



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

Cuernavaca, Mor., a 30 de septiembre de 2020.

**Dr. Mario Limón Mendoza**  
**Dr. Outmane Oubram**  
**Dr. Roy López Sesenes**  
**Dr. José Gerardo Vera Dimas**  
**Dr. Luis Cisneros Villalobos**  
**PROFESORES DE LA FCQeI**  
**P R E S E N T E**

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta el Ing. Néstor Alexis Hernández Muñoz titulada: ANÁLISIS DEL FENOMENO DE ESCALACIÓN DE TENSIÓN EN FALLAS INTERMITENTES EN MEDIA TENSIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES realizada bajo la dirección del Dr. Luis Cisneros Villalobos en el Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

**A T E N T A M E N T E**  
*Por una humanidad culta*

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**DIRECTORA**

**D I C T A M E N**

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**DIRECTORA DE LA FCQeI**  
**P R E S E N T E**

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:.

**DICTAMEN**

<b>NOMBRE</b>	<b>VOTO</b>	<b>FIRMA</b>
Dr. Mario Limón Mendoza		
Dr. Outmane Oubram		
Dr. Roy López Sesenes		
Dr. José Gerardo Vera Dimas		
Dr. Luis Cisneros Villalobos		



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2020-09-30 17:38:56 | Firmante**

KJdYEBEMScI5baZdu2yCWamWFyhaVF2or3CuMDy/10DYPJR+kxhS2ommyLxxMt5d3lYh+3ujxYn6mRsjc4DGuT2ybIRsrM0iYyHtbNMS6HStsnlShPQNFAdapCelGYNO8eyxd  
pT4FD0irRjLRP4+hQvACd3uqqX8fbY/fif0asY+wiUM4IVd3A30xHVcY+cNP3nuSJCKlZOQ0u/M5ICNGY4o6tB/Y//+4gCeQFYAEITdhJ7C7BpHXIRHsrX7+blsrEynJL3Q4gbQVS4x  
bwovxkSku+eduZyTbFmavKD+PCY5Gl/bGFg3oZ5LQgzSGzqrAclikVIQQvT49xv8QXEgw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



LbD83P

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/dhCtumnNVMyOGJtLgE3ME8p4ABQjZxqZ>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**MARIO LIMON MENDOZA | Fecha:2020-10-01 11:11:01 | Firmante**

KOSMWGqfno3dLIDPXNnN6V0S2wfuVT14IMgJEVmcNwiSt+I30JCwNsDD4PnPfzXg7P8pOCi1mlg5KYstKwv752JIIJxQvtzXFKXF2pddvOtlhy5viCLW3xHCl/hZHsQUfJft8sAKBLr+hSZRAxJRwROCIooEgPapV7YloznCaKFAKtqx9Ntfc/6xNMUETw2I4pXYt1dEkl6tokTOxlgwAVSYqF9OwQLmoDY9RTR2C1/JM3ospm/BMla/39nF949W5Snh+BSjbufBD+kGcguwBPObMQV6KmX0f2e2zGPvCGqoQPXq+BKd6a/ZTZNy16xXOb5jmD23d8IXalJt/S7IA==

**ROY LOPEZ SESENES | Fecha:2020-10-01 11:56:47 | Firmante**

b+ihgkcwPGraCZ/Lm5d6Zcde45o5wjjpz3cndMrTAwSlzHX5RDWIGg3ao88fO1SsqHNcZ3SnxfMy0sU2pzxkGTMp0UO+V6W/XqcPijMkHLMJRqnOVCvbfvFS7bViFd6Bld2Zlo4D1t31lkg7cXmihl8Wx0w/cwk2tdLITjkV5fqbzqSNzyD6CWJc/1GxXTvHhckirBVM+ucxdLiZdl+D5O7Wf7XqgbZwqcDXe1YPSk2+IHSqyxnbtDAm3vGEZlWVo8bH3X1PaNeWuFMm5dFga1MMmbrRm79XLr6V3r2QLepSLyjSo2jL5XVMdYfXARev08aN6Nbt4o2er1Xfeg==

**LUIS CISNEROS VILLALOBOS | Fecha:2020-10-01 12:35:28 | Firmante**

De3VEJCbclDgXZcex+8mKcZCwg5YNOAwW3KYeY7181xYddk0vP4PijWWIG0skQP6nOIXdIOSfkaocTJ8vDezKq4966U5G9n1Pur1kD6SjSBtncP2w/gG5JwmsYqf+liR7CsEWF0hkBNYGxmej7IQ+FBtO8xJ0+8ftJ0Wryf3Mv9Di+hcBqRwAfK7/x4fpWzXuT2dhQcfdHROUGgaZqopZxE3Sjfk3i9qPJSelJeb7A7vETYRF2eQv0iDOs/WCZV2rhhD5zNmr8cKavQTiFefbFz7bN/ILUDJg3WhWfBjkVvu/wpr4ljo8Nd3h+B2Uk556Hybm3aHHATgHF7pQ==

**OUTMANE OUBRAM | Fecha:2020-10-01 12:41:08 | Firmante**

MpZZnRMWmuN8ZLyEg9wQTFy6mCXUFIInx6LYZNos76C6cyj8SLfUwGg3SmO74MK3z7FbnyW1joZJixXk2cCdGi6dTtEc7p05jv+QwcZdsiAecQuulhe4AvKXm9JwDXD+h+nHZtZUezNIQzFFL6UFUeFCjUjY71GRRQy4/VU0WSZifOoLIQ2k0RdXaV/sGK4LV2k3allRWsN2oTyhQTes/zuTVRrSsQY8ldTbtUdtLedTL5dUKdgpC6xm61jY1i8Atoy+iudFCn8b4Viv2zSpirM6lpx1jZXFWitJbW1VG2DuZrXasX0mPyyQAK3/RvcW9UofAkcBSz1SDDVCf9c/q2Q==

**JOSE GERARDO VERA DIMAS | Fecha:2020-10-01 23:16:57 | Firmante**

o4efCghHQ+AZ5s0gEoybqrqIU+TVuBDceudDI0NyqXqGGvwlBcz8H/8mRJ/fN9ZIQiOkGMpSbgA7iFafErlKb0yNW0U4j9BulWWYjaBvauYynl/FMQ+Q9Dxhg9ZyftXCozE0sA2L/FkwbUlofR5ySH+fhvAo1QkSfa4rfYw1xEvJcabi7V70yDpJBfvZ3x1GeyJFEeb+ZHcjAgqY0CRuwNC4Mo/sAZbnAMybYvUlgBBdMEDZvsTVFUQXXC0bwq6Gu0ToINHAaRpE6oH29X+PF6VkeodYrHEEVncr5G1W3X9VaFeHaWcgvdllnCLj+0yKL1tTr9Yf9SxGGKKEEDcQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



zafSV

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/Zuaxn6r1XgX0ehs3Jctf0YBXo1KKUCeQ>



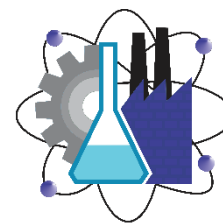


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL DE  
ESTADO DE MORELOS

---

---



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingenierías

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**ANÁLISIS DEL FENOMENO DE ESCALACIÓN DE TENSIÓN EN FALLAS  
INTERMITENTES EN MEDIA TENSIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS  
INDUSTRIALES**

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

P R E S E N T A:

**ING. NÉSTOR ALEXIS HERNANDEZ MUÑOZ**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. LUIS CISNEROS VILLALOBOS  
CODIRECTOR DE TESIS: M.C. ARTURO GARCÍA TEVILLO**

**CUERNAVACA, MORELOS**

**SEPTIEMBRE, 2020**

---

## **DEDICATORIA**

A mi esposa Erika Yazmín Salguero Neri y a mis hijos Néstor Abdiel y Gael

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por bendecir nuestra vida, por guiarnos, a lo largo de nuestra existencia y por ser el apoyo y fortaleza, en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

A mi esposa Erika Yazmín, por su apoyo para culminar satisfactoriamente este trabajo.

A mi madre Esther y a mis hermanos Hasibe Elvira y Felipe de Jesus, por su incondicional ayuda de siempre.

A mis asesores, el M. en C. Arturo Garcia Tevillo por su paciencia y asesoría durante la ejecución de este trabajo y el Dr. Luis Cisneros Villalobos por sus consejos y gran apoyo, en la realización de este trabajo.

Al jurado revisor de este trabajo, por su tiempo y consejos para realizar esta tesis.

A todos mis profesores de la MIEE – FCQEI de la UAEM, por transmitirme sus conocimientos y retos, durante las clases de esta maestría.

Al M. en C. Alberth Pascacio de los Santos, Gerente de la Gerencia de Equipos Eléctricos del INEEL, por las facilidades otorgadas durante la realización de esta maestría.

Al INEEL, por su apoyo como becario interno, para la realización de esta maestría.

## RESUMEN

En esta tesis, se analizó el fenómeno de escalación de tensiones, en un sistema eléctrico de potencia, que se queda alimentando una falla a tierra del tipo intermitente, con su neutro eléctricamente flotado. El análisis se llevó a cabo, mediante simulación digital, empleando el software para el análisis de transitorios electromagnéticos denominado ATPDraw, por sus siglas en inglés “Graphic Alternative Transients Program”.

Para poder llevar a cabo la simulación digital, el autor de este trabajo, desarrolló un modelo para simular una falla a tierra del tipo intermitente, en media tensión. Se simularon seis escenarios, con los cuales se analizaron las sobre tensiones ocasionadas por una falla a tierra franca y por una falla a tierra intermitente, en sistemas con su neutro conectado a tierra y con su neutro flotado.

Se determinó, mediante la simulación digital, que la ocurrencia del fenómeno de escalación de tensiones, se presenta sí y solo si, ocurre una falla a tierra del tipo intermitente, en un sistema que tiene su neutro sin conexión a tierra. También se determinó, que la escalación de tensiones, se debe al acoplamiento capacitivo del sistema con de la corriente de falla a tierra, con una capacitancia parásita del orden de  $3.32 \mu\text{F}$  y con una corriente de carga del orden de 10 Amp. Las tensiones se escalaron en las tres fases y en el neutro. En la fase, que presentó la falla a tierra inicial, la tensión de fase, se incrementó hasta 6 p.u. En las fases no falladas, la escalación de la

---

tensión de fase fue hasta de 4.5 p.u. Finalmente, el neutro adquirió una sobre tensión hasta de 5 p.u.

El aislamiento de los equipos principales de media tensión, como los generadores y motores, están diseñados para soportar hasta  $2V_{L-L} + 1000$  V de CA, durante un minuto, que equivale a 3.5 p.u de la tensión de fase. En consecuencia, en cuanto este nivel es superado por la escalación de tensiones, ocurrirá inevitablemente, una falla dieléctrica.

Como medida de solución, para evitar la presencia de sobretensiones por escalación de tensiones, en los sistemas industriales de media tensión que cuentan con múltiples fuentes de potencia, es preciso eliminar el bus de neutros, implantando un esquema que garantice que todos los neutros del sistema, permanecerán conectados a tierra, en todos los escenarios de operación. De este modo, se evita que el sistema de potencia quede flotado durante todos los escenarios de operación, tanto en condiciones normales, como en condiciones de falla.



## ABSTRACT

In this thesis, the phenomenon of voltage escalation was analyzed, in an electrical power system, which remains feeding a ground fault of the intermittent type, with its neutral electrically floating. The analysis was carried out, by means of digital simulation, using the software for the analysis of electromagnetic transients called ATPDraw, which stands for "Graphic Alternative Transients Program".

In order to carry out the digital simulation, the author of this paper developed a model to simulate an intermittent medium voltage ground fault. Six scenarios were simulated, with which the overvoltages caused by a straightforward ground fault and an intermittent ground fault were analyzed, in systems with their neutral connected to ground and with their neutral floating.

It was determined, through digital simulation that the occurrence of the voltage escalation phenomenon occurs if and only if an intermittent ground fault occurs in a system with its neutral ungrounded. It was also determined that the voltage rise is due to the capacitive coupling of the system with the ground fault current, with a parasitic capacitance of the order of  $3.32 \mu\text{F}$  and a load current of the order of 10 Amps. The voltages were scaled on all three phases and on the neutral. On the phase, which presented the initial ground fault, the phase to ground voltage was increased to 6 p.u. On the non-faulted phases, the phase-to-ground voltage was scaled up to 4.5 p.u. Finally, the neutral acquired an overvoltage of up to 5 p.u.

---

The insulation of main medium voltage equipment, such as generators and motors, is designed to withstand up to  $2V_L-L + 1000 \text{ V AC}$ , for one minute, which is equivalent to 3.5 p.u. of the phase to ground voltage. Consequently, as soon as this level is exceeded by voltage escalation, a dielectric failure will inevitably occur.

As a solution, to avoid overvoltages due to voltage escalation, in medium voltage industrial systems with multiple power sources, it is necessary to eliminate the neutral bus, implementing a scheme that guarantees that all system neutrals will remain connected to ground in all operating scenarios. In this way, the power system is prevented from floating during all operating scenarios, both under normal and fault conditions. This prevents the power system from floating during all operating scenarios, both under normal and fault conditions.

## ÍNDICE (O CONTENIDO)

RESUMEN	4
ABSTRACT	6
ÍNDICE (O CONTENIDO)	8
NOMENCLATURA Y SIMBOLOGÍA	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABLAS	15
1. CAPÍTULO 1	16
INTRODUCCIÓN	
1.1. Objetivos de la tesis .....	20
1.2. Justificación.....	20
1.3. Alcance de la tesis .....	20
1.4. Aportaciones de la tesis .....	21
1.5. Antecedentes .....	23
1.6. Estructura de la tesis .....	26
2. CAPÍTULO 2	28
ASPECTOS TEÓRICOS DEL FENÓMENO DE ESCALACION DE TENSIONES Y EVIDENCIAS DE FALLAS A TIERRA INTERMITENTES	
2.1. Fenómeno de escalación de tensiones .....	28
2.2. Sistemas con múltiples fuentes de potencia que se quedan flotados alimentado una falla a tierra.....	32
2.3. Evidencias del fenómeno de escalación de tensiones en complejos industriales .....	40
2.3.1. Caso 1. Evidencias de arcos eléctricos en dos tableros de 13.8 kV por sobre tensiones ocasionadas por escalación de tensiones .....	41
2.3.2. Caso 2. Fallas simultáneas por escalación de tensiones reportadas en la literatura especializada .....	45

3.	<b>CAPÍTULO 3</b>	39
	<b>MODELADO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA PARA EL ANÁLISIS DE ESCALACIÓN DE TENSIONES</b>	
3.1.	Introducción.....	39
3.2.	Descripción del sistema eléctrico de potencia .....	39
3.3.	Modelado de los equipos primarios del sistema eléctrico .....	42
3.4.	Fuente de energía externa (sistema eléctrico nacional).....	43
3.5.	Generadores .....	43
3.6.	Transformador de enlace .....	46
3.7.	Cables de energía .....	52
3.8.	Cargas .....	54
3.9.	Bancos de capacitores .....	56
3.10.	Interruptores.....	57
3.11.	Falla intermitente.....	59
4.	<b>CAPÍTULO 4</b>	68
	<b>ANÁLISIS DE ESCALACIÓN DE TENSIÓN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES</b>	
4.1.	Introducción.....	68
4.2.	Escenario A1. Falla a tierra franca en un sistema con dos neutros conectados a tierra.....	68
4.3.	Escenario A2. Falla a tierra intermitente en un sistema con dos neutros conectados a tierra.....	72
4.4.	Escenario A3. Falla a tierra franca en un sistema con un neutro conectado a tierra.....	75
4.5.	Escenario A4. Falla a tierra intermitente en un sistema con un neutro conectado a tierra .....	78
4.6.	Escenario A5. Falla a tierra franca en un sistema con el neutro flotado.....	81
4.7.	Escenario A6. Falla a tierra intermitente en un sistema con el neutro flotado .....	84
4.1.	Discusión de resultados .....	87

5.	CAPÍTULO 5	89
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
5.1.	Introducción.....	89
5.2.	Conclusiones.....	89
5.3.	Aportaciones .....	91
5.4.	Recomendaciones para trabajos futuros .....	92
	BIBLIOGRAFÍA	94
	APÉNDICE A	98
	APÉNDICE B	100
	APÉNDICE C	121

## NOMENCLATURA Y SIMBOLOGÍA

<i>a</i>	Fase a
A	amperes
ATP	Programa de Transitorios Alternativo (Alternative Transients Program)
ATPDraw	Programa de Transitorios Alternativo Gráfico
<i>b</i>	Fase b
<i>c</i>	Fase c
C	Capacitancia
cm	Centímetro
EMTP	Programa de Transitorios Electromagnéticos (Electromagnetic Transients Program)
<i>f</i>	Frecuencia
Hz	Hertz
kA	Kiloamperes
kHz	Kilohertz
km	Kilómetros
kV	Kilovoltios
<i>I<sub>c</sub></i>	Corriente en el capacitor
<i>I<sub>exc</sub></i>	Corriente de excitación
<i>I<sub>falla</sub></i>	Corriente de falla
<i>I<sub>L</sub></i>	Corriente en la inductancia
<i>I<sub>N</sub></i>	Corriente en el neutro
<i>I<sub>m</sub></i>	Corriente de magnetización
<i>I<sub>R</sub></i>	Corriente en la resistencia
<i>i(t)</i>	Corriente en función del tiempo
<i>j</i>	$\sqrt{-1}$
L	Inductancia
m	metro
kCM	Mil circular mil
MVA	Megavoltamper
MW	Megawatt
p.u.	Por unidad

$R$	Resistencia
$R_{equiv}$	Resistencia equivalente
$R_L$	Resistencia de la carga
TP	Transformador de potencial
TC	Transformador de corriente
$V$	Tensión
$V_C$	Sobretensión en la capacitancia
$V_L$	Tensión de línea
$V_f$	Tensión de fase
$v(t)$	Tensión en función del tiempo
$X_C$	Reactancia capacitiva
$X_L$	Reactancia inductiva
$X_s$	Reactancia propia
$X_M$	Reactancia mutua
$X^{short}$	Reactancia de corto circuito
XLP	Aislamiento de polietileno de cadena cruzada
$X_1$	Reactancia de secuencia positiva
$X_0$	Reactancia de secuencia cero
$Y$	Admitancia
$Z$	Impedancia
$Z^{short}$	Impedancia de corto circuito
$Z_1$	Impedancia de secuencia positiva
$Z_0$	Impedancia de secuencia cero
$\Delta t$	Incremento del tiempo
$\mu f$	Microfaradio
$\Omega$	Ohm

---

## LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1.1** Sistema de potencia de un centro Industrial con fuentes múltiples de potencia, para el suministro continuo de energía eléctrica.
- Fig. 2.1** Circuito equivalente de una falla intermitente.
- Fig. 2.2** Escalación de tensiones ocasionada por una falla a tierra intermitente, en un sistema trifásico, eléctricamente flotado.
- Fig. 2.3** Conexión del neutro a tierra con “baja resistencia” en generadores y transformadores en un centro Industrial típico de media tensión, con generación propia.
- Fig. 2.4** Esquema típico de un centro Industrial con múltiples fuentes de potencia.
- Fig. 2.5** Conexión a tierra del neutro mediante bus de neutros en sistemas de media tensión con múltiples fuentes de potencia.
- Fig. 2.6** Falla a tierra en sistemas con el neutro conectado sólidamente a tierra.
- Fig. 2.7** Falla a tierra en sistemas con el neutro sin conexión a tierra (Configuración delta-estrella).
- Fig. 2.8** Corrimiento del neutro e incremento de tensión en las fases no falladas, en un sistema trifásico, con su neutro eléctricamente flotado, con una falla a tierra. Adaptada de Aparaschivei et all, 2016 [2].
- Fig. 2.9** Evidencias de arcos eléctricos de fase en un tablero de 13.8 kV, Clase 15 kV.
- Fig. 2.10** Evidencias de arcos eléctricos de fase a tierra y entre fases en un tablero de 13.8 kV, Clase 15 kV.
- Fig. 2.11** Evidencia de falla a tierra intermitente, por tracking.
- Fig. 2.12** Sistema eléctrico de un centro Industrial con fallas simultaneas por sobretensiones. Adaptada de Aparaschivei et all, 2016 [2].
- Fig. 2.13** Sobretensiones registradas por el relevador del motor D111A (parte I).
- Fig. 2.14** Conexión de la red de tierra de una carga distante con el neutro del sistema, a través de la pantalla de los cables de potencia o un neutro corrido.
- Fig. 2.15** Daños en la celda de alimentación del motor D701 causados por sobretensiones y fallas a tierra.
- Fig. 3.1** Diagrama unifilar para el desarrollo del modelo para el análisis del fenómeno de escalación de tensiones.
- Fig. 3.2** Modelo del generador Tipo 59 de ATP/EMTP [15, 16].
- Fig. 3.3** Modelo “ $\pi$ ” de un cable.
-



- Fig. 3.4** Representación del circuito equivalente de las cargas en el sistema de potencia.
- Fig. 3.5.** Circuito resistivo equivalente para la solución de transitorios de una capacitancia concentrada.
- Fig. 3.6.** Representación de los interruptores en ATP/EMTP.
- Fig. 3.7.** Modelo del sistema eléctrico utilizado para la falla intermitente en Atpdrow.
- Fig. 3.8.** Sistema flotado con una falla a tierra franca en la fase C.
- Fig. 3.9.** Falla intermitente a tierra presente en un sistema eléctricamente flotado con una corriente de carga de 10 Amp.
- Fig. 3.10.** Falla intermitente a tierra cada  $\frac{1}{2}$  ciclo presente en un sistema eléctricamente flotado presentando escalación de tensiones del orden de 5 a 6 p.u.
- Fig. 4.1.** Comportamiento de la tensión de línea cuando se presenta una falla franca a tierra, con el neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .
- Fig. 4.2.** Comportamiento de la tensión de fase cuando se presenta una falla franca a tierra, con el neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .
- Fig. 4.3.** Comportamiento de la corriente de falla a tierra, cuando se presenta una falla a tierra franca, con el neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .
- Fig. 4.4.** Comportamiento de la tensión de línea cuando se presenta una falla a tierra intermitente. Neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .
- Fig. 4.5.** Comportamiento de la tensión de fase cuando se presenta una falla intermitente. Neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .
- Fig. 4.6.** Comportamiento de la corriente de falla a tierra, cuando se presenta una falla intermitente. Neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .
- Fig. 4.7.** Comportamiento de la tensión de línea cuando se presenta una falla franca. Neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .
- Fig. 4.8.** Comportamiento de la tensión de fase cuando se presenta una falla a tierra franca. Neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .
- Fig. 4.9.** Comportamiento de la corriente de falla a tierra, cuando se presenta una falla franca. Neutro del TG-1 conectado a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .
- Fig. 4.10.** Comportamiento de la tensión de línea cuando se presenta una falla intermitente, el neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .
-

- Fig. 4.11.** Comportamiento de la tensión de fase cuando se presenta una falla intermitente, el neutro del TG-1 y T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .
- Fig. 4.12.** Comportamiento de la corriente cuando se presenta una falla a tierra intermitente. el neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .
- Fig. 4.13.** Comportamiento de la tensión de línea, cuando se presenta una falla franca a tierra, en un sistema eléctricamente flotado.
- Fig. 4.14.** Comportamiento de la tensión de línea, cuando se presenta una falla franca a tierra, en un sistema eléctricamente flotado.
- Fig. 4.15.** Comportamiento de la corriente de falla a tierra, cuando se presenta una falla a tierra franca, en un sistema eléctricamente flotado.
- Fig. 4.16.** Comportamiento de la tensión de línea sin conexión de neutros a tierra presentando una falla intermitente a tierra.
- Fig. 4.17.** Comportamiento de la tensión de línea sin conexión de neutros a tierra presentando una falla intermitente a tierra.
- Fig. 4.18.** Comportamiento de la corriente en el neutro, sin conexión del neutro a tierra con una falla intermitente a tierra en el sistema.

### LISTA DE TABLAS

**Tabla 3.1** Tiempos de operación de la falla intermitente.

**Tabla 3.2** Valores de corriente de carga típicos 3lo por nivel de tensión.

**Tabla 4.1** Análisis de resultados de acuerdo al tipo de falla presente y su método de conexión del neutro a tierra

---

# 1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

---

Una falla a tierra es el contacto indeseable entre un conductor que está energizado con el potencial de tierra. Más del 90% de las fallas en los sistemas eléctricos industriales, precisamente son fallas a tierra [1]. Si se tiene un contacto sólido entre el conductor y tierra, se tiene una falla franca a tierra. Si la falla ocurre a través del aire, con arcos eléctricos que aparecen y desaparecen, se dice que se tiene una falla a tierra del tipo intermitente [2].

Las fallas a tierra tienen una relación directa con la conexión a tierra del neutro del sistema. Las normas permiten que el neutro, de un sistema eléctrico de potencia, pueda conectarse directamente a tierra, que se conecte a través de una impedancia o que quede sin conexión a tierra (neutro eléctricamente flotado) [39]. Es el usuario, quien finalmente, de acuerdo con sus requerimientos, determina el método de conexión a tierra del neutro de su sistema.

Cuando se presenta una falla a tierra franca, en un sistema conectado sólidamente a tierra, la corriente de falla adquiere un valor considerable, el cual es detectado por las protecciones de sobrecorriente (50/51N) y la falla es liberada inmediatamente.

Cuando se presenta una falla a tierra franca, en un sistema con su neutro conectado a tierra a través de una impedancia, el paso de la corriente de falla a través de la impedancia, genera una sobretensión de 1.73 veces la magnitud de la tensión de fase ( $1.73V_n$ ), en las fases no falladas. La corriente de falla, también es detectada por las

---

protecciones de sobrecorriente y la falla es liberada, eliminando inmediatamente la sobre tensión en las fases no falladas.

Cuando ocurre una falla a tierra franca en un sistema con el neutro flotado, se genera una sobretensión de  $1.73V_n$ , en las fases no falladas por el fenómeno de corrimiento del neutro. La corriente de falla a tierra regresa al sistema por acoplamiento capacitivo, por lo que su valor es mínimo y no puede ser detectado por las protecciones de sobre corriente. En estas condiciones, la sobretensión de  $1.73V_n$ , permanece peligrosamente, en las fases no falladas.

Cuando se presenta una falla a tierra intermitente, en sistemas con el neutro conectado a tierra sólidamente o con una impedancia, las protecciones de sobre corriente no pueden detectar las señales intermitentes de la corriente de falla, porque fueron diseñadas para detectar formas de onda de 60 hz [13]. Por lo tanto, la falla permanece peligrosamente.

El problema más severo, se presenta cuando ocurre una falla a tierra del tipo intermitente, en un sistema flotado. Se genera el fenómeno de corrimiento del neutro. En estas condiciones, se genera una serie de sobretensiones en el neutro y en las tres fases del sistema. A este fenómeno, se le denomina escalación de tensiones por fallas intermitentes en sistemas flotados.

Las sobretensiones de  $1.73V_n$  y la escalación de tensiones, en los sistemas flotados, terminan generando más fallas a tierra, también conocidas como fallas en cascada,

---

fallas consecutivas, fallas múltiples a tierra o fallas simultáneas [2]. Esto significa que una falla monofásica termina convirtiéndose en una falla bifásica o trifásica, ocasionando la salida de servicio de todo el sistema eléctrico de potencia, causando problemas técnicos y económicos severos.

En los sistemas de baja tensión, con el neutro flotado, una falla a tierra franca, difícilmente puede generar el fenómeno de fallas consecutivas. Por ejemplo, en un sistema de 480 V de tensión de línea y de 277 V de tensión de fase, con el neutro flotado, cuando se presenta una falla de fase franca, sus componentes pueden soportar el incremento de la tensión de  $1.73V_n$  (480 V de fase). Esto se debe a que el nivel de aislamiento de los componentes es de 600 o 1000 V [38]. Por otro lado, las fallas intermitentes son poco probables, en los sistemas de baja tensión, porque no hay altos gradientes eléctricos que ionicen el aire adyacente y produzcan arcos eléctricos intermitentes. En consecuencia, los sistemas de baja tensión con el neutro flotado, son utilizados para alimentar cargas críticas, en donde el sistema puede continuar en servicio con una falla a tierra [8]. Esto permite que el operador pueda programar una salida de servicio controlada, para corregir el problema.

En los sistemas de media tensión, con el neutro flotado, una falla a tierra franca, sí puede generar el fenómeno de fallas consecutivas. Por ejemplo, en un sistema de 13.8 kV de tensión de línea y de 8 kV de fase, con el neutro flotado, cuando se presenta una falla de fase, algunos componentes como apartarrayos y bancos de capacitores no pueden soportar el incremento de la tensión de  $1.73 V_n$  (13.8 V de

---

fase), porque su tensión nominal es del orden de 10 o 12 kV, con respecto a tierra. Por otro lado, los gradientes eléctricos en media tensión, sí pueden ionizar el aire adyacente, ocasionando fallas a tierra intermitentes.

En la práctica, difícilmente se diseña un sistema de media tensión con el neutro flotado. Sin embargo, en los sistemas con múltiples fuentes de potencia, en donde se conecta a tierra solamente el neutro de una fuente de potencia y el resto de ellos permanecen eléctricamente flotados, pueden presentarse escenarios de operación, en donde el equipo con el neutro conectado a tierra sale de servicio súbitamente, dejando al sistema flotado y con una falla a tierra [28].

Anteriormente, las fallas simultáneas por sobretensiones de fase de  $1.73V_n$  y por escalación de tensiones, eran incomprensibles para los usuarios, porque no se podían entender los niveles de tensión alcanzados. Actualmente, con la instalación de transformadores de potencial conectados de fase y con el uso de relevadores digitales, con registrador de eventos, se han podido registrar las formas de onda de las sobre tensiones. Por lo tanto, el análisis del fenómeno de escalación de tensiones, es muy importante desde el punto de vista de diseño, operación y mantenimiento de los sistemas eléctricos de potencia.

De acuerdo con todo lo anterior, en este trabajo de tesis, se conjuntan las evidencias obtenidas en sitio, con los resultados obtenidos con herramientas de modelado, para analizar el fenómeno de escalación de tensiones, ocasionado por fallas a tierra intermitentes, en sistemas flotados.

---

### **1.1. Objetivos de la tesis**

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo:

1. Analizar el comportamiento del fenómeno de escalación de tensiones, ocasionado por fallas intermitentes en sistemas de media tensión, con el neutro eléctricamente flotado, mediante la simulación digital, con el software ATP/EMTP de sistemas eléctricos industriales.

### **1.2. Justificación**

El análisis del fenómeno de escalación de tensiones por fallas intermitentes en sistemas eléctricamente flotados, surgió por la necesidad de los ingenieros de operación y mantenimiento de contar con una explicación consistente de lo ocurrido durante algunos eventos catastróficos, que se han presentado durante la operación de plantas industriales [2].

Es necesario contar con evidencias, que permitan comprender la causa-raíz del fenómeno y conocer el por qué no fue liberado por los equipos típicos de protección de sobrecorriente y de sobretensión.

### **1.3. Alcance de la tesis**

Los alcances de la tesis son los siguientes:

2. Revisar los aspectos teóricos del fenómeno de escalación de tensiones, en un sistema de media tensión, con su neutro eléctricamente flotado.

3. Discutir el problema de neutros flotados en sistemas con múltiples fuentes de potencia
4. Analizar las evidencias de fallas ocasionadas por escalación de tensiones, en sistemas de potencia industriales
5. Desarrollar los modelos de un sistema eléctrico de potencia con el neutro flotado, utilizando el programa ATP/EMTP.
6. Desarrollar el modelo de una falla a tierra intermitente.
7. Con los modelos desarrollados, analizar el fenómeno de escalación de tensiones, en sistemas industriales con el neutro flotado

#### **1.4. Aportaciones de la tesis**

Las aportaciones de la tesis son las siguientes:

1. Se conjuntaron los aspectos teóricos del fenómeno de escalación de tensiones con algunas evidencias de fallas ocurridas en sistemas industriales por este fenómeno.
2. Se desarrolló el modelo de un arco eléctrico intermitente, con el software ATP/EMTP, para simular una falla a tierra intermitente y comprender el fenómeno de escalación de tensiones, en sistemas eléctricos industriales con el neutro flotado.

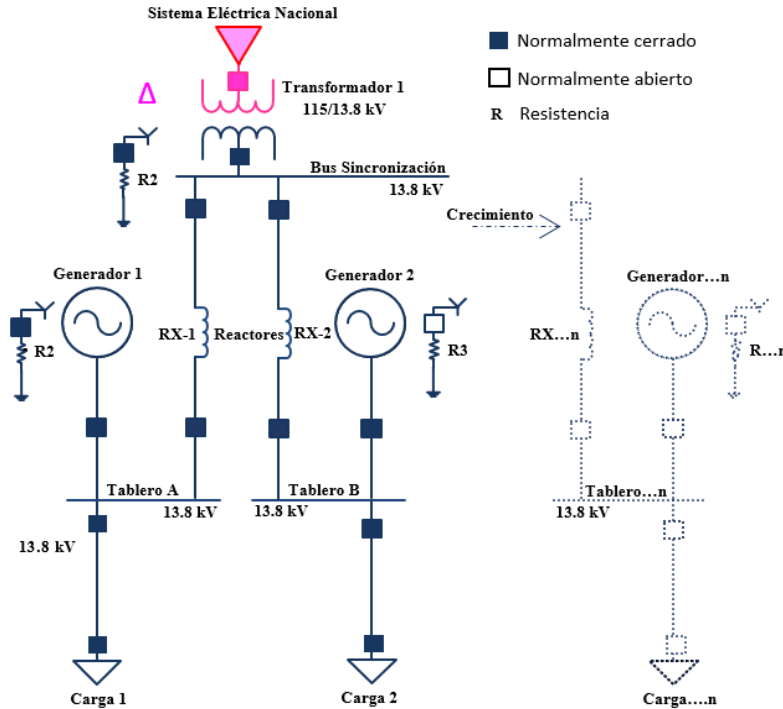


3. Se presentan los resultados de simulaciones, con los cuales se puede comprender el incremento de tensión de  $1.73V_n$  en las fases no falladas, durante una falla a tierra franca y el fenómeno de escalación de tensiones, en sistemas eléctricos industriales con el neutro flotado. Esta aportación puede ser una referencia importante para ingenieros que enfrentan problemas de diseño, operación y mantenimiento de sistemas eléctricos de potencia.
  
4. Para evitar el fenómeno de escalación de tensiones, en sistemas de media tensión con múltiples fuentes de potencia, se propone eliminar el bus de neutros e implantar un esquema de conexión a tierra del neutro, que garantice que el neutro, de todas las fuentes de potencia, permanecerá conectado a tierra, en todos los escenarios de operación.

## 1.5. Antecedentes

El suministro de energía eléctrica es un factor crítico para los centros Industriales, cuyos procesos productivos, requieren un suministro continuo de energía eléctrica, como en las plantas petroquímicas, en las fábricas de papel y en la industria acerera, entre otros. Estos centros industriales cuentan con generación propia de energía eléctrica y con Acometidas de respaldo, procedentes de la red eléctrica pública. En la **Fig. 1.1.** se muestra el sistema eléctrico de potencia de un centro industrial típico, que requiere un suministro continuo de energía eléctrica. Se tiene un bus de sincronización con reactores, que limitan la corriente de corto circuito de los generadores y de la Acometida. Cuando uno de los generadores, sale de operación, el resto de las fuentes de potencia, mantienen el suministro de energía hacia las plantas de proceso [25, 26].

