

```

[IbetaJ1,IbetaJ2,IbetaJ3,IbetaJ4,IbetaJ5,IbetaJ6,IbetaJ7,IbetaJ8,IbetaJ9,IbetaJ10,IbetaJ
11,IbetaJ12,IbetaJ13]=wanalisis_5D(Ibeta);
%% con los coeficientes ondita se determina la energia real e imaginria en el marco
transformado,
%% igualmente la enregia de secuencia cero
%%
E01= IOJ1.*v0J1;
E02= IOJ2.*v0J2;
E03= IOJ3.*v0J3;
E04= IOJ4.*v0J4;
E05= IOJ5.*v0J5;
E06= IOJ6.*v0J6;
E07= IOJ7.*v0J7;
E08= IOJ8.*v0J8;
E09= IOJ9.*v0J9;
E010= IOJ10.*v0J10;
E011= IOJ11.*v0J11;
E012= IOJ12.*v0J12;
E013= IOJ13.*v0J13;
%%
%%% Igualmente se procede con los coeficientes alfa y beta.
Ealfa1= IalfaJ1.*ValfaJ1;
Ealfa2= IalfaJ2.*ValfaJ2;
Ealfa3= IalfaJ3.*ValfaJ3;
Ealfa4= IalfaJ4.*ValfaJ4;
Ealfa5= IalfaJ5.*ValfaJ5;
Ealfa6= IalfaJ6.*ValfaJ6;
Ealfa7= IalfaJ7.*ValfaJ7;
Ealfa8= IalfaJ8.*ValfaJ8;
Ealfa9= IalfaJ9.*ValfaJ9;
Ealfa10= IalfaJ10.*ValfaJ10;
Ealfa11= IalfaJ11.*ValfaJ11;
Ealfa12= IalfaJ12.*ValfaJ12;
Ealfa13= IalfaJ13.*ValfaJ13;
%% coeficientes de beta.
%% Hay que corregir los productos de acuerdo con 2.24 y 2.25
%% capitulo 2 de la tesis.
%%
Ebeta1= IbetaJ1.*VbetaJ1;
Ebeta2= IbetaJ2.*VbetaJ2;
Ebeta3= IbetaJ3.*VbetaJ3;
Ebeta4= IbetaJ4.*VbetaJ4;
Ebeta5= IbetaJ5.*VbetaJ5;
Ebeta6= IbetaJ6.*VbetaJ6;
Ebeta7= IbetaJ7.*VbetaJ7;
Ebeta8= IbetaJ8.*VbetaJ8;
Ebeta9= IbetaJ9.*VbetaJ9;
Ebeta10= IbetaJ10.*VbetaJ10;
Ebeta11= IbetaJ11.*VbetaJ11;
Ebeta12= IbetaJ12.*VbetaJ12;
Ebeta13= IbetaJ13.*VbetaJ13;
%%
%% determinacion de los coeficientes de la energia real Ep
%% por nivel de descomposicion.
Ep1=E01+Ealfa1+Ebeta1;
Ep2=E02+Ealfa2+Ebeta2;
Ep3=E03+Ealfa3+Ebeta3;
Ep4=E04+Ealfa4+Ebeta4;
Ep5=E05+Ealfa5+Ebeta5;
Ep6=E06+Ealfa6+Ebeta6;
Ep7=E07+Ealfa7+Ebeta7;
Ep8=E08+Ealfa8+Ebeta8;
Ep9=E09+Ealfa9+Ebeta9;
Ep10=E010+Ealfa10+Ebeta10;
Ep11=E011+Ealfa11+Ebeta11;
Ep12=E012+Ealfa12+Ebeta12;
Ep13=E013+Ealfa13+Ebeta13;
%%
%% Distribucion de energia REAL segun nivel de
%% descomposicion
figure(2), subplot(13,1,1), plot(t, Ep1);
figure(2), subplot(13,1,2), plot(t, Ep2);
figure(2), subplot(13,1,3), plot(t, Ep3);
figure(2), subplot(13,1,4), plot(t, Ep4);
figure(2), subplot(13,1,5), plot(t, Ep5);

```

```

figure(2), subplot(13,1,6), plot(t, Ep6);
figure(2), subplot(13,1,7), plot(t, Ep7);
figure(2), subplot(13,1,8), plot(t, Ep8);
figure(2), subplot(13,1,9), plot(t, Ep9);
figure(2), subplot(13,1,10), plot(t, Ep10);
figure(2), subplot(13,1,11), plot(t, Ep11);
figure(2), subplot(13,1,12), plot(t, Ep12);
figure(2), subplot(13,1,13), plot(t, Ep13);
%%
%% Determinacion de los productos cruzados
%% para el calculo de la energia imaginaria
%%
%% Etapa de los productos tension alfa corriente beta.
Ealfabeta1=ValfaJ1.*IbetaJ1;
Ealfabeta2=ValfaJ2.*IbetaJ2;
Ealfabeta3=ValfaJ3.*IbetaJ3;
Ealfabeta4=ValfaJ4.*IbetaJ4;
Ealfabeta5=ValfaJ5.*IbetaJ5;
Ealfabeta6=ValfaJ6.*IbetaJ6;
Ealfabeta7=ValfaJ7.*IbetaJ7;
Ealfabeta8=ValfaJ8.*IbetaJ8;
Ealfabeta9=ValfaJ9.*IbetaJ9;
Ealfabeta10=ValfaJ10.*IbetaJ10;
Ealfabeta11=ValfaJ11.*IbetaJ11;
Ealfabeta12=ValfaJ12.*IbetaJ12;
Ealfabeta13=ValfaJ13.*IbetaJ13;
%%
%% Etapa de los productos tension beta corriente alfa
Eabetaalfa1=VbetaJ1.*IalfaJ1;
Eabetaalfa2=VbetaJ2.*IalfaJ2;
Eabetaalfa3=VbetaJ3.*IalfaJ3;
Eabetaalfa4=VbetaJ4.*IalfaJ4;
Eabetaalfa5=VbetaJ5.*IalfaJ5;
Eabetaalfa6=VbetaJ6.*IalfaJ6;
Eabetaalfa7=VbetaJ7.*IalfaJ7;
Eabetaalfa8=VbetaJ8.*IalfaJ8;
Eabetaalfa9=VbetaJ9.*IalfaJ9;
Eabetaalfa10=VbetaJ10.*IalfaJ10;
Eabetaalfa11=VbetaJ11.*IalfaJ11;
Eabetaalfa12=VbetaJ12.*IalfaJ12;
Eabetaalfa13=VbetaJ13.*IalfaJ13;
%%
%% etapa de determinacion de los coeficientes de
%% la energia imaginaria.
Eq1=-Ealfabeta1+Eabetaalfa1;
Eq2=-Ealfabeta2+Eabetaalfa2;
Eq3=-Ealfabeta3+Eabetaalfa3;
Eq4=-Ealfabeta4+Eabetaalfa4;
Eq5=-Ealfabeta5+Eabetaalfa5;
Eq6=-Ealfabeta6+Eabetaalfa6;
Eq7=-Ealfabeta7+Eabetaalfa7;
Eq8=-Ealfabeta8+Eabetaalfa8;
Eq9=-Ealfabeta9+Eabetaalfa9;
Eq10=-Ealfabeta10+Eabetaalfa10;
Eq11=-Ealfabeta11+Eabetaalfa11;
Eq12=-Ealfabeta12+Eabetaalfa12;
Eq13=-Ealfabeta13+Eabetaalfa13;
%%
%% Distribucion de la energia IMAGINARIA por niveles de
%% descomposicion.
figure(3), subplot(13,1,1), plot(t, Eq1);
figure(3), subplot(13,1,2), plot(t, Eq2);
figure(3), subplot(13,1,3), plot(t, Eq3);
figure(3), subplot(13,1,4), plot(t, Eq4);
figure(3), subplot(13,1,5), plot(t, Eq5);
figure(3), subplot(13,1,6), plot(t, Eq6);
figure(3), subplot(13,1,7), plot(t, Eq7);
figure(3), subplot(13,1,8), plot(t, Eq8);
figure(3), subplot(13,1,9), plot(t, Eq9);
figure(3), subplot(13,1,10), plot(t, Eq10);
figure(3), subplot(13,1,11), plot(t, Eq11);
figure(3), subplot(13,1,12), plot(t, Eq12);
figure(3), subplot(13,1,13), plot(t, Eq13);
%%
%% Determinacion de la potencia Activa por niveles:

```

```

Pactiva_n=[ mean(Ep1) mean(Ep2) mean(Ep3) mean(Ep4) mean(Ep5) mean(Ep6) mean(Ep7)
mean(Ep8) mean(Ep9) mean(Ep10) mean(Ep11) mean(Ep12),mean(Ep13)];
figure(4), plot(Pactiva_n,'r'),grid
Pactiva_total=sum(Pactiva_n);
%%
%% Determinacion de la potencia reactiva por niveles:
%%
Qreactiva_n=[ mean(Eq1) mean(Eq2) mean(Eq3) mean(Eq4) mean(Eq5) mean(Eq6) mean(Eq7)
mean(Eq8) mean(Eq9) mean(Eq10) mean(Eq11) mean(Eq12),mean(Eq13)];
figure(5), plot(Qreactiva_n,'r'),grid
Qreactiva_total=sum(Qreactiva_n);
%%
%% determinacion de la potencia de distorsion:
%% llamada tilda por Aredes y Watanabe.
SDp=(Ep13-mean(Ep13))+(Ep1-mean(Ep1))+(Ep2-mean(Ep2))+(Ep3-mean(Ep3))+(Ep4-
mean(Ep4))+(Ep5-mean(Ep5))+(Ep6-mean(Ep6))+(Ep7-mean(Ep7))+(Ep8-mean(Ep8))+(Ep9-
mean(Ep9))+(Ep10-mean(Ep10))+(Ep11-mean(Ep11))+(Ep12-mean(Ep12));
SDq=(Eq13-mean(Eq13))+(Eq1-mean(Eq1))+(Eq2-mean(Eq2))+(Eq3-mean(Eq3))+(Eq4-
mean(Eq4))+(Eq5-mean(Eq5))+(Eq6-mean(Eq6))+(Eq7-mean(Eq7))+(Eq8-mean(Eq8))+(Eq9-
mean(Eq9))+(Eq10-mean(Eq10))+(Eq11-mean(Eq11))+(Eq12-mean(Eq12));
SD=sqrt(mean(SDp.^2+SDq.^2));
%%
%% determinacion de la desviacion estandar de los coeficientes.
%% primera parte analisis sobre Ep
%%
std_p=[ std(Ep1) std(Ep2) std(Ep3) std(Ep4) std(Ep5) std(Ep6) std(Ep7) std(Ep8) std(Ep9)
std(Ep10) std(Ep11) std(Ep12) std(Ep13)];
figure(6), plot(std_p,'r'),grid;
ptilda=sum(std_p);
%%
%% desarrollo de la curva RDD_p
RDD_p=1./[ std(Ep1)/mean(Ep1) std(Ep2)/mean(Ep2) std(Ep3)/mean(Ep3) std(Ep4)/mean(Ep4)
std(Ep5)/mean(Ep5) std(Ep6)/mean(Ep6) std(Ep7)/mean(Ep7) std(Ep8)/mean(Ep8)
std(Ep9)/mean(Ep9) std(Ep10)/mean(Ep10) std(Ep11)/mean(Ep11) std(Ep12)/mean(Ep12)
std(Ep13)/mean(Ep13)];
figure(7), plot(RDD_p,'r'),grid;
%%
%% segunda parte analisis sobre Eq
std_q=[ std(Eq1) std(Eq2) std(Eq3) std(Eq4) std(Eq5) std(Eq6) std(Eq7) std(Eq8) std(Eq9)
std(Eq10) std(Eq11) std(Eq12) std(Eq13)];
figure(8), plot(std_q,'r'),grid;
%%
%% desarrollo de la curva RDD_q
RDD_q=1./[ std(Eq1)/mean(Eq1) std(Eq2)/mean(Eq2) std(Eq3)/mean(Eq3) std(Eq4)/mean(Eq4)
std(Eq5)/mean(Eq5) std(Eq6)/mean(Eq6) std(Eq7)/mean(Eq7) std(Eq8)/mean(Eq8)
std(Eq9)/mean(Eq9) std(Eq10)/mean(Eq10) std(Eq11)/mean(Eq11) std(Eq12)/mean(Eq12)
std(Eq13)/mean(Eq13)];
figure(9), plot(RDD_q,'r'),grid;
qtilda=sum(std_q);
%% potencia armonica segun watanabe y aredes (Modificado a las curvas de
desviacion).
%%
H=sqrt(ptilda^2+qtilda^2);

