 A y sobretensión en la barra 2 de la subestación COA con un valor pico de 41,14 kV (29,09 kVRMS), la cual ocurre a una frecuencia de 714 Hz durante un tiempo de 38 ms. El voltaje y la corriente registrados en las demás subestaciones no son afectados significativamente por esta maniobra.

Como se puede apreciar en las tablas V y VI, las

sobrecorrientes originadas por las maniobras de energización de los bancos de condensadores evaluados no afectan de forma significativa al sistema.

- Capacidades de los Equipos: El nivel básico de aislamiento ante el impulso de maniobra (por sus siglas en inglés, *Basic Switching impulse insulation Level*, BSL) definen la capacidad de los equipos durante la ejecución de maniobras en el sistema, sin embargo el nivel de aislamiento de los equipos viene dado por el nivel básico de aislamiento del impulso del rayo (según sus sigla en inglés *Basic Lightning impulse insulation Level*, BIL).[7] En la tabla VII, se puede observar que los equipos instalados en las subestaciones se encuentran en la capacidad de soportar las sobretensiones máximas registradas en las simulaciones de los casos de estudio, razón por la cual el sistema no se ve afectado de forma significativa

Subestaciones		Interruptor	Transformador	Simulación
		BIL (kV)	BIL (kV)	Vt (kV)
Amana 13,8 kV	Barra 1	67,18	67,18	14,08
	Barra 2	67,18	67,18	14,09
Muscar PDVSA	Barra 1	67,18	67,18	24,83
	Barra 2	67,18	67,18	24,69
MUC-10	Barra 1	67,18	67,18	23,69
	Barra 2	67,18	67,18	23,68
COA	Barra 1	67,18	67,18	29,19
	Barra 2	67,18	67,18	29,15

IV. CONCLUSIONES

La simulación de sistema eléctrico asociado a la subestación Amana 115/13,8 kV mediante el modelo digital que fue creado en el ATP, permitió realizar un estudio gráfico de las perturbaciones transitorias que se originan debido a las maniobras con bancos de condensadores. Los casos de simulación que describen maniobras de energización de los bancos de condensadores, permiten verificar cómo se comporta el sistema durante la conexión de un banco mientras los otros se encuentran previamente energizados o no, de esta forma se tiene un amplio rango de simulaciones y por ende mayores resultados para diferentes simulaciones.

Las mayores sobretensiones obtenidas en el estudio se registraron en la Subestación Eléctrica del Centro Operativo Amana (COA), para los casos de simulación en los cuales se energizaban los bancos de condensadores en la Subestación Muscar. Para ninguno de los casos de estudio las sobrecorrientes originadas por las maniobras de energización en los bancos de condensadores representan algún riesgo para la red eléctrica.

Mediante el análisis de los resultados de diferentes caso de simulación se verificó que los equipos instalados en las subestaciones Amana 11/13,8 kV, Muscar, Carito, Musipán,

Muri y están diseñadas para soportar las solicitaciones de voltaje y corriente originadas por las maniobras de los bancos de condensadores.

Si bien, el caso de estudio se enfoca en el estudio de los transitorios electromagnéticos originados por las maniobras de bancos de condensadores, según los casos de simulación descritos en el mismo, el modelo digital de la red eléctrica en el ATP permite realizar un estudio más amplio de estos y otros fenómenos, como por ejemplo, estudios de los transitorios originados por desconexión de los bancos de condensadores cuando se produce una reinserción en sus interruptores, estudios de transitorios electromagnéticos originados por descargas atmosféricas, entre otros. Por esta razón, y además porque permite realizar una ejecución eficaz y acelerada de los estudios de transitorios electromagnéticos, la metodología desarrollada representa un aporte en el estudio y planificación de proyectos asociados a bancos de condensadores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Std 1036-1992. "IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors". The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, USA, 1992.
- [2] Golindano R., R. "Análisis de los Efectos transitorios asociados a la energización de Bancos de Compensación en las Subestaciones Cachama 69 kV y Guara Oeste en 115 kV del Distrito San Tome PDVSA" Trabajo de Grado. Universidad de Oriente. Venezuela, 2010
- [3] Pérez A., H. "Magnificación de Tensiones por maniobras de Bancos de Condensadores" Trabajo de Grado. Universidad de San Carlos Guatemala. Guatemala, 2008.
- [4] Bianchi L., R. Barbieri, M. y Amera, P. "Conexión de Bancos de capacitores en redes de AT, Metodología de Estudio. Diseño y verificación del equipamiento". Comité Nacional Paraguayo del CIGRE. Paraguay. Mayo, 2005.
- [5] Cuaderno Técnico N° 189 "Maniobra y protección de las baterías de condensadores de Media Tensión" Schneider Electric España S.A., Versión española. España. Junio, 2000
- [6] Ras O., Enrique. "Teoría de líneas Eléctricas. Volumen I" Editorial MARCOMBO, Boixareu Editores, 1985.
- [7] IEEE Std 1313.1-1996. "IEEE Standard for Insulation Coordination-Definitions, Principles and Rules" The Institute of Electrical and Electronics, Inc. New York, USA, 1996.