En los sistemas que tienen múltiples fuentes de potencia, conectados a un mismo nivel de tensión, como el de la **Fig. 1.1.**, se complica la conexión a tierra de los neutros. En el caso de la **Fig. 1.1.**, si todos los neutros del sistema se conectan a tierra, la corriente de falla a tierra, retorna al sistema a través de todos los neutros, incrementando su magnitud considerablemente. Por otro lado, esto complica la coordinación de las protecciones de sobre corriente.



**Fig. 1.1.** Sistema de potencia de un centro Industrial con fuentes múltiples de potencia, para el suministro continuo de energía eléctrica.

Una práctica común, utilizada en los sistemas con múltiples fuentes de potencia, consiste en conectar a tierra solamente el neutro de uno de los generadores, así como el neutro de uno de los transformadores de enlace con la red pública, mientras que el resto de los neutros permanecen “eléctricamente flotados”. En este tipo de sistemas, se han presentado escenarios de operación, donde los dos neutros conectados quedan fuera de servicio y el sistema se queda eléctricamente flotado. Esto trae como consecuencia que, en caso de una falla a tierra, se presenten sobretensiones peligrosas [12, 13, 14, 30].

Cuando ocurre una falla a tierra en un sistema eléctrico que no cuenta con una conexión intencional del neutro a tierra, la corriente de falla, retorna al sistema mediante un acoplamiento capacitivo [12, 33, 34]. Como consecuencia, existe un corrimiento del neutro dependiendo del tipo de falla existente. Si la falla es del tipo intermitente se presenta una escalación de tensión, cada vez que se extingue el arco de falla.

En México, se han presentado diversas fallas en complejos industriales, que han sacado de servicio a todo un sistema eléctrico de potencia. Al revisar el sistema después del evento, se han encontrado evidencias de arcos eléctricos, en tableros de 13.8 kV, entre el conductor principal y el gabinete del tablero, conectado al potencial de tierra. En la literatura especializada, también se han publicado experiencias, relacionadas con arcos eléctricos por sobre tensiones, considerables. Estas fallas, se han presentado en ausencia de tormentas, por lo que no pueden ser atribuidas a sobre tensiones por rayo. También se han presentado, sin que se realice la apertura o cierre de interruptores, por lo que no pueden ser atribuidas a sobre tensiones ocasionadas por maniobras.

Las sobre tensiones, ocasionadas por la escalación de tensiones, es el tema de estudio de esta tesis. [15, 18]. Utilizando el modelado con el software ATP/EMTP, se analiza la salida de servicio de un centro Industrial típico de Mexico, ocasionada por fallas múltiples, generadas por sobretensiones, causadas por una falla a tierra intermitente.

## 1.6. Estructura de la tesis

Esta tesis se encuentra estructurada en cinco Capítulos y en tres Apéndices.

El Capítulo 1 es la presente introducción.

En el Capítulo 2, se revisan los aspectos teóricos del fenómeno de escalación de tensiones. Se revisan las causas que generan este fenómeno, siendo los principales factores, la ocurrencia de una falla a tierra intermitente en un sistema, con su neutro eléctricamente flotado. Se analiza el proceso de escalación de tensiones por la combinación de dos factores; la carga de la capacitancia parásita a tierra por la corriente de falla y el corrimiento del neutro. Se muestran las magnitudes de sobretensión alcanzadas por el neutro y por las tres fases del sistema. Posteriormente, se discute el problema de neutros flotados en un sistema con múltiples fuentes de potencia. Finalmente, se presentan evidencias de fallas simultáneas, ocasionadas por sobre tensiones, por escalación de tensiones, en sistemas de potencia mexicanos y en sistemas reportados en la literatura especializada.

Para poder analizar el fenómeno de escalación de tensiones, fue necesario desarrollar el modelo de un sistema eléctrico de potencia, con su neutro flotado y con una falla a tierra intermitente. El modelo se desarrolló utilizando los modelos de componentes eléctricos contenidos en la librería del software ATP/EMTP. Es importante señalar que esta librería no cuenta con un modelo para simular una falla a tierra intermitente. Por lo tanto, este modelo fue desarrollado por el autor. La descripción de estos modelos, se presenta en el Capítulo 3 y en el Apéndice A. En los Apéndices B y C, se presenta un

---

breve instructivo para el uso del software ATP/EMTP y para la entrada de datos respectivamente.

En el Capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos con la simulación digital. Se simularon seis escenarios, con los cuales se analizaron las sobre tensiones ocasionadas por una falla a tierra franca y por una falla a tierra intermitente en sistemas con su neutro conectado a tierra y con su neutro flotado.

Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas y las recomendaciones para trabajos futuros.

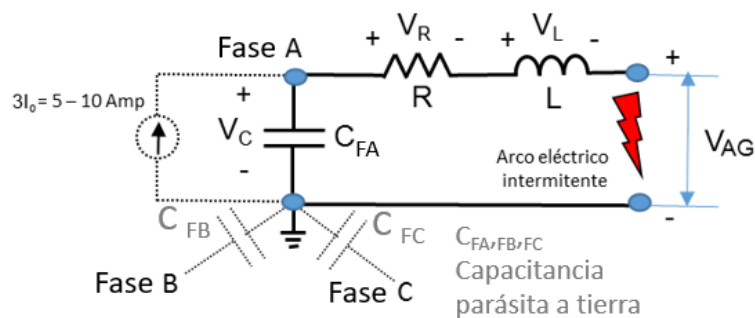
## 2. CAPÍTULO 2

### *ASPECTOS TEÓRICOS DEL FENÓMENO DE ESCALACION DE TENSIONES Y EVIDENCIAS DE FALLAS A TIERRA INTERMITENTES*

En este capítulo, se revisan los aspectos teóricos del fenómeno de escalación de tensiones, sus causas, el corrimiento del neutro, la secuencia de la escalación de las tensiones y las magnitudes alcanzadas. También se discute el problema de sistemas con múltiples fuentes de potencia, que se quedan flotados, alimentando una falla a tierra. Finalmente, se presentan evidencias de fallas en sistemas industriales, ocasionadas por el fenómeno de escalación de tensiones.

#### 2.1. Fenómeno de escalación de tensiones

En la **Fig. 2.1** se muestra el circuito equivalente de una falla a tierra intermitente, en un sistema flotado. A pesar de que el neutro no está conectado a tierra, se tiene un acoplamiento de las tres fases, con respecto al potencial de tierra, a través de sus capacitancias parásitas ( $C_{FA}$ ,  $C_{FB}$  y  $C_{FC}$ ).



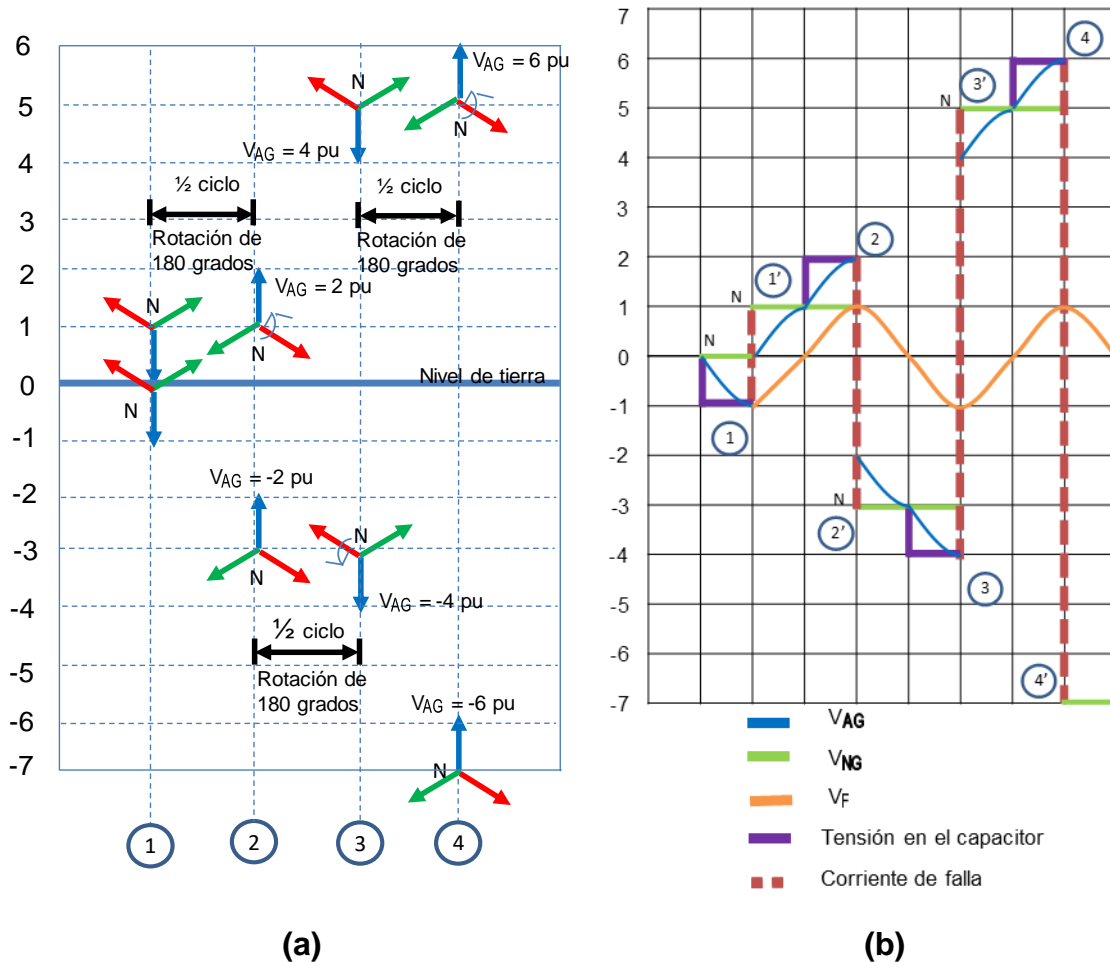
**Fig. 2.1.** Circuito equivalente de una falla intermitente.

La falla inicia cuando la rigidez dieléctrica del aire, entre los electrodos (+) y (-), disminuye por alguna razón. En estas condiciones, se presenta un arco eléctrico hacia el electrodo de tierra, formando un circuito cerrado entre el borne (+), el plasma del arco, el electrodo (-), la reactancia de la capacitancia parásita  $C_{PA}$  y la resistencia e inductancia de la Fase A. En el circuito cerrado, circulará una corriente de falla mínima, limitada principalmente por la reactancia de la capacitancia parásita y por la impedancia del arco. Esto muestra, que aunque no existe una conexión entre el neutro y tierra, la corriente de falla retorna al sistema, por acoplamiento capacitivo, a través de la capacitancia parásita.

Cuando la corriente de falla, pasa por su cruce por cero, el aire recupera su condición dieléctrica y el arco se auto-extingue. Sin embargo, la capacitancia parásita  $C_{PA}$ , queda cargada y los electrodos vuelven a quedar sometidos a una diferencia de potencial. En el momento en que la rigidez dieléctrica del aire vuelva a disminuir, se vuelve a presentar un arco eléctrico, repitiendo todo el proceso. Como la corriente de falla es mínima y su forma de onda no es sinusoidal, las protecciones de sobre corriente (51N) no pueden detectar dicha falla. En consecuencia, la falla a tierra intermitente, continuará presentando arcos eléctricos.

En la **Fig. 2.2 a**, se muestra el diagrama fasorial del neutro y de las Fases A, B y C, de un sistema flotado y en la **Fig. 2.2 b**, se muestra el seguimiento del proceso de carga y descarga de la capacitancia parásita, con la corriente y la tensión del sistema, durante una falla intermitente.





**Fig. 2.2.** Escalación de tensiones ocasionada por una falla a tierra intermitente, en un sistema trifásico, eléctricamente flotado.

En la Condición 1, de la **Fig. 2.2.a**, la Fase A tiene la tensión de fase del sistema  $V_F = -1$  pu. Si en esos momentos, en algún punto del sistema, el aire disminuye su rigidez dieléctrica, ocurre un arco eléctrico, tal como sucede en el circuito equivalente de la **Fig. 2.1**. En estas condiciones, la Fase A, adquiere el potencial de tierra, la corriente de falla es máxima y carga a la capacitancia parásita del neutro con respecto a tierra, con su máxima carga. En estas condiciones, el neutro adquiere un potencial con respecto a

tierra  $V_{NG} = 1 V_{LN}$ , tal como se muestra en la Condición 1', de la **Fig. 2.2 b**. A este fenómeno, se le denomina "corrimiento del neutro". En la **Fig. 2.2 a**, también se observa la rotación del diagrama fasorial y el corrimiento del neutro.

Siguiendo la forma de onda de la tensión del sistema, en la Condición 2 de la **Fig. 2.2 b**, después de 90 grados, la corriente de falla es cero, el aire recupera sus condiciones dieléctricas y la forma de onda de la tensión del sistema, vuelve a adquirir un valor máximo de 1 p.u.. Sumando la diferencia de potencial de 1 p.u. en la Fase A y la diferencia de potencial de 1 p.u. en el neutro, da como resultado un valor de 2 p.u. en la Fase A. Esto equivale a una rotación de 180 grados en la Condición 2, del diagrama fasorial de la **Figura 2.2 a**.

Como la diferencia de potencial de 2 p.u. en la Fase A, supera la rigidez dieléctrica del aire, en el punto donde está ocurriendo la falla intermitente, vuelve a ocurrir un arco eléctrico (Condición 2', de la **Figura 2.2 b**). Esto implica, que la corriente de falla adquiera nuevamente un valor máximo de -1 p.u., cargando la capacitancia parásita del neutro, ahora con un valor de -3 p.u. con respecto a tierra.

Después de 90 grados, la corriente de falla es cero, el aire vuelve a recuperar sus condiciones dieléctricas y la forma de onda de la tensión del sistema, adquiere un valor máximo de -1 p.u.. Sumando la diferencia de potencial de -1 p.u. en la Fase A y la diferencia de potencial de -3 p.u. en el neutro, da como resultado un valor de -4 p.u. en la Fase A (Condición 3 de la **Figura 2.2 b**.). Esto equivale a una rotación de 180 grados en la Condición 3, del diagrama fasorial de la **Figura 2.2 a**.

---

El proceso anterior se repite, de tal manera que en la Condición 4, de las **Figuras 2.2 a. y 2.2 b.**, la Fase A adquiere una diferencia de potencial de 6 p.u., las Fases B y C adquieren una diferencia de potencial del orden de 4.5 p.u. y el neutro adquiere una diferencia de potencial de 5 p.u.

Normalmente, el sistema aislante de los equipos instalados en un sistema de 13.8 kV de tensión de línea, pueden soportar una sobretensión de prueba de 2 veces su tensión de línea más 1 kV (27.6 kV), con respecto a tierra [38]. Esto equivale a una sobretensión de 3.5 p.u., de fase. En consecuencia, una escalación de tensiones de 6, 5 y 4.5 p.u., en la fase con una falla a tierra intermitente, en las fases no falladas y en el neutro respectivamente, ocasionará una falla franca en algún equipo del sistema.

Las formas de onda de las sobretensiones, generadas por escalación de tensiones, tendrán oscilaciones, por las capacitancias y las inductancias del sistema. Estas formas de onda, aparecerán sobrepuestas a la forma de onda de la tensión de fase del sistema.

## **2.2. Sistemas con múltiples fuentes de potencia que se quedan flotados alimentado una falla a tierra**

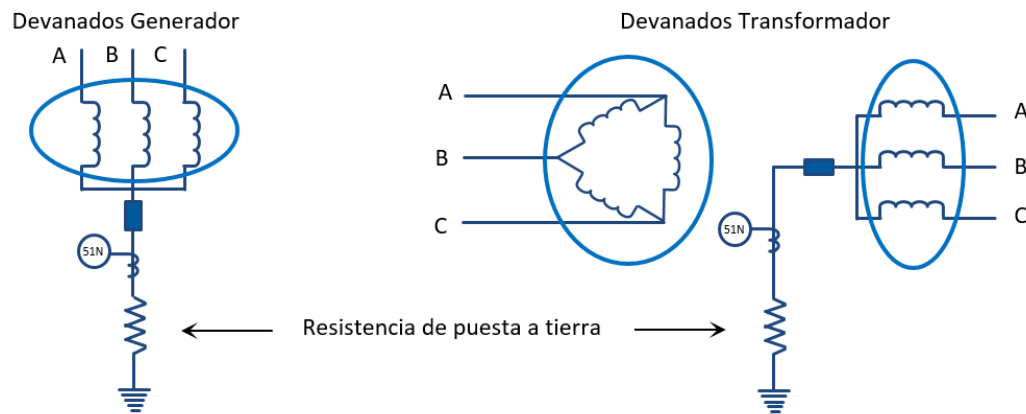
La puesta a tierra del neutro de un sistema eléctrico, es la acción de conectar a tierra, intencionalmente el neutro de un generador o de un transformador [38-48]. Las normas indican que el neutro se puede conectar a tierra en forma directa, a través de una impedancia o se puede dejar eléctricamente flotado [39].

En la práctica, en un sistema industrial de 13.8 kV, con generación propia y con conexión a la red pública, el neutro se conecta a tierra con “baja resistencia”, tal como se muestra en la **Fig. 2.3**. Esta conexión tiene cuatro objetivos:

- El primer objetivo, es permitir un camino de retorno al sistema, para la corriente de falla a tierra.
- El segundo objetivo, es limitar la magnitud de la corriente de falla a tierra, de tal manera que no ocasione daños severos en el sitio de falla.
- El tercer objetivo es permitir que la corriente de falla tenga un valor suficiente para ser detectada por la protección de sobre corriente contra fallas de fase (51N).
- Finalmente, el cuarto objetivo, es eliminar, lo más pronto posible, la sobre tensión, en las fases no falladas.

La corriente de falla a tierra, es detectada mediante un un transformador de corriente (TC), instalado en el neutro, tal como se muestra en la **Fig. 2.2**.

Generalmente, se utiliza una resistencia de puesta a tierra, en el intervalo de 9 a 20  $\Omega$ . Estos valores limitan la corriente de falla a tierra a niveles de 200 a 800 A [48]. La resistencia se ve sometida a la corriente de falla, por lo que se especifica que esta resistencia debe soportar la corriente de falla durante un tiempo de 10 o 30 s.

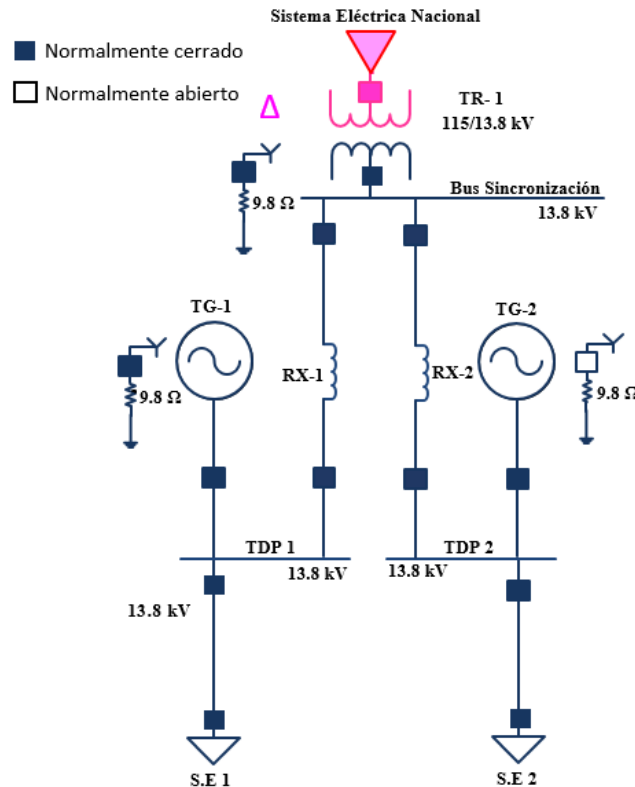


**Fig. 2.3.** Conexión del neutro a tierra con “baja resistencia” en generadores y transformadores en un centro Industrial típico de media tensión, con generación propia.

Existen complejos industriales, como las plantas petroquímicas, las fábricas de papel o los complejos aceros, en donde los procesos de producción demandan un suministro continuo de energía eléctrica. Si alguno de estos procesos se queda sin energía eléctrica, en cuestión de minutos, se pueden bloquear ductos con producto, que pueden ocasionar períodos largos sin producción. En consecuencia, este tipo de industrias requieren de fuentes múltiples de potencia.

En la **Fig. 2.4**, se muestra el esquema eléctrico de un complejo industrial con suministro continuo de energía eléctrica, en donde la energía se genera, se distribuye y se consume prácticamente al mismo nivel de tensión (13.8 kV, en este caso). Se tienen tres fuentes de potencia; dos generadores y un transformador, el cual suministra la potencia procedente de la red pública. Este esquema, garantiza el suministro continuo de energía eléctrica. Es decir, en caso de que uno de los generadores salga de

operación por falla o mantenimiento, el transformador y el segundo generador, pueden suministrar el 100% de la energía requerida por la carga.

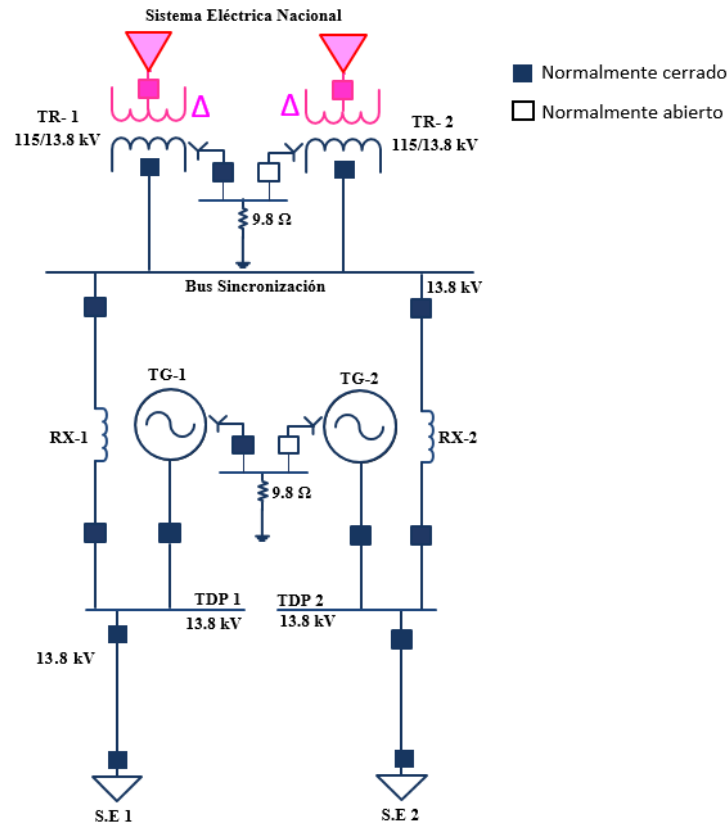


**Fig. 2.4.** Esquema típico de un centro Industrial con múltiples fuentes de potencia.

Un problema importante en los sistemas con múltiples fuentes de potencia, consiste en que no es posible conectar a tierra todos los neutros del sistema. Si en el esquema de la **Fig. 2.4**, se conectan a tierra los neutros de las tres fuentes de potencia, la corriente de falla a tierra, regresará por los tres neutros y se sumará, dando un total del orden de 2400 A (800 A por cada neutro). Este valor de corriente, puede ocasionar daños severos en el sitio de falla y puede superar la capacidad de algún interruptor del

sistema. Por otro lado, se complica el ajuste y la coordinación de las protecciones de sobre corriente.

Para evitar el problema mencionado, una práctica común es la conexión a tierra de uno o dos de los neutros del sistema, dejando el resto de ellos flotados. Para ello se utilizan tableros denominados “bus de neutros”, tal como se muestra en la **Fig. 2.5**. En esta figura se observa, que se conectan a tierra los neutros del TR-1 y del TG-1, mientras que los neutros del TR-2 y del TG-2, se quedan flotados.



**Fig. 2.5.** Conexión a tierra del neutro mediante bus de neutros en sistemas de media tensión con múltiples fuentes de potencia.

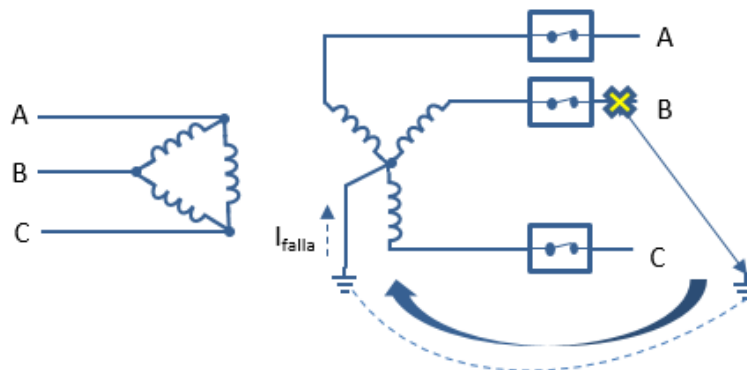
Para la conexión del neutro de los generadores se utiliza un cable de energía clase 15 kV. Este cable de energía tiene una capacitancia parásita asociada del orden de 1 nF/m. La distancia entre el neutro de los generadores y el bus de neutros es del orden de 50 m a 1 km. Considerando esta distancia, la capacitancia concentrada asociada al cable fluctúa entre 0.05 – 1.0 μF.

La desventaja de conectar uno o dos neutros a tierra solamente, se presenta cuando en algunos escenarios de operación, las fuentes de potencia con el neutro conectado a

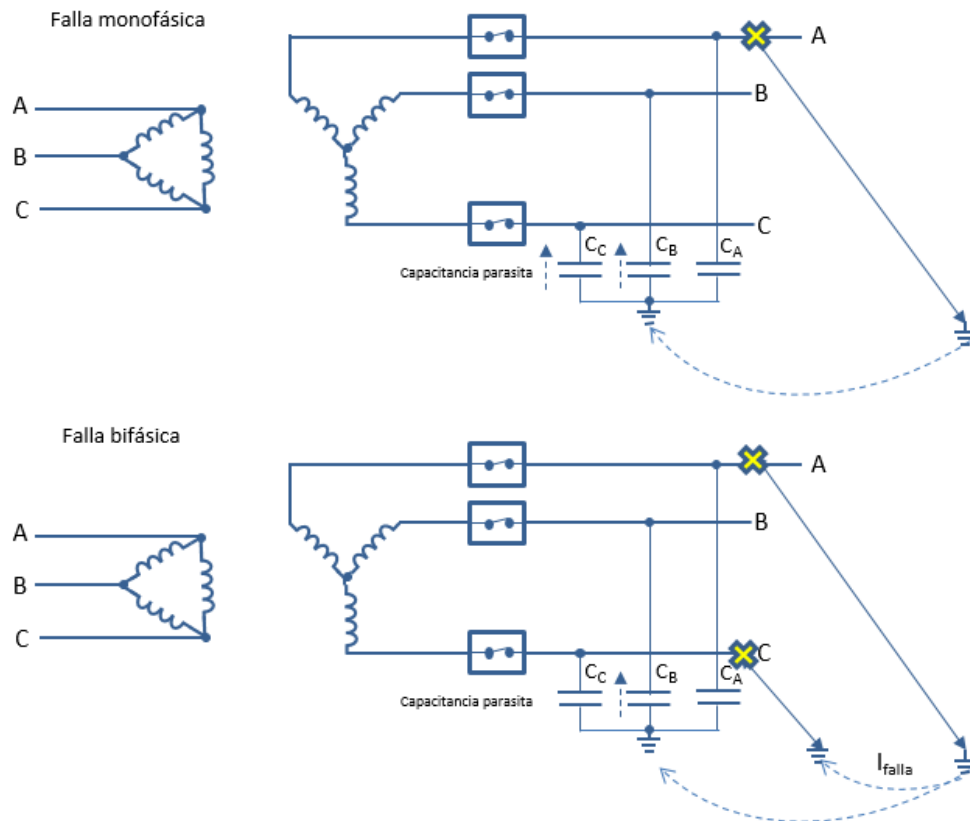


tierra, salen de servicio súbitamente. En estas condiciones, el sistema se puede quedar eléctricamente flotado y alimentando una falla a tierra.

En la **Fig. 2.6** se muestra el esquema equivalente de un sistema con el neutro sin conexión a tierra o eléctricamente flotado. Cuando se presenta una falla a tierra, ésta corriente no cuenta con un neutro conectado a tierra, para poder retornar al sistema. En consecuencia, la corriente de falla retorna al sistema, por acoplamiento con las capacitancias parásitas de fase, ver la **Fig. 2.7**. En este caso, la corriente de retorno tiene un valor bajo, porque es limitada por la reactancia capacitiva. Es del orden de unos cuantos amperes. Las protecciones de sobre corriente, no pueden detectar estos niveles de corriente, por lo que la falla a tierra no puede ser detectada ni liberada.



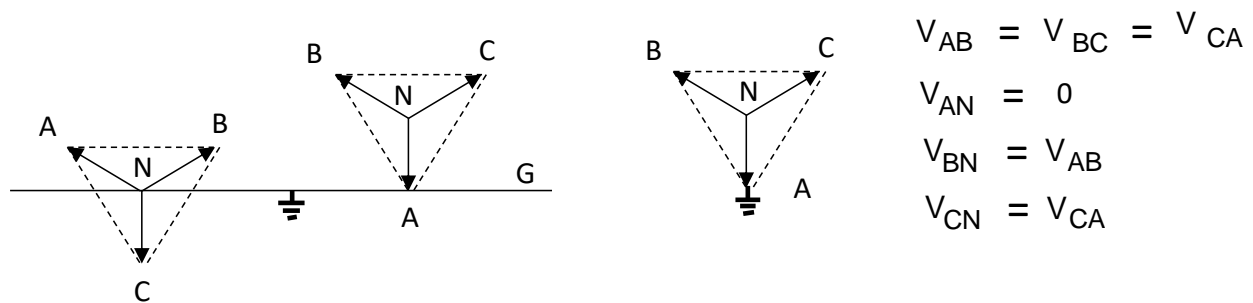
**Fig. 2.6.** Falla a tierra en sistemas con el neutro conectado sólidamente a tierra.



**Fig. 2.7.** Falla a tierra en sistemas con el neutro sin conexión a tierra (Configuración delta-estrella).

En la **Fig. 2.8**, se muestra un sistema trifásico, conectado en estrella con el neutro eléctricamente flotado, con su sistema equivalente conectado en delta. En condiciones normales de operación, las tensiones entre líneas son  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  y  $V_{AC}$ , mientras que las tensiones de fase a neutro son  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$  y  $V_{CN}$ . Finalmente, la tensión en el neutro flotado, en un sistema balanceado es de cero volts. Cuando se presenta una falla a tierra, por ejemplo, en la Fase A, de la **Fig. 2.8**, se observa que las tensiones entre líneas siguen siendo las mismas, que antes de la falla:  $V_{AB}$  es igual a  $V_{BC}$  e

igual a  $V_{AC}$ . En cambio, la falla genera un desbalance en las tres fases, ocasionando una tensión en el neutro, correspondiente a la tensión de línea a tierra del sistema (VLN). Este fenómeno se denomina corrimiento del neutro (anota referencia %%%%). En la **Fig. 2.8**, también se observa que, cuando se presenta una falla a tierra en la Fase A, la tensión de fase, en esta fase, es de 0 V. Sin embargo, la tensión de fase, en las fases no falladas, es igual a la tensión entre líneas del sistema:  $V_{BN}$  es igual a  $V_{BC}$  y  $V_{CN}$  es igual a  $V_{CA}$ . Esto indica que la tensión, con respecto a tierra, en las fases no falladas, se incrementa 1.73 veces.



**Fig. 2.8.** Corrimiento del neutro e incremento de tensión en las fases no falladas, en un sistema trifásico, con su neutro eléctricamente flotado, con una falla a tierra. Adaptada de Aparaschivei et al, 2016 [2].

### 2.3. Evidencias del fenómeno de escalación de tensiones en complejos industriales

En México, se han reportado diversas evidencias, que muestran que la ocurrencia de fallas simultáneas por escalación de tensiones, en complejos industriales [5, 18, 19]. Por otro lado, en la literatura especializada, también se han publicado fallas

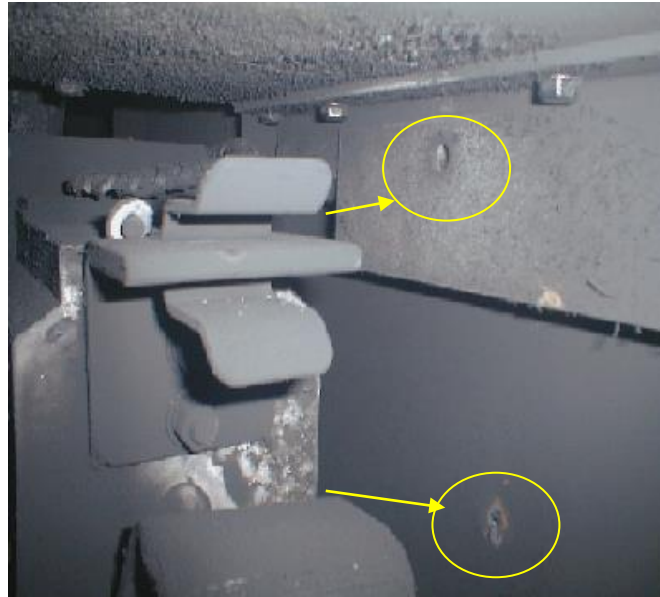
simultáneas por escalación de tensiones, en otros lugares del mundo [2, 3, 10, 11]. A continuación, se revisan dos casos importantes.

### **2.3.1. Caso 1. Evidencias de arcos eléctricos en dos tableros de 13.8 kV por sobre tensiones ocasionadas por escalación de tensiones**

Se presentaron dos casos de falla, en dos complejos mexicanos, que operaban con dos fuentes de potencia (un generador local y una Acometida). Los complejos tenían un bus de neutros, en donde se conectaba a tierra solamente el neutro del generador. Las fallas ocasionaron, que los sistemas salieran totalmente de servicio.

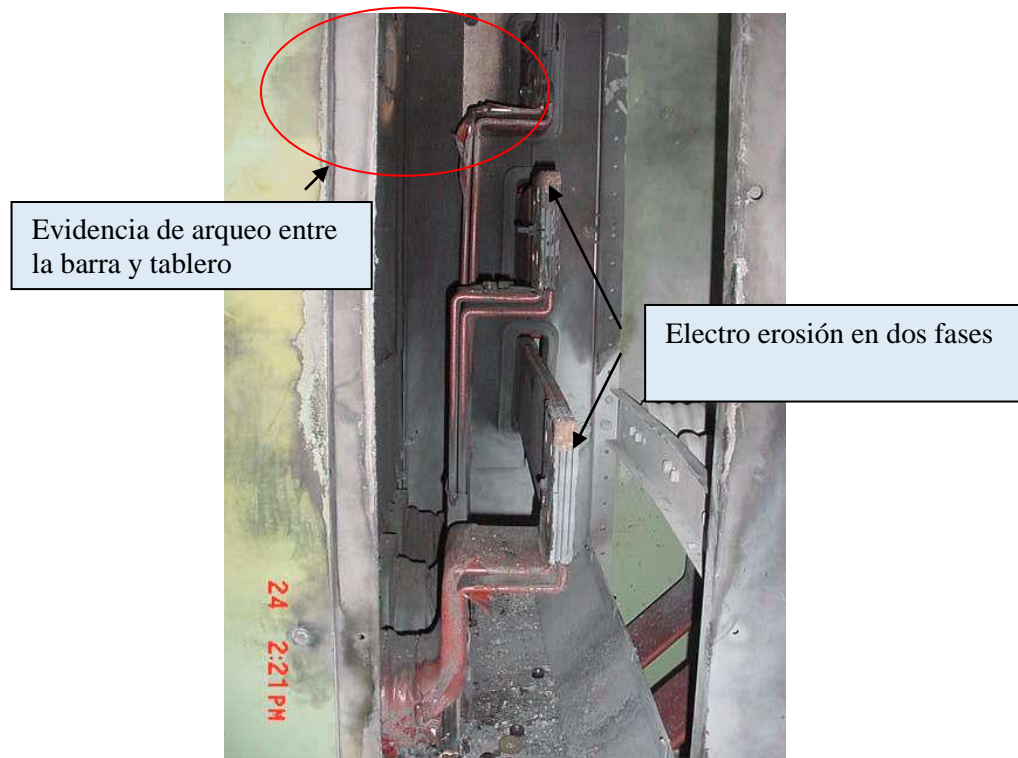
Después de los eventos, en ambos casos, se encontró accionada la protección diferencial del generador y la protección contra falla trifásica, en el interruptor de la Acometida. Sin embargo, no se encontraron fallas a tierra francas en los generadores, ni evidencias de una falla trifásica franca en los componentes del sistema. Solamente se encontraron evidencias de arcos eléctricos de fase a tierra y entre fases, en tableros de 13.8 kV, del tipo metal-clad, aislados en aire.