```

C.7 CONCLUSIONES

En este capítulo, se ha presentado una parte del programa EMTP que correspondiente a los principios y a los elementos que pueden intervenir en el modelado de las estructuras en electrónica de potencia y sistemas de distribución.

La representación discreta de los elementos con la ayuda del método trapezoidal conduce a una formulación estable que es necesaria para la simulación numérica. Con este método y teniendo como variables de estado las tensiones de nodos (formulación nodal) la solución en el instante t se encuentra por resolución de un sistema de ecuaciones lineales para la red.

C.8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Dommel, EMTP “Theory Book”, Microtran Power System Analyses Corporation, Vancouver, British Columbia 1996.
- [2] H.W. Dommel, T. Liu, EMTP User Group, “EMTP Rule Book, Vol 1 y 2, 1995
- [3] H. K. Holdalein, L. Priskley, “ATPDraw manual del Usuario”, Versión 3.0, Julio del 2001, Boneville Power Administration, USA, SINTEF, Noruega.
- [4] Plot XY, Máximo Cereaolo, Universidad de Pisa, *ceraolo@dsea.unipi.it* .
- [5] J. Martinez- Velasco “Simulación de problemas de calidad de la potencia con el ATP, Actas del Curso de postgrado intensivo “Aplicaciones del ATP/EMTP en Sistemas de Distribución” Administrado por: Universidad Nacional de La Plata – Buenos Aires, diciembre de 1999.
- [6] H. Henao, “CAO et Simulation des Associations Convertisseur – Machines: Applications à la machine à induction”, PhD tesis, Grenoble June 1990.

APÉNDICE D

Definiciones y normas sobre potencia eléctrica

D.1 INTRODUCCIÓN

Desde el advenimiento de la ingeniería eléctrica se han desarrollado muchos esfuerzos y se han presentado muchos debates en relación a los valores que toman los parámetros eléctricos bajo condiciones no senoidales y desbalanceadas, tales parámetros son: la potencia activa, la potencia reactiva, la potencia aparente, la potencia no activa, la potencia de distorsión, etc. [1-14]. Nuevas definiciones continúan apareciendo [16-18].

Las propuestas de las nuevas definiciones usualmente resaltan algunas inconsistencias de las definiciones previamente publicadas y sugieren una manera de eliminarlas. Queda la sensación de que cada nueva definición da una solución a alguna inconsistencia pero introduce problemas en otras áreas. A pesar de que se dice que las definiciones que están ahora emergiendo resuelven la mayoría de problemas, el debate sobre estas definiciones se ve que estará presente en los años por venir. Hay un consenso real en la comunidad científica internacional y es que las normas actuales que establecen unas definiciones sobre los parámetros de potencia eléctrica, utilizados para evaluar el flujo de la energía eléctrica en la redes de potencia no son adecuados para estudios económicos cuando la tensión y la corriente son distorsionadas o cuando se ven problemas de desbalance en sistemas polifásicos [16].

Este debate en la década pasada fue confinado, más o menos a un nivel teórico. Solamente algunos instrumentos para investigación estaban disponibles para la medida de la potencia eléctrica según cada definición [1]. La difusión de técnicas digitales y el consecuente avance en medidas trifásicas ha pasado del laboratorio al campo, este tipo de planteamientos [17-18].

Esta tecnología es particularmente importante ahora, e impone buscar el consenso de los investigadores sobre las definiciones de potencia, puesto que muchos de los nuevos instrumentos que hay en el mercado no tienen todas las ventajas de la nueva tecnología [19,21]. Tradicionalmente los instrumentos electromecánicos o de estado sólido se limitan solamente a las definiciones que pueden ser implementadas por su tecnología. En consecuencia, las formulas y operaciones empleadas, que son exactas en

condiciones senoidales, producen errores cuando se tiene otro tipo de forma de onda [19,21].

Los nuevos instrumentos digitales, que no presentan estos límites tecnológicos, presentan problemas debido a que simulan los principios de operación de esa generación previa (los electromecánicos) o se implementan en ellos conceptos de medida obsoletos [1,19]. Se han reportado diferencias en la lectura en un rango del 20%-30% en instrumentos que miden kVA en el campo [19] y se puede decir que estas diferencias se dan solamente por las diferentes definiciones de potencia que los fabricantes programan en sus productos.

De lograrse un consenso sobre las definiciones de la potencia, estos instrumentos darán resultados más cercanos y se podría aventurar que las diferencias entre ellos desaparecerían a futuro.

De aquí se infiere que urge unificar lineamientos en relación con la estrategia a adoptar por usuarios y fabricantes de instrumentos, para las técnicas de medida en razón del incremento de cargas no lineales. Esto se ve mucho más crítico cuando hay una gran proliferación de instrumentos que pueden separar la componente fundamental de los armónicos, lo que fue el origen del std 1469 [2, 24].

Esta capacidad tiene implicancias éticas y legales en relación a los consumidores con cargas no lineales y desbalanceadas que por tradición no están acostumbrados a verse como contaminantes de la red [22]. Nótese que al ser la generación de energía una actividad contaminante, la polución de la red no es una contaminación virtual, sino que se traduce en contaminación ambiental, pues una merma en el rendimiento de transmisión implica generar más energía para abastecer el mismo consumo.

Las opiniones esbozadas en los párrafos anteriores, primordialmente, son una adaptación de los lineamientos presentados por el grupo de trabajo sobre situaciones no senoidales de la IEEE [1].

El intento de los integrantes del grupo de IEEE no es resolver las controversias teóricas sobre las definiciones de la potencia sino dar una guía a los diseñadores de equipo de medida en relación con los parámetros que deben ser medidos.

D.2 PARÁMETROS QUE DEBEN SER MEDIDOS

La filosofía de trabajo del grupo de trabajo de IEEE es la de separar el producto principal “*los términos de la potencia fundamental*”, de la “*contaminante*”, esta última está compuesta por los términos no fundamentales y sus productos cruzados.

Se reconocen los siguientes puntos:

- Las compañías del servicio eléctrico generan y distribuyen tensiones muy senoidales y libres de contaminación, o sea “*componente fundamental*”.
- Los consumidores esperan una tensión senoidal.
- En la mayoría de los casos, esto es más del 99% del total de la potencia activa que se encuentra en la red es *potencia fundamental activa*.

La ventaja que esta propuesta presenta es el tratamiento de la potencia según las propuestas clásicas. Igualmente, da elementos de valoración cuantitativa de los armónicos presentes en la red.

D.2.1 Parámetros en los sistemas monofásicos:

D.2.1.1 Tensión y corriente instantáneos:

Para comenzar, se presentan las definiciones de la tensión y de la corriente con respecto al tiempo:

$$v(t) = \sum_{h=0}^{\infty} v_h(t) = V_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h) \quad (D.1)$$

donde $v(t)$ es la tensión instantánea, V_0 es el valor promedio, V_h y θ_h son respectivamente el valor eficaz y el ángulo de fase de la tensión armónica h .

Igualmente para la corriente:

$$i(t) = \sum_{h=0}^{\infty} i_h(t) = I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_0 t + \delta_h) \quad (D.2)$$

donde $i(t)$ es la corriente instantánea, I_0 es el valor promedio, I_h y δ_h son respectivamente el valor eficaz y el ángulo de fase de la corriente armónica h .

El valor eficaz de la corriente y de la tensión armónica es:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad \text{y} \quad V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (D.3)$$

Obsérvese que los parámetros pueden ser definidos en el marco del tiempo [6-8] o en el de las frecuencias [3-4].

Concentrando la atención en el marco de las frecuencias, se podrá separar la componente fundamental V_1, I_1 de las componentes armónicas V_h, I_h de esta forma:

$$V^2 = V_1^2 + V_H^2 \quad \text{y} \quad I^2 = I_1^2 + I_H^2 \quad \text{donde} \quad V_H = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad \text{y} \quad I_H = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (D.4)$$

y así, se llega naturalmente a la definición de *potencia aparente*:

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2$$

Simplificando, la potencia aparente se podrá ver como dos componentes:

$$S^2 = S_c^2 + S_N^2 \quad (D.6)$$

donde

$$S_N^2 = (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 \quad (D.7)$$

Descomposiciones adicionales permiten observar lo siguiente:

$$S^2 = \sum_h \overline{V_h^2} \sum_h \overline{I_h^2} = \sum_h \overline{S_h^2} + \sum_{h \neq n} \overline{V_h^2} \overline{I_n^2} \quad (D.8)$$

donde $S_h^2 = \overline{V_h^2} \overline{I_h^2}$, coincidiendo esta descomposición con el estándar 100 de ANSI/IEEE [9].