En la **Fig. 2.9**, se muestran las evidencias de los arcos eléctricos encontrados, en el primer sistema reportado. La figura muestra evidencias de picaduras en el gabinete de un tablero de 13.8 kV, Clase 15 kV, aislado en aire. Estas picaduras, son evidencias irrefutables, de arcos eléctricos entre las barras y el gabinete, conectado a tierra.



**Fig. 2.9.** Evidencias de arcos eléctricos de fase en un tablero de 13.8 kV, Clase 15 kV.

En la **Fig. 2.10**, se muestran las evidencias encontradas en el segundo sistema reportado. Se observa erosión en las barras de cobre de un tablero de 13.8 kV, Clase 15 kV. Estas erosiones, son evidencias irrefutables, de arcos eléctricos entre las barras y el gabinete, conectado a tierra, así como de arcos eléctricos entre fases.



**Fig. 2.10.** Evidencias de arcos eléctricos de fase a tierra y entre fases en un tablero de 13.8 kV, Clase 15 kV.

Obviamente, los arcos eléctricos son evidencias de sobre tensiones, con una magnitud considerable, suficiente para romper una distancia dieléctrica en aire de más de 15 cm.

En ambos casos, la magnitud de la corriente de falla, fue limitada por la impedancia del arco y por la reactancia de la capacitancia parásita entre los componentes. Por lo tanto, la magnitud de los daños no fue considerable.

También es importante señalar, que en ambos casos, se encontraron evidencias de “tracking” o trayectorias de falla sobre la superficie de un aislador de soporte de las barras de los tableros, ver la **Fig. 2.11**. La trayectoria de falla inicia sobre la manga roja del material termo-contráctil de la barra, pasa sobre la superficie del aislador de soporte

y llega finalmente al gabinete, conectado a tierra. Se consideró que el gradiente eléctrico, más la contaminación y la humedad, depositada en esta zona, estuvo generando arcos eléctricos intermitentes de la barra hacia el gabinete.



**Fig. 2.11.** Evidencia de falla a tierra intermitente, por tracking

Desafortunadamente, los relevadores de protección, no contaban con registro de eventos, por lo que las formas de onda de la tensión y de la corriente de falla, no fueron registradas. Esto implica, que los usuarios de los equipos, quedaron con la incertidumbre de la causa-raíz de falla. No se sabe si primero ocurrió una falla a tierra y después entre fases. Tampoco se sabe, si los sistemas se quedaron flotados, en un momento dado.

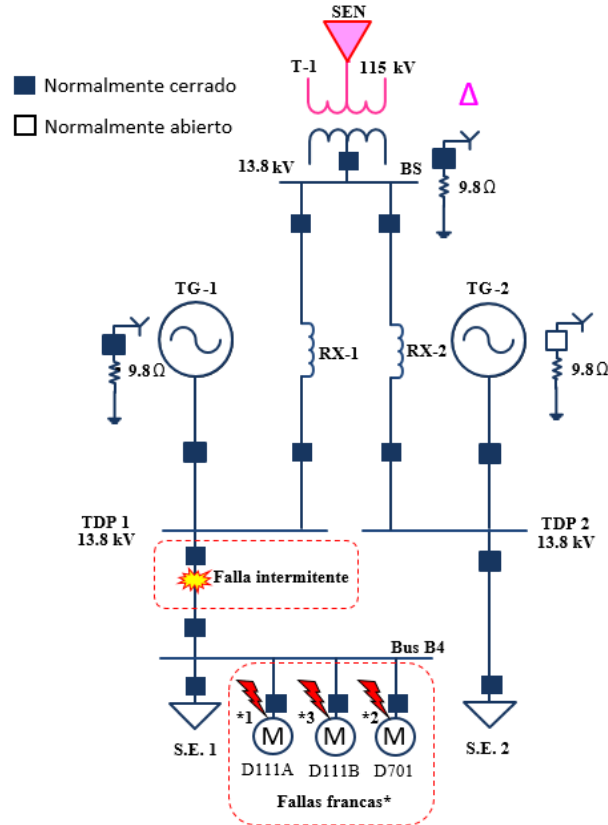
### **2.3.2. Caso 2. Fallas simultáneas por escalación de tensiones reportadas en la literatura especializada**

Aparaschivei et al, 2016 [2], reportaron la salida de servicio de un complejo industrial, por fallas simultáneas, ocasionadas por sobre tensiones. Este caso se consideró muy importante, porque muestra la forma de onda de las sobre tensiones registradas.

El esquema eléctrico del complejo, se muestra en la **Fig. 2.12**. El neutro del generador (TG-1) y el neutro del secundario del transformador de enlace se encontraban conectados a tierra. La red de distribución estaba formada por tableros y cables de potencia, con una tensión nominal de 13.8 kV. El centro tenía una carga distante compuesta por tres motores de inducción denominados D111A, D111B y D701.

Los autores reportan, que después de la salida de servicio del sistema, se encontraron 4 fallas, indicadas en el esquema de la Fig. 2.13. Una falla a tierra se localizó en un alimentador, que va de la subestación eléctrica SE-1 hacia el tablero TDP-1. También se encontraron evidencias de fallas a tierra, en los motores D111A, D111B y D701.



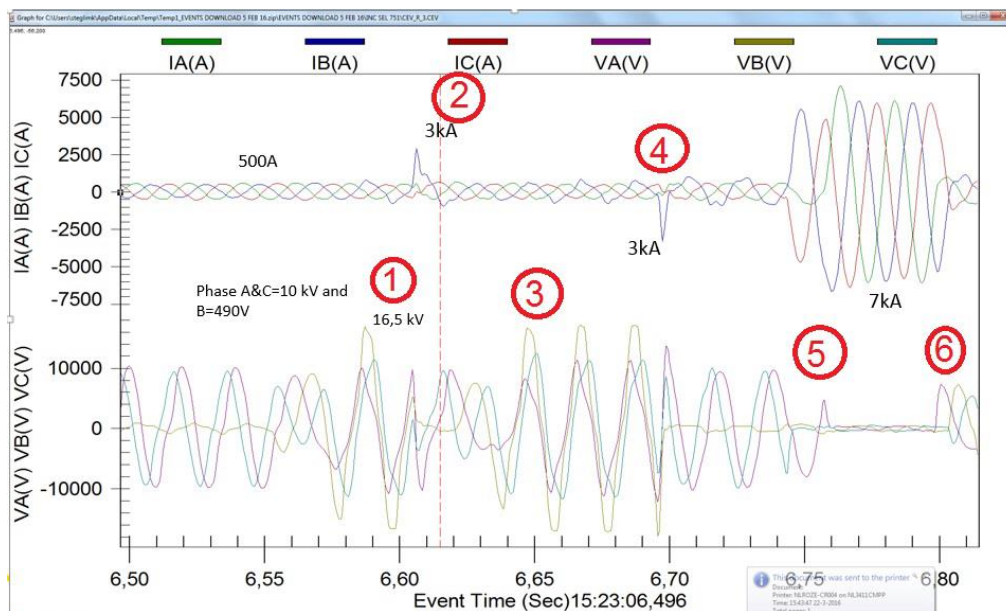


**Fig. 2.12** Sistema eléctrico de un centro Industrial con fallas simultáneas por sobretensiones. Adaptada de Aparaschivei et al, 2016 [2].

Los relevadores de los tres motores liberaron las fallas simultáneas y registraron las formas de onda que se presentaron durante el evento. En las **Figuras 2.13 y 2.14**, se muestra como ejemplo, los registros almacenados por el relevador del motor D111A.

En la **Fig. 2.14**, se observa que, el relevador del motor D111A, registró un valor de 0 kV, en la Fase B, indicando una falla a tierra. Sin embargo, el relevador no registró ningún valor de corriente de falla a tierra franca. Por otro lado, la tensión a tierra, en las no falladas (Fases A y C), se incrementó a 10.5 kV. Esto equivale a un incremento de 1.73 p.u. Posteriormente, a los 6.55 segundos, la tensión en la Fase B se recuperó y

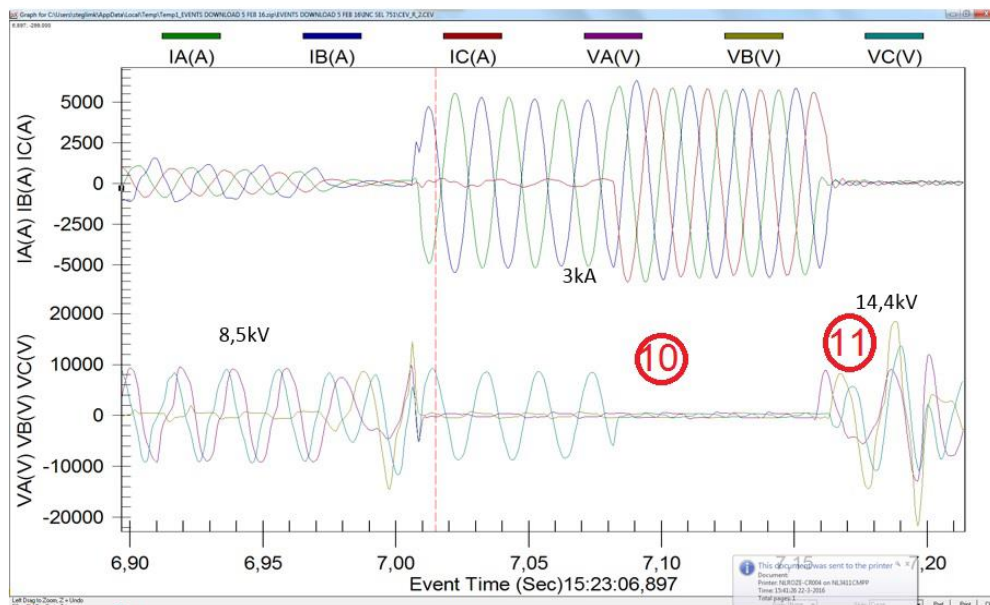
entre los 6.60 y los 6.70 segundos, el nivel de tensión de la Fase B, alcanzó un valor hasta de 16.5 kV (2.75 p.u.), ver el punto 1. Mas tarde, la tensión de la Fase B, se fue nuevamente a 0 kV y apareció un pico de sobre corriente a tierra de 3 kA, en la Fase B, en el punto 2. Este fenómeno se repitió en los puntos 3 y 4. En el punto 5, se observa que las tres fases presentaron una falla a tierra. Por lo tanto, la corriente de la falla trifásica a tierra, se incrementó a 7 kA. Sin embargo, en el punto 6, la tensión en las tres fases se volvió a recuperar.



**Fig. 2.13.** Sobretensiones registradas por el relevador del motor D111A (parte I).

El oscilograma, registrado por el relé del motor D111A (parte II), continúa en la **Fig. 2.14**. En esta figura, se observa que el fenómeno registrado en la parte I, se repitió. La Fase B se fue a tierra y la tensión a tierra, en las fases no falladas, se volvió a incrementar 1.73 p.u. A los 7.01 segundos, la falla a tierra en la Fase B evolucionó y se presentó una falla bifásica a tierra, en las Fases B y A. Finalmente, la falla siguió

evolucionando y a los 7.09 segundos, se presentó una falla trifásica a tierra. La corriente de falla trifásica alcanzó nuevamente un valor de 7 kA, pero ahora, el relé si alcanzó a disparar, sacando de servicio al motor D111A. Sin embargo, en el punto 11, se observa que la tensión en el tablero Bus B4, siguió presentando condiciones anormales de operación. Posteriormente, los oscilogramas registrados por los relevadores de los motores D701 y del motor D111B fueron similares a los registrados por el relé del motor D111A.



**Fig. 2.14.** Sobretensiones registradas por el relevador del motor D111A (parte II).

Una vez, que los relés sacaron de servicio a los tres motores, por 3 fallas trifásicas simultáneas o consecutivas, la tensión en el tablero Bus B4, siguió presentando condiciones anormales de operación. Finalmente, el relé del alimentador del Bus B4, liberó la falla trifásica simultánea número 4.

Lo más importante de este ejemplo, es el registro de las formas de onda de las sobre tensiones, que se presentaron en las tres fases. Los autores del artículo revisado, consideraron que en el alimentador del Bus B4, se presentó una falla a tierra intermitente y que esta fue el origen de las sobre tensiones y de las fallas simultáneas, que afectaron a los tres motores. En la **Fig. 2.15** se observan los daños encontrados en la caja de conexiones de los gabinetes de los tres motores. Se observan manchas de carbonización en las paredes del gabinete, ocasionadas por arcos eléctricos múltiples.

De acuerdo con lo reportado, las evidencias de los arcos eléctricos en el Caso 1 y en el Caso 2, se presentaron cuando no había tormenta, por lo que no fueron atribuidas a sobre tensiones por rayo. Tampoco se realizaron apertura y cierre de interruptores, por lo que no pudieron ser atribuidas a sobre tensiones de maniobra. En consecuencia, quedó la incertidumbre de la causa-raíz de las fallas.



**Fig. 2.15** Daños en la celda de alimentación del motor D701 causados por sobretensiones y fallas a tierra.

### 3. CAPÍTULO 3

#### ***MODELADO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA PARA EL ANÁLISIS DE ESCALACIÓN DE TENSIONES***

---

##### **3.1. Introducción**

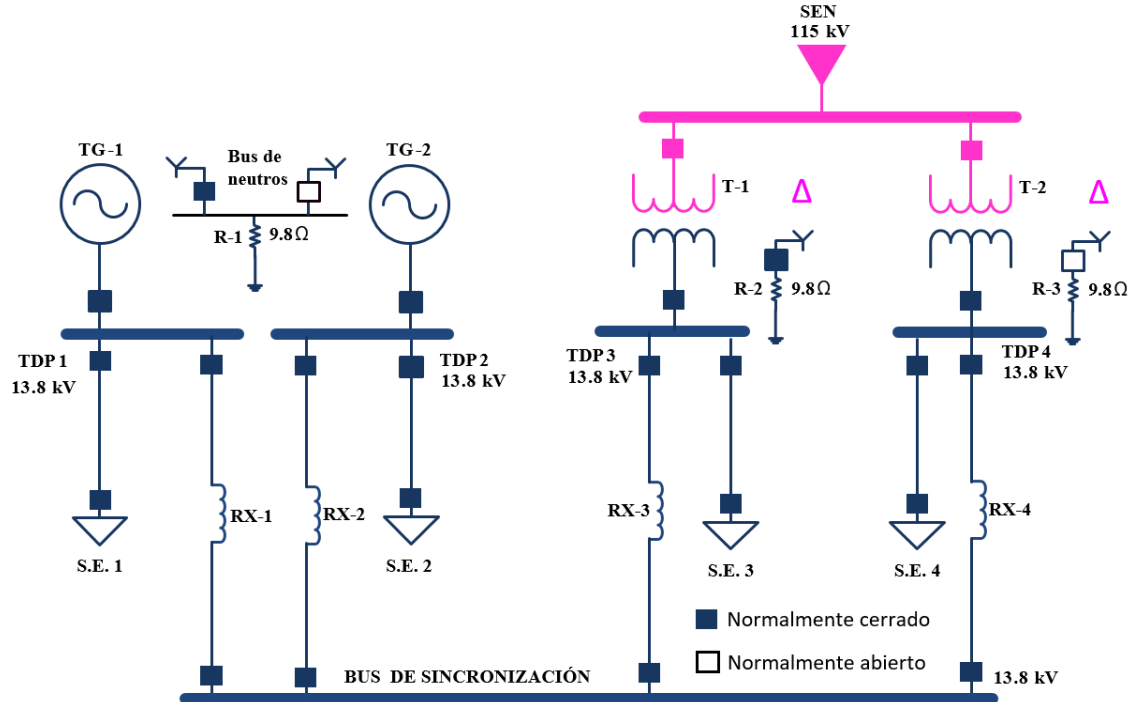
En esta sección, se presenta el modelo de un sistema eléctrico con fuentes múltiples de potencia, para analizar el fenómeno de escalación de tensiones.

Primero, se describe el esquema del sistema eléctrico de potencia. Se consideró un sistema de 13.8 kV, con cuatro fuentes de potencia, conectados a un bus de sincronización. El sistema también cuenta con dos buses de neutros.

En los Apéndices B y C se muestra como se introdujeron los parámetros eléctricos del sistema, en el modelo desarrollado.

##### **3.2. Descripción del sistema eléctrico de potencia**

En la **Fig. 3.1**, se muestra el esquema modelado para el análisis del fenómeno de escalación de tensiones. Es un sistema típico industrial, con fuentes múltiples de potencia.



**Fig. 3.1.** Diagrama unifilar para el desarrollo del modelo para el análisis del fenómeno de escalación de tensiones.

### Fuentes de energía

El centro Industrial cuenta con generación propia. Se tienen dos generadores síncronos (TG-1 y TG-2) con turbinas de gas, con una capacidad de 44 MVA y una tensión nominal de 13.8 kV cada uno. Adicionalmente, se una Acometida de respaldo, con dos transformadores de enlace de 44 MVA cada uno (T1 y T2). Normalmente, el sistema opera con los dos generadores y con uno de los transformadores de enlace. El segundo transformador de enlace, queda fuera de servicio, como relevo. Adicionalmente, se tienen tres bancos de capacitores, para el suministro de potencia reactiva.

### Conexión a tierra del neutro

El sistema cuenta con un bus de neutros para los generadores y otro para los transformadores de enlace. La conexión a tierra del neutro, se efectúa con baja resistencia ( $9.8 \Omega$ ). Normalmente, se conecta a tierra el neutro de uno de los generadores, mientras que el resto de los neutros permanecen sin conexión a tierra. En algunas ocasiones, también se considera la conexión a tierra de dos neutros, conectando a tierra el neutro de un generador y el neutro del transformador de enlace, que se encuentra en operación.

### Distribución de la energía

Las cargas se conectan a tableros de distribución, los cuales quedan asociados con una fuente de potencia y con el bus de sincronización, para garantizar un suministro continuo de energía eléctrica. Todas las fuentes de energía (generadores y transformadores de enlace), se conectan a un bus de sincronización, a través de reactores limitadores de corriente de corto circuito.

La energía eléctrica se genera, se transmite y prácticamente se consume a un mismo nivel de tensión (13.8 kV). Para la distribución de la energía eléctrica, se utilizan cables de energía con pantalla y aislamiento *XLPE* o *EPR*, con calibres desde 250 MCM hasta 750 MCM en el nivel de 13.8 kV. Se utilizan 5 cables por fase dentro de ductos y charolas.

---



## Carga

La carga principal consiste en motores de inducción y motores síncronos conectados a 13.8 kV. Se tienen motores de 5,000 HP con arranque a tensión plena. La demanda de carga máxima es del orden de 60 MW.

### **3.3. Modelado de los equipos primarios del sistema eléctrico**

Se utilizó el software denominado ATPDraw (Alternative Transients Program), que es la versión gráfica del software EMTP (Electromagnetic Transients Program) [16, 17] el cual incluye modelos de los principales componentes de una red, para simular eventos de procedencia transitoria.

Se utilizaron los modelos de:

- Fuente de energía externa (sistema eléctrico nacional).
- Generadores.
- Transformador de enlace.
- Cables de energía.
- Carga del centro industrial, principalmente de motores de inducción.
- Bancos de capacitores.
- Interruptores.
- Falla intermitente.

### 3.4. Fuente de energía externa (sistema eléctrico nacional)

La fuente de energía externa proviene del sistema eléctrico nacional (CFE). Esta fuente se modeló como si fuera un generador con una tensión sinusoidal constante y estable, empleando el modelo Tipo 59 de ATP/EMTP [15, 16]. Este modelo se empleó como un generador síncrono, pero con un momento de inercia de masa de  $3 \times 10^9 \text{ kg-m}^2$ , cuando en un generador típicamente es del orden de  $30 \times 10^3 \text{ kg-m}^2$ . Debido al momento de inercia considerado, este modelo puede suministrar la tensión de 115 kV, como si fuera un bus infinito sin variaciones significativas ante disturbios pequeños [16, 17]

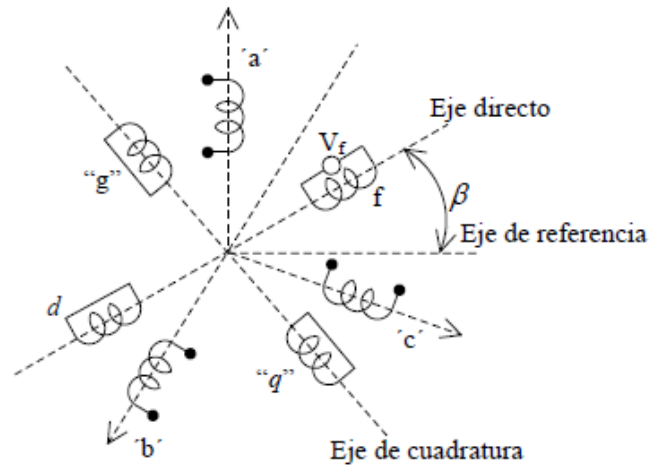
### 3.5. Generadores

Los modelos de las máquinas síncronas están constituidos por una representación detallada de las partes eléctricas y mecánicas, estando la resolución de las ecuaciones eléctricas basada en la transformación de Park [16, 17].

El modelo empleado para los generadores síncronos se muestra en la **Fig. 3.2**. Este modelo corresponde al modelo denominado Tipo 59, en ATP/EMPT [15, 49, 50]. Suministra un voltaje balanceado en estado estable. Los devanados están conectados en estrella, con una rama R-L, en serie, entre el neutro y tierra; Esto permite simular las diferentes condiciones de conexión a tierra del neutro. El modelo es un generador síncrono ideal, con siete devanados (tres devanados en el estator y cuatro en el rotor, dos en cada eje). La ecuación del voltaje en las coordenadas  $d, q, 0$  [6, 44, 45], tiene la forma de la **ec. 3.1**.

$$V_p = -[R_p]i_p - [L_p]\frac{d}{dt}i_p - [A][L_p]i_p$$

ec.3.1



**Fig. 3.2.** Modelo del generador Tipo 59 de ATP/EMTP [15, 16].

En la **ec. 3.1**,  $[R_p]$ ,  $[L_p]$  y  $[A]$  son constantes, y el subíndice “p” denota componentes de Park  $d$ ,  $q$ ,  $0$ . Los elementos de la matriz  $A$  de  $2 \times 2$  tienen un valor de cero, excepto  $a_{12} = \omega$  y  $a_{21} = -\omega$ . La variación de la inductancia  $[L_p]$  depende de la posición  $\beta$  de los devanados. Por ejemplo, en el eje polar o eje directo “ $d$ ”, se presenta la trayectoria de mínima reluctancia, mientras que en el eje interpolar o eje en cuadratura “ $q$ ”, se tiene la trayectoria de máxima reluctancia. De acuerdo con la posición de los devanados del rotor, se tendrá una reactancia equivalente variable.

En este modelo, la idea fue eliminar la necesidad de calcular el circuito equivalente de Thevenin de la red, vista desde las terminales del generador. Esto se logró desarrollando el equivalente de Thevenin de los circuitos del generador mismo, de tal

forma que se ve como una simple fuente de tensión precedida de resistencias equivalentes constantes [50].

La serie de ecuaciones diferenciales de la **ec. 3.1** se resuelven utilizando la regla de integración trapezoidal [16, 17]. Después de varios arreglos, se obtiene la relación mostrada en la **ec. 3.2**.

$$V_p(t) = [R]i_p(t) + e_p(t - \Delta t) \quad \text{ec. 3.2}$$

La **ec. 3.2** puede ser visualizada como fuentes de voltaje  $e_p(t - \Delta t)$ , precedidas de resistencias  $[R]$ .

La **ec. 3.2** representa una serie de siete (o posiblemente más) ecuaciones. Las primeras tres describen a los devanados del estator y el resto a los devanados del rotor. Por tanto, pueden ser reescritas de la siguiente forma:

$$V_s(t) = [R_{ss}]i_s(t) + [R_{sr}]i_r(t) + e_s(t - \Delta t) \quad \text{ec. 3.3a}$$

$$V_r(t) = [R_{rs}]i_s(t) + [R_{rr}]i_r(t) + e_r(t - \Delta t) \quad \text{ec. 3.3b}$$

El subíndice “s” denota las cantidades del estator y “r” las cantidades del rotor.

La eliminación de las corrientes del rotor da como resultado,

$$V_s(t) = \left( [R_{ss}] - [R_{sr}][R_{rr}]^{-1}[R_{rs}] \right) i_s(t) + \left( e_s(t - \Delta t) + [R_{sr}][R_{rr}]^{-1} e_r(t - \Delta t) \right) \quad \text{ec. 3.4a}$$

En su forma corta,

$$V_s(t) = [R_{ss}^{red}] i_s(t) + e_s^{red}(t - \Delta t) \quad \text{ec. 3.4b}$$

La matriz de resistencias  $[R_{ss}^{red}]$  tiene la siguiente forma:

$$[R_{ss}^{red}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \quad \text{ec. 3.5}$$

Todos los elementos que no tienen un valor de cero son constantes, si  $\omega$  y  $\Delta t$  son constantes. Finalmente, transformando a coordenadas de fase, conduce al circuito equivalente de Thevenin del generador:

$$V_{phase}(t) = [R_{phase}] i_{phase}(t) + e_{phase}(t - \Delta t) \quad \text{ec. 3.6}$$

### 3.6. Transformador de enlace

Se utilizó un transformador trifásico convencional saturable de ATP/EMTP [16, 17], con conexión delta/estrella y una relación de transformación de 115/13.8 kV. Se consideró la corriente de magnetización, la resistencia óhmica de los devanados, el flujo magnético y su respectiva inductancia [6, 45, 46].

El modelo empleado considera los efectos no lineales de saturación del núcleo [52]. Está basado en un concepto físico de la representación de los devanados como bobinas de acoplamiento mutuo. De esta forma, un transformador trifásico de dos devanados se convierte en un sistema de 6 bobinas acopladas. La impedancia o admitancia de las bobinas acopladas puede ser obtenida de pruebas comúnmente

disponibles, como son las de excitación y de corto circuito del transformador. Este concepto puede describirse en ecuaciones fasoriales en estado estable como,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_N \end{bmatrix} \quad \text{ec. 3.7}$$

La matriz de la **ec. 3.7** es simétrica. Sus elementos pueden ser obtenidos por mediciones de pruebas de excitación (sin carga). Si la bobina  $k$  es energizada, y todas las demás bobinas son desconectadas, los valores medidos para  $I_k$  y  $V_i, \dots, V_N$  producen la columna  $k$  de la matriz  $[Z]$ .

$$Z_{ik} = V_i / I_k \quad \text{ec. 3.8}$$

Desafortunadamente, las impedancias de entrada de corto circuito que describen las características de transferencia más importantes del transformador, se pierden durante las mediciones de excitación. La impedancia de entrada de corto circuito  $Z_{ik}^{short}$  entre la bobina energizada “ $i$ ” y la bobina cortocircuitada “ $k$ ” es,

$$Z_{ik}^{short} = Z_{ii} - \frac{Z_{ik}Z_{ki}}{Z_{kk}} \quad \text{ec. 3.9a}$$

o

$$\frac{Z_{ik}^{short}}{Z_{ii}} = 1 - k^2 \quad \text{ec. 3.9b}$$

con un coeficiente de acoplamiento,

$$k = \sqrt{\frac{Z_{ik}Z_{ki}}{Z_{ii}Z_{kk}}} \quad \text{ec. 3.9c}$$

Los transformadores de potencia están fuertemente acoplados, con un factor  $k$  cercano a 1.0. Para una impedancia típica de 12% y para una corriente de excitación típica del 0.4% los valores de  $Z_{ii}$ ,  $Z_{ik}$  y  $Z_{kk}$  tendrían que ser medidos con una exactitud de 0.001% para obtener un valor de dentro del  $\pm 10\%$ . Esto es imposible, por lo que es necesario encontrar  $[Z]$  o su inversa  $[Y]$  de una manera diferente.

Para el análisis de transitorios electromagnéticos la **ec. 3.7** puede ser escrita de manera diferencial como,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1N} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{N1} & R_{N2} & \dots & R_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1N} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{N1} & L_{N2} & \dots & L_{NN} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_N \end{bmatrix} \quad \text{ec. 3.10}$$

Con  $[R]$  siendo la parte real de  $[Z]$ , y  $[L]$  la parte imaginaria de  $[Z]$  dividida por  $\omega$ . Este modelo es el usado en ATP/EMTP [15, 16].

La extensión de la **ec. 3.7** a un transformador trifásico puede identificarse como un sistema de tres bobinas en una submatriz de  $3 \times 3$ .

$$\begin{bmatrix} Z_S & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_S & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_S \end{bmatrix} \quad \text{ec. 3.11}$$

Donde  $Z_s$  es la impedancia propia de una fase o pierna y  $Z_M$  es la impedancia mutua entre las tres fases o piernas del núcleo.

Como cualquier otro componente de un sistema de potencia trifásico, las impedancias propias y mutuas están relacionadas a los valores de secuencia positiva y cero  $Z_1$  y  $Z_0$  por,

$$Z_s = \frac{1}{3}(Z_0 + 2Z_1) \quad \text{ec. 3.12}$$

$$Z_M = \frac{1}{3}(Z_0 - Z_1) \quad \text{ec. 3.13}$$

La **ec. 3.7** es válida para transformadores trifásicos de  $N$  devanados sólo si cada elemento se reemplaza por una matriz de 3x3 de la **ec. 3.11**. Inicialmente, de los datos de la prueba de corriente de excitación en secuencia positiva y cero, se calculan las partes imaginarias de los elementos pares de la diagonal de la matriz ( $X_{S-ii}, X_{M-ii}$ ). Si se ignoran las pérdidas de excitación y si “ $i$ ” es el devanado de excitación, entonces siguiendo la **ec. 3.8** se establece que en p.u., es simplemente recíproco a la corriente de excitación en p.u. Con los valores de secuencia positiva y cero y conocidos, los pares de valores son obtenidos por la **ec. 3.12** y **3.13**.

$$X_{S-ii} = \frac{1}{3}(X_{0-ii} + 2X_{1-ii}) \quad \text{ec. 3.14a}$$



$$X_{M-ii} = \frac{1}{3}(X_{0-ii} - X_{1-ii}) \quad \text{ec. 3.14b}$$

Para los otros devanados, es razonable asumir que las reactancias en p.u. son prácticamente las mismas que en la **ec. 3.14**. Si se conocen las pérdidas de excitación, no se deben incluir en los cálculos de la **ec. 3.14**, debido a que son modeladas como resistencias en serie con la reactancia de magnetización. En su lugar se deben conectar resistencias en paralelo a través de uno o más devanados para reproducir las pérdidas de excitación. Estas resistencias en paralelo son ramas adicionales que no pueden ser incluidas en la representación de la matriz de impedancias de la **ec. 3.7**. Entonces, estrictamente hablando, las reactancias en p.u.,  $X_{1-ii}$  y  $X_{0-ii}$  no son el recíproco en p.u. de la corriente de excitación, pero si son el recíproco de la parte imaginaria en p.u. de la corriente de excitación,

$$I_m = \sqrt{I_{exc}^2 - P_{exc}^2} \quad \text{ec. 3.15}$$

Donde

$I_m$  = Corriente de magnetización (parte imaginaria en p.u. de la corriente de excitación).

$I_{exc}$  = Corriente de excitación en p.u.

$P_{exc}$  = Pérdidas de excitación en p.u.

Prácticamente, los valores de  $I_m$  y  $I_{exc}$  difieren muy poco, por lo que el valor de  $I_{exc}$  es el mismo de  $I_m$ .

---

Ahora, con los elementos de la diagonal conocidos, se pueden calcular los elementos que se encuentran fuera de la diagonal con las impedancias de corto circuito de entrada con la **ec. 3.9a**.

$$Z_{ik} = Z_{ki} = \sqrt{(Z_{ii} - Z_{ik}^{short})Z_{kk}} \quad \text{ec. 3.16}$$

Ahora, la representación en la matriz de admitancias se indica en la **ec. 3.17**.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_N \end{bmatrix} \quad \text{ec. 3.17}$$

Para el estudio de eventos transitorios  $[Y]$  debe ser dividida en sus componentes resistivos e inductivos. De los datos obtenidos en la prueba de corto circuito,

$$X_{ik}^{short} = \sqrt{|Z_{ik}^{short}|^2 - (R_i + R_k)^2} \quad \text{ec. 3.18}$$

$Z_{ik}^{short}$  = Impedancia de entrada de corto circuito en p.u. (magnitud)

$R_i + R_k$  = Pérdidas de carga de la prueba de corto circuito en p.u. entre  $i$  y  $k$  o resistencia de los devanados en p.u.

Donde,

$$[L]^{-1} = j\omega[Y] \quad \text{ec. 3.19}$$

Las resistencias de los devanados forman una matriz diagonal  $[R]$  y el transformador puede describirse finalmente como se muestra en la **ec. 3.20**.

$$\left[ \frac{di}{dt} \right] = [L]^{-1}[V] - [L]^{-1}[R][i]$$

**ec. 3.20**

El modelo de la **ec. 3.20** es el que se utiliza en ATP/EMTP [16, 17] con buenos resultados [46]. Con este modelo no se tienen problemas de exactitud en la representación de la matriz  $[Z]$ .

El aterrizamiento del neutro del transformador de enlace se efectúa a través de un cable de energía de aproximadamente 500 a 2000 m. Por tanto, si se considera una capacitancia a tierra del cable de 1 nF/m, se tendrá una capacitancia concentrada de 5 – 2,000 nF. Esto se representa como una capacitancia independiente conectada en la estrella del transformador.

### 3.7. Cables de energía

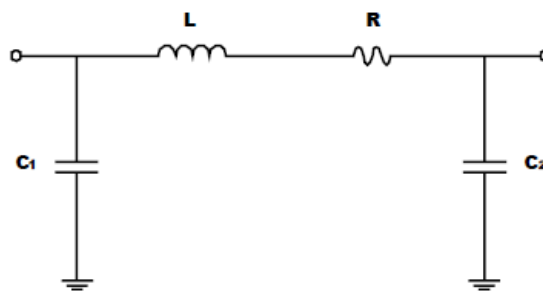
En ATP/EMTP [16, 17] se pueden utilizar dos modelos para líneas aéreas y cables aislados [16, 17]: modelos con parámetros concentrados, que representan una línea o cable mediante un circuito equivalente con elementos concentrados, cuyos valores son calculados a una determinada frecuencia; y modelos con parámetros distribuidos, para los que se pueden distinguir dos categorías según los parámetros sean constantes o dependientes de la frecuencia. El primer tipo de modelos es adecuado para cálculos en régimen permanente, aunque pueden ser utilizados en simulaciones transitorias a frecuencias próximas a aquella para la que se han calculado los parámetros. Los

---

modelos más precisos en cálculos transitorios son aquellos que tienen en cuenta la naturaleza distribuida de los parámetros y su dependencia con la frecuencia.

La formulación y la solución de las ecuaciones de un cable aislado son similares a las empleadas en líneas aéreas. Sin embargo, la gran variedad de instalaciones que emplean cables aislados hace muy difícil el desarrollo de un modelo único para todos los tipos de cables. Un modelo riguroso de un cable aislado es el que tiene en cuenta la dependencia de parámetros con la frecuencia basado en la teoría modal y emplea matrices de transformación dependientes de la frecuencia.

Por otro lado, los modelos para cables y líneas de transmisión pueden efectuarse en el dominio del tiempo, empleando parámetros concentrados y parámetros distribuidos. Para el caso de la simulación de los cables empleados en los centros industriales, se empleó el modelo de un circuito “pi” o “ $\pi$ ”, que se emplea para representar líneas cortas, con una longitud de hasta 80 km. La distancia de los cables empleados en los centros industriales es de hasta 2 km, por lo que un modelo “ $\pi$ ” es adecuado. Este modelo “ $\pi$ ” para cables se encuentra contenido en ATPDraw. El diagrama representativo de este modelo se muestra en la **Fig. 3.3** [52, 51].



**Fig. 3.3.** Modelo “ $\pi$ ” de un cable.

En ATP/EMTP [16, 17] el uso de circuitos “ $\pi$ ” está restringido a líneas muy cortas cuando el tiempo de viaje  $\tau$  es más pequeño que el paso de integración  $\Delta t$  de la simulación. Sin embargo, en muchos casos, se pueden usar secciones de circuitos “ $\pi$ ” en cascada sin pérdidas considerables en la exactitud de los resultados. Las impedancias propias y mutuas usadas en la representación de los circuitos “ $\pi$ ” se pueden obtener de la **ec. 3.21**.

$$X_s = \frac{1}{3}(X_0 + 2X_1) \quad \text{ec. 3.21a}$$

$$X_m = \frac{1}{3}(X_0 - X_1) \quad \text{ec. 3.21b}$$

Las distancias que se utilizan en el sistema eléctrico de los centros industriales típicamente varían del orden de 30 m a 2000 m. Las mediciones de capacitancia en estos cables de energía, muestran que la capacitancia parásita de una fase es del orden de 1-10 nF/km para niveles de tensión de 13.8 kV, dependiendo de su sección transversal y de la distancia a tierra.

### 3.8. Cargas

La carga se encuentra constituida principalmente por motores de inducción, aunque también se tienen cargas de alumbrado. La representación de la carga puede realizarse a través de un circuito  $RL$ . La parte resistiva de la carga es indicativa del calentamiento, cargas de alumbrado y la componente activa de los motores. La componente reactiva de la carga es de los motores y alumbrado con lámparas fluorescentes principalmente.

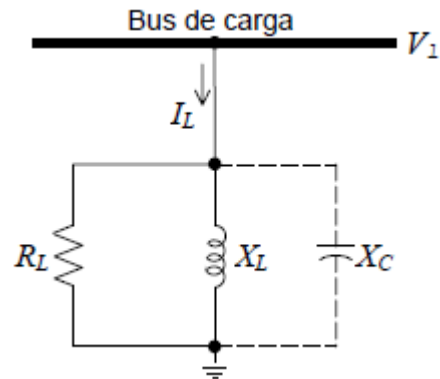
---

En general, la carga de los centros industriales puede ser representada usando un circuito equivalente en conexión paralelo de los elementos resistivos y reactivos concentrados a un “bus de carga”, como se observa en la **Fig. 3.4**, [51]. El factor de potencia de la carga determina la impedancia relativa de la resistencia y de los elementos inductivos. Si se emplean bancos de capacitores para corrección del factor de potencia, estos se representan como una capacitancia shunt conectada a la resistencia y elementos inductivos.

Para el caso del modelo de la carga del centro industrial, la carga se concentró en el nivel de 13.8 kV. Los elementos resistivos e inductivos se determinaron a través de la potencia activa y reactiva que demandan los alimentadores conectados a los tableros de distribución en 13.8 kV, mediante las siguientes ecuaciones,

$$R_L = \sqrt{2} \frac{\left(\frac{13.8 \text{ kV}}{\sqrt{3}}\right)^2}{MW} \quad [\Omega] \quad \text{ec. 3.22}$$

$$X_L = \sqrt{2} \frac{\left(\frac{13.8 \text{ kV}}{\sqrt{3}}\right)^2}{MVAR} \quad [\Omega] \quad \text{ec. 3.23}$$



**Fig. 3.4.** Representación del circuito equivalente de las cargas en el sistema de potencia.

### 3.9. Bancos de capacitores

Los bancos de capacitores se representan como una capacitancia concentrada a un bus de carga. La capacitancia entre dos nodos  $k$  y  $m$  está definida por la solución en estado estable de la **ec. 3.24** [6].

$$i_{km} = C \frac{d(V_k - V_m)}{dt} \quad \text{ec. 3.24}$$

Para la simulación digital de eventos transitorios, esta ecuación diferencial es reemplazada por,

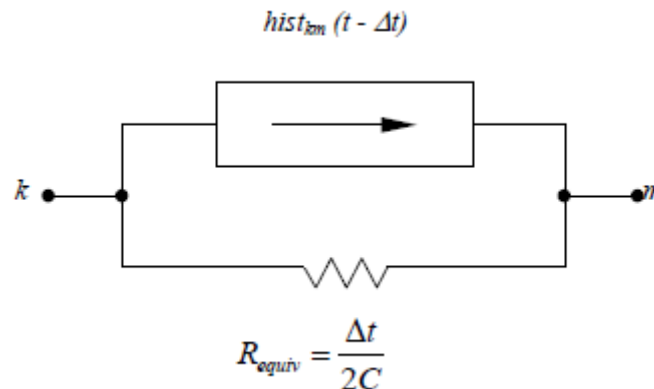
$$\frac{i_{km}(t) + i_{km}(t - \Delta t)}{2} = C \frac{\{V_k(t) - V_m(t)\} - \{V_k(t - \Delta t) - V_m(t - \Delta t)\}}{\Delta t} \quad \text{ec. 3.25}$$

lo que determina a la **ec. 3.26**,

$$i_{km}(t) = \frac{2C}{\Delta t} \{V_k(t) - V_m(t)\} + hist_{km}(t - \Delta t) \quad \text{ec. 3.26}$$

$$hist_{km}(t - \Delta t) = -i_{km}(t - \Delta t) - \frac{2C}{\Delta t} \{V_k(t - \Delta t) - V_m(t - \Delta t)\} \quad \text{ec. 3.26}$$

La integración por la regla trapezoidal de la **ec. 3.24**, está representada en la **ec. 3.26** como una resistencia equivalente  $tCR_{equiv}\Delta=2$  en paralelo con una fuente de corriente conocida, como se muestra en la **Fig. 3.5**. Una vez que todos los voltajes de nodo han sido conocidos en un paso de integración en un instante  $t$ , el término histórico de la **ec. 3.27** debe ser actualizado para cada rama de capacitancias para usarse en el siguiente paso de integración en  $(t-t\Delta)$ .



**Fig. 3.5.** Circuito resistivo equivalente para la solución de transitorios de una capacitancia concentrada.

### 3.10. Interruptores

El interruptor es un elemento que permite conectar y desconectar elementos o grupos de elementos en una red. Los interruptores considerados en el modelado son elementos ideales que consideran el estado en “0” y “1”, (abierto y cerrado) en el tiempo



establecido. En ATP/EMTP [15, 16] los interruptores se consideran como conductores ideales, es decir, con una impedancia cero cuando están cerrados y como un circuito abierto, es decir, como una impedancia infinita cuando están abiertos.

Un interruptor trifásico puede ser modelado como tres interruptores monofásicos, cada uno con una distribución uniforme e independiente. Cada interruptor puede cerrar en cualquiera de los 360 grados que corresponden a un ciclo.

Se tiene más de una forma para manejar el cambio de la posición del interruptor, para la solución de transitorios como parte de ATP/EMTP [16, 17]. Como parte de la solución en estado estable, el problema es simple porque las ecuaciones se solucionan solo una vez, por lo que se emplean 2 nodos para abrir interruptores y uno para cerrar interruptores, como se observa en la **Fig. 3.6**.

El cálculo de la corriente de cierre del interruptor se obtiene mediante,

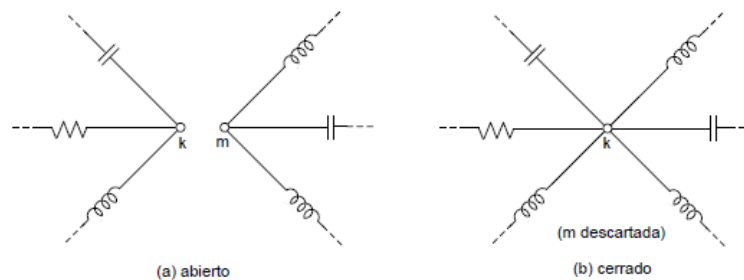
$$i_{km} = (V_k - V_m) / R \quad \text{ec. 3.26}$$

Cuando los contactos de un interruptor en operación se abren, se presenta un arco eléctrico que mantiene el flujo de corriente hasta que la corriente toma un valor de cero. En los interruptores de potencia, la resistencia del arco es despreciablemente pequeña si se interrumpen corrientes de carga normal o corrientes de corto circuito altas. En la interrupción de corrientes inductivas pequeñas (por ejemplo, en abrir un transformador sin carga), la resistencia del arco es alta debido a las características del arco, y puede ser importante para decidir si la corriente de interrupción está completa o no. Inmediatamente después de la interrupción, se crea un voltaje de recuperación a través

---

de los contactos, lo que puede conducir a un recierre si se excede el esfuerzo del dieléctrico, lo que sucede cuando el entrehierro entre los contactos está siendo ionizado.

En ATP/EMTP [16, 17] actualmente no se tienen modelos de arco, sin embargo, se está trabajando en este tema para ser implementado en el software [53]. Por otro lado, para el caso en estudio este hecho no es un problema debido a que las simulaciones efectuadas no se centran en la operación del interruptor de potencia, y se considera que el interruptor opera de manera ideal.



**Fig. 3.6.** Representación de los interruptores en ATP/EMTP.

### 3.11. Falla intermitente

En la literatura especializada se encontró el modelo para una falla intermitente en baja tensión, donde se utiliza una fuente de 1 a 2 Amp de corriente de carga  $3I_0$  típica para un sistema con un aislamiento de hasta 600 V, la capacitancia total del sistema es del orden de  $9.57 \mu f$ , adicionalmente, el modelo está realizado en el software LTSpice (*simulador de circuitos electrónicos de alto rendimiento basado en Spice*), por lo que el

modelo no puede ser aplicado en media tensión debido a las premisas y al software de simulación en el que fue desarrollado.

Una falla a tierra intermitente, está asociada con un arco eléctrico en aire. El modelo de arco eléctrico del software ATP/EMTP de interruptores no es aplicable para simular una falla a tierra intermitente, debido a que no contiene un modelo del arco establecido para este tipo de fallas.

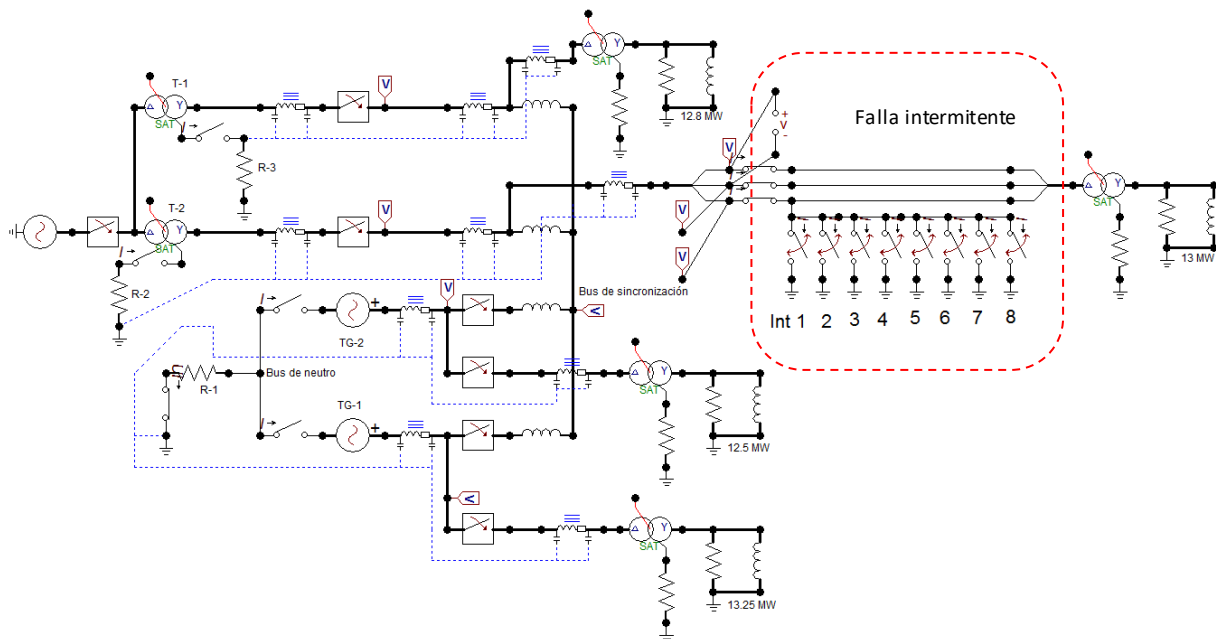
Por lo anterior, el autor desarrolló el modelo de una falla a tierra intermitente, integrando un grupo de interruptores convencionales, ver la **Fig. 3.7**, los cuales se controlan por un tiempo de cierre y otro de apertura que define el usuario. Cabe destacar que no existe ninguna interacción entre el interruptor y la red, ya que el interruptor está idealizado como un cortocircuito cuando cierra y como un circuito abierto cuando se abre.

De acuerdo con lo anterior, en este trabajo de tesis se desarrolló un modelo para determinar la escalación de tensiones en media tensión, para simular una falla a tierra intermitente.

Los datos ingresados para la apertura y cierre de los interruptores convencionales se establecieron de acuerdo a la siguiente **Tabla 3.1** considerando como premisa la rotación fasorial de 180 grados ( $1\sqrt{2}$  ciclo) que determina el valor máximo de tensión de la fase fallada.

**Tabla 3.1** Tiempos de operación de la falla intermitente

Ts (tiempo de simulación)								
	Int. 1	Int. 2	Int. 3	Int. 4	Int. 5	Int. 6	Int. 7	Int. 8
T-cl (Tiempo de cierre)	0.1000	0.1068	0.1145	0.1227	0.1314	0.1394	0.1478	0.1735
T-op (tiempo de operación)	0.1004	0.1072	0.1149	0.1231	0.1318	0.1398	0.1482	0.1739



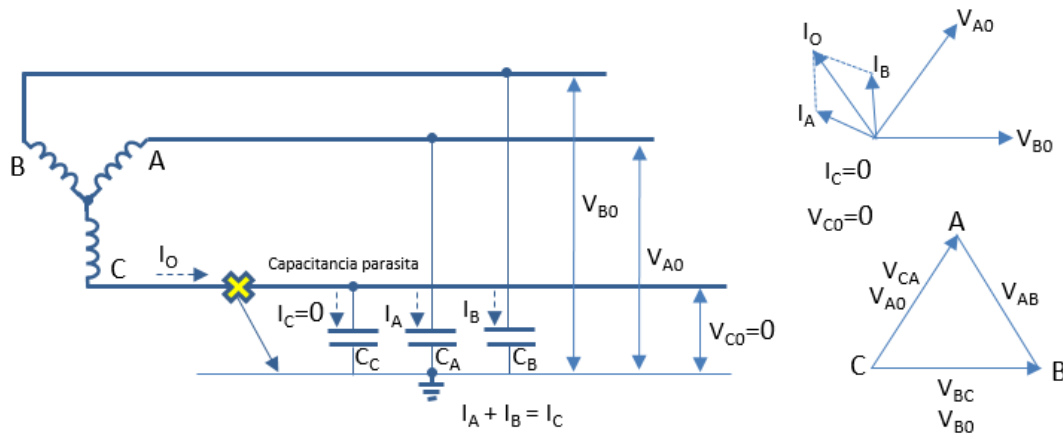
**Fig. 3.7.** Modelo del sistema eléctrico utilizado para la falla intermitente en Atpdraw.

Para el desarrollo del modelo, se determinó la magnitud de la corriente de falla o "corriente de carga", en un sistema flotado [6]. La corriente de carga de un sistema se puede calcular sumando la capacitancia de secuencia cero o la reactancia capacitiva de todos los cables y equipos conectados al sistema. A partir de esto, la corriente se puede calcular a partir del voltaje del sistema, usando fórmulas [6], si los valores reales no están disponibles, también se pueden usar gráficos y fórmulas de aproximación sin

errores considerables [6]. Sin embargo, es preferible medir la magnitud de la corriente de carga en los sistemas de energía existentes [6].

En un sistema eléctrico Industrial ya en operación no es práctico medir la corriente de carga del sistema, por lo que este modelo considero magnitudes de capacitancia de acuerdo a los datos de placa de los equipos ver **Apéndice B**. Por lo anterior, se determinó la capacitancia de línea a tierra asociada con los componentes del sistema para determinar la magnitud de la corriente de carga de secuencia cero, mediante los dos métodos de cálculo, uno con los valores de placa cargados directamente en el software *ATPdraw* y otro mediante datos típicos mediante gráficos y fórmulas de aproximación esto permite corroborar que los datos de entrada de la capacitancia parasita para el cálculo de la escalación de tensiones son correctos.

Para el método utilizando gráficos y fórmulas de aproximación, primero se establece el circuito equivalente de un sistema trifásico flotado ver **Fig. 3.8**, considerando un transformador, con devanado estrella, como fuente de potencia. Las capacitancias  $C_A$ ,  $C_B$  y  $C_C$  son las capacitancias parásitas con respecto a tierra, de los devanados del transformador y de los cables de potencia.



**Fig. 3.8.** Sistema flotado con una falla a tierra franca en la fase C.

De acuerdo con la ley de Ohm, la tensión a través de la capacitancia parásita de cada fase, se puede definir como [3]:

$$E = IZ = I(R + jX_C) = IR + jIX_C \quad \text{ec.2.1}$$

Del mismo modo, la reactancia capacitiva  $X_c$  de cada fase, se resuelve usando la **ec.**

**2.2:**

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad \text{ec.2.2}$$

Considerando un sistema de 13.8 kV rms (7.96 kV VL-G), con frecuencia de 60 Hz y de acuerdo con la **Tabla XX** la corriente de carga típica para un sistema de 13,800 VLL es de 10 Amp. por lo que la ecuación 2.1 queda como:

$$7,967 = 10R + j10X_c \quad \text{e.c.2.3}$$

Debido a que la resistencia del aislamiento es muy alta, podemos suponer que la impedancia del condensador de línea a tierra es casi toda reactancia capacitiva ( $R \gg XC$ ). Entonces, simplificando la **e.c. 2.3**:

$$7,967 = j10X_c \quad \text{e.c.2.4}$$

Combinando las variables de las ecuaciones **2.4** y **2.2**, tenemos:

$$7,967 = j(10/2\pi fC) = j(10/377C) \quad \text{e.c.2.5}$$

Despejando la capacitancia de la **e.c. 2.5**:

$$C = 10/(7,967 \cdot 377) = 3.35 \mu\text{f} \quad \text{e.c.2.6}$$

Entonces, una capacitancia de aproximadamente  $3.35 \mu\text{F}$  en un sistema de  $7.96 \text{ kV}$  dará como resultado aproximadamente  $10 \text{ amp}$  de corriente de carga a través de esa capacitancia.

En la **Tabla 3.2**, se enumeran los datos de la corriente de carga en varios niveles de tensión. Los valores indicados se basan en datos publicados de los fabricantes de componentes o se derivan de las mediciones reales de la corriente de carga.

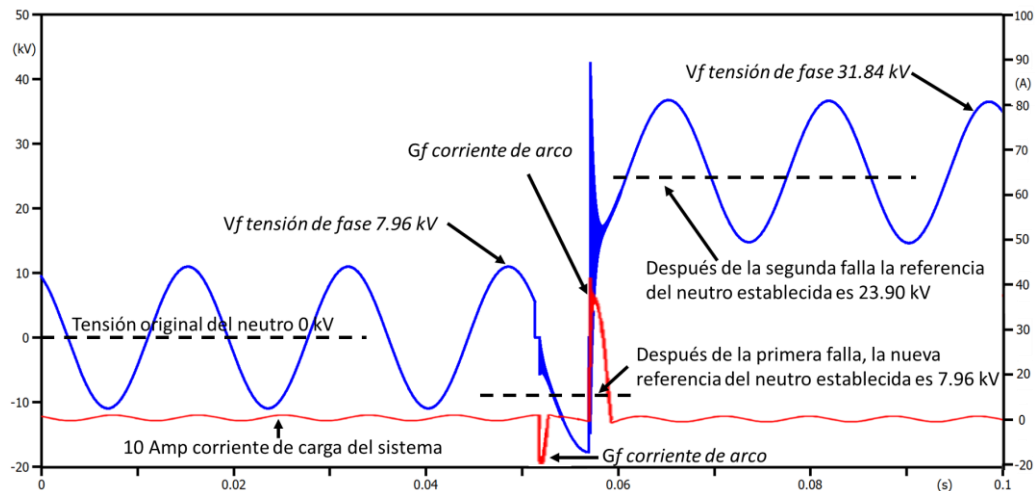
**Tabla 3.2.** Valores de corriente de carga típicos 3lo por nivel de tensión

Tensión de sistema	Corriente de carga 3lo de capacitancia de sistema
480	0.1-2.0
600	0.1-2.0
2,400	2.0 - 5.0
4,160	2.0 - 5.0
13,800	5.0 - 10.0

Una vez establecida, la capacitancia de secuencia cero del sistema eléctrico bajo estudio, se procedió a distribuir la capacitancia de acuerdo con los componentes del sistema eléctrico, considerando los cables eléctricos, los de mayor aporte de capacitancia parasita en el sistema.

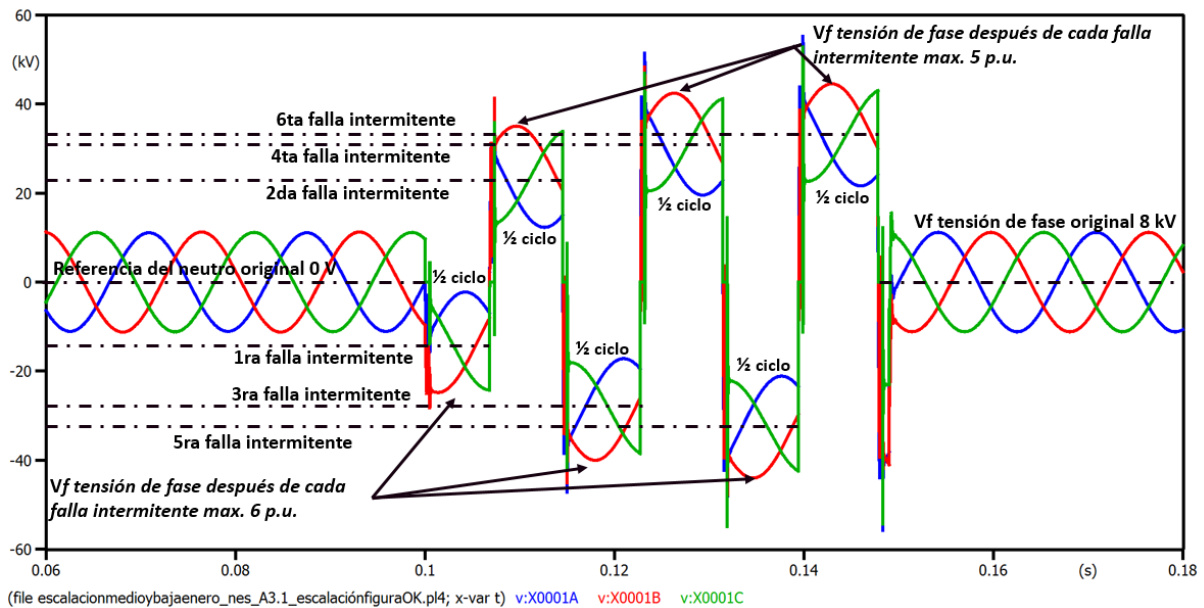
De lo anterior y considerando los datos de operación típicos de un centro Industrial, se realizó la simulación de una falla intermitente. Primero, considerando dos fallas intermitentes para ver el desplazamiento de la tensión original del nuetro; así como la corriente de carga de 10 Amp, ver la **Fig. 3.9**.





**Fig. 3.9.** Falla intermitente a tierra presente en un sistema eléctricamente flotado con una corriente de carga de 10 Amp.

Adicionalmente, se realizó la simulación para determinar el máximo valor de tensión de fase por escalación de tensiones, estableciendo la falla intermitente de acuerdo a la rotación fasorial de 180 grados (1/2 ciclo). La **Fig. 3.10** se observa que el valor máximo de tensión es del orden de 5 a 6 p.u. esto es 47,804 V. Por otro lado, la referencia a tierra del neutro se va moviendo de acuerdo a la falla simultanea originando la escalación de tensiones.



**Fig. 3.10.** Falla intermitente a tierra cada  $\frac{1}{2}$  ciclo presente en un sistema eléctricamente flotado presentando escalación de tensiones del orden de 5 a 6 p.u.

En el Apéndice A se describen las Características y uso del ATPDraw. En el Apéndice B, se describen los Parámetros eléctricos de los equipos primarios utilizados para el modelado del sistema de potencia bajo estudio. Finalmente, en el Apéndice C, se describen las entradas de datos en ATPDraw.

## 4. CAPÍTULO 4

### *ANÁLISIS DE ESCALACIÓN DE TENSION EN SISTEMAS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES*

---

#### 4.1. Introducción

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos con la simulación digital. Utilizando el modelo del sistema eléctrico de potencia, indicado en la **Fig. 3.1**, cuyo desarrollo fue explicado en el **Capítulo 3**, se analizaron seis condiciones de falla diferentes:

- A1) Falla a tierra franca en un sistema con dos neutros conectados a tierra.
- A2) Falla a tierra intermitente en un sistema con dos neutros conectados a tierra.
- A3) Falla a tierra franca en un sistema con un neutro conectado a tierra.
- A4) Falla a tierra intermitente en un sistema con un neutro conectado a tierra.
- A5) Falla a tierra franca en un sistema con el neutro flotado.
- A6) Falla a tierra intermitente en un sistema con el neutro flotado.

#### 4.2. Escenario A1. Falla a tierra franca en un sistema con dos neutros conectados a tierra

Se consideró lo siguiente:

1. Los generadores TG-1 y TG-2 en operación, sincronizados con el transformador T-1.
-

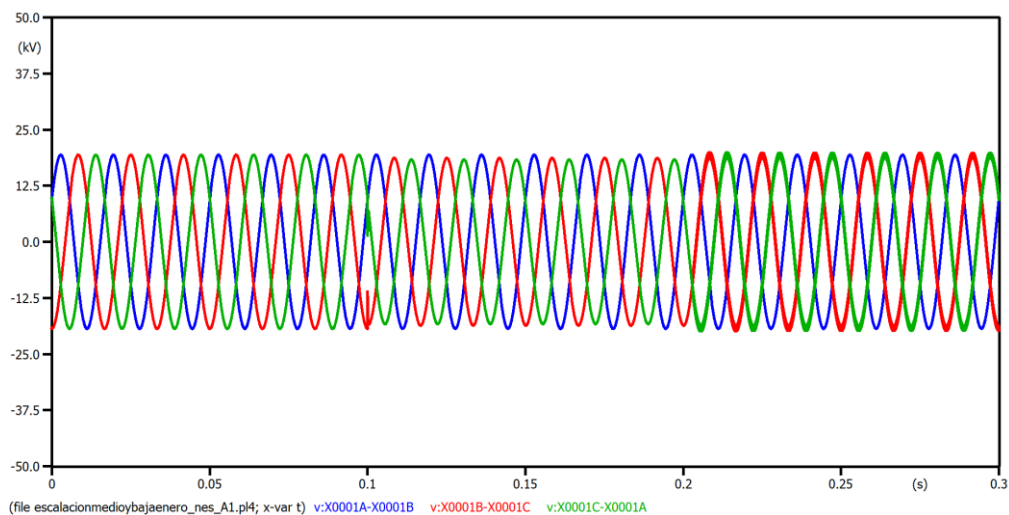
2. El neutro del generador TG-1 conectado a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ . El neutro del generador TG-2 desconectado de tierra. Para simular esta condición, se consideró una impedancia de  $1 M\Omega$ .
3. El neutro del transformador T-1 conectado a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ . Para simular esta condición, se consideró una impedancia de conexión a tierra de  $1 M\Omega$ .
4. La pantalla de los cables de potencia, se consideró conectada a tierra en ambos extremos, para la circulación de la corriente de falla a tierra.
5. La distancia máxima entre subestaciones aledañas es de 5 km.
6. No existe neutro corrido.
7. El intervalo de tiempo analizado es de 0.30 s.
8. Se simuló una falla franca a tierra en la Fase C, en el instante de 0.10 s, con una resistencia de falla muy próxima a cero  $10^{-7} \Omega$ . La falla se localiza en el alimentador a la SE-1 proveniente del tablero TDP-1 en 13.8 kV.
9. La falla es liberada en un tiempo programado de 0.20 s.

### Resultados obtenidos

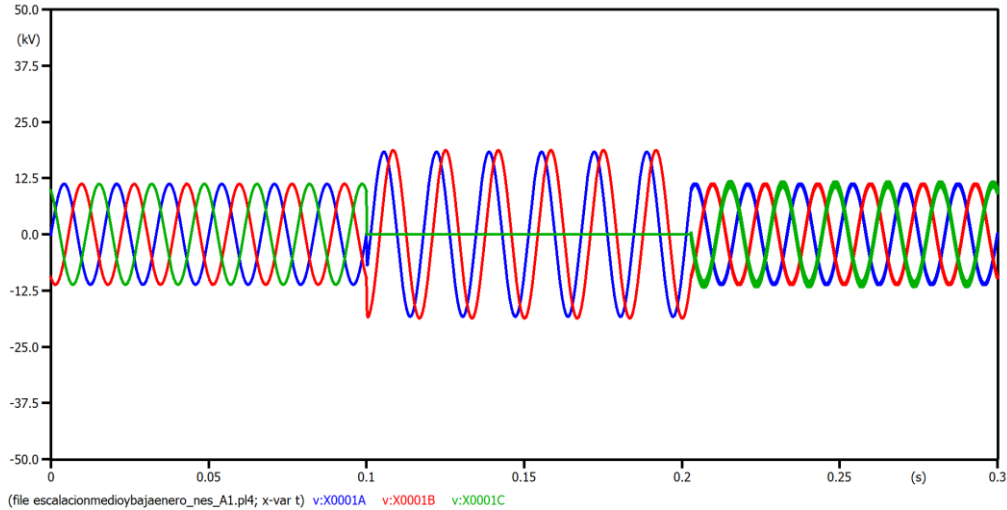
Se simuló una falla franca en un tiempo de 0.10 a 0.20 ms, en la Fase C. El comportamiento del sistema se muestra en las **Fig's. 4.2, 4.3 y 4.4**. En la **Fig 4.2**, se observa que la tensión de línea (tensión entre líneas) no registró ninguna afectación, conservando su valor de 13.8 kV. En la **Fig. 4.3** se muestra que las tensiones de fase

---

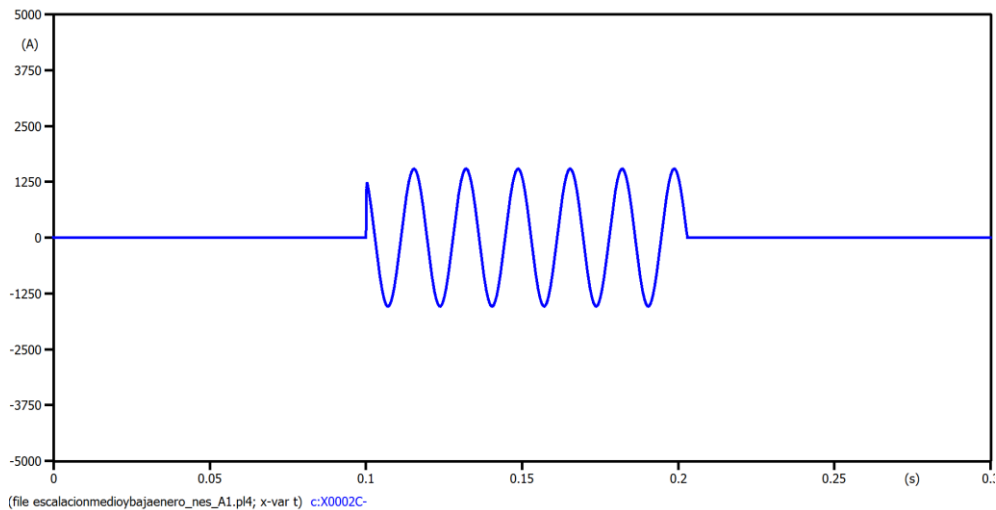
(tensión de fase), en las fases no falladas, se incrementaron 1.73 veces, que equivale a un valor de 13.8 kV. Estas sobretensiones fueron ocasionadas por el corrimiento del neutro. La corriente de falla a tierra total, es de 1,207.19 Amp rms, como se observa en la **Fig. 4.4**. Esta es la suma de la corriente que retornó al sistema a través de cada uno de los neutros. Las mediciones se realizaron en en el bus de sincronización, en los tableros de distribución, en los tableros de los transformadores de enlace y en los neutros.



**Fig. 4.1.** Comportamiento de la tensión de línea cuando se presenta una falla franca a tierra, con el neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de 13.2  $\Omega$ .



**Fig. 4.2.** Comportamiento de la tensión de fase cuando se presenta una falla franca a tierra, con el neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .



**Fig. 4.3.** Comportamiento de la corriente de falla a tierra, cuando se presenta una falla a tierra franca, con el neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .

#### **4.3. Escenario A2. Falla a tierra intermitente en un sistema con dos neutros conectados a tierra**

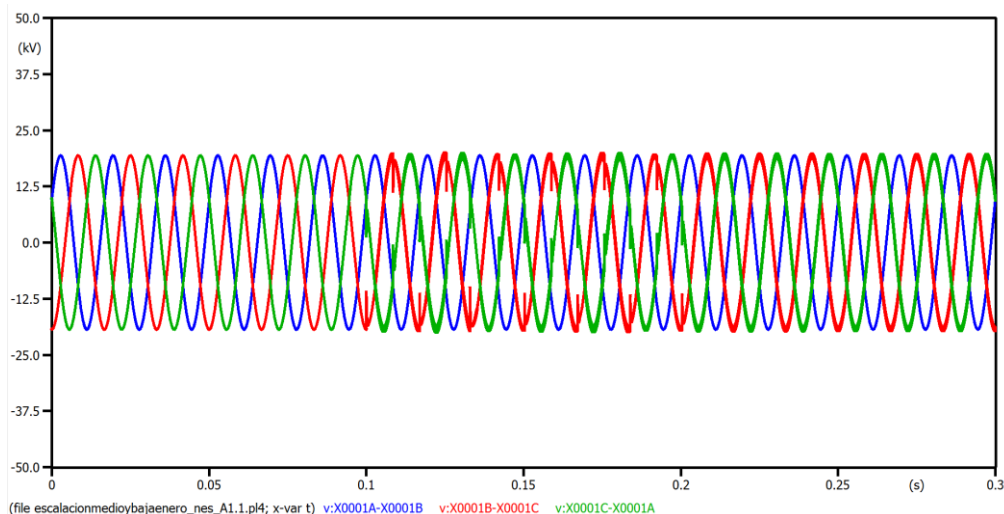
Se consideró lo siguiente:

1. Los generadores TG-1 y TG-2 en operación, sincronizados con el transformador T-1.
2. El neutro del generador TG-1 conectado a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ . El neutro del generador TG-2 desconectado de tierra. Para simular esta condición, se consideró una impedancia de  $1 M\Omega$ .
3. El neutro del transformador T-1 conectado a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ . Para simular esta condición, se consideró una impedancia de conexión a tierra de  $1 M\Omega$ .
4. La pantalla de los cables de potencia, se consideró conectada a tierra en ambos extremos, para la circulación de la corriente de falla a tierra.
5. La distancia máxima entre subestaciones aledañas es de 5 km.
6. No existe neutro corrido.
7. El intervalo de tiempo analizado es de 0.30 s.
8. Una falla a tierra intermitente en la Fase C, en el instante de 0.10 s, con un acoplamiento capacitivo de  $3.32 \mu\text{f}$  y una corriente de carga de 10 A, el arco se disipa cada  $\frac{1}{2}$  ciclo. La falla se localiza en el alimentador a la SE-1 proveniente del tablero TDP-1 en 13.8 kV

9. La falla es liberada en un tiempo programado de 0.1604 s.

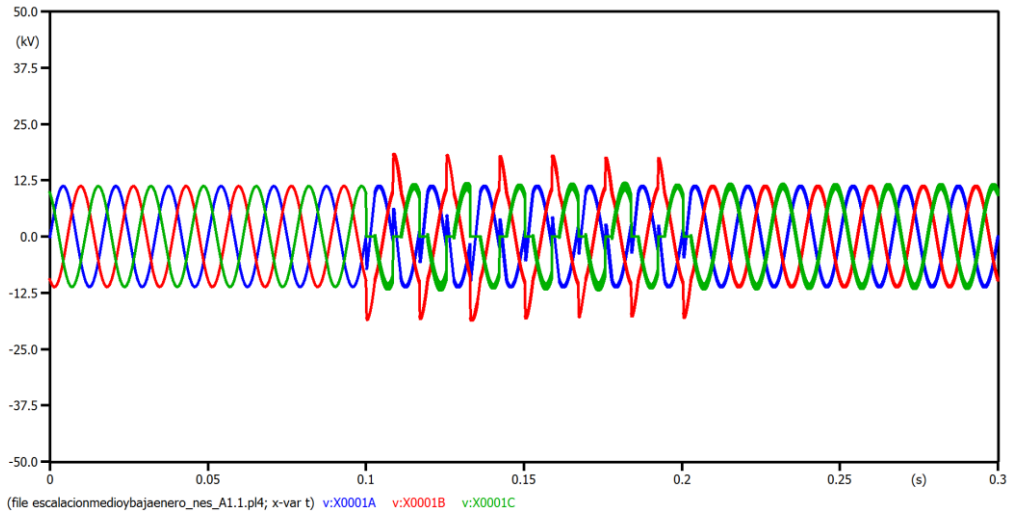
## Resultados obtenidos

Los resultados se muestran en las **Fig's. 4.5, 4.6 y 4.7**. En la **Fig 4.5**, se observa la tensión de línea sin afectación. En la **Fig. 4.6**, se muestran las tensiones de fase. Se observan sobretensiones en la fase fallada, del orden de 1.5 p.u. (12 kV). Estas sobretensiones se disipan en menos de medio ciclo. La corriente de falla a tierra es del orden de 1,207.19 Amp rms, tal como se observa en la **Fig. 4.7**. De igual manera que la tensión de línea a tierra, la corriente de falla se disipa en cada medio ciclo. Las mediciones se realizaron en el bus de sincronización, en los tableros de distribución, en los tableros de los transformadores de enlace y en los neutros.

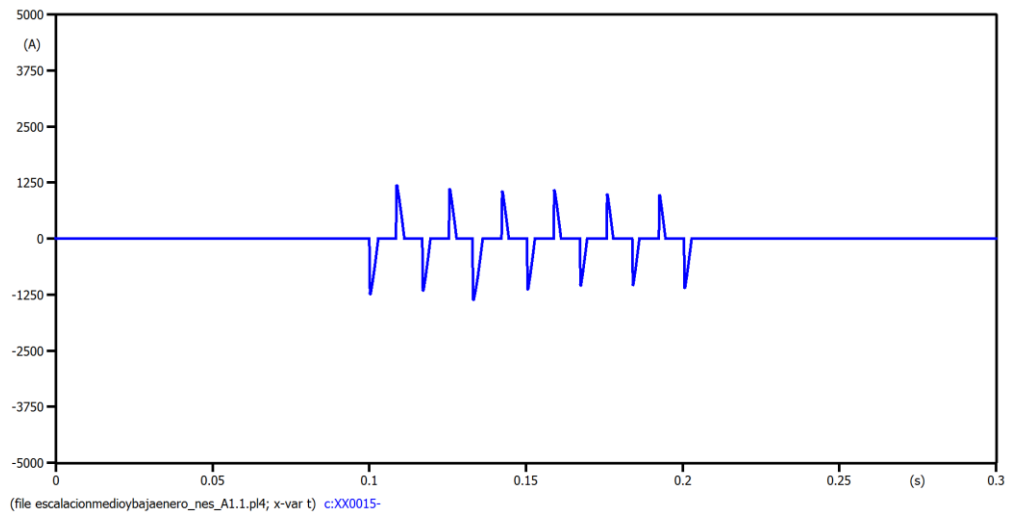


**Fig. 4.4.** Comportamiento de la tensión de línea cuando se presenta una falla a tierra intermitente. Neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de 13.2  $\Omega$ .





**Fig. 4.5.** Comportamiento de la tensión de fase cuando se presenta una falla intermitente. Neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .



**Fig. 4.6.** Comportamiento de la corriente de falla a tierra, cuando se presenta una falla intermitente. Neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .

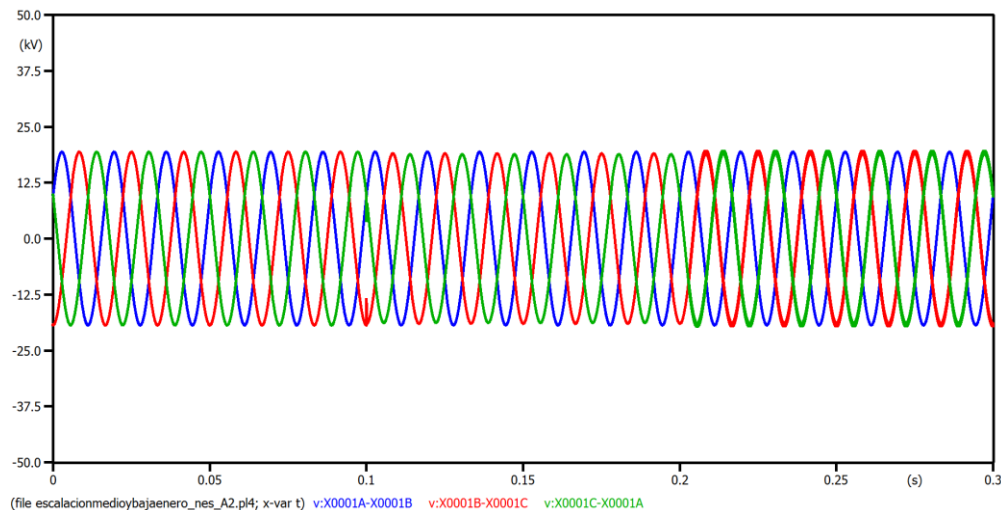
#### **4.4. Escenario A3. Falla a tierra franca en un sistema con un neutro conectado a tierra**

Se consideró lo siguiente:

1. TG-1 y TG-2 en operación, sincronizados con el T-1.
2. El neutro del TG-1 conectado a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ ; mientras que el neutro del TG-2 se encuentra desconectado de tierra. Para fines de simulación se consideró una impedancia de conexión a tierra de  $1 M\Omega$ .
3. El neutro de los transformadores T-1 y T-2 desconectados de tierra. Para fines de simulación se consideró una impedancia de conexión a tierra de  $1 M\Omega$ .
4. La pantalla de los cables de potencia, se consideró conectada a tierra en ambos extremos para el flujo de la corriente de falla a tierra.
5. La distancia máxima entre subestaciones aledañas es de 5 km.
6. No existe neutro corrido.
7. El intervalo de tiempo analizado es de 0.30 s.
8. Se simuló una falla a tierra franca en la Fase C, en el instante de 0.10 s, con resistencia de falla con un valor muy próximo a cero  $10^{-7} \Omega$ . La falla se localiza en el alimentador a la SE-1 proveniente del tablero TDP-1 en 13.8 kV
9. La falla es liberada en un tiempo programado de 0.20 s.

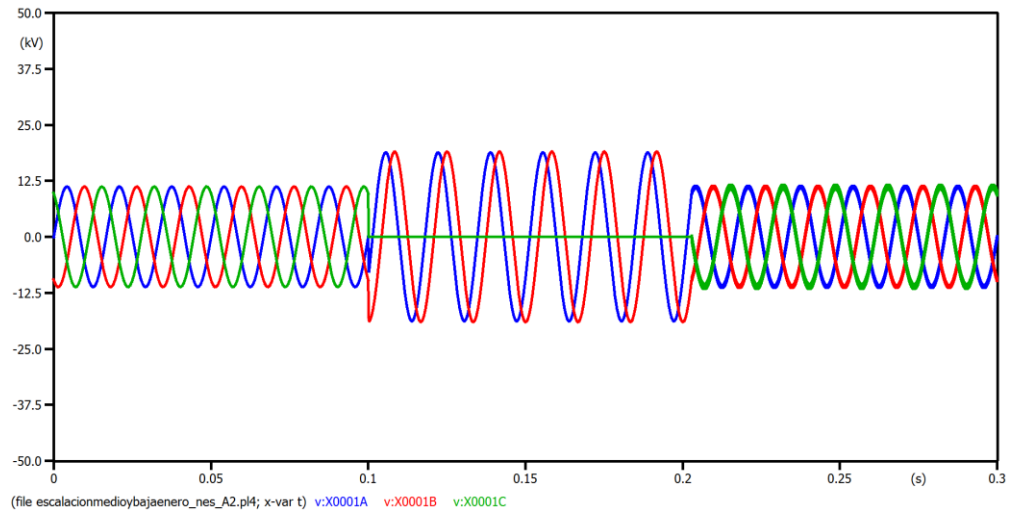
## Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos se muestran en las **Fig's. 4.8, 4.9 y 4.10**. En la **Fig 4.8** se observa la tensión de línea sin afectación. En la **Fig. 4.9** se muestran las tensiones de fase, con sobretensiones en las fases no falladas, por corrimiento del neutro. Estas sobretensiones son del orden de 1.73 veces (13.8 kV). La corriente de falla a tierra total, es del orden de 603.59 Amp rms, tal como se observa en la **Fig. 4.10**. Las mediciones se realizaron en el bus de sincronización, en los tableros de distribución, en los tableros de los transformadores de enlace y en los neutros.

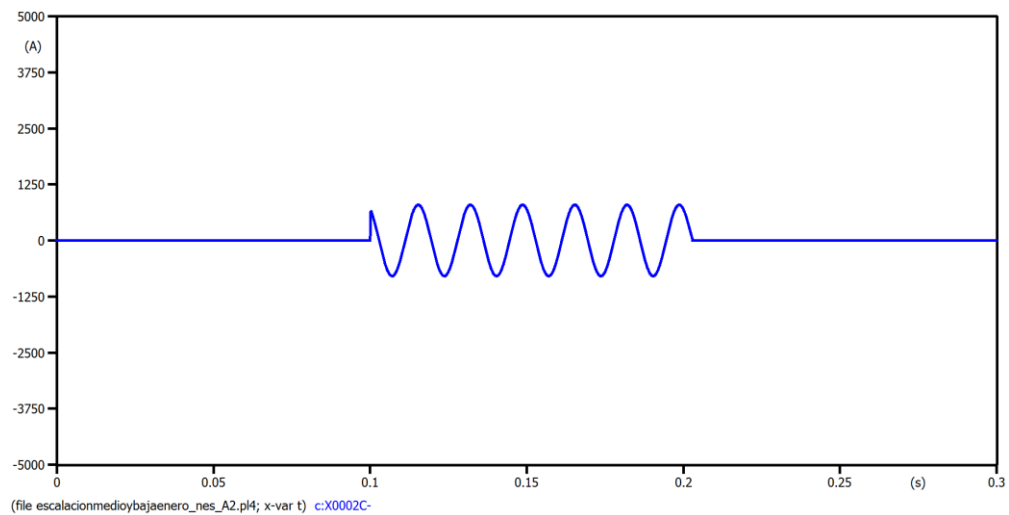


**Fig. 4.7.** Comportamiento de la tensión de línea cuando se presenta una falla franca.

Neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de 13.2  $\Omega$ .



**Fig. 4.8.** Comportamiento de la tensión de fase cuando se presenta una falla a tierra franca. Neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .



**Fig. 4.9.** Comportamiento de la corriente de falla a tierra, cuando se presenta una falla franca. Neutro del TG-1 conectado a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .

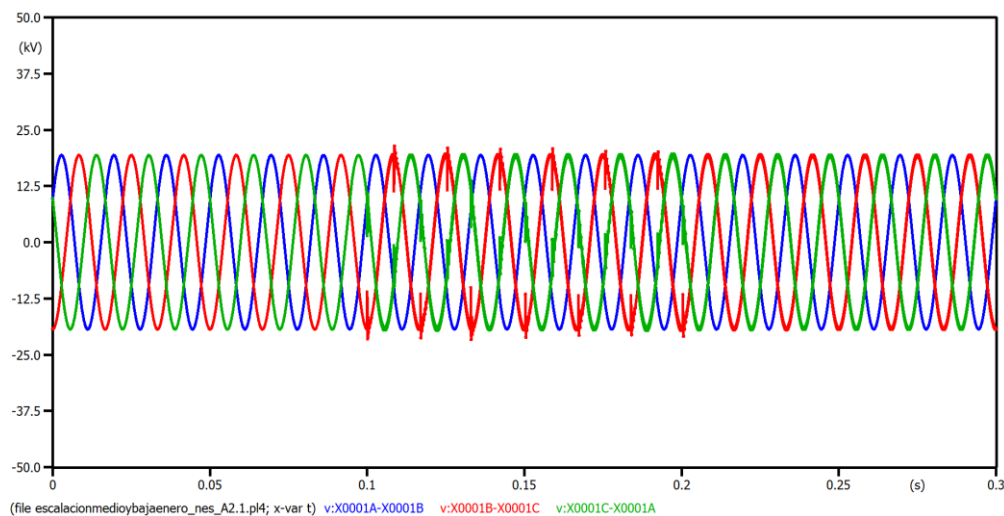
#### **4.5. Escenario A4. Falla a tierra intermitente en un sistema con un neutro conectado a tierra**

Se consideró lo siguiente:

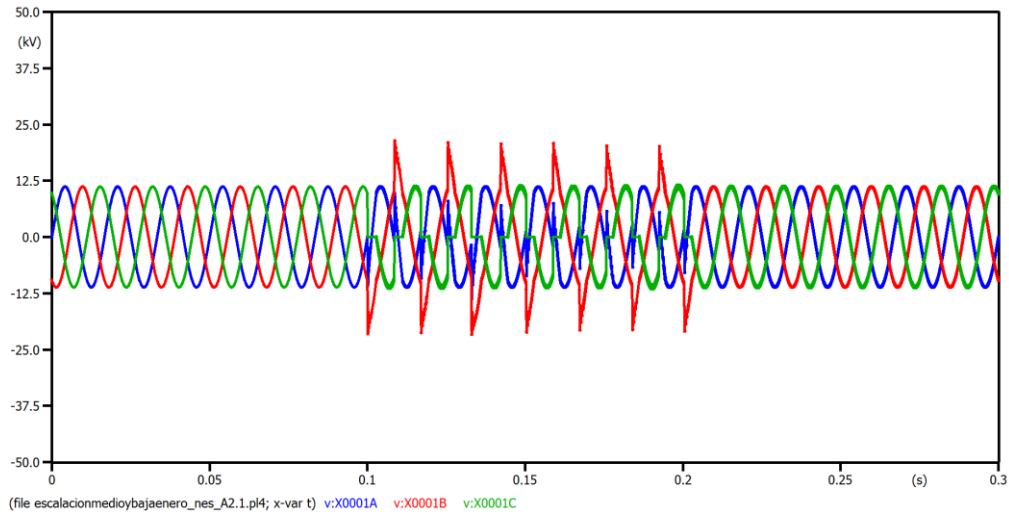
1. TG-1 y TG-2 en operación, sincronizados con el T-1.
2. El neutro del TG-1 conectado a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ ; mientras que el neutro del TG-2 se encuentra desconectado de tierra. Para fines de simulación se consideró una impedancia de conexión a tierra de  $1 M\Omega$ .
3. El neutro de los transformadores T-1 y T-2 desconectados de tierra. Para fines de simulación se consideró una impedancia de conexión a tierra de  $1 M\Omega$ .
4. La pantalla de los cables de potencia, se consideró conectada a tierra en ambos extremos para el flujo de la corriente de falla a tierra.
5. La distancia máxima entre subestaciones aledañas es de 5 km.
6. No existe neutro corrido.
7. El intervalo de tiempo analizado es de 0.30 s.
8. Una falla a tierra en la Fase C, en el instante de 0.10 s, con un acoplamiento capacitivo de  $3.32 \mu\text{f}$  y una corriente de carga de 10 A, el arco se disipa cada  $\frac{1}{2}$  ciclo. La falla se localiza en el alimentador a la SE-1 proveniente del tablero TDP-1 en 13.8 kV.
9. La falla es liberada en un tiempo programado de 0.1604 s.

## Resultados obtenidos

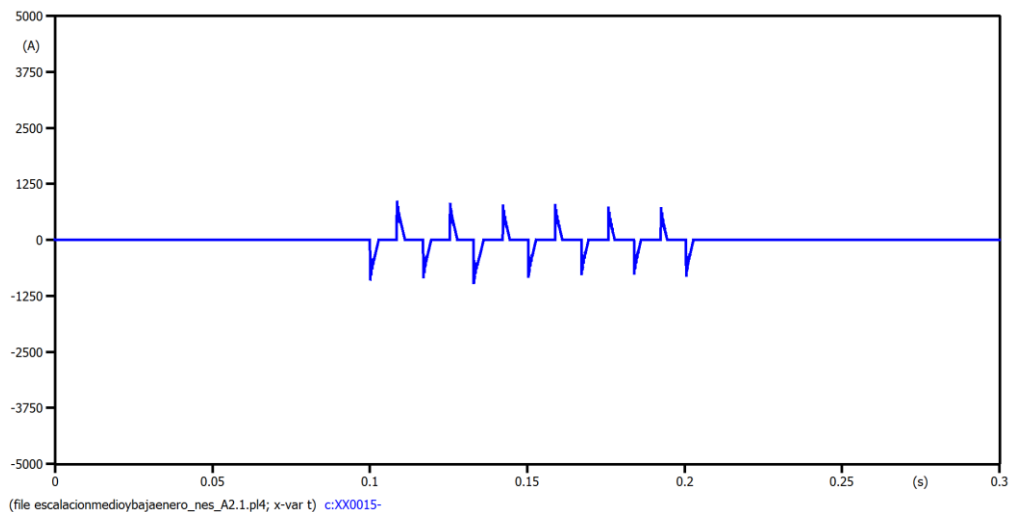
Los resultados se muestran en las **Fig's. 4.11, 4.12 y 4.13**. En la **Fig 4.11**, se observa la tensión de línea sin afectación. En la **Fig. 4.12** se muestran las tensiones de fase. Se observan sobretensiones, en la fase fallada, del orden de 1.5 p.u. (12 kV), que se disipan en menos de medio ciclo. La corriente de falla a tierra es del orden de 603.59 Amp rms, tal como se observa en la **Fig. 4.13**. Al igual que la tensión de línea a tierra, la corriente de falla a tierra, se disipa en medio ciclo. Las mediciones se realizaron en el bus de sincronización, en los tableros de distribución, en los tableros de los transformadores de enlace y en los neutros.



**Fig. 4.10**, Comportamiento de la tensión de línea cuando se presenta una falla intermitente, el neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de 13.2  $\Omega$ .



**Fig. 4.11,** Comportamiento de la tensión de fase cuando se presenta una falla intermitente, el neutro del TG-1 y T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .



**Fig. 4.12.** Comportamiento de la corriente cuando se presenta una falla a tierra intermitente. el neutro del TG-1 y del T-1 conectados a tierra a través de una resistencia de  $13.2 \Omega$ .

#### 4.6. Escenario A5. Falla a tierra franca en un sistema con el neutro flotado

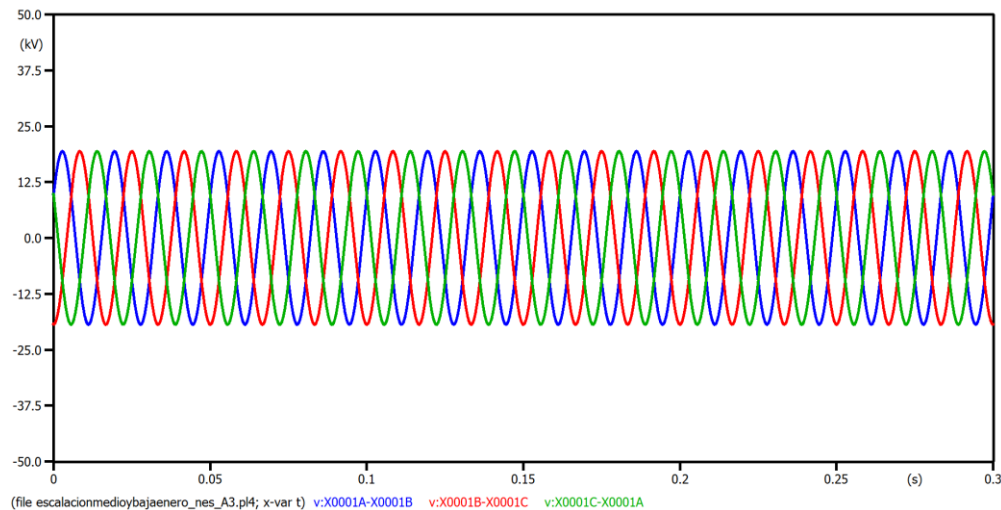
Se consideró lo siguiente:

1. TG-1 y TG-2 en operación, sincronizados con el T-1.
2. El neutro del TG-1 y del TG-2 desconectados de tierra. Para simular esta condición, se consideró una impedancia de  $1 \text{ M}\Omega$  de conexión a tierra.
3. El neutro de los transformadores T-1 y T-2 se encuentran desconectados de tierra. Para simular esta condición, se consideró una impedancia de  $1 \text{ M}\Omega$  de conexión a tierra.
4. La pantalla de los cables de potencia, se consideró conectada a tierra en ambos extremos, para el flujo de la corriente de falla a tierra.
5. La distancia máxima entre las subestaciones aledañas es de 5 km.
6. No existe neutro corrido.
7. El intervalo de tiempo analizado es de 0.30 s.
8. Se simuló una falla a tierra franca en la Fase C, en el instante de 0.10 s, con resistencia de falla con un valor muy próximo a cero  $10^{-7} \Omega$ . La falla se localiza en el alimentador a la SE-1 proveniente del tablero TDP-1 en 13.8 kV
9. La falla es liberada en un tiempo programado de 0.20 s.

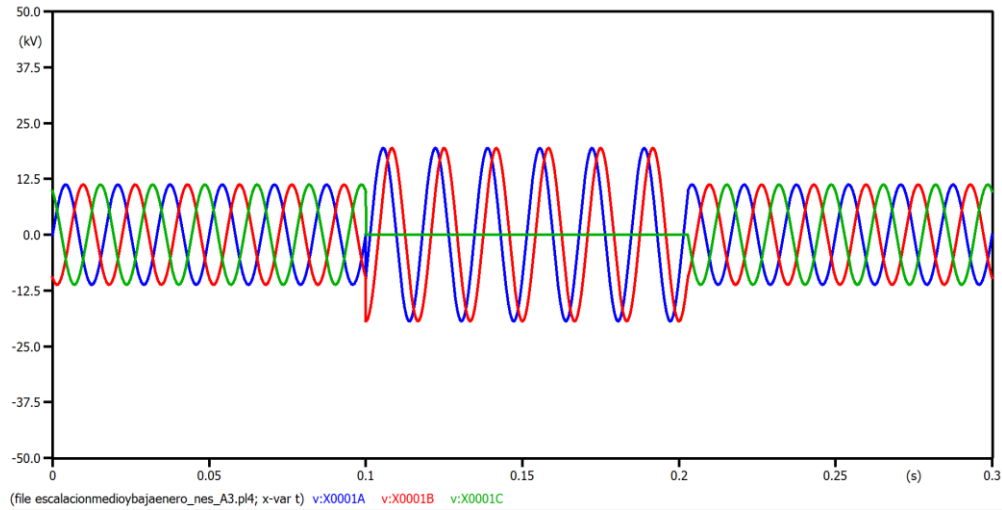


## Resultados obtenidos

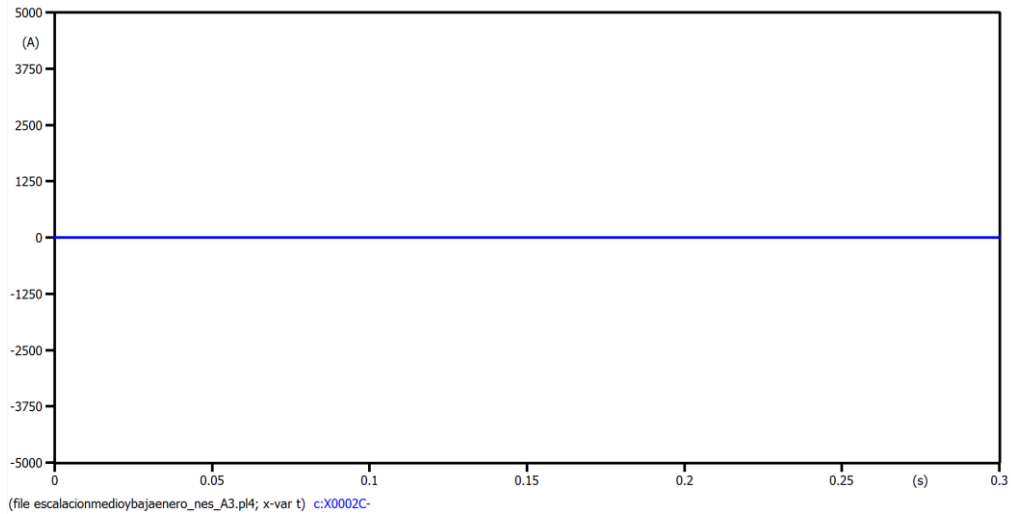
Los resultados se muestran en las **Fig's. 4.14, 4.15 y 4.16**. En la **Fig 4.14**, se observa la tensión de línea sin afectación. En la **Fig. 4.15** se muestran las tensiones de fase. Se observa sobretensión en las fases no falladas, del orden de 1.73 p.u. (13.8 kV). Estas sobretensiones son ocasionadas por corrimiento del neutro. La corriente por falla a tierra es del orden de 0 Amp rms, tal como se observa en la **Fig. 4.16** Las mediciones se realizaron en el bus de sincronización, en los tableros de distribución, en los tableros de los transformadores de enlace y en los neutros.



**Fig. 4.13.** Comportamiento de la tensión de línea, cuando se presenta una falla franca a tierra, en un sistema eléctricamente flotado.



**Fig. 4.14.** Comportamiento de la tensión de línea, cuando se presenta una falla franca a tierra, en un sistema eléctricamente flotado.



**Fig. 4.15.** Comportamiento de la corriente de falla a tierra, cuando se presenta una falla a tierra franca, en un sistema eléctricamente flotado.

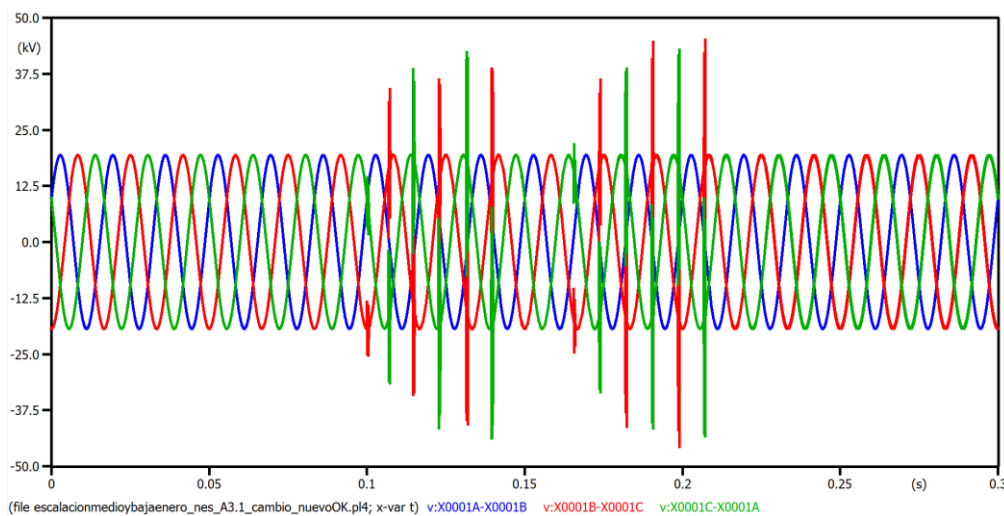
#### 4.7. Escenario A6. Falla a tierra intermitente en un sistema con el neutro flotado

Se consideró lo siguiente:

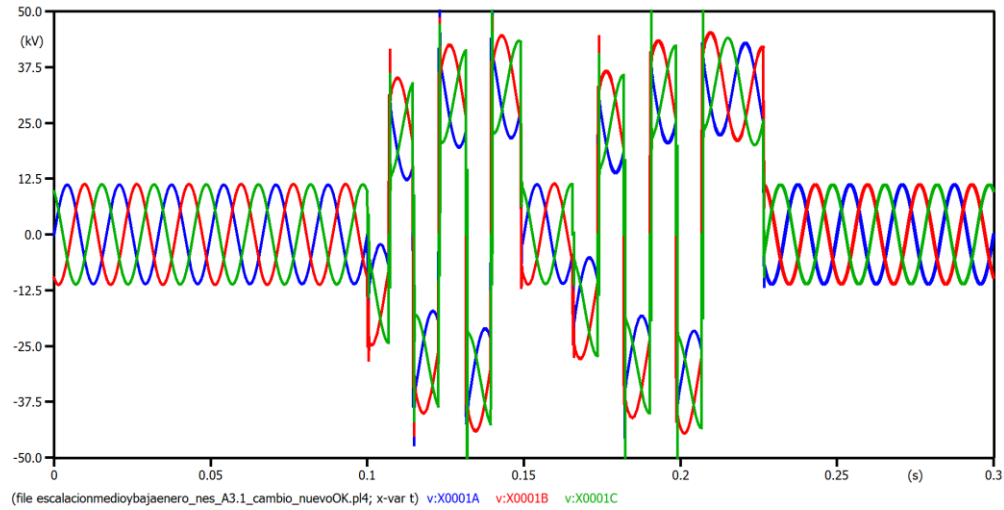
1. TG-1 y TG-2 en operación, sincronizados con el T-1.
2. El neutro del TG-1 y del TG-2 desconectados de tierra. Para simular esta condición, se consideró una impedancia de  $1\text{ M}\Omega$  de conexión a tierra.
3. El neutro de los transformadores T-1 y T-2 se encuentran desconectados de tierra. Para simular esta condición, se consideró una impedancia de  $1\text{ M}\Omega$  de conexión a tierra.
4. La pantalla de los cables de potencia, se consideró conectada a tierra en ambos extremos, para el flujo de la corriente de falla a tierra.
5. La distancia máxima entre las subestaciones aledañas es de 5 km.
6. No existe neutro corrido.
7. El intervalo de tiempo analizado es de 0.30 s.
8. Se simuló una falla a tierra intermitente en la Fase C, en el instante de 0.10 s, con un acoplamiento capacitivo de  $3.32\text{ }\mu\text{f}$  y una corriente de carga de 10 A, el arco se disipa en un tiempo de  $\frac{1}{2}$  ciclo. La falla se localiza en el alimentador a la SE-1 proveniente del tablero TDP-1 en 13.8 kV.
9. La falla es liberada en un tiempo programado de 0.2071 s.

## Resultados obtenidos

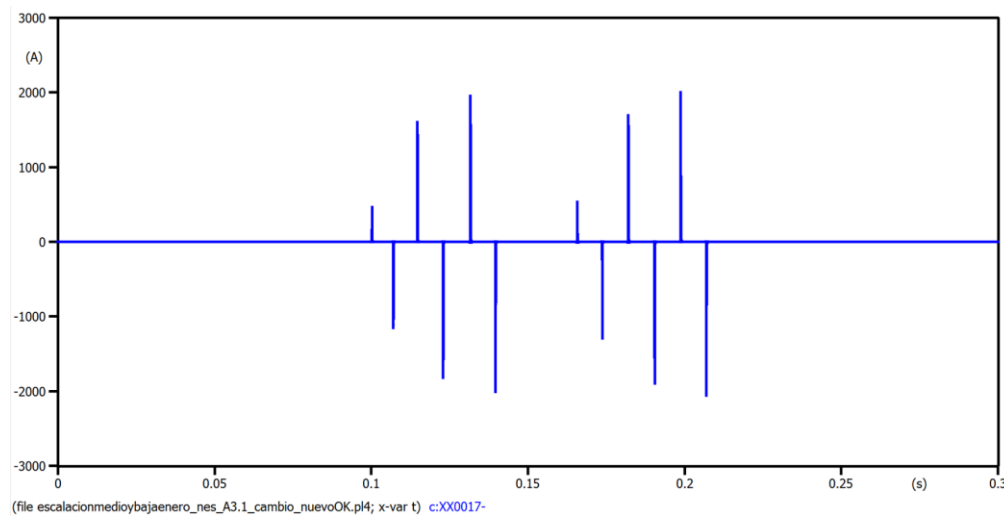
Los resultados se muestran en las **Fig's. 4.17, 4.18 y 4.19**. En la **Fig 4.17** se observa la tensión de línea sin afectación. En la **Fig. 4.18** se muestran las tensiones de fase. Se observan sobretensiones, en la fase fallada, del orden de 5.42 p.u. (43.3 kV). Esto se debe al recorrido del neutro en cada medio ciclo. La corriente por falla a tierra es del orden de 2,494.02 Amp rms, tal como se observa en la **Fig. 4.19**. De igual manera que las sobretensiones de línea a tierra, la corriente de falla a tierra también se va incrementando cada medio ciclo. Las mediciones se realizaron en el bus de sincronización, en los tableros de distribución, en los tableros de los transformadores de enlace y en los neutros.