Definiendo:

$$Q = \sum_h V_h I_h \sin \varphi_h \quad (D.9)$$

$$\text{siendo } \varphi_h = \theta_h - \delta_h \quad (D.10)$$

$$\text{y considerando que: } P = \sum_h \overline{V_h} \overline{I_h} \cos \varphi_h \quad (D.11)$$

se obtiene:

$$P^2 = \sum_h P_h^2 + \sum_{h \neq n} P_h P_n \quad (D.12)$$

donde, $P_h = V_h I_h \cos \varphi_h$ (D.13)

$$Q^2 = \sum_h Q_h^2 + \sum_{h \neq n} Q_h Q_n \quad (D.14)$$

donde

$$Q_h = V_h I_h \operatorname{sen} \varphi_h \quad (D.15)$$

Sumando miembro a miembro:

$$P^2 + Q^2 = \sum_h S_h^2 + \sum_{h \neq n} P_h P_n + \sum_{h \neq n} Q_h Q_n \quad (D.16)$$

de donde se despeja

$$\sum_h S_h^2 = P^2 + Q^2 - \sum_{h \neq n} P_h P_n - \sum_{h \neq n} Q_h Q_n \quad (D.17)$$

Sustituyendo la expresión precedente en la definición de potencia aparente, se obtiene:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + \sum_{h \neq n} V_h^2 I_n^2 - \sum_{h \neq n} P_h P_n - \sum_{h \neq n} Q_h Q_n = P^2 + Q^2 + \sum_{h \neq n} V_h^2 I_n^2 \left[1 - \frac{V_n}{V_h} \frac{I_h}{I_n} \cos(\varphi_h - \varphi_n) \right] \quad (D.18)$$

Como se define en el estándar 100 ANSI/IEEE $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$ y la potencia de deformación resulta

$$D^2 = \sum_{h \neq n} V_h^2 I_n^2 \left[1 - \frac{V_h}{V_n} \frac{I_n}{I_h} \cos(\varphi_h - \varphi_n) \right] \quad (D.19)$$

La expresión (D.19) concuerda con el resultado propuesto por V. G. Smith en 1933 [3].

Nótese que la dirección de flujo puede ser asignada a P y Q pero no se puede decirse nada de la dirección de D . Ésta se representa solamente como un producto formal, su interpretación física puede ser algo confusa pero se puede utilizar como un indicador del estado de la red.

Reorganizando la potencia S_N y dividiéndola por S_1 se tiene:

$$\frac{S_N^2}{S_1^2} = \left(\frac{I_H}{I_1} \right)^2 + \left(\frac{V_H}{V_1} \right)^2 + \left(\frac{V_H I_H}{V_1 I_1} \right)^2 \quad (D.20)$$

Definiendo la tasa de distorsión armónica como: $\tau_v = \frac{V_{eh}}{V_{e1}}$; $\tau_I = \frac{I_{eh}}{I_{e1}}$ la ecuación

(D.20) expresada en función de la tasa de distorsión resulta:

$$\left(\frac{S_N}{S_1} \right)^2 = (\tau_I)^2 + (\tau_v)^2 + (\tau_I \cdot \tau_v)^2 \quad (D.21)$$

El indicador numérico más ilustrativo para cuantificar el aprovechamiento de la transmisión de energía es el factor de potencia:

$$f.p. = \left(\frac{P}{S} \right) = \frac{(P_1 + P_H)}{S} \quad (D.22)$$

que resulta de utilidad para hacer una evaluación de la operación del sistema en términos económicos. Esto es:

Poder separar P_1 , Q_1 y S_1 de la potencia no fundamental, permite facilitar la aplicación de técnicas económicas, tales como técnicas de compensación y de despacho energético.

D.2.2 Parámetros en los sistemas trifásicos:

El estándar IEEE 1459 [24] presenta un conjunto de nuevas definiciones que tratan de estar de acuerdo con las definiciones presentadas por W.V. Lyon [5]. La transferencia de energía óptima posible que absorbe una carga se obtiene cuando la tensión y la corriente no cambian, lo que permite plantear las siguientes definiciones:

- La potencia aparente es la máxima potencia transmitida a la carga (o entregada por la fuente) mientras se mantenga la misma pérdida de transmisión y se mantenga constante la tensión y la corriente en la carga [2].
- El factor de potencia es la relación de la potencia medida por el máximo valor de la potencia que puede ser transmitida considerando pérdidas por transmisión constantes y tensión de carga constante (aquí puede reemplazarse la potencia por la energía transmitida durante un intervalo de tiempo) [2].

Con estas dos definiciones se generan incongruencias entre los conceptos dados por las normas std 100 [9] y los presentados por la std 1459 [24], por causa de intentar hacer una representación similar a la de los sistemas monofásicos.

Hacer un análisis en sistemas trifásicos involucra un concepto nuevo, el desbalance. Edwart Kimbart [3] presentó en los años 30 un artículo que clarifica el origen de muchas transformaciones de desacoplo del sistema trifásico, la más conocida es la de Fortescue, [4].

D.2.2.1 Análisis de las componentes simétricas:

Al obtenerse una matriz de similitud [23] mediante el cálculo de los valores y vectores propios de la matriz de impedancias de un sistema trifásico, se puede llegar a una interesante forma del modelo denominada representación en componentes simétricas, que permite visualizar nuevas conclusiones acerca del funcionamiento del sistema. Ésta divide el sistema trifásico en 3 subsistemas no acoplados entre sí, más sencillos de analizar.

La ecuación característica del sistema lineal será:

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad (D.23)$$

con un sistema representado por la impedancia dada por la expresión :

$$[\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3] = [Z + 2M \quad Z - M \quad Z - M] \quad (D.24)$$

El sistema en el marco transformado satisfará la relación:

$$(\lambda I - A) \bullet X = 0 \quad (D.25)$$

donde:

$$A = \begin{bmatrix} Z & M & M \\ M & Z & M \\ M & M & Z \end{bmatrix} \quad (D.26)$$

Se puede reordenar el sistema de ecuaciones y construir una transformación de similitud basándose en los vectores propios del sistema [23]:

$$Z_k = T^{-1} Z_{abc} T \quad (D.27)$$

la matriz T está formada por los vectores propios del sistema y debe ser no singular.

Escogiendo los vectores con relación al tema de interés, se puede presentar, las componentes de Fortescue [13], de Clark [10-12] o de Park [14] como bien resume Kimbart [15].

Pudo haberse conseguido infinitas formas de la matriz de transformación y con ello, infinitas representaciones del modelo. Por motivos históricos, la selección en el std 1459 fue la de Fortescue, utilizando los conceptos de secuencia positiva, negativa y cero pero cabe la posibilidad de seleccionar otras transformaciones que también permitan obtener conclusiones equivalentes.

D.2.2.2 El std 1459 y la definición de potencia aparente efectiva:

El std 1459 [24] introduce la definición de tensión, corriente y potencia efectiva, tomando como caso general al sistema trifásico que se ve en la figura D.1 (donde una carga desbalanceada es alimentada por un sistema de cuatro hilos). Se resalta la capacidad de transmisión (llamada "potencia efectiva") dependiendo del grado de utilización del conductor en la figura D.1b [2].

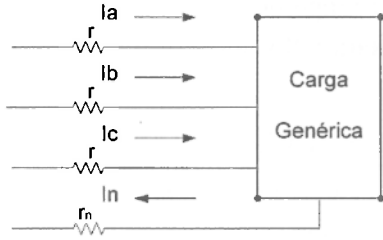


Figura D. 1a

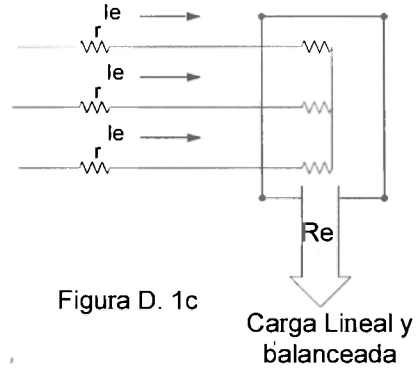


Figura D. 1c

$$f.p. = \frac{P}{S}$$

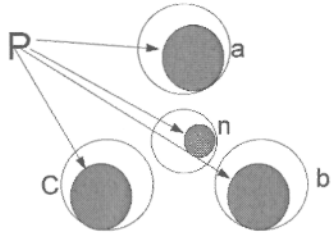


Figura D. 1b

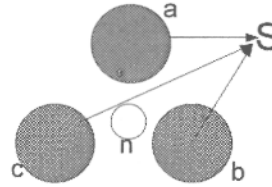


Figura D. 1d

Figura D.1: Definición del factor de potencia en sistemas trifásicos. Figura 1a: sistema con carga genérica y desbalance. Figura 1b. Utilización del conductor para el sistema de la figura 1a. Figura 1c: Sistema óptimo con f.p.=1. Figura 1d: Utilización del conductor para el sistema de la figura 1c [2].

La potencia disipada por el sistema de transmisión es:

$$\Delta P = 3r(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) + r_n I_n^2 \quad (D.28)$$

Un sistema óptimo, es decir un sistema con factor de potencia unitario, figura D.1c, disipará la misma potencia en la línea pero por ser carga equilibrada $I_a = I_b = I_c = I_e$; $I_n = 0$ se puede simplificar como:

$$\Delta P = 3rI_e^2$$

Se deduce así, la expresión para la corriente efectiva o equivalente a partir de (D.28) y (D.29).

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + \rho I_n^2)} \quad ; \quad \rho = \frac{r_n}{r} \quad (D.30)$$

Aquí caben dos observaciones importantes:

- La corriente efectiva se toma como la relación entre lo que sería una carga lineal libre de desbalance y una desbalanceada.

- La relación entre la resistencia de transmisión y la resistencia de retorno ρ , es un factor complejo de estimar y se encuentra en el rango de 0.2 - 4. El Std 1459 lo supone igual a 1 ($\rho = 1$). En [2] hay un comentario: “los modernos instrumentos tienen la capacidad de estimarlo”.

De manera similar se define la tensión efectiva V_e . La carga es representada por una resistencia equivalente R_Y conectada en estrella (Y) y tres resistencias R_Δ conectadas en triángulo (Δ). Las potencias respectivas para cada condición serán:

$$P_Y = \frac{3V_e^2}{R_Y} \quad \text{y} \quad P_\Delta = \frac{3V_e^2}{R_\Delta} \quad (\text{D.31})$$

y definiendo la relación:

$$\xi = \frac{P_\Delta}{P_Y} = \frac{3R_Y}{R_\Delta} \quad (\text{D.32})$$

La igualdad de potencia, entre un sistema resistivo y equilibrado (sistema óptimo de transmisión y consumo) y un sistema genérico está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}{R_Y} + \frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{3R_Y} \xi = 3 \frac{V_e^2}{R_Y} + 3 \frac{(\sqrt{3}V_e)^2}{3R_Y} \xi \quad (\text{D.33})$$

lo que permite introducir la definición de tensión efectiva:

$$V_e = \sqrt{\frac{3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + \xi(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)}{9(1 + \xi)}} \quad (\text{D.34})$$

El std 1459 supone que el nuevo parámetro ξ es igual a 1 ($\xi = 1$) y entonces la tensión efectiva resulta:

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} \quad (\text{D.35})$$

$$\text{y la corriente efectiva } I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} \quad (\text{D.36})$$

con lo cual define la potencia aparente efectiva como:

$$S_e = 3V_e I_e \quad (\text{D.37})$$

Según los autores de la norma [1], esta potencia sí refleja correctamente las pérdidas por transmisión, las pérdidas en el camino de neutro, así como el problema del desbalance. De esta forma, la máxima potencia activa que puede ser transmitida a través de un sistema trifásico resistivo puro, libre de pérdidas por transmisión y balanceado estará dado por el valor de S_e .

Estas expresiones fueron sugeridas y evaluadas por los participantes del congreso de IAEE de 1933 [5].

D.2.3 Comentarios:

- Intentar explicar las relaciones entre el desbalance y la carga balanceada llevó a las definiciones de (ρ, ξ) . Tener implícitos en la definición a estos dos factores (ρ, ξ) hace del std. 1459 una norma de difícil calibración. Estos parámetros son dependientes de la topología y del estado del sistema.
- El std. 1459 pretende mantener los conceptos de potencia en sistemas monofásicos extendiendo o intentando generalizarlos para sistemas trifásicos.
- Es importante aclarar que para un sistema concebido originalmente como sistema trifásico, el sistema monofásico es una anomalía y en consecuencia, no es fácil pasar de las explicaciones de un sistema monofásico a uno trifásico sino más bien, hacer la generalidad del sistema polifásico y luego considerar al sistema monofásico como caso particular.

En cuanto al grado de descomposición que plantea la norma respecto de la potencia efectiva, se tiene que las componentes de tensión y corriente pueden ser descompuestas en función de las componentes armónicas y su fundamental, siguiendo el razonamiento para el caso monofásico:

$V_e^2 = V_{e1}^2 + V_{eH}^2$ y $I_e^2 = I_{e1}^2 + I_{eH}^2$, donde el subíndice 1 indica la componente fundamental (50 o 60Hz).

$I_{e1}^2 = \frac{1}{3}(I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + \rho_1 I_{m1}^2)$, teniendo además $I_{eH}^2 = I_e^2 - I_{e1}^2$ y los valores para la tensión:

$$V_{e1}^2 = \frac{1}{18} \left[3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + \bar{v}_{a1}^2 + \bar{v}_{b1}^2 + \bar{v}_{c1}^2 \right] \text{ con } \bar{v}_{a1}^2 = \bar{v}_c^2 - V_{e1}^2; \xi = 1$$

De los productos cruzados se obtienen 4 términos de manera similar a lo propio del caso monofásico:

$$S_e^2 = (3V_{e1}I_{e1})^2 + (3V_{e1}I_{eH})^2 + (3V_{eH}I_{e1})^2 + (3V_{eH}I_{eH})^2 \quad (D.38)$$

El primer término, es la potencia aparente fundamental $S_{e1} = 3V_{e1}I_{e1}$. El std 1459 muestra como la potencia fundamental puede ser separada en la potencia fundamental aparente de secuencia positiva, utilizando la transformación de Fortescue [4] (secuencias positiva, negativa y cero) para la componente de secuencia positiva S_1^+ . Luego, S_1^+ estará representada por la suma cuadrática de la potencia activa fundamental y la potencia reactiva fundamental, $(S_1^+)^2 = (P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2$ y los siguientes tres términos constituyen la potencia aparente efectiva no fundamental S_{eN} . La transformación de Fourier está implícita en la definición y por lo tanto, son fasores.

En estas definiciones se aplicaron las componentes simétricas para detectar el desbalance y la transformada de Fourier para obtener la expresión de deformación.

Un detalle de la descomposición que hace la std 1459 se presenta en la figura D.2. Se puede ver incluso como un árbol intuitivo de *multirresolución*.

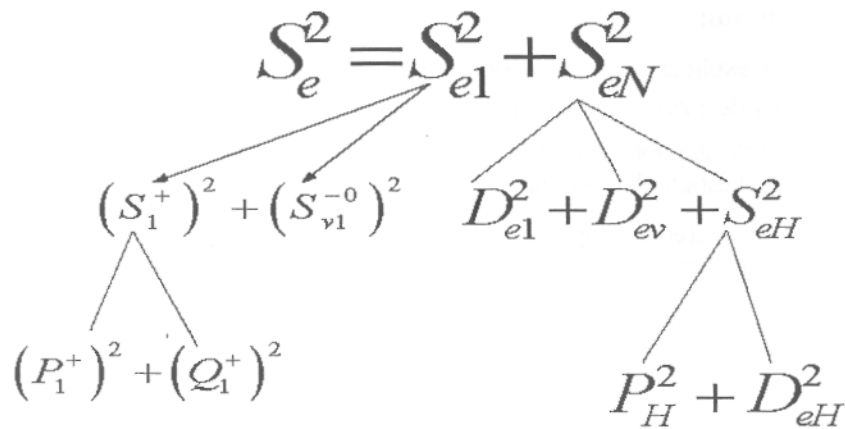


Figura D.2. Multirresolución intuitiva de la potencia aparente efectiva S_e en la std 1459

Dada esta estructura de *multirresolución* se pueden inferir las siguientes ventajas:

- El “producto principal” P_1^+ se separa de las componentes de potencia. Las cargas no lineales tienen una pequeña porción de P_1^+ convertida en potencia activa fundamental de secuencia negativa P_1^- , potencia activa fundamental de secuencia cero P_1^0 y potencia poliarmónica P_H^{+0} con las tres secuencias. Usualmente son potencias signadas y salen de la carga, es decir la carga no lineal es generadora de estas componentes.
- La potencia reactiva fundamental de secuencia positiva Q_1^+ también puede ser separada y puede ayudar a estimar el banco capacitivo necesario para la corrección del factor de potencia fundamental de secuencia positiva $\cos \theta_1^+$.
- La potencia aparente efectiva no fundamental S_{eN} permite la cuantificación de la severidad de la carga en relación a la distorsión. Caracteriza el grado de severidad de operación de dicha carga, bajo, medio o alto. Ayuda también, a especificar el tamaño del equipo de compensación estática (“customer power” o FACTS).
- La potencia aparente efectiva S_e y sus componentes fue propuesta en el std 1459 procurando mantener las ideas clásicas del análisis sinusoidal, dado que el grupo de trabajo del IEEE considera que un siglo es más que suficiente demostración de lo acertado para el ejercicio de la ingeniería eléctrica [2].

D.2.3.1 Inquietudes con respecto al comentario 4:

- La propuesta presentada en el año 1933 por Buchholz-Goodhue [5] fue la fuente de inspiración para el grupo de IEEE, pero existiendo herramientas para el análisis de señales más poderosas en localización tiempo frecuencia, ¿por qué no avanzar por esta vía?

Un intento fue presentado por W. Yoon y M. J. Davaney [17-18] aunque el análisis hecho por ellos se limitó a un sistema balanceado.

- 2) Desde el punto de vista de tener una herramienta que evalúe el estado estacionario y el desbalance, es valioso el aporte del grupo IEEE, pero el estado transitorio no fue considerado.
- 3) La controversia entre el estándar 100 y el estándar 1459 radica primordialmente en la evolución que uno hace del otro. No obstante, los dos parten de generalizar los conceptos monofásicos procurando aplicarlos a los sistemas polifásicos. De esta manera el trabajo no queda bien estructurado pues un sistema monofásico es una aberración del diseño original en el sistema de generación que es en realidad trifásico. En consecuencia, sería mejor partir directamente de una concepción polifásica que explique el fenómeno desde su origen.
- 4) La cantidad de información obliga a pensar en técnicas que guarden la mayor cantidad de información con el mínimo gasto en memoria. Para la técnica en frecuencia los transitorios representan una limitación pues las técnicas de Fourier se ven endebles, ya que la serie en rigor no es aplicable dada la no estacionalidad de la señal [20].

D. 3 CONCLUSIONES

El nuevo estándar de IEEE el 1459 enfatiza en las antiguas definiciones de potencia en el marco de Fourier, procura ser claro en el tratamiento del desbalance utilizando la transformación de similitud de Fortescue. Con el objeto de hacer énfasis en la clasificación de las cargas según el grado de contaminación, procura una multirresolución intuitiva pero deja de lado el concepto de transitorios y la medida de la energía en tal estado.

Los pasos a seguir para las medidas en sistemas trifásicos utilizando el std 1459 coinciden con los presentados en esta tesis y son:

- Medir las componentes instantáneas de tensión y corriente.
- Transformar al marco de las componentes simétricas.
- Pasar al marco de la transformada de Fourier.
- Calcular F.P. como índice de calidad.
- Descomponer la potencia aparente efectiva en componentes de distorsión y desbalance.

En el paso 2 (como demostró Edward Kimbart [3] en 1933) las transformaciones de similitud son infinitas [23] y dependen del sistema de vectores propios que se eligen. En el caso de esta tesis se optó por la transformada de Edith Clarke [10-12], pues la matriz es real y por ello tiene buena facilidad de cómputo.

Con el actual desarrollo en análisis de señales, las técnicas de transformación que respetan la identidad de Parseval son muchas [20]. Cuando la base del sistema de análisis utiliza las funciones exponenciales, se tiene el tradicional análisis fasorial aportado por C. Steinmetz en 1893. Pero con el desarrollo de I. Daubechies en 1988 [20], las teorías generalizadas proponen infinitos conjuntos de posibles funciones: “las onditas”. Estas teorías generan gran esperanza para el tratamiento de señales no estacionarias y por ende, permitirán incluir nuevos conceptos para el tratamiento de los transitorios.

Como el sistema del std 1459 involucra elementos de difícil estimación tales como (ρ, ξ) , se generan limitaciones y se debe buscar un índice de evaluación que sea independiente de este tipo de parámetros.

La descomposición de la componente útil o “componente principal” como la llama A. Emanuel [2] surge de manera natural cuando se hace análisis de multirresolución en el marco de la transformada ondita, como se propone en esta tesis.