**Fig. 4.16.** Comportamiento de la tensión de línea sin conexión de neutros a tierra presentando una falla intermitente a tierra.



**Fig. 4.17.** Comportamiento de la tensión de línea sin conexión de neutros a tierra presentando una falla intermitente a tierra.



**Fig. 4.18.** Comportamiento de la corriente en el neutro, sin conexión del neutro a tierra con una falla intermitente a tierra en el sistema.

#### 4.1. Discusión de resultados

En la **Tabla 4.1** se describe un resumen de los resultados obtenidos en el análisis de los seis escenarios evaluados, identificando como caso crítico el no contar con la conexión del neutro a tierra en un sistema eléctrico de media tensión, donde se identificó la escalación de tensiones debido a fallas intermitentes a tierra.

**Tabla 4.1** Análisis de resultados de acuerdo al tipo de falla presente y su método de conexión del neutro a tierra

Características	A1) Falla a tierra franca en un sistema con dos neutros conectados a tierra con baja resistencia.	A2) Falla a tierra intermitente en un sistema con dos neutros conectados a tierra con baja resistencia.	A3) Falla a tierra franca en un sistema con un neutro conectado a tierra con baja resistencia.	A4) Falla a tierra intermitente en un sistema con un neutro conectado a tierra con baja resistencia.	A5) Falla a tierra franca en un sistema con el neutro flotado.	A6) Falla a tierra intermitente en un sistema con el neutro flotado.
Corriente Máxima de falla	1,207.19 Amp	1,207.19 Amp	603.59 Amp	603.59 Amp	0 Amp	2,494.02 Amp
Tensión Máxima en las fases no falladas	13.8 kV	12 kV	13.8 kV	12 kV	13.8 kV	48 kV
Tensión en la fase fallada	0 V	12 kV	0 V	12 kV	0 V	48 kV
Sobretensiones presentes	Recorrimiento del neutro	Sobretensión transitoria	Recorrimiento del neutro	Sobretensión transitoria	Recorrimiento del neutro	Escalación de tensión
Continuidad del servicio	Regular	Regular	Regular	Regular	Buena hasta 1 hora	Mala
Ocurrencia de una posible segunda falla	Baja	Baja	Media	Media	Alta	Alta
Daño por falla a tierra	Baja	Baja	Media	Media	Alta	Alta
Localización de la falla a tierra	Buena	Buena	Buena	Buena	Nula	Nula

## 5. CAPÍTULO 5

### *CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES*

---

#### **5.1. Introducción**

En este Capítulo se presentan las conclusiones de esta tesis. También se presentan sus aportaciones y las recomendaciones para trabajos futuros.

#### **5.2. Conclusiones**

Con los modelos desarrollados y con los análisis de simulación realizados, se puede concluir lo siguiente:

- Se determinó que, cuando ocurre una falla a tierra franca, en un sistema industrial, con su neutro conectado a tierra con baja resistencia, se genera una sobre tensión de 1.73 p.u, en las fases no falladas. Sin embargo, como la protección de sobre corriente detecta la falla a tierra y la libera, las sobre tensiones en las fases no dañadas, se eliminan rápidamente, sin ocasionar daños.
- Si se presenta una falla a tierra franca, en un sistema industrial, con su neutro flotado, se genera una sobre tensión de 1.73 p.u, en las fases no falladas. Sin embargo, como la protección de sobre corriente no detecta la falla a tierra y no la libera, las sobre tensiones en las fases no dañadas, permanece peligrosamente. Esto puede ocasionar una segunda falla en bancos de capacitores o en apartarrayos.



- Si ocurre una falla del tipo intermitente, en un sistema con el neutro conectado a tierra con baja resistencia, se presenta una sobre tensión en la fase que tiene la falla intermitente, menor de 1.73 p.u. También circulan a tierra, pulsos de corriente, generados por la falla. Estos pulsos no tienen una forma sinusoidal, por lo que no son detectados por las protecciones de sobre corriente. Sin embargo, pueden ocasionar el disparo en falso de esquemas diferenciales.
- Se determinó que las sobretensiones del orden de 6 p.u. en plantas industriales, de media tensión, son ocasionadas por el fenómeno de escalación de tensiones.
- El fenómeno de escalación de tensiones se presenta en un sistema eléctrico de potencia, sí y solo sí, ocurre una falla a tierra del tipo intermitente, estando el sistema con su neutro, sin conexión a tierra.
- La escalación de tensiones se genera por el acoplamiento capacitivo de la corriente de falla a tierra, la cual va cargando la capacitancia del sistema, que aunado al corrimiento del neutro va incrementando la tensión en las tres fases y en el neutro.
- El acoplamiento capacitivo a tierra, en un sistema flotado, está determinado por la reactancia capacitiva  $X_{Co}$ , representada por la capacitancia del sistema ( $C_o$ ), considerando la capacitancia de los devanados del generador, de los cables de potencia y la capacitancia de los capacitores supresores de transitorios.
- Los resultados indican que, para una corriente de carga del orden de 5 a 10 amp, con una capacitancia  $C_o$  de 1.66 a 3.33  $\mu\text{f}$ , en el nivel de media tensión de

13.8 kV, se puede generar el fenómeno de escalación de tensiones, con magnitudes del orden de 39.83 kV (5 p.u.) de fase.

- Las tensiones de fase, se escalan en las tres fases y en el neutro. En la fase, que presentó la falla a tierra inicial, la tensión de fase, se incrementa hasta 6 p.u. En las fases no falladas, la escalación de la tensión de fase alcanza valores hasta de 4.5 p.u. Finalmente, el neutro adquiere una sobre tensión hasta de 5 p.u.
- Los arcos eléctricos, de una falla intermitente, se auto extinguen, por lo que la falla aparece y desaparece cada medio ciclo.
- Finalmente, se concluye que, al conectar una impedancia en el neutro permanentemente, se elimina el riesgo de escalación de tensión. Sin embargo, se debe contar solo con dos puntos de conexión a tierra del neutro mediante baja impedancia para la operación de las protecciones de sobre corriente y se debe integrar una conexión permanente en paralelo de una alta impedancia en todos los neutros del sistema eléctrico de un centro Industrial.

### **5.3. Aportaciones**

**Las aportaciones principales de este trabajo de investigación son:**

- Se ha mostrado la forma en la cual puede presentarse el fenómeno de escalación de tensión en el sistema eléctrico de potencia de un Centro Industrial, con su neutro temporalmente aislado de tierra. Se determinó la magnitud de la sobretensión.

- Se desarrolló un modelo que sirve para el análisis de escalación de tensiones en cualquier sistema de potencia en media tensión el cual puede ser utilizado como mecanismo para evaluar las sobretensiones presentes en una falla intermitente a tierra.
- Se presenta un esquema de implantación viable para la interconexión del equipo primario de los centros Industriales con fuentes de generación y conexión con la red pública. El objetivo de este esquema consiste en asegurar que el neutro, en todos los niveles de tensión, permanezca conectado a tierra durante su operación normal y ante perturbaciones del sistema. De este modo se evita que el sistema eléctrico opere sin referencia a tierra, lo cual puede inhibir la presencia de sobretensiones por escalación de tensión.

#### **5.4. Recomendaciones para trabajos futuros**

Con base en los resultados obtenidos en este estudio, se establecen las siguientes recomendaciones:

- Los eventos que han ocurrido indican que la escalación de tensión genera sobretensiones del orden de 48 kV. Sería conveniente contar con equipo de medición en línea, para validar estas mediciones y también validar los resultados mostrados en esta tesis.
- Para mantener el neutro de un generador “flotado”, en las simulaciones en ATPDraw se utilizó una resistencia de 1 M $\Omega$ , pero en realidad en el neutro existe

un cable de energía. Por lo cual sería conveniente analizar el efecto que tiene la capacitancia de dicho cable en los resultados que se obtuvieron.

- Adicionalmente, sería conveniente determinar un esquema de protección el cual permita la operación ante sobretensiones por el fenómeno de escalación de tensión de acuerdo a la literatura especializada analizada en esta tesis [54] se recomienda la utilización de protecciones direccionales como la función 32U para sistemas que no cuentan con la conexión de su neutro a tierra.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] By Nehad El-Sherif and Sheldon P. Kennedy, “A Design Guide to Neutral Grounding of Industrial Power Systems,” 2019 IEEE Industry Applications Magazine
- [2] Aparaschivei A., Steglich M., Chiriac G., Lucache D. D., Root-Cause Analysis of Cascaded Ground Faults on an Ungrounded Distributed Network, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, October 20-22, Iasi, Romania (2016)
- [3] Transient Overvoltages on Ungrounded Systems from Intermittent Ground Faults, May 11, 2009.
- [4] Gajjar G., Kulkarni M., Soman S.A., Interaction of Capacitor Bank Inrush Current Limiting Reactor and Medium Voltage Vacuum Circuit Breakers, International Conference on Power System Transients, July (2013).
- [5] García A., Zapata M.A., Estrada J.A y García J., Sobretensiones en Arrancadores con Autotransformador Causadas por la Desconexión del Interruptor Principal en el Arranque de los Motores. Información tecnológica, Vol. 29, No. 3, pp155-166. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000300155> (2018).
- [6] I-gard, Ground Fault Protection on Ungrounded and High Resistance Grounded Systems, C-400EA Application Guide, Tabla 2.1, pp 50, February 2015.
- [7] Argaup P. et all, CIGRE, Working Group B1.19, General Guidelines for the Integration of a New Underground Cable System in the Network, August (2004)
- [8] Dr. Arturo Galván Diego, Curso SPT Cimemor: Fallas, TIPOS DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS, 2010.
- [9] CFE, Construcción de Sistemas Subterráneos, ESPECIFICACIÓN CFE DCCSSUBT, enero 2015.
- [10] F.M. Gatta, A. Geri, S. Lauria, and M. Maccioni, “Analytical prediction of abnormal temporary overvoltages due to ground faults in MV networks,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 77, no. 10, pp. 1305–1313, August 2007.
- [11] Calone R., Cerretti A., Gatta F. M., Abnormal Ground Fault Overvoltages in MV Networks: Analyses and Experimental Tests, CIGRE 21, 21st International Conference on Electricity Distribution, Paper 0511, Frankfurt, June 6-9 (2011).
- [12] R. Rüdenberg. *Transient Performance of Electric Power Systems*. Ed. Mc Graw Hill. USA, 1950.
-

- [13] Mircea P.M., Ursu D., Marin I., Mircea I. y Buzatu G.C, Analisis of Overvoltages Ocurring at Grounding Faults in a Medium Voltage Network Depending on the Neutral Treatment, Journal of Sustainable Energy, Vol. 8, No.3, September (2017).
- [14] R. L Boylestad. Análisis introductorio de circuitos. Octava edición. Ed. Prentice Hall, México, 1998.
- [15] F. Crespo. Sobretensiones en las Redes de Alta Tensión. Asinel. España, 1975.
- [16] Bonneville Power Administration, “Rule Book of EMTP”. 1983.
- [17] Hermann W. Dommel, “EMTP Theory Book”. Microtran Power System Analysis Corporation. Segunda edición, mayo 1992.
- [18] J. García Paredes, O. A. Reyes Martínez, F. Javier Martínez Vallejo y P. Montes. “Fallas en transformadores de potencial en conexión delta abierta”. Decimaquinta Reunión de Verano de Potencia RVP, IEEE Sección México, Julio 2002, Acapulco, Gro.
- [19] García J, Reyes O. A. y OLGUIN D., Sobretensiones por Resonancia Serie en el Sistema de Potencia de Plantas Petroquímicas. Información Tecnológica, Vol. 16, No. 6, pp. 43-49, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642005000600008> (2005).
- [20] Rodríguez J., Pontt J., Silva C., Musalem R., Newman P., Vargas R., Fuentes S., Resonances and Overvoltages in a Medium-Voltage Fan Motor Drive with Long Cables in an Underground Mine, IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 42, May-June (2006).
- [21] Dunki-Jacobs J. R., The Historical Development of Neutral Grounding Practice, IEEE Industry Applications Magazine, March-April (1977).
- [22] E. J. Currence, J. E. Plizga and H. N. Nelson. “Harmonic resonance at a medium-sized industrial plant”. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 4, July-August 1995, pp. 682-690.
- [23] Zhang Z., Xie Y., Jiang F., Guo D., Study on the Intermittent Arc-Grounding Fault Feeder Selection, IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 27-29, 2012.
- [24] H. Fujita, T. Yamasaki and H. Akagi. “A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power systems”. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 15, No. 2, March 2000, pp. 215-222.
- [25] E. L. Brancato. “Insulation aging, a historical and critical review”. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-13, No. 4, August 1978. pp. 308-317.
- [26] S. Rengarajan and M. D. Agrawal. “Accelerated aging of high voltage machine insulation under combined thermal and electrical stresses”. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report IEEE 1983, pp. 129-134.
-

- [27] P. O. Bobo, J. W. Skooglund and C. L. Wagner. "Performance of excitation systems under abnormal conditions". IEEE Transactions on Power Applications and Systems, Vol. PAS-87, No. 2, February 1968, pp. 547-553.
- [28] I. Rosales, et al. "Interconexión de centros industriales con la red eléctrica del servicio público". Boletín IIE, Vol. 24, No. 1, enero-febrero 2000, pp. 42-48.
- [29] A. García. "Deterioro térmico de los generadores con rotores de polos lisos ocasionado por flujo disperso". Decimasexta Reunión de Verano de Potencia RVP, IEEE Sección México, Julio 2003, Acapulco, Gro.
- [30] A. Greenwood. Electrical Transients in Power Systems. Second edition. Ed. John Wiley and Sons, 1991.
- [31] N. Aspragathos and A. Dimarogonas. "The effects of some system parameters on the fatigue life reduction of turbine-generator shafts due to electrical transients". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 8, August 1984, pp. 2308-2317.
- [32] J. S. Joyce, T. Kulling and D. Lambrech. "Torsional fatigue of turbine-generator shafts caused by different electrical systems faults and switching operations". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 5, September-October 1978, pp. 1965-1977.
- [33] W. H. Hayt and J. E. Kemmerly. Análisis de Circuitos en Ingeniería. Cuarta edición. Ed. Mc Graw Hill, Colombia, 1990.
- [34] R. D. Strum and J. R. Ward. Electric Circuits and Networks. Ed. Quantum. USA, 1973.
- [35] P. S. Bodger y T. B. Norriss. "Ripple control interference at irrigations installations". IEE Proceedings, Vol. 135, Pt. C, No. 6, November 1988, pp. 494-500.
- [36] L. A. Kraft y G. T. Heydt. "A method to analyze voltage resonance in power systems". IEEE Transactions on Power Apparatus an Systems, Vol. PAS-103, No. 5, May 1984, pp. 1033-1037.
- [37] R. Reid. "AC high voltage resonant testing". IEEE PES Winter Meeting, New York, N.Y. January 27 –February 1, 1974.
- [38] IEEE Standard 141-1993, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
- [39] IEEE Standard 142-2007, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.
- [40] IEEE Standard 242-2001, IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems
- [41] IEEE Std 241-1990, IEEE Recommended Practice for Electric Systems in Commercial Buildings.
-

- [42] IEEE Std C62.92.4-2014, IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems--Part IV: Distribution (2014).
- [43] National Electrical Code National – National Fire protection Association 70.
- [44] IEC 61936-1, Power installations exceeding 1 kV a.c. – Part 1: Common rules, 2010.
- [45] IEC 60364-1, Electrical installations of buildings – Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions, 2005.
- [46] J. R. Dunki-Jacobs, “State of the art of grounding and ground fault protection”. IEEE 24<sup>th</sup> Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Dallas, TX, September 12-14, 1977.
- [47] L. W. Manning, “Industry power systems grounding practices”. Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, Philadelphia, PA, October 1964.
- [48] D.D. Shipp and F.J. Angelini. “Characteristics of different power systems grounding techniques: facts and fiction”. IEEE 1991 Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference, Greenville, SC, USA, May 8-9, 1991, pp. 1535 – 1544.
- [49] J. P. Nelson. “System grounding and ground-fault protection in the petrochemical industry: a need for a better understanding”. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 6, November-December 2002, pp. 1633-1640.
- [50] V. Brandwajn and H. W Dommel. “A new method for interfacing generator models with an electromagnetic transients program”. Proceeding of Power Industry Computer Applications Conference (PICA), Toronto, Ontario, Canada, May 1977. pp. 260-265.
- [51] Tutorial on: “Modeling and analysis of system transients using digital programs”. IEEE PES Special Publication 99TP-133-0, 1998.
- [52] V. Brandwajn, H. W. Dommel and I. I. Dommel. “Matrix representation of three-phase N-winding transformers for steady-state and transient studies”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 6, June 1982, pp. 1369-1378.
- [53] V. Phaniraj and A. G. Phadke. “Modelling of circuit breakers in the electromagnetic transients program”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1988, pp. 799-805.
- [54] Daqing Hou, Héctor J. Altuve, Normann Fischer, and Fernando Calero, “Selecting Directional Elements for Impedance-Grounded Distribution Systems”. 34th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 16–18, 2007.
-



## APÉNDICE A

### *Parámetros eléctricos de los equipos primarios del sistema de potencia de un centro industrial*

En este apéndice se presentan los parámetros de los equipos eléctricos descritos en el Capítulo 3 para ser utilizados en la simulación digital presentada en el Capítulo 4.

#### A.1 Generadores eléctricos

DESCRIPCION	UNIDADES	VALOR
Tensión nominal	kV	13.8
Frecuencia	Hz	60
Polos	Número	2
Potencia	MVA	44.5
Corriente de campo	A	100
Resistencia de la armadura	p.u.	0.013
Reactancia dispersa de armadura	p.u.	0.13
Reactancia síncrona eje $d$	p.u.	1.79
Reactancia síncrona eje $q$	p.u.	1.71
Reactancia transitoria eje $d$	p.u.	0.169
Reactancia transitoria eje $q$	p.u.	0.228
Reactancia subtransitoria eje $d$	p.u.	0.135
Reactancia subtransitoria eje $q$	p.u.	0.2
Constante de tiempo transitorio eje $d$	s	4.3
Constante de tiempo transitorio eje $q$	s	0.85
Constante de tiempo subtransitorio eje $d$	s	0.032
Constante de tiempo subtransitorio eje $q$	s	0.05
Reactancia de secuencia cero	p.u.	0.13
Capacitancia por fase	nF	100

## A.2 Transformadores

DATOS	UNIDADES	VALOR
Resistencia en la rama de magnetización	Ohm	$1 \times 10^{-12}$
Resistencia en el devanado primario	Ohm	0.3
Inductancia en devanado primario	mH	295.7
Voltaje nominal en devanado primario	kV	115
Resistencia en devanado secundario	Ohm	0.022
Inductancia en devanado secundario	mH	21.59
Voltaje nominal en devanado secundario	kV	13.8

## A.3 Cables

DATOS	UNIDADES	VALOR
Calibre	kCM	750
Reactancia independiente de la frecuencia por fase	Ohm/km	0.8748
Radio externo del conductor por fase	cm	0.0203
Resistencia del conductor por fase	Ohm/Km	0.2494
Distancia de enterramiento del cable	cm	85.344
Capacitancia	nF/m	0.333

## A.4 Carga

DATOS	UNIDADES	VALOR
Potencia activa	kW	807
Potencia reactiva	kVAR	578.5
Resistencia por fase	Ohm	111.2375
Inductancia por fase	mH	411.63
Capacitancia por fase	$\mu$ F	0

## APÉNDICE B

### *Características y uso del ATPDraw*

---

#### **B.1 Introducción**

En esta sección, se describe brevemente el uso del ATPDraw, para el análisis de transitorios en sistemas de potencia industriales.

El Programa Alternativo para Transitorios denominado ATPDraw (Alternative Transient Program), es un programa digital gráfico, utilizado para realizar la simulación de eventos transitorios electromagnéticos, electromecánicos y de sistemas de control en sistemas eléctricos de potencia polifásicos. El ATPDraw para Windows es un preprocesador gráfico (mouse- driven), para la versión ATP del programa de Transitorios Electromagnéticos (EMTP). Este programa ayuda a crear y editar el modelo de la red eléctrica que será simulada interactivamente. En este programa, el usuario construye un circuito eléctrico seleccionando los componentes predefinidos en un menú. El preprocesador crea el archivo de entrada del ATP en el formato correcto. El nombre de los nodos del circuito es administrado por el ATPDraw y el usuario solo necesita describir el nombre a nodos claves.

Para resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales, en el dominio del tiempo de los componentes del sistema eléctrico a simular, se utiliza la regla trapezoidal.

#### **B.2 Requerimientos de hardware y software para ATPDraw**

Para computadoras personales con microprocesadores Pentium, el hardware y software requerido es:

- Microprocesador
  - Sistema operativo MS-Windows 9x/NT/2000/XP/Vista/Windows7/10
  - Memoria 500 MB o superior
  - Disco duro de 40 MB
-

### **B.3 Instalación del software**

EL ATPDraw es distribuido gratuitamente. A través de Internet, se puede solicitar una licencia para fines de estudio o investigación no lucrativos. La autorización de la licencia está coordinada dentro de un grupo de usuarios; para el caso de México las licencias están coordinadas por el grupo de usuarios Canadiense/Americano.

El conjunto de archivos que corresponden a este programa vienen dados en formato \*.zip. Se cuenta con un archivo INSTALAR.TXT, que proporciona las instrucciones de instalación. A continuación, se enlista el procedimiento para instalar correctamente la versión 3.6 de ATPDraw:

1. Generar una carpeta temporal en C:\
2. En la carpeta ATP de los archivos de instalación y recopilación de versiones y documentación se encuentra el archivo ATPDRAW35.ZIP. Descomprimirlo en la carpeta temporal que se generó en el punto 1.
3. Una vez descomprimido el archivo, en la carpeta temporal usar el instalador para cargar ATPDraw. Al preguntar el programa la ruta de instalación, evitar usar nombres separados con espacios. Se recomienda generar una ruta de instalación dada por: C:\ATPDRAW.
4. Terminado el proceso de instalación, se ejecuta el programa ATPDRAW. La primera vez que se realiza esto, el programa solicita la confirmación de la creación de varios directorios básicos para el funcionamiento del ATP. Contestar afirmativamente a cada pregunta.
5. Descomprimir el contenido de ATPDRAW35P6.ZIP en la ruta de instalación seleccionada por el usuario (si se siguió la recomendación será C:\ATPDRAW). Responder afirmativamente a las preguntas sobre si desea sobre escribir estos archivos.
6. Descomprimir el contenido de ATPDRAW36.ZIP en la ruta de instalación seleccionada por el usuario (si siguió la recomendación será C:\ATPDRAW).

Responder afirmativamente a las preguntas sobre si desea sobre escribir estos archivos.

7. En la carpeta donde se están descomprimiendo los archivos de instalación generar las carpetas ATPGNU y VARIOS
  8. En la carpeta MINGW32 de los archivos de instalación suministrados se encuentra el archivo ATPMINGW.ZIP. Descomprimirlo en la carpeta ATPGNU.
  9. En la carpeta PLOTXY de los archivos de instalación suministrados se encuentra el archivo PLOTXY0300.ZIP. Descomprimirlo en la carpeta VARIOS.
  10. Ejecutar ATPDraw y abrir uno de los archivos de prueba. Esto permite acceder a los menús. En TOOLS/OPTIONS/PREFERENCES definir en ATP la ruta del archivo UNATP\_G.BAT como C:\ATPDraw\runATP\_G.bat (si se siguió la sugerencia de la ruta). Ahora definir en ARMAFIT la ruta correspondiente al archivo ARMAFIT.EXE. Este está ubicado en la carpeta ATPGNU. Si se siguió la sugerencia de ruta, será C:\ATPDRAW\ATPGNU\ARMAFIT.EXE.
  11. Abrir el menú ATP/EDIT COMMANDS. Aparecerá un panel en blanco. Pulsar el botón NEW para generar una nueva entrada. En NAME escribir RUN&ATP y en COMMAND escribir, C:\ATPDRAW\runATP\_G.bat, si se siguió la sugerencia de ruta. Marcar la casilla de CURRENT ATP. Pulsar UPDATE.
  12. Pulsar el botón NEW para generar una nueva entrada. En NAME escribir RUN ATP (file) y en COMMAND escribir C:\ATPDraw\runATP\_G.bat si se siguió la sugerencia de ruta. Marcar la casilla de FILE. Pulsar UPDATE.
  13. Pulsar el botón NEW para generar una nueva entrada. En NAME escribir RUN PLOTXY y en COMMAND escribir C:\ATPDraw\varios\PlotXY.exe, si se siguió la sugerencia de ruta. Marcar la casilla de CURRENT PL4. Pulse UPDATE.
  14. Este mismo procedimiento se repite para cada herramienta que se desea utilizar desde ATPDraw.
  15. En el menú TOOLS seleccionar SAVE OPTIONS.
-

16. Salir de ATPDraw.

17. Agregar las líneas: `path=%path%;c:\ATPDRAW\ATPGNU set  
gnudir=c:\ATPDRAW\ATPGNU\` en el archivo Autoexec.bat de la PC.

NOTA: Estas líneas son válidas si se siguió la sugerencia de la ruta de instalación. En caso contrario modificar las rutas propuestas en conveniencia con la ruta seleccionada.

18. Reinicializar la PC.

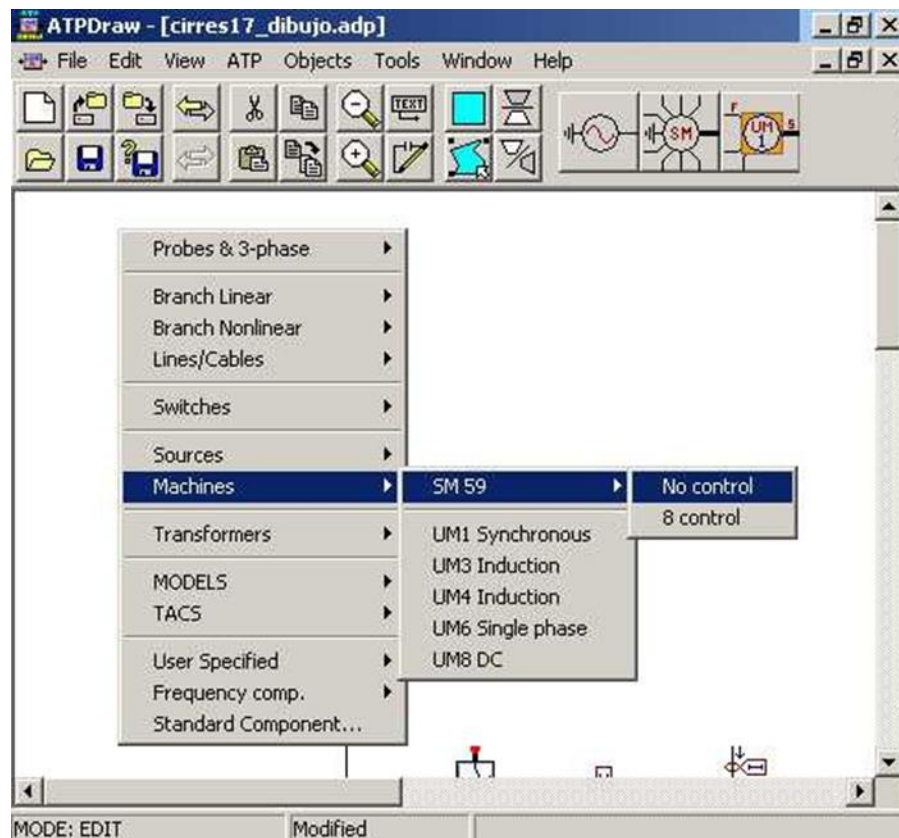
Después de ejecutar este procedimiento de instalación ya se puede comenzar a utilizar el software.

#### **B.4 Uso y manejo del ATPDRAW**

En esta sección, se describe la manera de ejecutar y utilizar ATPDraw mediante una computadora personal con “mouse”. Inicialmente, para ejecutar ATPDraw e iniciar un archivo nuevo, una vez abierta la pantalla principal del programa, se oprime FILE, luego NEW; aparece una pantalla color banco para iniciar la sesión de trabajo. Por otro lado, si ya se cuenta con un archivo existente, en la carpeta de “Projects” de ATPDraw, se ejecuta FILE y luego OPEN, seleccionando el archivo a visualizar en la pantalla.

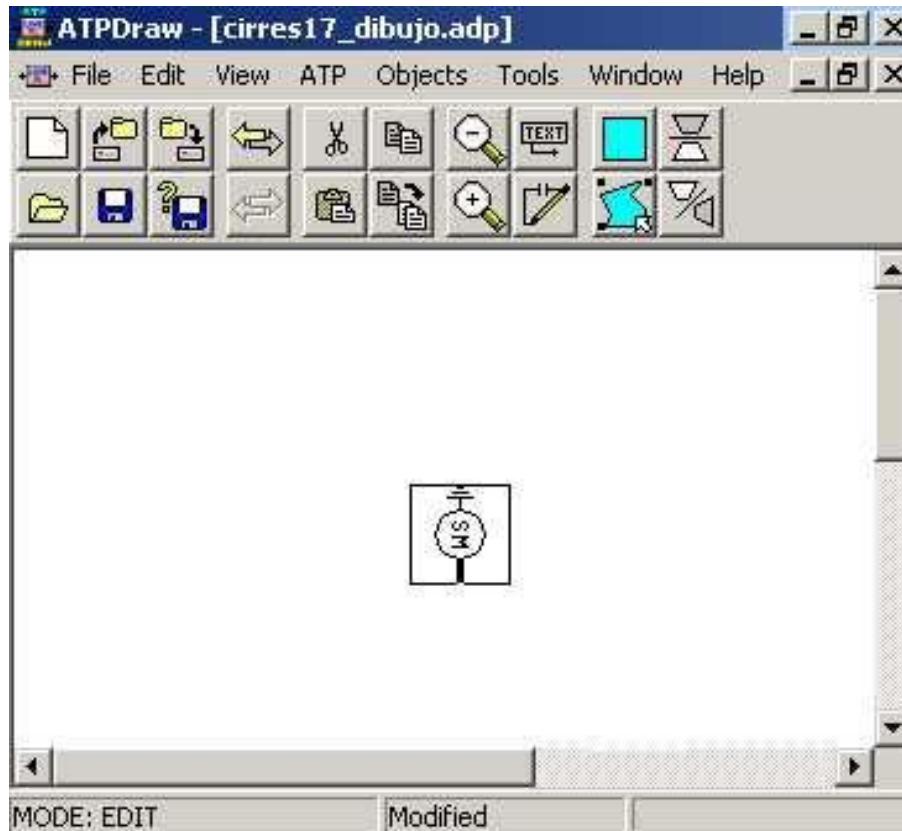
Para formar el circuito de un nuevo sistema se da un “click” al botón derecho del “mouse” para desplegar un menú organizado que contiene los elementos eléctricos disponibles para integrar un sistema eléctrico como se observa en la Fig. B1. Para integrar el circuito es necesario seleccionar de entre estos menús los componentes apropiados y unirlos a través de líneas dibujadas con el cursor y dando “click” izquierdo al “mouse”, o a través de cables o líneas de transmisión seleccionados del menú de componentes.

En la **Fig. B1** se muestra el menú organizado con los elementos que pueden integrar un sistema eléctrico. En este menú se puede apreciar cómo se despliega un submenú con los diferentes tipos de máquinas rotatorias con que cuenta el programa de ATPDraw.



**Fig. B1** Menú de componentes eléctricos.

Por ejemplo, para escoger una maquina tipo “SM59 no control”, se despliega el menú de componentes eléctricos como se explicó con anterioridad. Con el cursor del “mouse” se señala donde dice “no control” en color azul y se da un “click” izquierdo, la figura se mostrará en la pantalla en blanco del ATPDraw. Esto se puede ver en la **Fig. B2**.



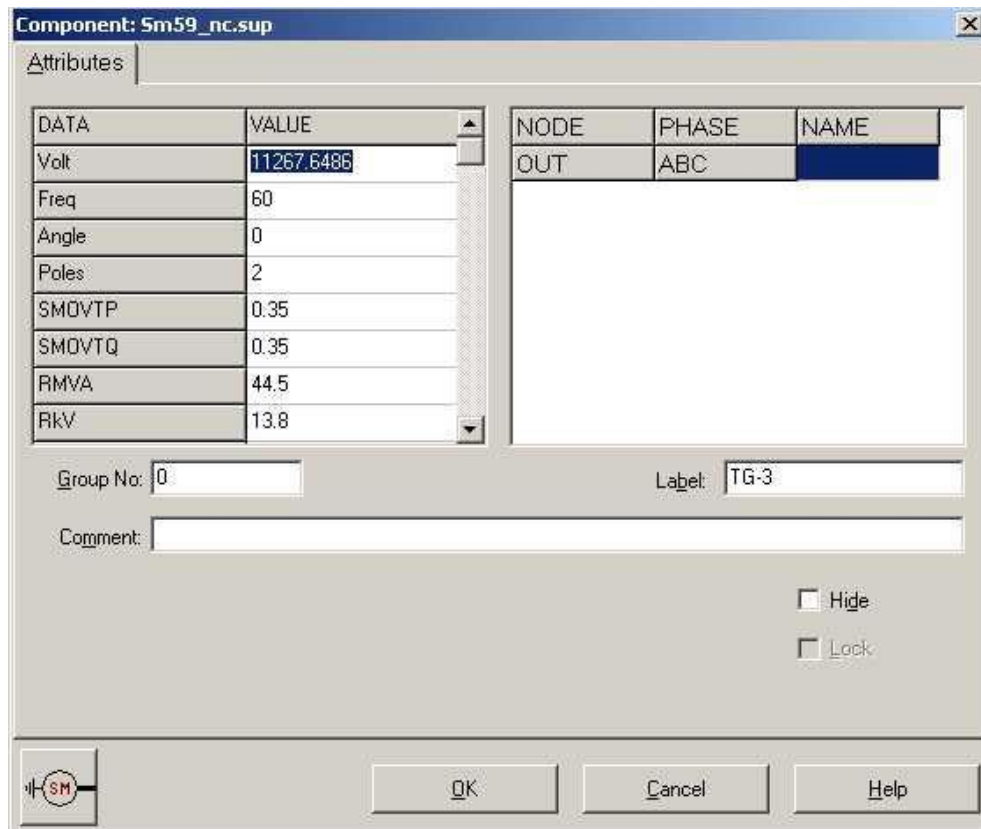
**Fig. B2** Generador tipo SM59\_nc.

Como se puede observar en la **Fig. B2**, el elemento seleccionado es colocado en la pantalla en blanco y se encuentra encerrado en un recuadro. El recuadro alrededor de la figura indica que la misma está seleccionada. Para dejar de seleccionar el elemento hay que dar un “clic” izquierdo con el “mouse” en cualquier parte de la pantalla, siempre y cuando no sea dentro del recuadro de la figura. Cuando el elemento se encuentra seleccionado, se puede desplazar a cualquier parte de la pantalla, esto se logra de la siguiente forma: se coloca el cursor sobre el elemento, dando un “click” izquierdo con “mouse”, se mantiene oprimido el “click”, se arrastra la figura hasta el lugar deseado y se suelta el “click” izquierdo del “mouse”. Por otro lado, una figura se puede rotar para que tenga la posición deseada, esto se logra seleccionando y dando doble “click” con el botón derecho del “mouse”. Los pasos de rotación serán de  $90^\circ$  en todas las figuras.