D.4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Working Group on Non sinusoidal situations: "Practical Definitions for Power systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No.1, Jan. 1996, pp. 79-87.
- [2] A.E. Emanuel, "Summary of IEEE Standard 1459: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Condition" IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 40, No.3, May. 2004, pp. 869-876.
- [3] V. G. Smith, "Reactive and Fictitious Power" A.I.E.E. Trans. September 1933, pp.748-751.
- [4] C. L. Fortescue "Power, Reactive Volt-Amperes, Power Factor" A.I.E.E Trans. September 1933, pp.758-762.
- [5] W.V. Lyon y otros. Discusión sobre potencia "Power, Reactive Volt-Amperes, Power Factor" A.I.E.E Trans. September 1933, pp.762-790.
- [6] S. Fryze, "Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nicht-sinusförmigen Verlauf von Strom und Spannung", ETZ-Arch. Elektrotech., Vol. 53, 1932, pp. 596-599.
- [7] S. Fryze, "Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nicht-sinusförmigen Verlauf von Strom und Spannung", ETZ-Arch. Elektrotech., Vol. 53, 1932, pp. 625-627.
- [8] S. Fryze, "Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nicht-sinusförmigen Verlauf von Strom und Spannung", ETZ-Arch. Elektrotech., Vol. 53, 1932, pp. 700-702.
- [9] IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms. ANSI/IEEE Std 100-1996, The Ins. of Electrical and Electronics Engineers, Sexta edición, Inc. New York, 1996.
- [10] E. Clarke, "Circuits Analysis of A-C Power Systems, Vol I-Symmetrical and Related Components", New York: John Wiley and Sons, Inc. 1943.
- [11] --- 1938, "Problems solved by Modified Symmetrical Components: Part I, Unsymmetrical Circuits, faults, and Open Conductors" General electric Review, Vol. 41, No. 11, 1938, pp.488-494.
- [12] --- 1938, "Problems solved by Modified Symmetrical Components: Part II: Open-delta and Scott-Connected Transformer and autotransformer banks." General electric Review, Vol. 41, No. 12,1938, pp.546-549.
- [13] C.L. Fortescue. "Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the solution of polyphase networks" AIEE Transactions, Vol. 37, 1918, pp. 1027-1140.

- [14] R. H. Park. "Two-Reaction Theory of synchronous Machines – Part I" AIEE Transactions, Vol. 48, 1929, pp. 716-727.
- [15] Edward W. Kimbark, "Two-Phase Co-ordinates of a three – Phase Circuit" AIEE Transactions, Vol. 58, 1939, pp. 894-910.
- [16] Discussion paper: IEEE Working Group on Non sinusoidal situations: "Practical Definitions for Power systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion." IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No.1, Jan. 1996, pp. 88-101.
- [17] W. Yoon, M. J. Davaney, "Power Measurement Using the Wavelet Transform", IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, Vol. 47. No.5, October 1998, pp. 1205-1210.
- [18] W. Yoon, M. J. Davaney, "Reactive Power Measurement Using the Wavelet Transform", IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, Vol. 49. No.2, April 2000, pp. 246-252.
- [19] A. Domijan, A. Gilani, G. Lamer, C. Stiles and C.W. Williams, "Watt-hour Meter Accuracy Under Controlled Unbalanced Harmonic Voltage and Current Conditions" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No.1, Jan. 1996, pp. 64-70.
- [20] I. Daubechies "Ten Lectures on Wavelets", Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.
- [21] A. Ustariz , A. Toro, R. Nieto Documento de trabajo: "Trabajos de Grado I -2005, Grupo de Redes de Distribución y potencia", Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2005.
- [22] Comisión de regulación de energía y gas de la republica de Colombia – CREG . Resolución CREG 024 del 2005.
- [23] Chi – Tsong Chen "Linear Systems Theory and Design", Saunders College Publishing 1984, International Edition.
- [24] IEEE std 1459 -2000 "IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions" Power System Instrumentation and Measurements Committee of the IEEE Power Engineering Society, January/ 2000.

APÉNDICE E

Método de cálculo de parámetros de simulación

E.1 INTRODUCCIÓN:

Se presenta a continuación la forma de introducir los parámetros para los casos de simulación presentados en la tesis. Se muestra paso a paso cómo armar el caso 11 de simulación presentado en el capítulo 5. En ese capítulo están definidas las tablas de los parámetros a ser utilizados en la simulación de los caso 11 y 13 donde se presentan las características del sistema de prueba de IEEE de 13 barras.

E.2 Equivalente de Red de sistemas, cargas convencionales, bancos de capacitores y modelos de transformadores [1]:

E.2.1 Paso 1: FUENTE

Para la fuente trifásica se pide en ATP el valor pico de la tensión de fase (línea – neutro) que en un sistema de distribución a 115kV está dada por la ecuación (E.1):

$$V_m = 115000 * \sqrt{\frac{2}{3}}(1.2 p.u) \quad (E.1)$$

Así la amplitud será el parámetro a ubicar en la ventana del ATPDraw para la fuente AC tipo 14, Amp = 114930 V.

E.2.2 Paso 2: Equivalente de Red del Sistema

Determinar el sistema trifásico equivalente proviene de la costumbre histórica de los *equivalente de red* con TNA “Transient Network Analysis”, para ello en ATP se plantea el uso de un circuito Π equivalente del sistema trifásico. En él se ubican las componentes R, L, y C con sus respectivos valores propios y mutuos. Estos se determinan a continuación.

Una práctica empírica que ha dado buen resultado [1] es estimar la impedancia de secuencia cero del sistema asumiéndola como 2.5 veces mayor que la impedancia de secuencia positiva que se puede calcular con la ecuación (E.2) y (E.3).

$$Z^+ = \frac{1}{I_{sc}} p.u. \quad (E.2)$$

Con una relación $\frac{X}{R} = 5$ se tiene:

$$Z^0 = 2.5Z^+ \quad (E.3)$$

y utilizando el sistema de conversión de las ecuaciones (E.4) que pasa de componentes de secuencia 0-1-2 a componentes de fase a-b-c, se obtienen los parámetros del sistema equivalente:

$$Z_{propia} = \frac{Z^0 + Z^+}{3} ; Z_{mutua} = \frac{Z^0 - Z^+}{3} \quad (E.4)$$

Nota: Si para el estudio no hay fenómenos de desbalance y si el sistema no posee bancos capacitivos, el sistema equivalente puede ser representado por un elemento R-L-C, donde las R y L son las resistencias de secuencia positiva.

E.2.3 Paso 3: Carga Lineal

Las cargas tipo P y Q son representadas por un sistema conectado en Y (estrella) al alimentador. La carga está conformada por resistencias, inductores y capacitores. Si la carga va puesta a tierra, entonces, el punto común de la estrella es puesto a tierra. De otra forma, la conexión de la estrella se deja eléctricamente flotante.

Estas cargas y los bancos capacitivos se implementan utilizando la rutina “Data Base Module (DBM)” facilidad existente en ATP [3]. Con esta rutina es posible que el usuario introduzca los resistores de carga, inductores y capacitores, de manera personalizada, ubicándolos en la red construida con el ATPDraw.

A través de estos elementos se crean automáticamente por la tabla de carga los elementos necesarios para representar la condición de carga que se pretende evaluar. Ocasionalmente, será necesario cambiar los datos de manera individual y en forma manual. Por ejemplo, si todo o una fracción de la carga total en una barra es debida a una carga no lineal y si esta carga está sujeta a un estudio de armónicos, entonces el modelo de carga se debe modificar en ATPDraw de modo tal que represente las porciones equivalentes de los tipos de carga presentes.

A continuación se presenta la forma en cómo se hace el cálculo de las cargas convencionales, así como también un modelo de bancos de condensadores en sistemas de distribución. Considérese el siguiente caso donde un alimentador trifásico conectado en estrella (Y), puesto a tierra, opera a 7.200 Vrms (tensión de fase) y tiene las siguientes características:

100 kW, 30 kVAr de carga en la fase a,

150 kW, 50 kVAr de carga en la fase b,

200 kW, 75 kVAr de carga en la fase c, y un banco trifásico de 900 kVAr en paralelo.

El equivalente de R y L que se conecta en paralelo en la carga para la fase a está representado por las ecuaciones (E.5) (la convención con el doble subíndice donde el segundo es ‘t’ enfatiza la conexión respecto de tierra):

$$R_{...} = \frac{7,200^2}{100,000} = 518.4 \Omega \quad L_{...} = \frac{7,200^2}{377 \cdot 30,000} \cdot 1,000 = 4,583 \text{ mH} \quad (\text{E.5})$$

De manera similar, el valor para las fases b y c se determinan de manera similar, por las ecuaciones (E.6):

$$R_{bt} = 345.6 \Omega, L_{bt} = 2,750 \text{ mH}, R_{ct} = 259.2 \Omega, L_{ct} = 1,833 \text{ mH}. \quad (\text{E.6})$$

El equivalente de la capacitancia conectado en estrella está dado por la ecuación (E.7):

$$C_{at} = C_{bt} = C_{ct} = \frac{900,000/3}{377 \cdot 7,200^2} \cdot 10^9 = 15.35 (\mu F). \quad (\text{E.7})$$

Nota : El cálculo anterior de la capacitancia es idéntico para capacitores conectados en delta puesto que serán modelados con conexiones en estrella sin puesta a tierra.

Aquellas fases donde hay ausencia de carga se modelará con un valor muy grande de R y L (i.e., 999999) y la capacidad será cero C.

Se emplearon modelos “caracterizados por el usuario” basados en la rutina del ATP “Data Base Module (DBM)”. El archivo de usuario específico *.sup, provee al usuario de cargas trifásicas para ser conectadas en paralelo al alimentador. Estos archivos serán usados con ATPDraw.

E.2.3.1 Pasos para crear un macro modelo con ATP utilizando la rutina DBM (Data Base Module [1-2])

1. Construya el circuito que desee convertir en macro modelo con la rutina DBM utilizando ATPDraw (figura E.1). Dé nombre a los nodos para tener una referencia fácil en los pasos que desarrolle en el futuro. En este caso, CAP representa el nodo trifásico del extremo superior.

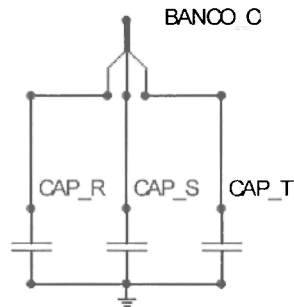


Figura E.1: Modelo a ser desarrollado con la rutina DBM

En la figura E.1 se muestra el modelo construido con ATPDraw y en la figura E.2 la ventana que sirve de interfaz con el usuario del modelo.

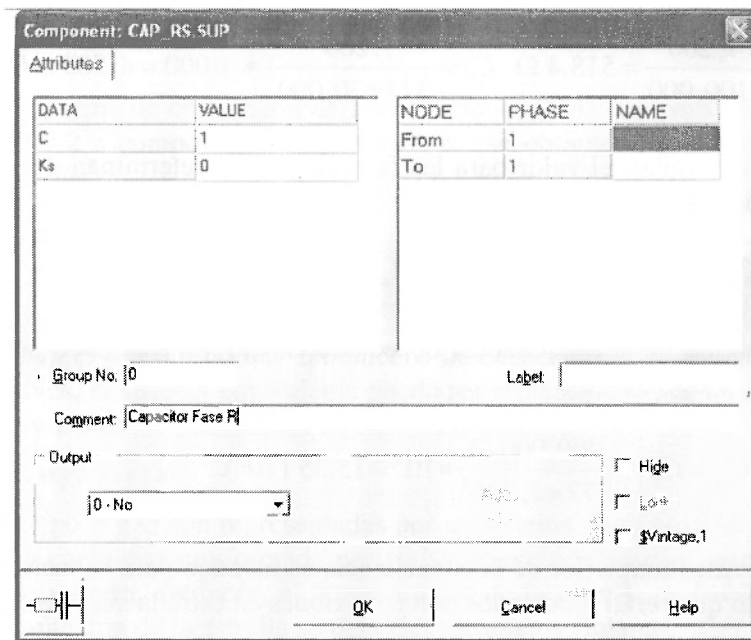


Figura E.2 Ventana de entrada de parámetros al modelo especificado por el usuario CAP_RS.sup, kS mejora la estabilidad numérica.

2. Use ATPDRAW para construir el archivo CAP.atp que se muestra a continuación. Borre las líneas que tienen base roja.

```

C Generated by ATPDRAW May, Thursday 7, 2006
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEFAS - NORWAY 1994-98
C -----
C Miscellaneous Data Card ....
C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >
  1.E-6 .001
  500 1 1 1 1 0 0 1 0
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
C Capacitor fases R S y T
CAP_R TP .1 .001 0
CAP_S TP .1 .001 0
CAP_T TP .1 .001 0

/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT

```

3. Modifique el archivo CAP.atp. Las letras de base azul indican las líneas que se deben adicionar y los caracteres que debe cambiar.

```

BEGIN NEW DATA CASE --NOSORT--
DATA BASE MODULE
C Cap. Banco capacitivo trifásico conexión en estrella puesto a tierra.
C Banco de Cap_R a tierra. Cap_S a tierra., Cap_T a tierra.
$ERASE
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
ARG,CAP_R_,CAP_S_,CAP_T_,CS____,RD____,LD____
NUM,RS____,CS____,
DUM,CA____
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
C CAPACITOR POR FASE
C FASE R          .1 .001          .0
  CAP R TP____    RS____    CS____          0
C FASE S
C AN TP          1.E3 .01          0
  CAP S TP____    RS____    CS____          0
C FASE T
C AN TP          1.E3 .01          0
  CAP T TP____    RS____    CS____          0
/SWITCH
/SOURCE
BEGIN NEW DATA CASE
$PUNCH

```

- Corra ATP, utilice el archivo CAP.atp como entrada. La salida de la corrida de este archivo será CAP.pch, que se muestra a continuación. Deberá renombrárselo CAPY.lib y copiarse en el directorio c:\atpdraw\usp (o donde se hayan definido los archivos USP). El código se muestra continuación:

```

KARD 3 3 3 3 4 4 4 4 6 6
KARG 2 5 6 -1 1 3 4 -1 1 2
KBEG 3 27 33 9 3 27 39 9 3 9
KEND 8 32 38 14 8 32 44 14 8 14
K'TEX 1 0 0 1 1 0 0 1 1 1
C Cap. Banco capacitivo trifásico conexión en estrella puesto a tierra.
C Banco de Cap_R a tierra. Cap_S a tierra., Cap_T a tierra.
$ERASE
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH'
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
C FASE R          .1 .001          0
  CAP R TP____    RS____    CS____          0
C FASE S
C AN TP          1.E3 .01          0
  CAP S TP____    RS____    CS____          0
C FASE T
C AN TP          1.E3 .01          0
  CAP T TP____    RS____    CS____          0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
C1AN CA          CLOSED          0
11AN__CA____    CLOSED          0
/SOURCE
$EOF User-supplied header cards follow.      07-MAY-06 19.08.41
ARG,CAP_R_,CAP_S_,CAP_T_,CS____,RD____,LD____

```

NUM,RS____,CS____,
DUM,CA____

5. Cree "user specified file" Copy.sup (incluye información para el menú de diálogo, icono, y los mensajes de ayuda)

Como se muestra en la figura E.3 con los *menús de persiana* se tiene acceso al objeto de trabajo de archivos creados por el usuario que se muestra en la figura E.4

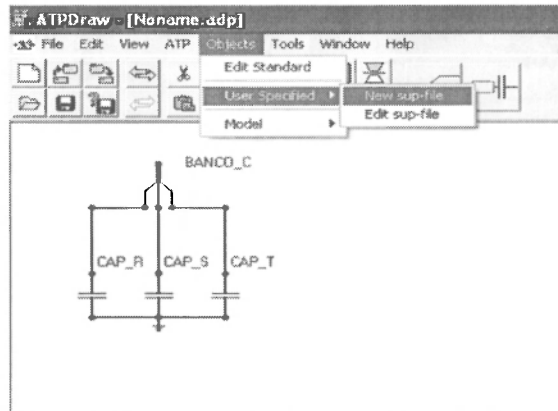


Figura E.3: conversión de un archivo *.adp en uno *.sub (manejo de la rutina DBM)

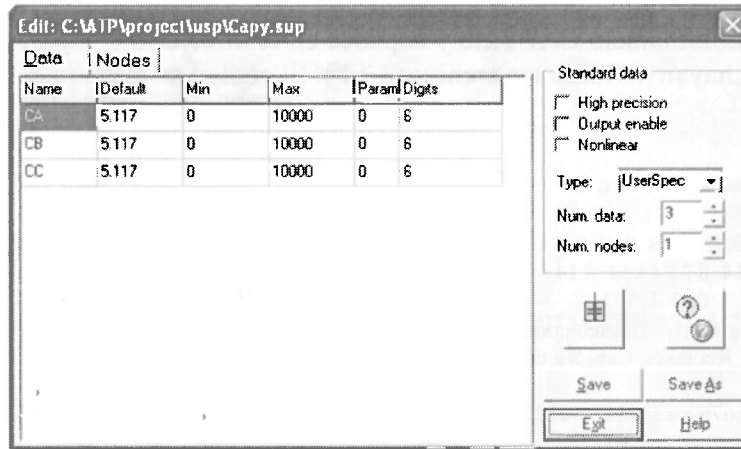


Figura E.4: Ventana para la asignación de parámetros para un banco capacitivo trifásico

Aplicación al caso 11: Perturbación por la maniobra de un banco capacitivo.

Para elegir los componentes creados con DBM se procede así:

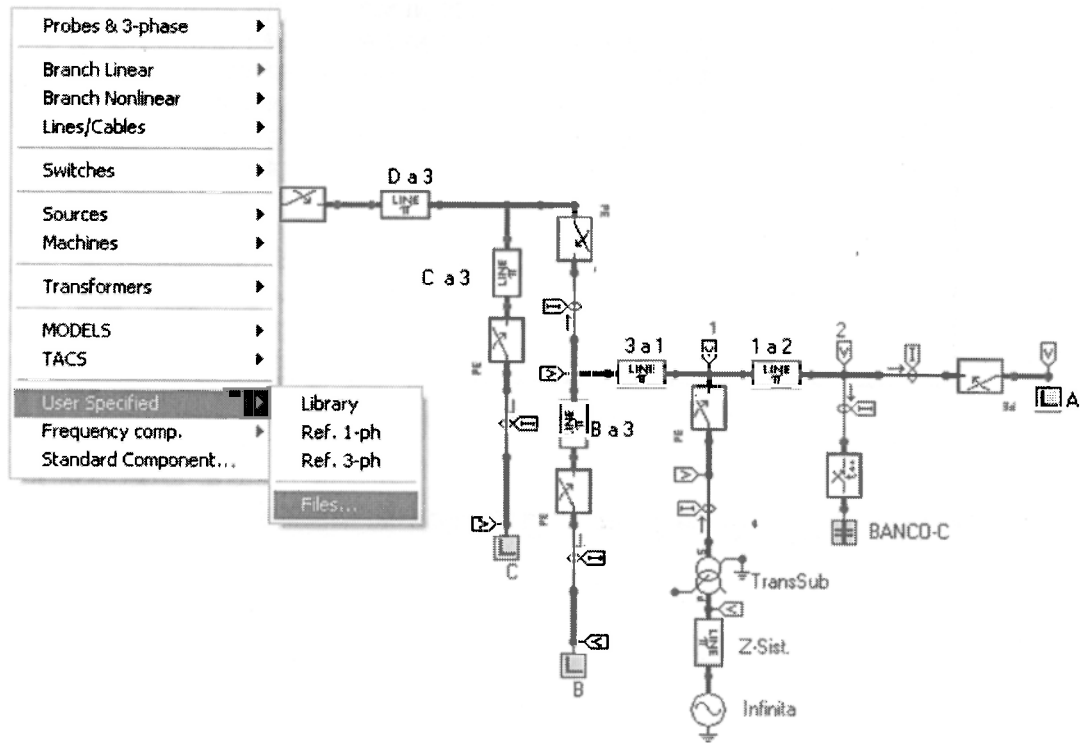


Figura E.5: Selección de los componentes creados

- Seleccione con el botón derecho del ratón el menú de persiana que le permita abrir "User Specified/files" como se indica en la figura E.5, luego dará origen a la interfaz que se muestra en la figura E.6
- De la figura E.6 seleccione el archivo. Para este caso Copy.sup, al seleccionarlo se abre la ventana que le permitirá cambiar los parámetros (figura E.7).