Cada elemento seleccionado e introducido en el circuito debe ser caracterizado por los parámetros eléctricos que represente; esto se logra dando doble “click” izquierdo del



“mouse” sobre el elemento deseado y accediendo a cada dato solicitado al usuario por el programa en la ventana de atributos que se mostrará. En cada ventana se encuentra un botón “Help”, el cual describe cual es el dato que se solicita en cada renglón y las unidades en las que se debe introducir cada valor. Como ejemplo, en la **Fig. B3** se muestran los valores que se necesitan para un generador SM59: voltaje, frecuencia, ángulo, número de polos, potencia, etc.



The screenshot shows a dialog box titled "Component: Sm59\_nc.sup" with a tab labeled "Attributes". It contains two tables and several input fields.

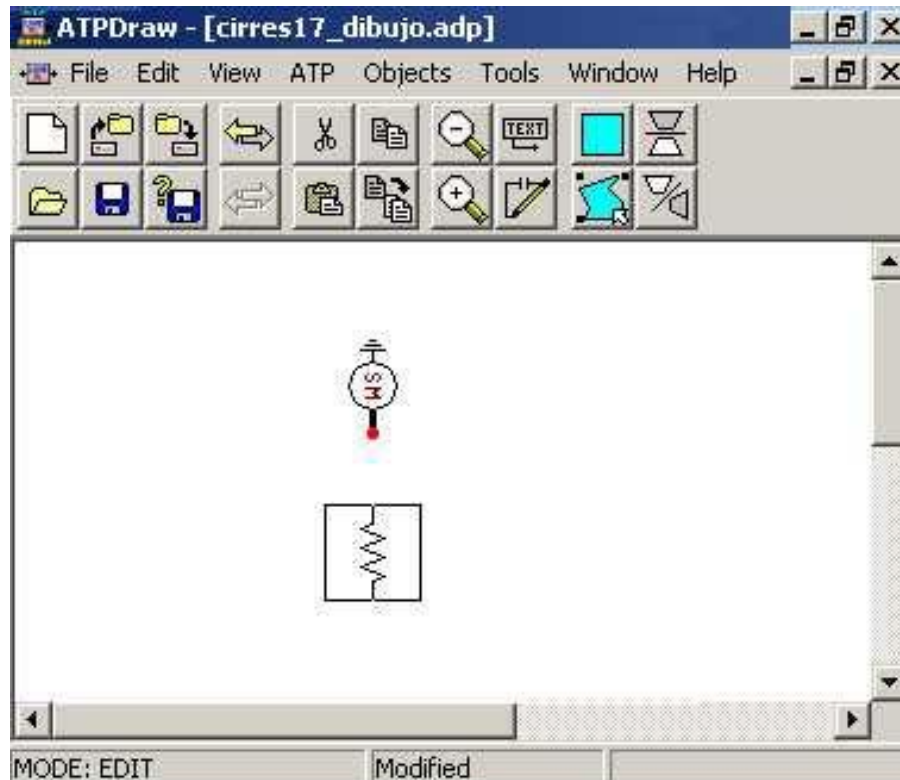
DATA	VALUE
Volt	11267.6486
Freq	60
Angle	0
Poles	2
SMDVTP	0.35
SMDVTQ	0.35
RMVA	44.5
RkV	13.8

NODE	PHASE	NAME
OUT	ABC	

Below the tables, there are input fields for "Group No:" (value: 0) and "Label:" (value: TG-3). A "Comment:" field is also present. At the bottom right, there are checkboxes for "Hide" and "Lock". At the bottom left, there is a button with a generator symbol and "SM". At the bottom center, there are buttons for "OK", "Cancel", and "Help".

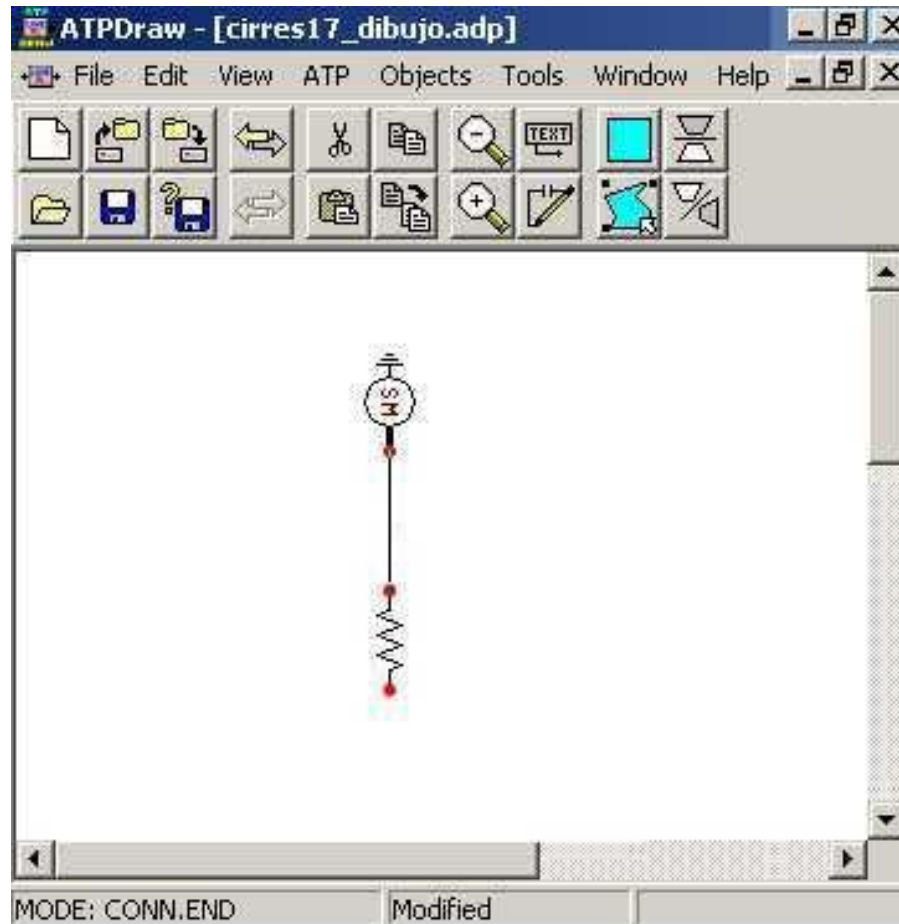
**Fig. B3** Ventana de datos de un generador tipo SM59\_nc.

Si ahora se conecta una resistencia en las terminales del generador. Esta se obtiene del menú que ya se desplegó con anterioridad como se mostró en la **Fig. B1**. La resistencia se coloca como se muestra en la **Fig. B4**. Si se desea rotar la resistencia, esta se debe seleccionar y en la parte interior del recuadro se da “click” izquierdo con el “mouse” hasta lograr la posición deseada.



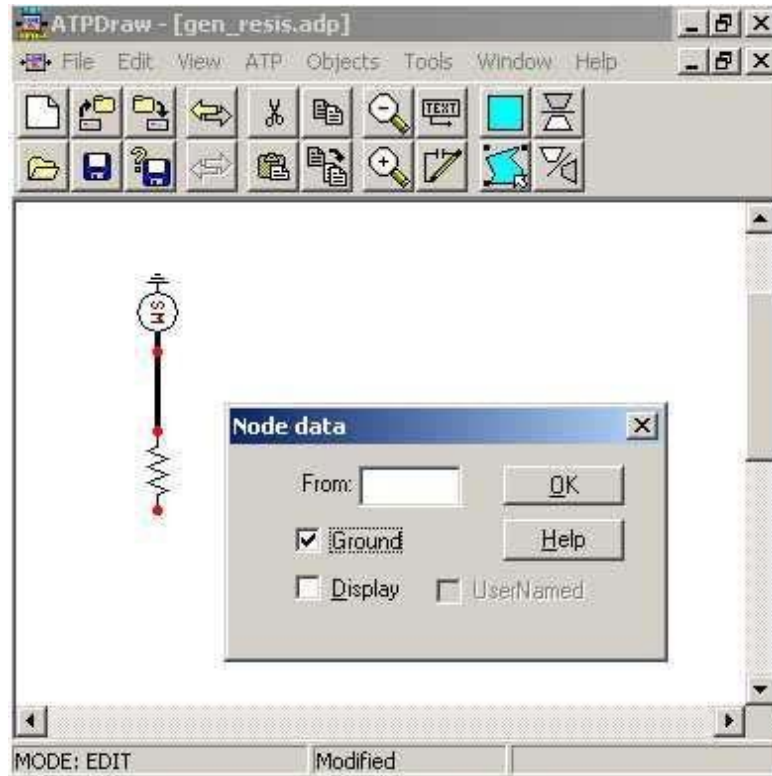
**Fig. B4** Conexión de una resistencia al generador

El valor de la resistencia se especifica de la misma forma que se explicó para el generador. Para unir el generador con la resistencia se coloca el cursor en el punto rojo del generador que se aprecia en la **Fig. B4**, se da “click” izquierdo con el “mouse”, manteniendo el “clic” oprimido se desplaza el cursor hasta cualquiera de los dos puntos rojos de conexión de la resistencia, para este caso tomaremos el punto rojo superior como se muestra en la **Fig. B5**, y por último se suelta el “click”.

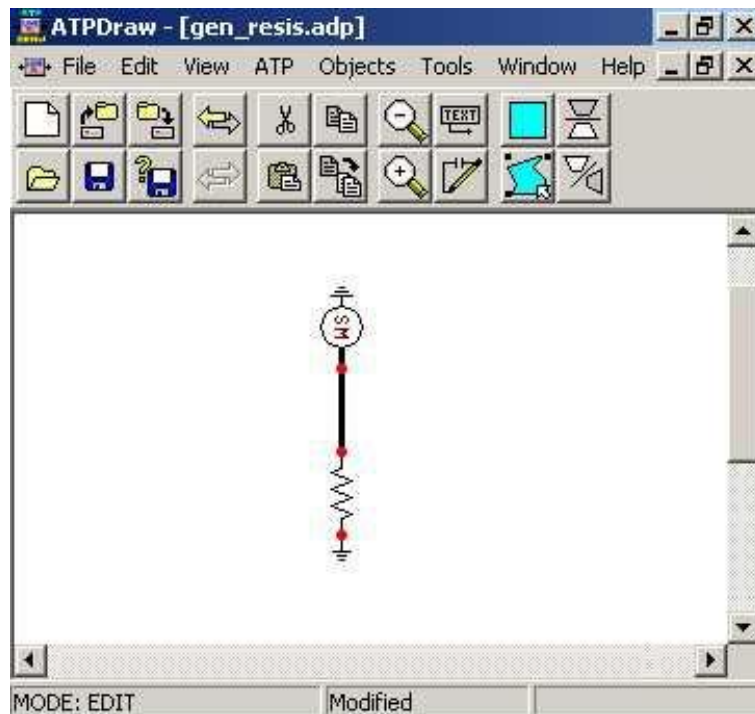


**Fig. B5** Conexión del generador con la resistencia

Si, por ejemplo, ahora se desea poner a tierra la resistencia y así cerrar el circuito, en el nodo de color rojo de la parte inferior de la resistencia, se da un “click” derecho con el “mouse”. Esto desplegará una pequeña pantalla “data node” donde el usuario caracteriza el nodo, ver **Fig. B6**. En esta ventana el usuario debe indicar que dicho punto debe estar aterrizado. El circuito ilustrativo ya completo se muestra en la **Fig. B7**.

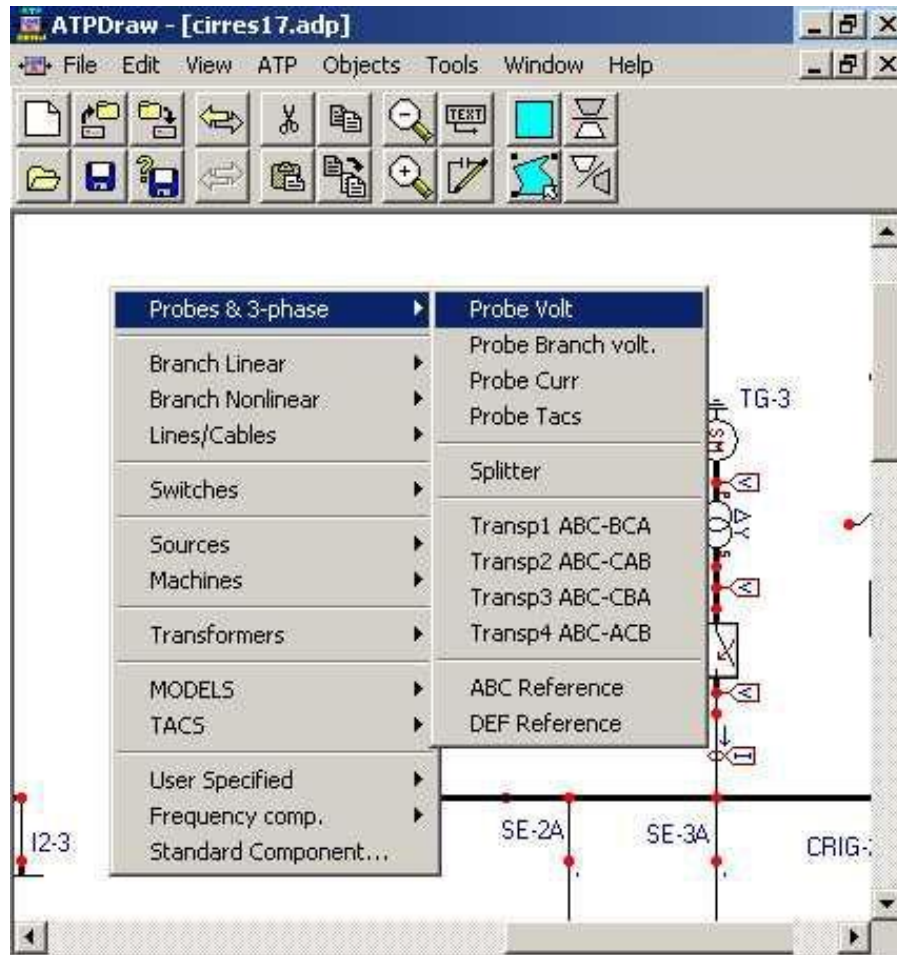


**Fig. B6** Ventana de datos del nodo.



**Fig. B7** Circuito terminado

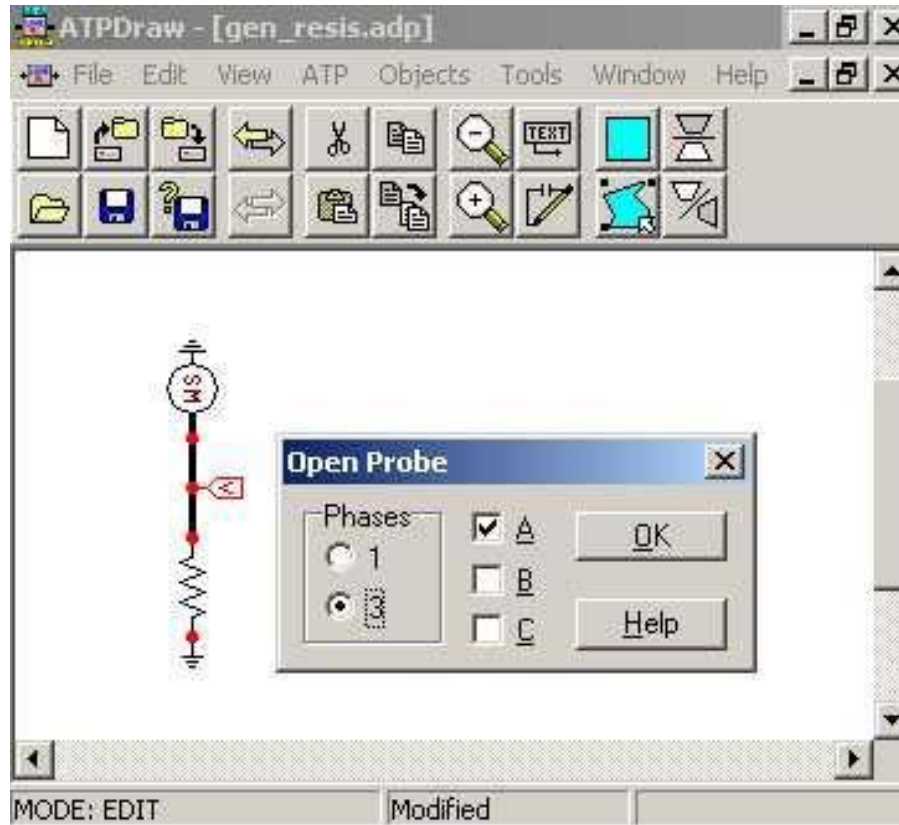
Todos los elementos del ATPDraw se manipulan de la misma forma en que se explicó para el generador y la resistencia. En los nodos de interés de estudio es necesario conectar un elemento que indique el parámetro a visualizar como solución del sistema, ya sea el voltaje o la corriente. Para esto es necesario conectar un elemento de medición del menú de “Probes & 3- phase” dando “click” derecho al “mouse” y escogiendo la punta de prueba, en este caso “Probe Volt”, como se muestra en la **Fig. B8**.



**Fig. B8** Medidores de voltaje y de corriente.

Con las puntas de prueba “Probe Volt” se especifican los puntos en los cuales es de interés el valor de la tensión. En los puntos donde se colocan las puntas de prueba, son los puntos cuyos valores de tensión se mostraran en la gráfica de “PLOTXY” una vez realizada la solución del sistema. En **la Fig. B9** se muestra como se coloca la punta de

prueba “Probe Volt” para determinar el voltaje en el punto de conexión del generador y la resistencia del ejemplo anterior.



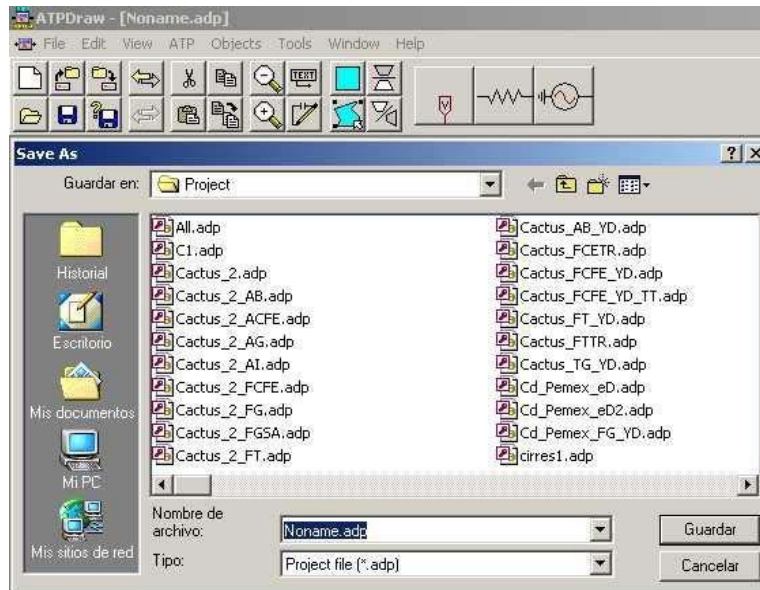
**Fig. B9** Punta de prueba y ventana ‘Open Probe’.

Una vez que la punta de prueba está colocada en el punto de interés, se le da doble “click” izquierdo con el “mouse”, enseguida se mostrará una ventana “Open Probe” como se muestra en la **Fig. B9**, en la cual el usuario debe determinar el número de fases consideradas para la simulación y también las fases a mostrar después de ésta.

Una vez que se ha completado el circuito, se realizan los siguientes pasos:

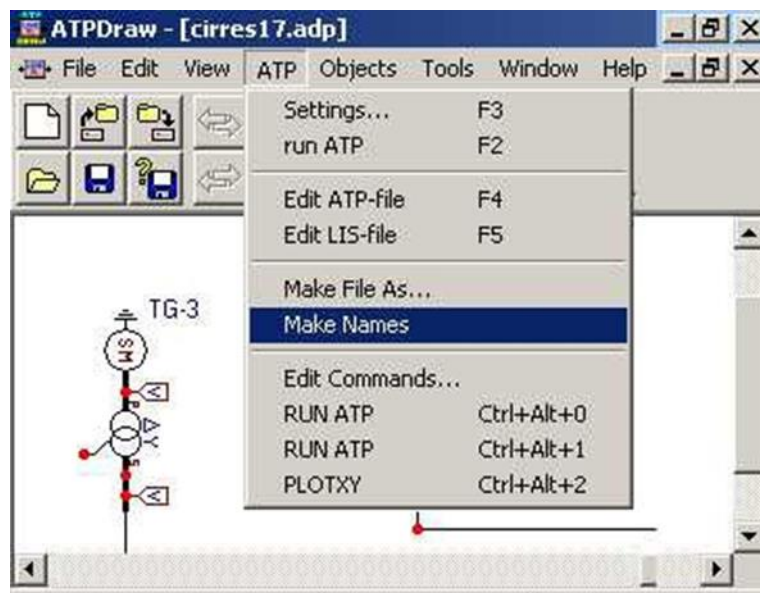
1. Se ejecuta FILE/SAVE, introduciendo el nombre deseado para el archivo, ver la **Fig. B10**.





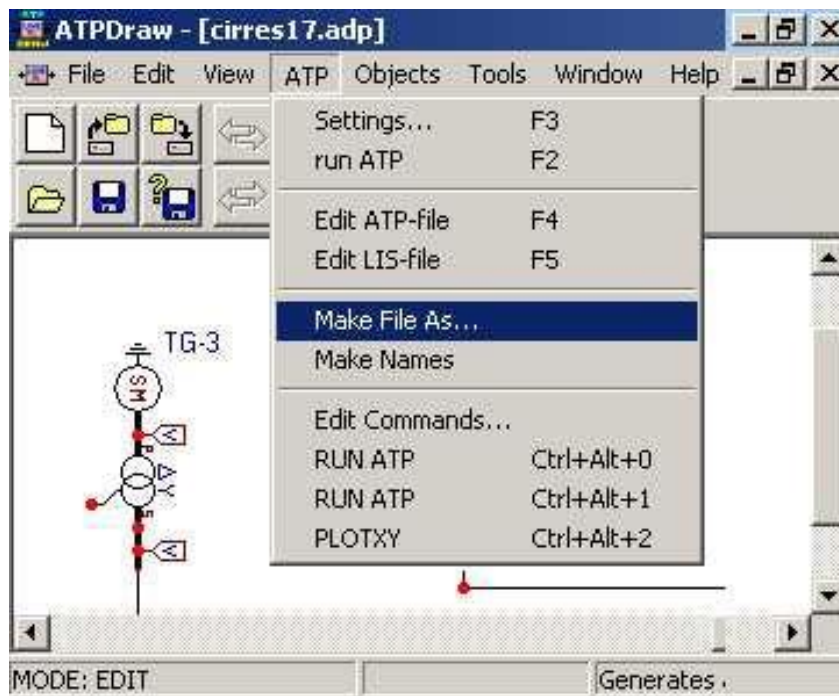
**Fig. B10** Guardar el archivo “Save”.

2. Se nombran todos los nodos del sistema introducido, ejecutando ATP/Make Names, ver **Fig. B11**.

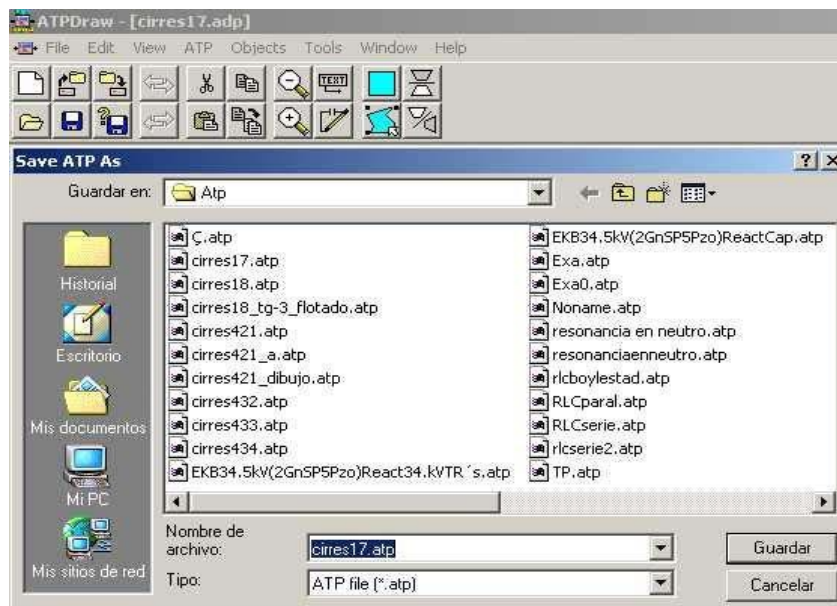


**Fig. B11** Creación de nodos del sistema.

3. Se ejecuta ATP/Make File As, ver **Fig. B12**, donde el usuario puede introducir el nombre deseado al escenario a ejecutar, ver **Fig. B13**.



**Fig. B12** Activación de ATP/Make File As.

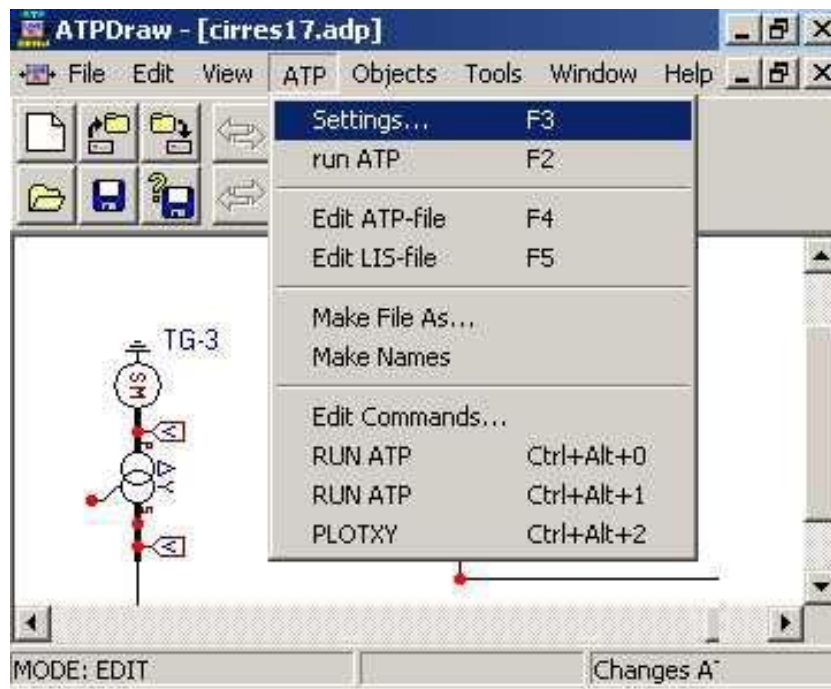


**Fig. B13** Nombre del archivo.

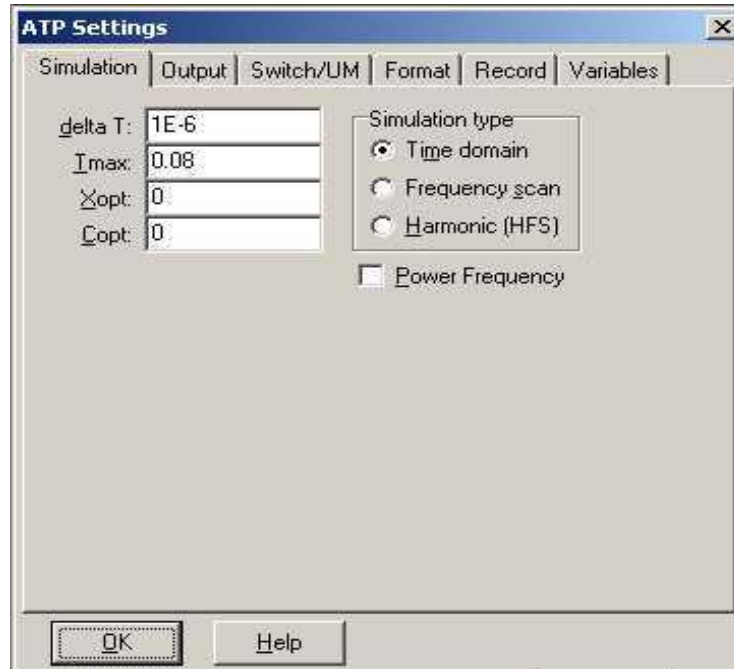
4. Antes de ejecutar el programa es necesario que el usuario introduzca el paso de integración  $\Delta t$  para la solución de las ecuaciones a través del método trapezoidal. Además, hay que introducir el tiempo de ejecución del programa. Este tiempo es



el que será visualizado en las gráficas de resultados, el cual puede tener un valor desde 0 hasta varios ciclos. Para introducir estos valores, el usuario debe ejecutar ATP/Settings, ver **Fig. B14** y **Fig. B15**.

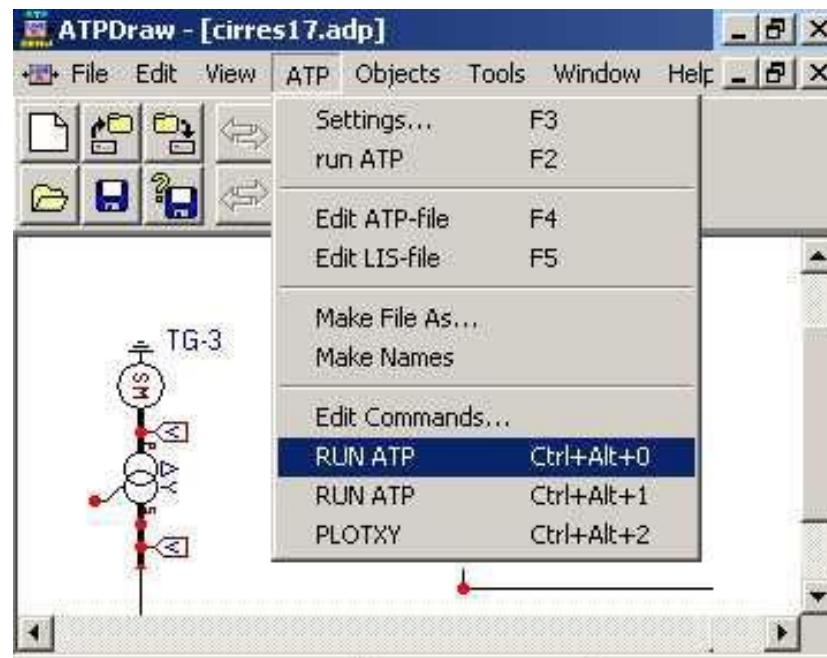


**Fig. B14** Activación de ATP/Settings.

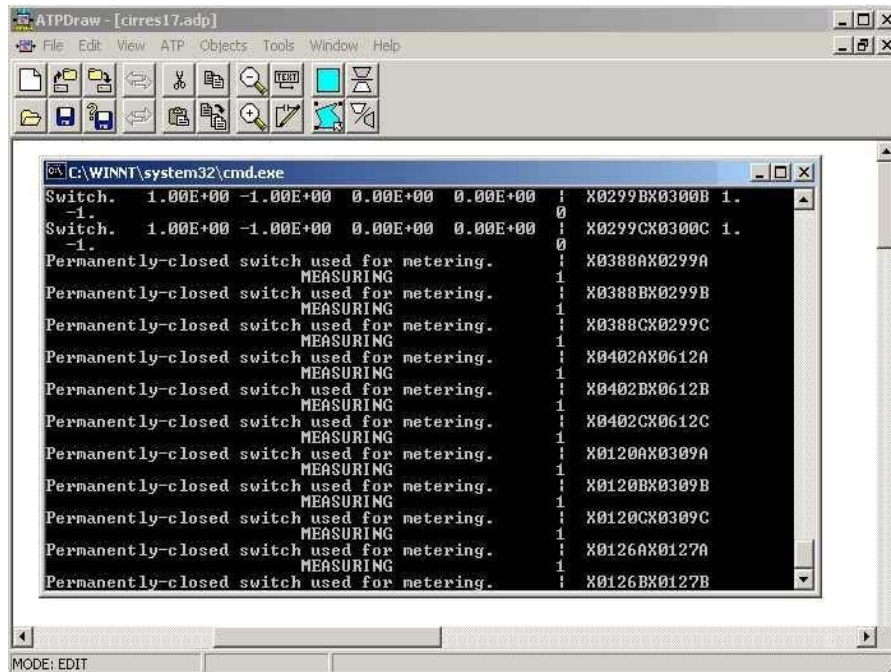


**Fig. B15** Valores de  $\Delta t$  y tiempo máximo de la simulación

5. Se ejecuta ATP/RUN ATP, como se muestra en la **Fig B16**, y se mostrará una pantalla como la que se observa en la **Fig. B17**.



**Fig. B16** Ejecución del ATP/RUN.



The screenshot shows the ATPDraw application window with a command window open. The command window title is "C:\WINNT\system32\cmd.exe". The output text is as follows:

```

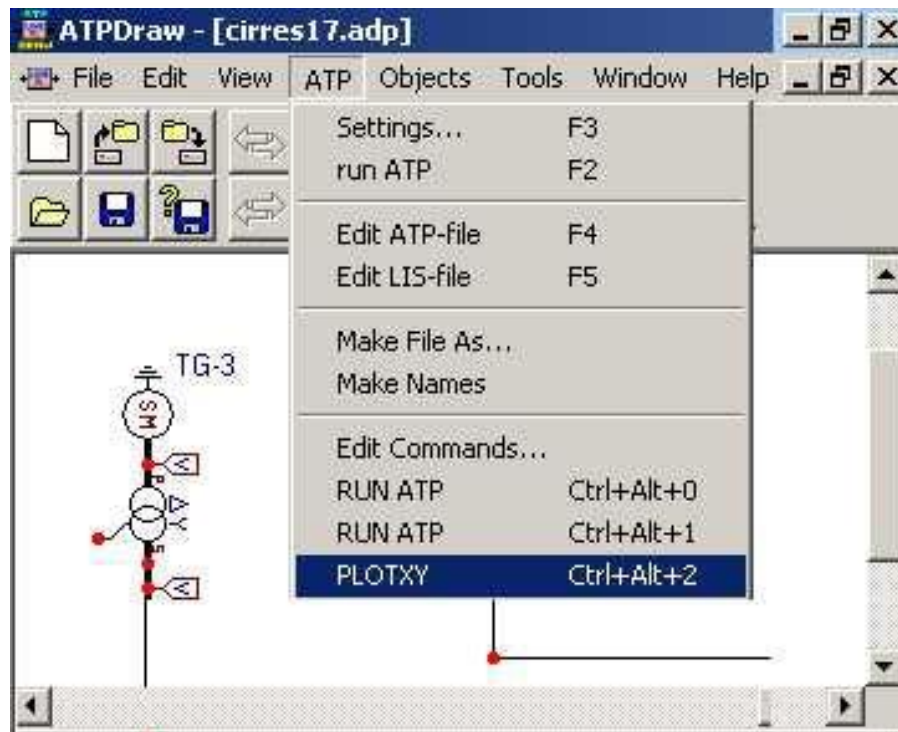
Switch. 1.00E+00 -1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | X0299BX0300B 1.
-1. | 0
Switch. 1.00E+00 -1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 | X0299CX0300C 1.
-1. | 0
Permanently-closed switch used for metering. | X0388AX0299A
MEASURING | 1
Permanently-closed switch used for metering. | X0388BX0299B
MEASURING | 1
Permanently-closed switch used for metering. | X0388CX0299C
MEASURING | 1
Permanently-closed switch used for metering. | X0402AX0612A
MEASURING | 1
Permanently-closed switch used for metering. | X0402BX0612B
MEASURING | 1
Permanently-closed switch used for metering. | X0402CX0612C
MEASURING | 1
Permanently-closed switch used for metering. | X0120AX0309A
MEASURING | 1
Permanently-closed switch used for metering. | X0120BX0309B
MEASURING | 1
Permanently-closed switch used for metering. | X0120CX0309C
MEASURING | 1
Permanently-closed switch used for metering. | X0126AX0127A
MEASURING | 1
Permanently-closed switch used for metering. | X0126BX0127B
MEASURING | 1
  
```

**Fig. B17** Ventana de ejecución del comando RUN/ATP.

6. Verificar si el sistema no presenta errores. Esto se logra ejecutando ATP/LIS-file como se muestra en la **Fig. B18**. En la **Fig. B19** se mostrará un listado del programa, si la palabra error aparece en este listado, hay que verificar en dónde se encuentra y corregirlo. Una vez corregido el error, se comienza de nuevo desde el paso 1.