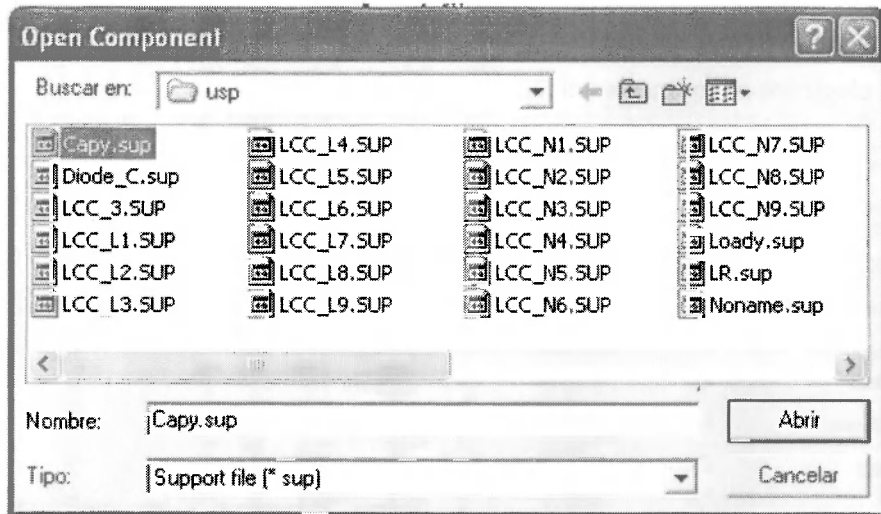


Figura E.6: Selección de los archivos *.sup

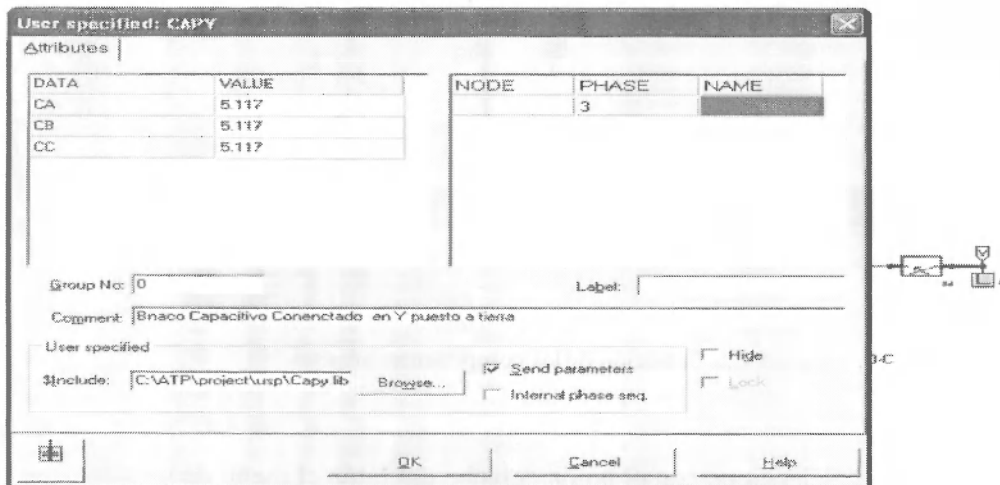


Figura E.7: Ventana para la asignación de parámetros al modelo especificado por el usuario Capy.sub

- c. Ingrese los parámetros que necesite para caracterizar kVA reactivos, ahora haga click en “Send parameters”.

Ahora, complete el circuito agregando la carga resistiva y los demás parámetros que se explican a continuación.

Para la carga lineal genérica se ha creado el subgrupo LOADY.SUP que representa la carga a ser conectada en paralelo que está en estrella sólidamente puesta a tierra.

Se tiene acceso a este archivo en ATPDraw usando el comando “User Specified Files” como se indicó en la figura E.6.

En el caso particular del banco de capacitores se procedió armando archivos de topología en estrella y en delta (los archivos Capy.sup y CapD.sup). Los valores por defecto que presentan son $C = 5,117 \mu\text{F}$. Esta capacitancia corresponde a 300 kVAr para un sistema trifásico con una tensión de fase de 7.200 V. La tabla E.1 muestra valores de capacidades para las tensiones de 12,47 kV y 25 kV. Estas capacidades están conectadas en estrella solidamente puesta a tierra para la segunda columna de la tabla E.1 y la tercer columna representa los valores para conexión en triángulo. Los valores en kVAr equivalentes se ven en la columna de la izquierda.

Tabla E.1: Valores típicos de capacitores para los modelos Capy.sub y CapD.sup

Kva. Trifásicos	12.47 kVrms línea-a-línea (7.2 kVrms línea-a-neutro) C (μF equivalente por fase, línea-a-neutro)	25.0 kVrms línea-a-línea (14.4 kVrms línea-a-neutro) C (μF equivalente por fase, línea-a-neutro)
300	5,117	1,273
450	7,68	1,910
600	10,23	2,55
900	15,35	3,82
1200	20,5	5,09
1800	30,7	7,64
2400	40,9	10,19

E.2.4 Paso 4: Modelo del transformador

El transformador trifásico puede ser modelado de dos formas:

- **Método con la rutina DBM:** Con ella, se pueden crear modelos propios que tienen en cuenta diferentes tipos de conexiones: TYYSP.DBM, TYDPS.DBM, TYDSP.DBM, TDYPS.DBM, TDYSP.DBM, TDDPS.DBM, y TDDSP.DBM. Estos módulos son importados al ATPDRAW por el menú “user specified files”. Los símbolos que se pueden crear en el icono Y y D se refieren a conexiones en estrella y triángulo (Delta); con P y S se puede hacer referencia al primario y secundario. Estos modelos de los transformadores ignoran la saturación.
- El otro método **alternativo** es hacer uso del modelo saturable de ATPDraw, específicamente el componente TRADY_3 para la conexión triángulo-estrella y TRAYY_3 para la conexión estrella-estrella.

Como regla general, ubique las resistencias e inductancias, R y L en el lado de baja tensión y adopte pequeños valores para R y L (e.j., 0.001Ω y 0.001 mH) sobre el lado de alta tensión. Estos valores se podrían intercambiar pero debe tenerse cuidado, puede entrarse en inestabilidades.

La tabla E.2 muestra valores recomendados para modelos de transformadores en estudios de flujo armónico. El caso mostrado en la figura corresponde al modelo

implementado en el caso 11 donde el transformador tiene una conexión triángulo-estrella. El menú de TRADY_3 pedirá una tensión y esta será de 138 kVrms conectado en triángulo y el lado del secundario es de 12,47 kVrms (conectado en estrella). R_s y L_s se calculan para un transformador con impedancia de 5,0 %, 40 MVA y $X/R = 10$.

Tabla E.2: Parámetros del transformador de la subestación del caso 11.

Parámetro	Valor y Comentario
I_o	0,01 se usa siempre
F_o	0,001 se usa siempre
R_{mag}	999999,0 se usa siempre
R_p	0,001 se usa siempre del lado de alta
L_p	0,001 se usa siempre del lado de alta
V_{rp}	Tensión pico kV del debanado primario. En el ejemplo $138\sqrt{2} = 195.16$ kV .(en Delta)
R_s	Resistencia del debanado secundario. En el ejemplo 0,01931 Ω . (E.8)
L_s	Inductancia del debanado secundario. En el ejemplo 5,13 mH. (E.8)
V_{rs}	Tensión pico del debanado secundario kV . En el ejemplo $12,47 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 10,18$ kV . (conexión en estrella)
Lag	-30 (Grados de desfase del debanado secundario respecto del primario)
OUT	Siempre use 0
RMS	Siempre use 1

$$Z = 0,050 \cdot \frac{(12,47)^2}{40,0} @ 84,3^\circ = 0,1944 @ 84,3^\circ \quad (E.8)$$

Por la ecuación (E.8) los parámetros serán: $R = 0,01931 \Omega$, $L = 5,13$ mH

El menú anterior está acompañado por el menú de la curva de saturación, donde debe ubicar los parámetros de acuerdo a las exigencia de la simulación. En el caso de la energización de transformadores es obligatorio el uso de la curva de saturación, ella puede ser calculada con la rutina BCTRAN [2]. El caso 11 utilizó los valores de la tabla E.3 (nota - el punto (0,0) está automáticamente implícito):

Tabla E.3: Curva de saturación asumida en el caso 11

I - Arms	V - Vrms
0.1	100000

E.2.5 Paso 5: Cables

En el caso 11 utiliza el modelo de línea de transmisión de parámetros concentrados (el modelo Π). Como se explicó en el capítulo 5, el ATP incluye una amplia biblioteca de modelos para la simulación de cables y líneas de transmisión.

E.2.5.1 Método del cálculo del circuito Π equivalente

En el caso de cables homopolares individualmente acorazados y aislados, se puede despreciar la impedancia mutua. Así, la impedancia y capacitancia es la misma impedancia y capacitancia por fase.

De esta forma, se presenta el siguiente ejemplo, usando la impedancia por milla para un cable 1/0 Al, con una longitud de 4324 ft, se tendrá la resistencia y la inductancia propia con el valor dado por las ecuaciones (E.9):

$$R_{propia} = R^+ = 0.852\Omega, L_{propia} = L^+ = 1.023mH \quad (E.9)$$

Para la capacitancia propia se asume $\epsilon_r = 2.25$ y una relación de permitividades dieléctricas e : ($e = \text{medio interno/ medio externo} = 2,7183$). Con ello, la ecuación (E.10) queda:

$$C_{propia} = 2pe_0\epsilon_r \text{ f/m} \quad (E.10)$$

En el Caso 11 (ver tabla 5.4) para el tramo de 4324 ft se tendrá:

$$C_{propia} = 2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 2.25 \cdot \frac{4324 \text{ ft}}{3.2808 \text{ ft/m}} \cdot 10^6 = 0.1650 \mu F$$

y todos los términos mutuos se hacen cero.



Figura E.8: Icono de representación del modelo [] de la línea de transmisión

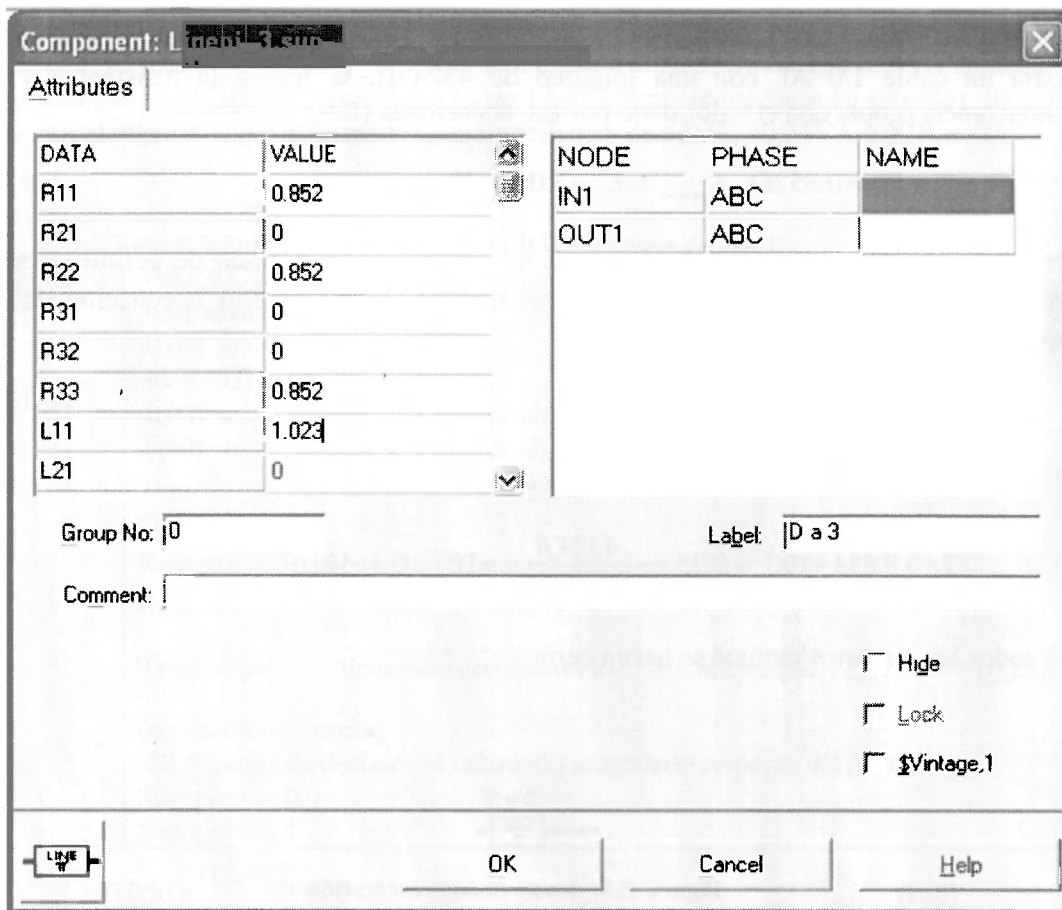


Figura E.9: Ventana para introducir los parámetros al modelo [] de la línea de transmisión

E.2.5.2 Método utilizando la rutina ATP_LCC :

Para la simulación caso 9 presentada en el capítulo 5 se presentó la simulación a través de un cable que utiliza la rutina ATP_LCC [2]. El esquemático en ATPDraw se muestra en la figura E.10.