7. Si el sistema no presenta errores se ejecuta ATP/PLOTXY, ver **Fig. B20**, lo cual despliega una visualización gráfica de los resultados, ver **Fig. B21**. En esta ventana es posible realizar “Zooms” para visualizar detalles en las gráficas, además se cuenta con una regla activa para medir la magnitud de la onda en función del tiempo.



**Fig. B20** Ejecución de ATP/PLOTXY



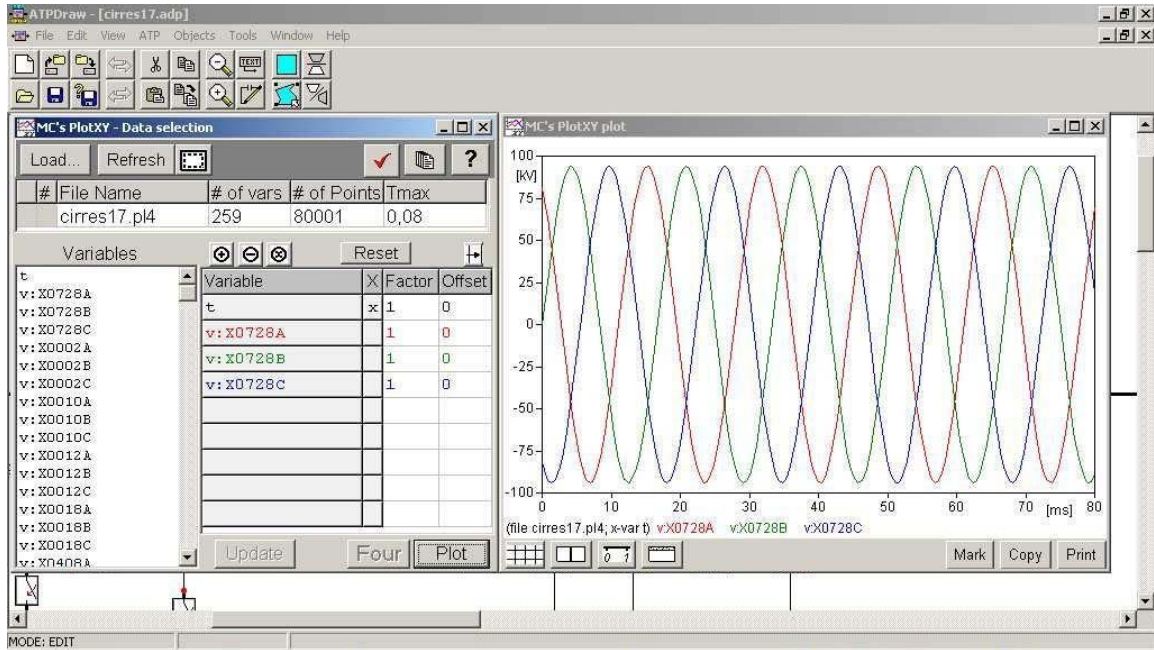


Fig. B21 Resultados de la simulación en ATPDraw.

## B.5 Bibliografía

- B1) Gabriel López Ruiz. “Metodología para la aplicación de apartarrayos en líneas de transmisión para mejorar su confiabilidad”. Tesis de grado de maestría. SEPI-ESIME Instituto Politécnico Nacional, México, 2003.
- B2) Carlos Ramírez Pacheco. “Incorporación de modelos de arco eléctrico a interruptores de potencia en el ATP/EMTP”. Tesis de grado de maestría SEPI-ESIME Instituto Politécnico Nacional, México, 2000.
- B3) Francisco Cevallos Soto. “Uso de ATP para el análisis del rechazo de carga en sistemas eléctricos de potencia radiales”. Tesis de grado de maestría SEPI-ESIME Instituto Politécnico Nacional, México, 1999.
- B4) Claudio Rubén Fuerte Esquivel. “Metodología para la simulación de operaciones de maniobra en líneas de transmisión”. Tesis de grado de maestría SEPI-ESIME Instituto Politécnico Nacional, México, 1993.

## APÉNDICE C

### *ENTRADA DE DATOS EN ATPDraw*

---

#### **C.1 Introducción**

En ATPDraw se pueden llegar a simular los siguientes elementos o componentes que conforman un sistema eléctrico.

Como se mencionó en el Apéndice B para insertar un elemento es necesario dar “click” en el botón derecho del “mouse”, para desplegar el menú de componentes existentes, ver **Fig. B1**. Por otro lado, se tienen archivos como “all.adp”, ver **Fig. C1**, en el cual también se encuentran incluidos diferentes componentes un poco distintos de los que se encuentran de la forma mostrada en la **Fig. B1**. Al abrir este archivo es necesario copiar el componente y pegarlo en el archivo que se desea realizar o modificar.



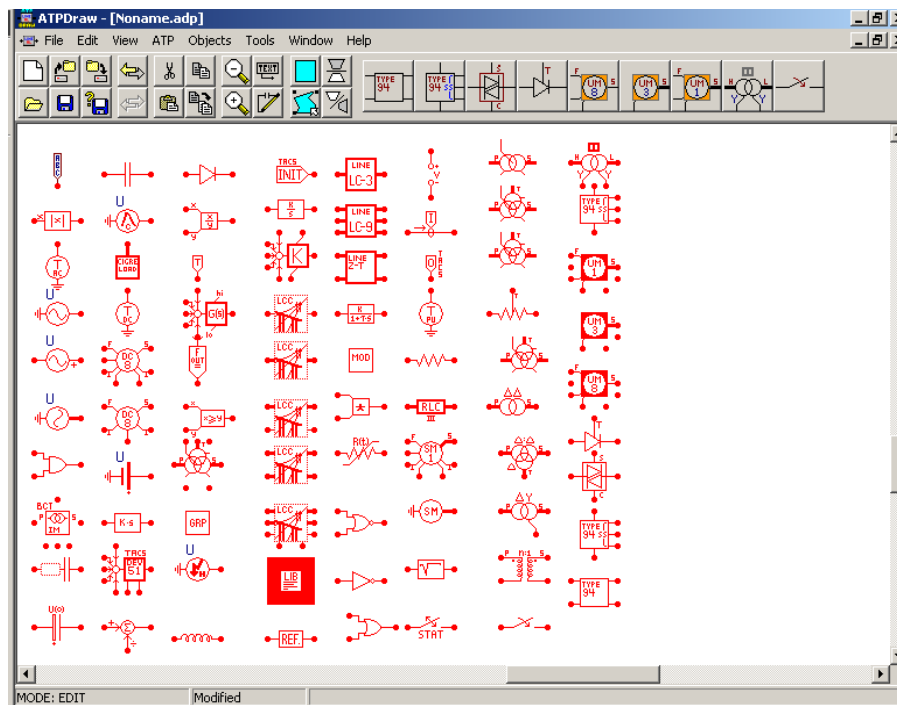
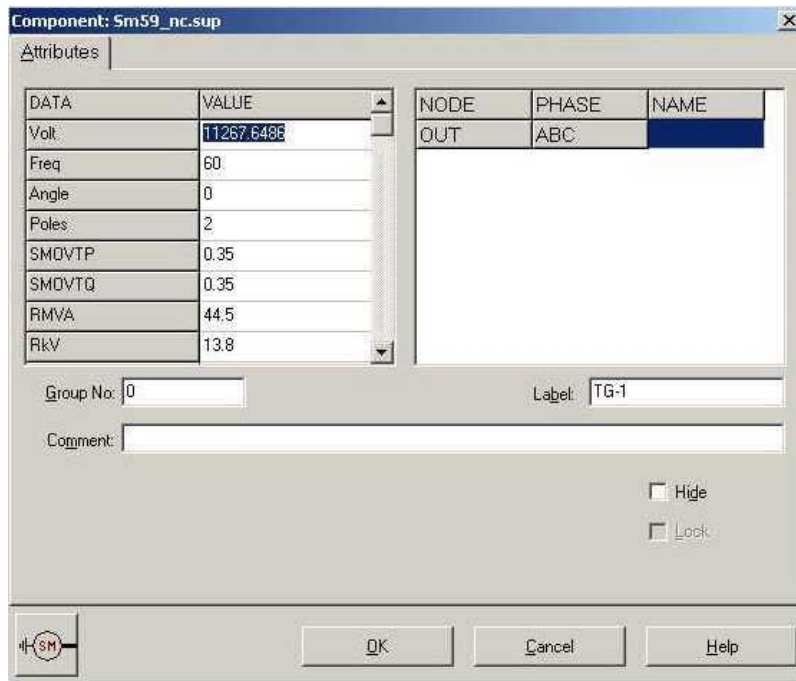


Fig. C1 **Ventana para obtener los componentes de un circuito a través del archivo “all.adp”.**

Para introducir los parámetros eléctricos requeridos para cada componente es necesario dar doble “click” al componente seleccionado. Se deben verificar las unidades solicitadas de cada componente; para cualquier duda sobre las casillas de datos o unidades de los parámetros eléctricos, es necesario dar “click” en el botón de “Help” del componente. A continuación, se mostrarán algunos ejemplos sobre la manera de introducir los datos en los siguientes componentes eléctricos.

## C.2 Generador eléctrico

En un generador eléctrico del tipo SM59 (Synchronous machine Type 59) de *ATPDraw* los datos requeridos se muestran en las **Figs. C.2a a C.2d**



DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Volt:	11267.6488	OUT	ABC	
Freq:	60			
Angle:	0			
Poles:	2			
SMDVTP:	0.35			
SMDVTQ:	0.35			
RMVA:	44.5			
RkV:	13.8			

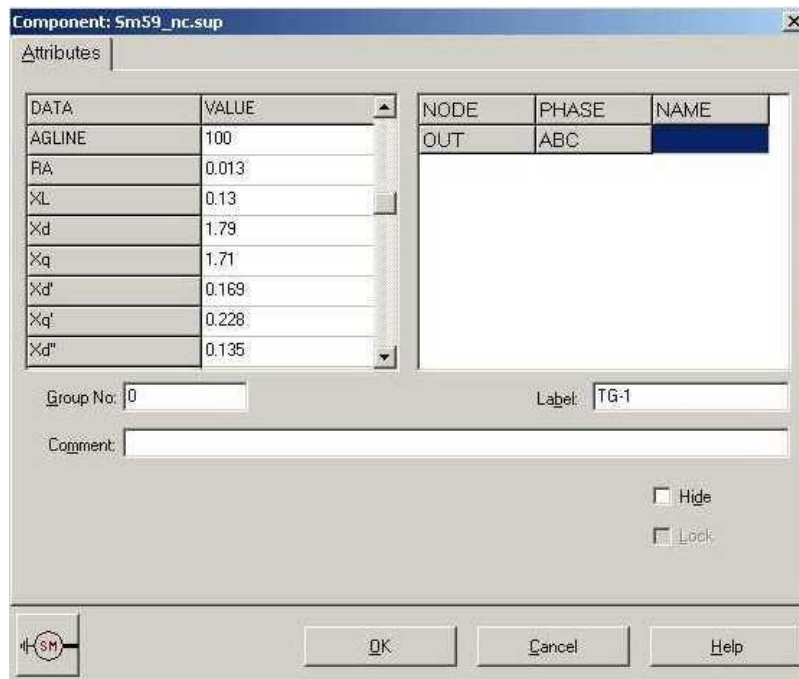
Group No: 0 Label: TG-1

Comment:

Hide  
 Lock

Buttons: OK, Cancel, Help

**Fig. C.2a** Parámetros eléctricos de un generador eléctrico modelo SM59 de *ATPDraw*.



DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
AGLINE	100	OUT	ABC	
RA	0.013			
XL	0.13			
Xd	1.79			
Xq	1.71			
Xd'	0.169			
Xq'	0.228			
Xd''	0.135			

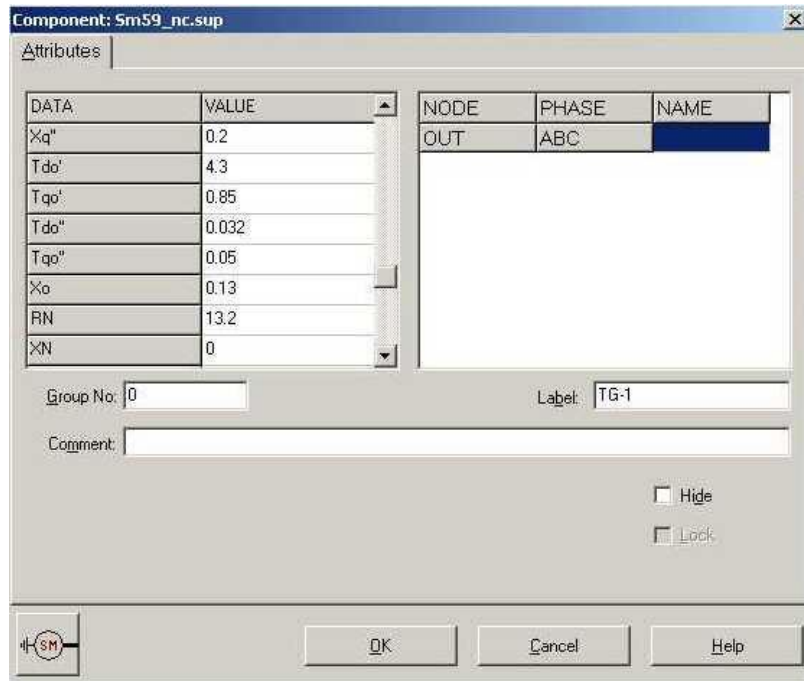
Group No: 0 Label: TG-1

Comment:

Hide  
 Lock

Buttons: OK, Cancel, Help

**Fig. C.2b** Parámetros eléctricos de un generador eléctrico modelo SM59 de *ATPDraw*.



DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Xq''	0.2	OUT	ABC	
Tdo'	4.3			
Tqo'	0.85			
Tdo''	0.032			
Tqo''	0.05			
Xo	0.13			
RN	13.2			
XN	0			

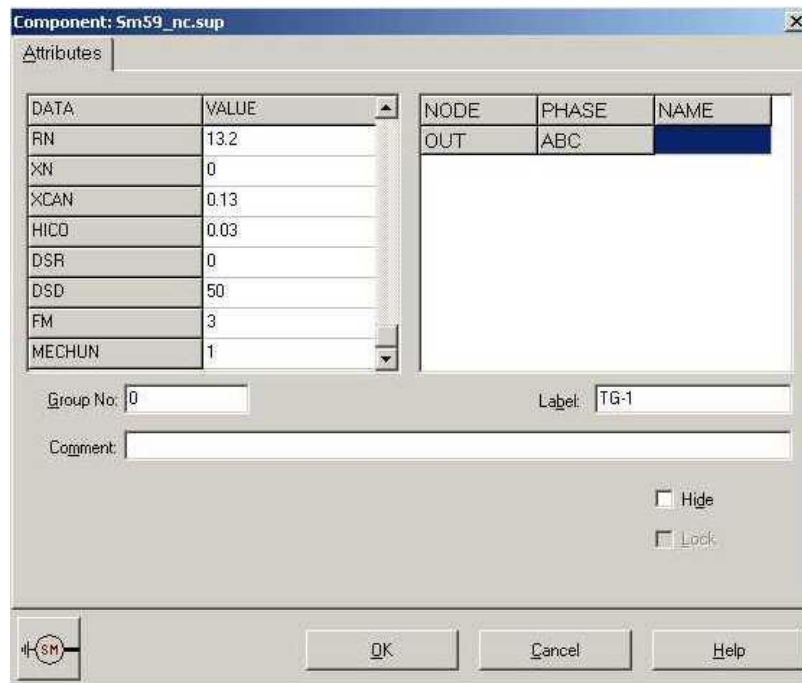
Group No: 0 Label: TG-1

Comment:

Hide  
 Lock

OK Cancel Help

**Fig. C.2c** Parámetros eléctricos de un generador eléctrico modelo SM59 de *ATPDraw*.



DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
RN	13.2	OUT	ABC	
XN	0			
XCAN	0.13			
HICD	0.03			
DSR	0			
DSD	50			
FM	3			
MECHUN	1			

Group No: 0 Label: TG-1

Comment:

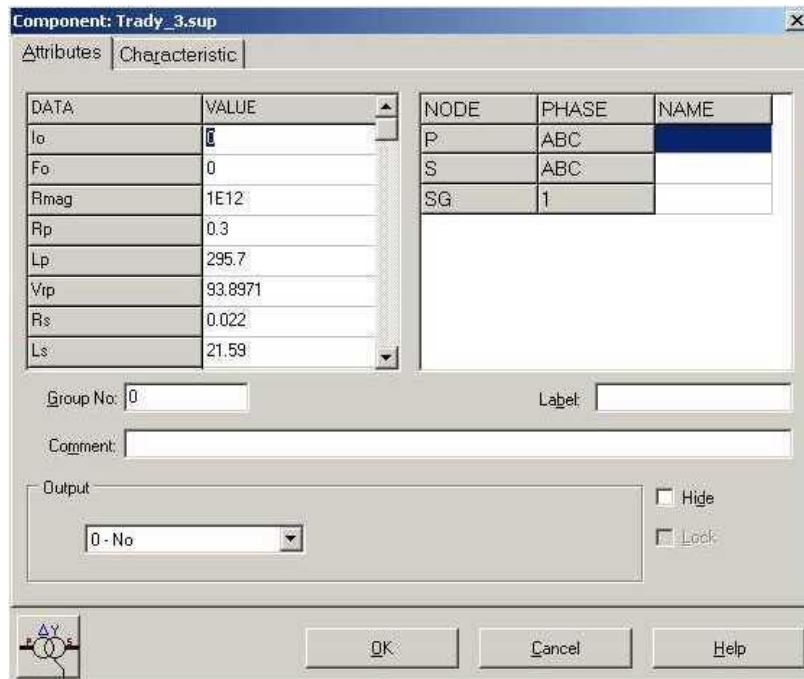
Hide  
 Lock

OK Cancel Help

**Fig. C.2d** Parámetros eléctricos de un generador eléctrico modelo SM59 de *ATPDraw*.

### C.3 Transformador

En un transformador eléctrico del modelo Trady\_3 de *ATPDraw* los datos requeridos se muestran en las **Figs. C.3a** y **C.3b**.



DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Io	0	P	ABC	
Fo	0	S	ABC	
Rmag	1E12	SG	1	
Rp	0.3			
Lp	295.7			
Vrp	93.8971			
Rs	0.022			
Ls	21.59			

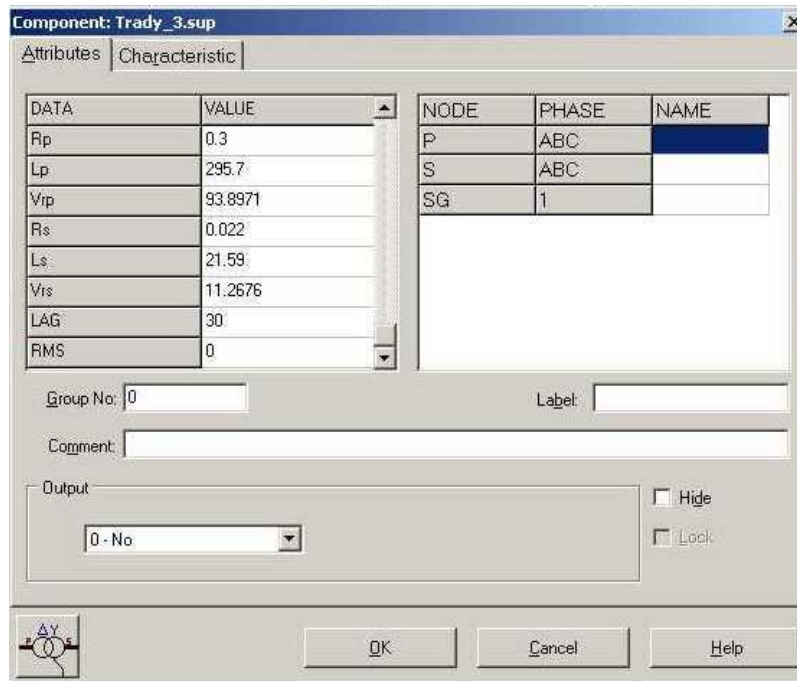
Group No: 0      Label:

Comment:

Output:        Hide  
 Lock

OK      Cancel      Help

**Fig. C.3a** Parámetros eléctricos de un transformador trifásico en *ATPDraw*.



DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Rp	0.3	P	ABC	
Lp	295.7	S	ABC	
Vrp	93.8971	SG	1	
Rs	0.022			
Ls	21.59			
Vrs	11.2676			
LAG	30			
RMS	0			

Group No: 0      Label:

Comment:

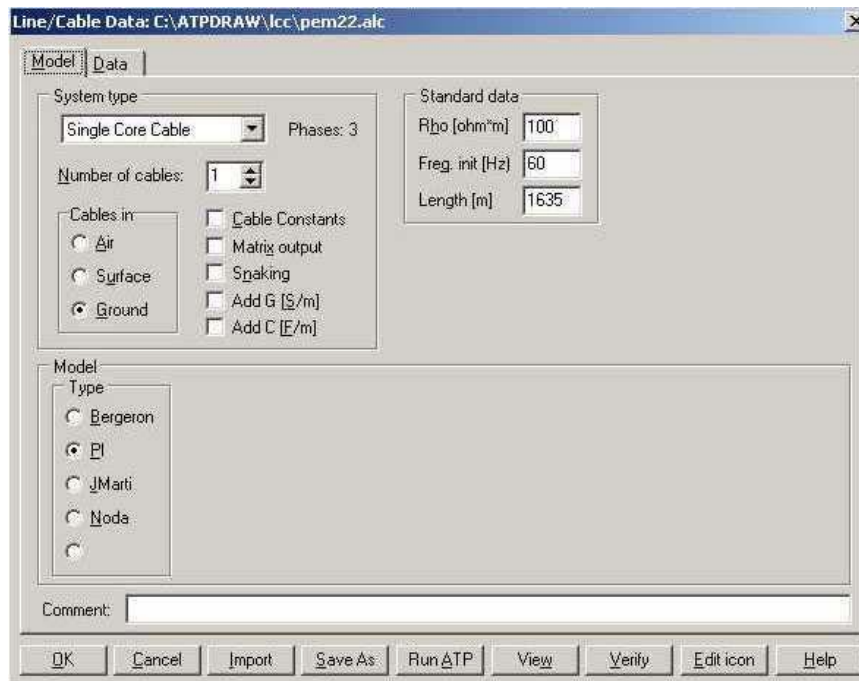
Output:        Hide  
 Lock

OK      Cancel      Help

**Fig. C.3b** Parámetros eléctricos de un transformador trifásico en *ATPDraw*.

### C.4 Cable de energía

Para un cable modelo  $\pi$  el archivo de datos LCC (line cable) en *ATPDraw* requiere los parámetros mostrados en las **Figs. C.4a** y **C.4b**.



Line/Cable Data: C:\ATPDRAW\lcc\pem22.alc

Model Data

System type: Single Core Cable Phases: 3

Number of cables: 1

Cables in:  Air  Surface  Ground

Cable Constants  Matrig output  Snaking  Add G [S/m]  Add C [E/m]

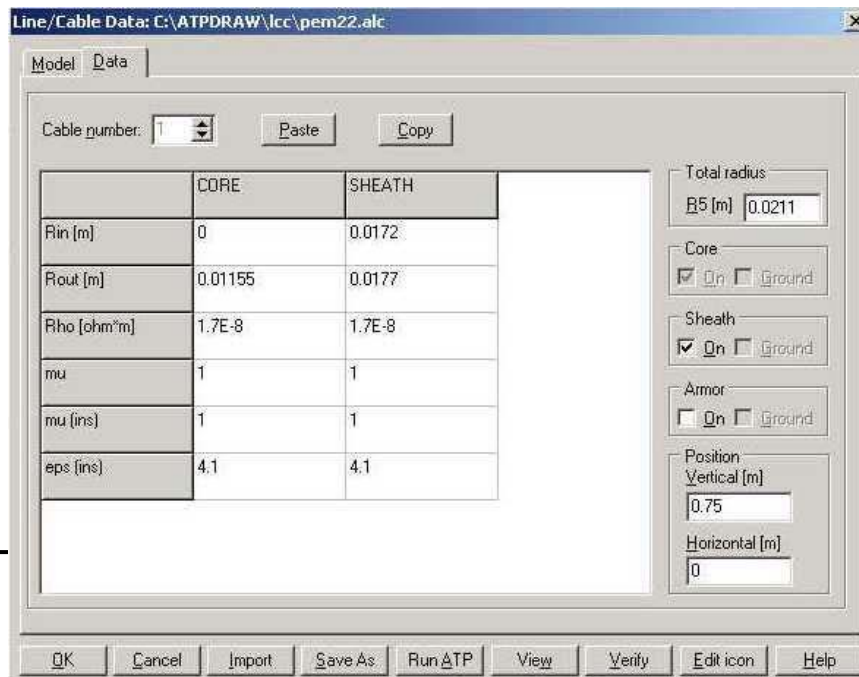
Standard data: Rho [ohm\*m] 100, Freq. init [Hz] 60, Length [m] 1635

Model Type:  Bergeron  PI  JMarti  Noda

Comment:

OK Cancel Import Save As Run ATP View Verify Edit icon Help

**Fig. C.4a** Parámetros eléctricos de un cable de energía para un modelo  $\pi$  en *ATPDraw*.



Line/Cable Data: C:\ATPDRAW\lcc\pem22.alc

Model Data

Cable number: 1 Paste Copy

	CORE	SHEATH
R <sub>in</sub> [m]	0	0.0172
R <sub>out</sub> [m]	0.01155	0.0177
Rho [ohm*m]	1.7E-8	1.7E-8
mu	1	1
mu (ins)	1	1
eps (ins)	4.1	4.1

Total radius: R5 [m] 0.0211

Core:  On  Ground

Sheath:  On  Ground

Armor:  On  Ground

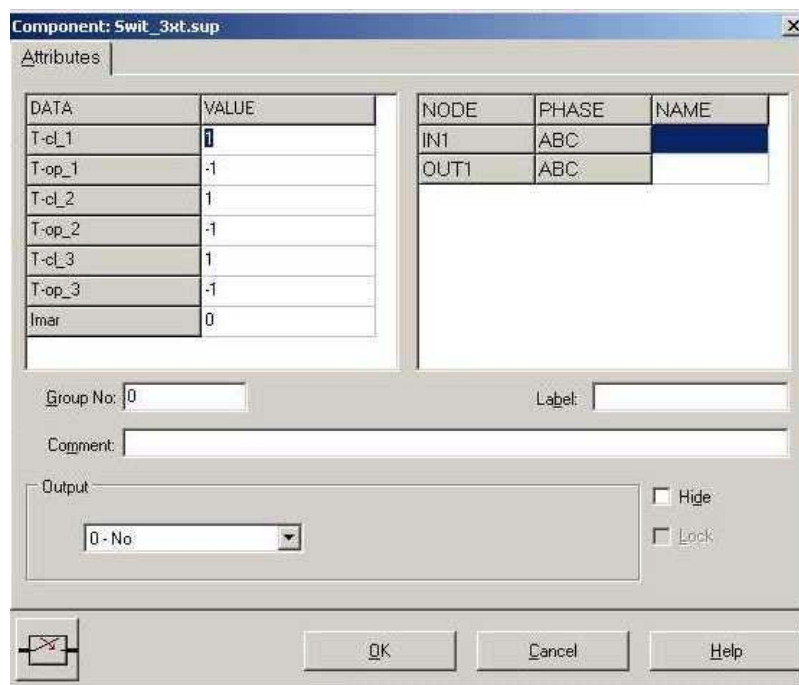
Position: Vertical [m] 0.75, Horizontal [m] 0

OK Cancel Import Save As Run ATP View Verify Edit icon Help

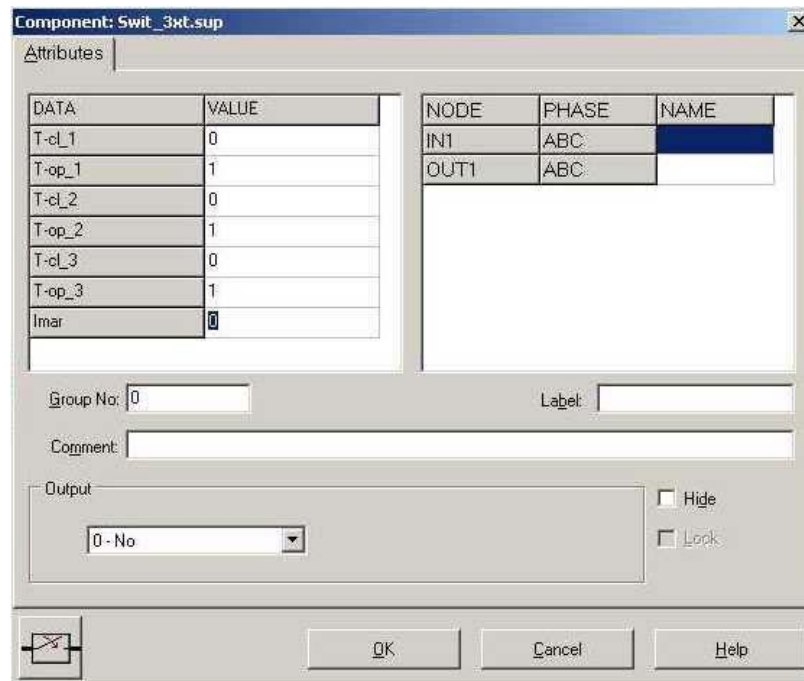
**Fig. C.4b** Parámetros eléctricos de un cable de energía para un modelo  $\pi$  en *ATPDraw*.

## C.5 Interruptor

En la **Fig. C5a** se muestra la manera de indicar que un interruptor trifásico ideal en *ATPDraw* se encuentra abierto o fuera de operación. En la **Fig. C5b** se muestra la operación de un interruptor trifásico en un tiempo de 0 a 1 s.



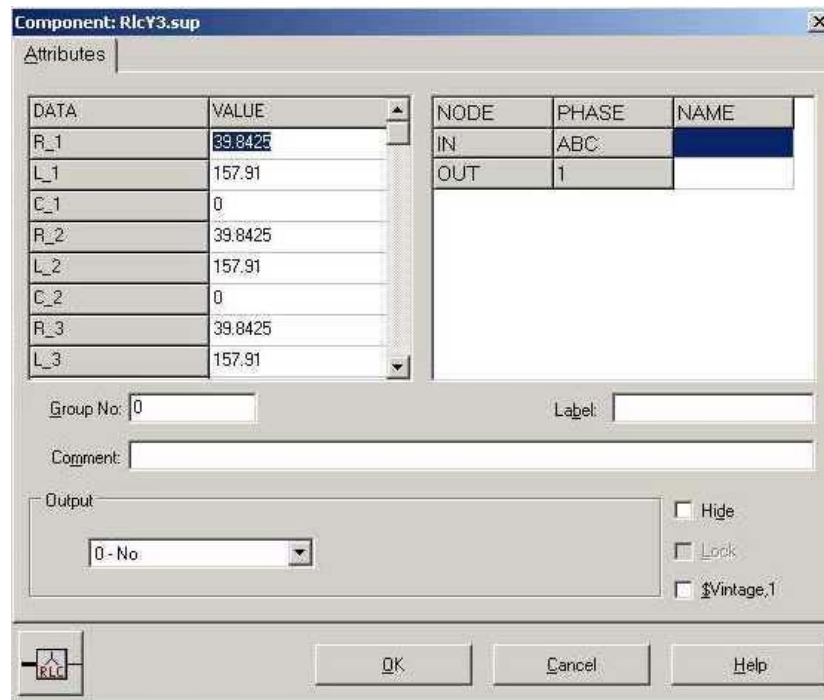
**Fig. C.5a** Forma de indicar que un interruptor se encuentra abierto en *ATPDraw*.



**Fig. C.5b** Forma de indicar que un interruptor se encuentra cerrado en *ATPDraw*.

## C.6 Carga eléctrica

En la **Fig. C6** se muestra la manera de introducir los datos que se solicitan para una carga trifásica *RLC* en conexión estrella dentro de *ATPDraw*.



**Fig. C.6** Introducción de datos de una carga trifásica RLC en conexión estrella en *ATPDraw*.

### C.7 Detector de voltaje y corriente

En *ATPDraw* se tiene la forma de conocer de la magnitud pico de la tensión y de la corriente en todos los puntos de un circuito. Para conocer la magnitud de la tensión es necesario colocar una punta de “prueba de tensión” en cualquier nodo. Para conocer la magnitud de la corriente es necesario insertar una punta de “prueba de corriente” en conexión serie entre los puntos que se desee. Para insertar estas puntas de pruebas es necesario seleccionarlas de los menús de componentes, dando “click” al botón derecho del “mouse”. En la **Fig. C.7** se muestra que se está seleccionado visualizar la tensión en las tres fases del nodo seleccionado.

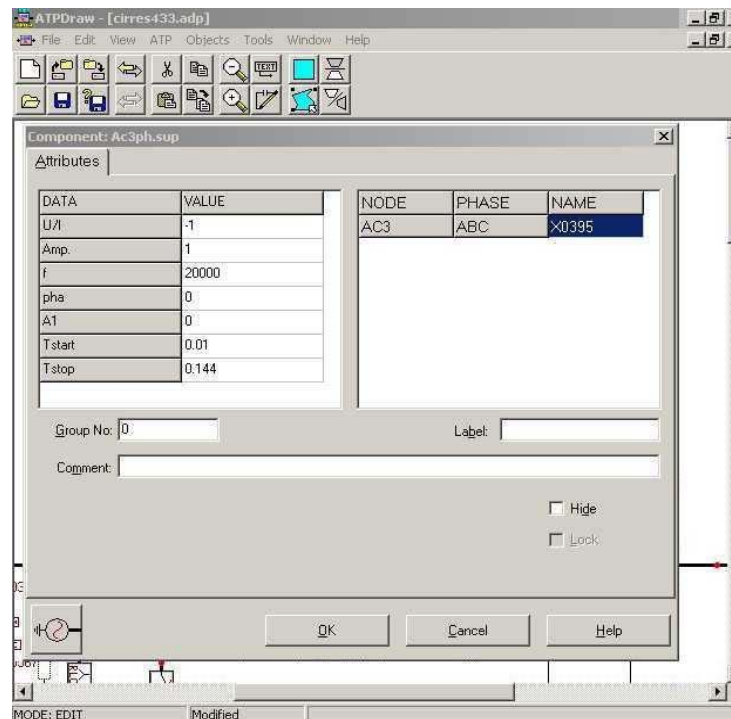




**Fig. C.7** Punta de prueba de tensión trifásica en *ATPDraw*.

### C.8 Variación de la frecuencia

Para variar la frecuencia dentro de *ATPDraw* se puede insertar una fuente de corriente o voltaje como la que se muestra en la **Fig. C.8**, en la cual se hace variar la frecuencia en el valor requerido.



**Fig. C.8** Variación de la frecuencia en uno de los buses de distribución en *ATPDraw*.