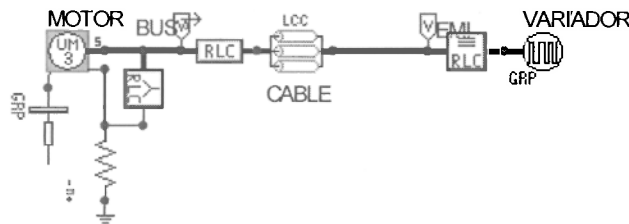


Figura E.10: Modelo en ATPDraw para la simulación del ensayo 4

Se puede pedir el cable a través del menú de persiana que entrega el ratón con el botón izquierdo, los requerimientos para configurar las características del cable se muestran en la figura E.11

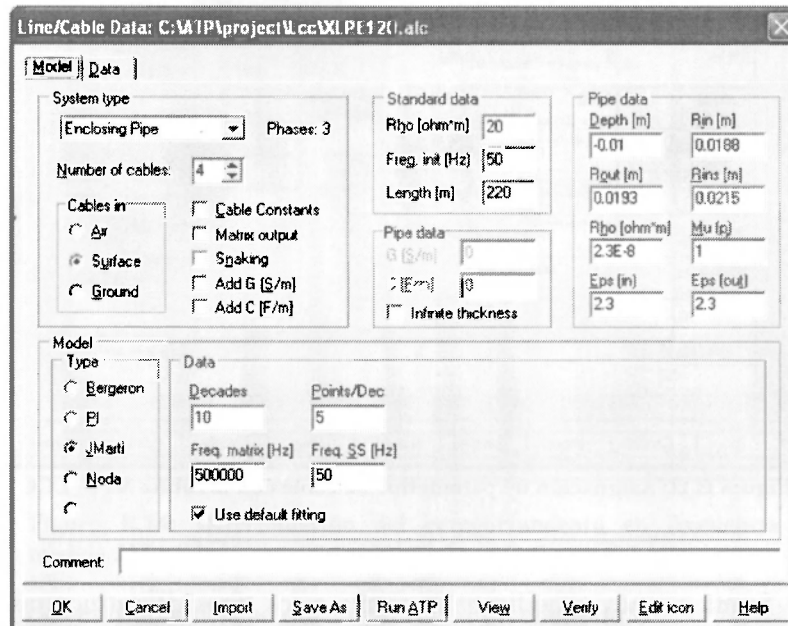


Figura E.11: Ventana de configuración de un cable o línea de transmisión

El tipo de modelo a utilizar resulta transparente al usuario. En la figura E.11 se puede elegir entre los modelos de Bergeron explicado en el apéndice C, el modelo PI exacto, el Modelo JMartí, el modelo Noda y por último, el modelo Semlyen. Estos modelos pueden ser consultados en [4].

Las características geométricas y su ubicación se pueden especificar haciendo “clic” sobre la pestaña “data”. En ella se encuentran las características del conductor o núcleo, la coraza o aislante, la chaqueta o el tipo de pantalla, etc. Allí se combinan las características geométricas y las propiedades físicas de los materiales con los cuales se construye el cable o la línea de transmisión.

Se ilustra así la utilización de la ventana que se muestra en la figura E.12.

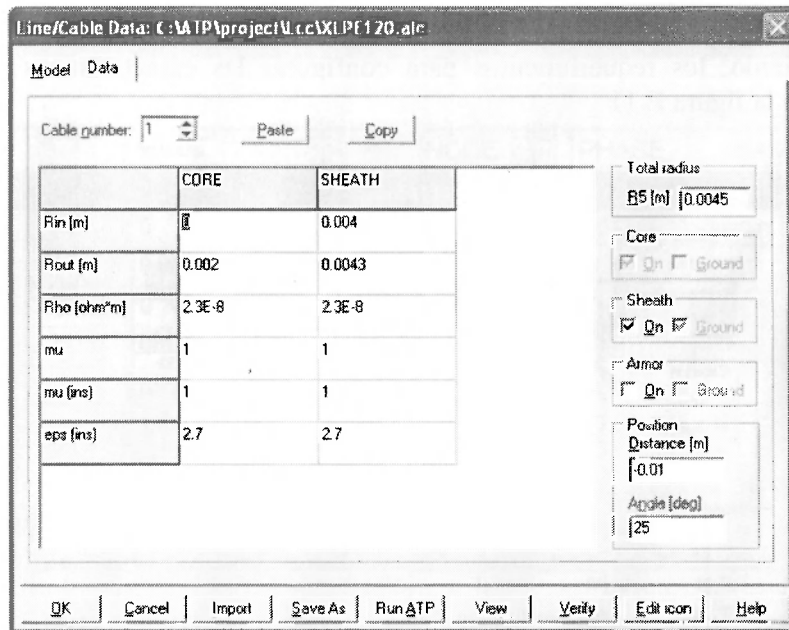


Figura E.12: Asignación de parámetros de cable con la rutina ATP_LCC

De esta forma es muy sencillo darle forma a los tipos de estructuras geométricas que se requieren. En el sistema de 13 barras implementados en la tabla E.5 se muestra un código precedido por las letras ID, éste es el identificador de la topología que se hace del sistema de transmisión, ya sea aéreo o subterráneo. Para ver estas estructuras se recomienda [5].

Al introducir los datos se puede visualizar el tipo de topología haciendo “clic” sobre el botón virtual “View” del menú inferior. Se muestra el resultado de la geometría del cable en la figura E.13:

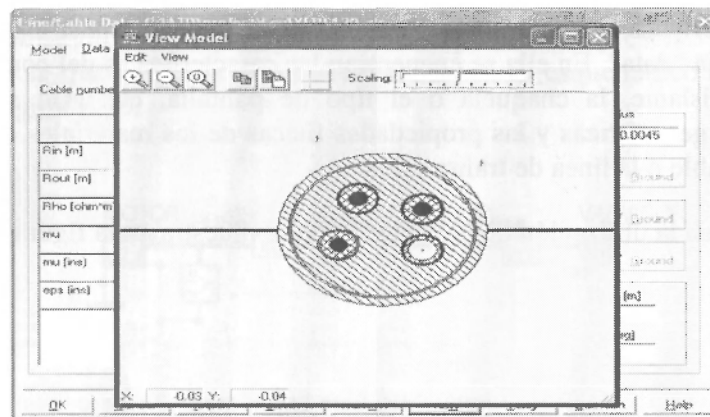


Figura E.13: Geometría del cable configurada con el programa ATP_LCC

Verificar las condiciones del modelo se logra haciendo “clic” sobre el botón virtual “Verify” que da origen a la ventana que se muestra en la figura E.14

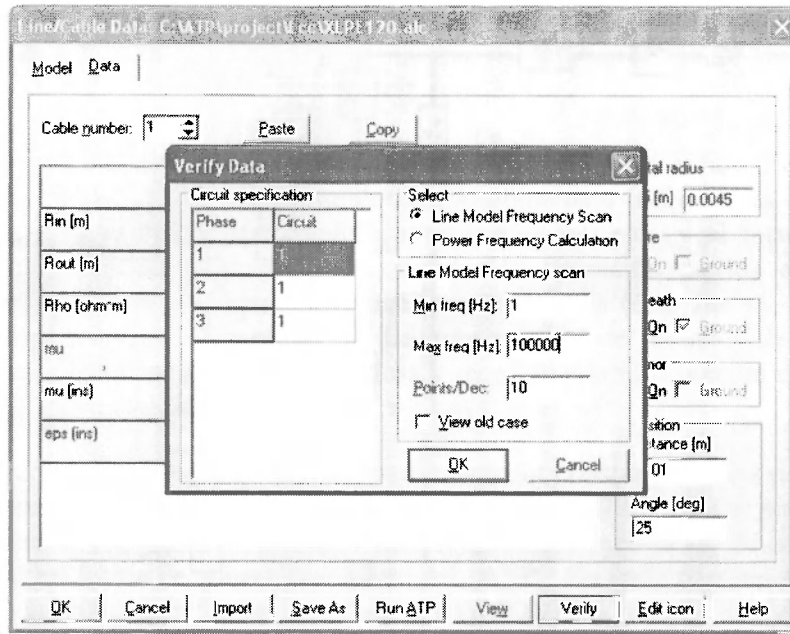


Figura E.14: Determinación del comportamiento en frecuencia del modelo JMarti la la geometría mostrada en la figura E.14

Los reportes en frecuencia se pueden apreciar en el capítulo 7.

E.2.6 Paso 6: Validación del sistema

El circuito del caso 11 en ATPDraw es mostrado en la figura E.16. Las tensiones se miden en los dos lados del transformador de la subestación. Se ha ubicado un sensor de corriente en el lado 13,2kV sobre el alimentador del nodo 1. Los parámetros del menú SETTINGS se muestran en la figura E.17. El proyecto se guardó con el nombre CASO 11.ADP

Al resolver sistemas usando ATP, vea primero si el sistema es balanceado, que la tensión de alimentación sea 13,2kV (tensión de línea en el lado del secundario del transformador) y que la corriente a través de la subestación del transformador no sea superior a los 3kA. Vea las figuras 5.31 y 5.32. La figura E.15 muestra el esquemático creado con ATPDraw para el caso 11 de simulación. En color amarillo se detallan los modelos creados por el usuario con la rutina DBM.

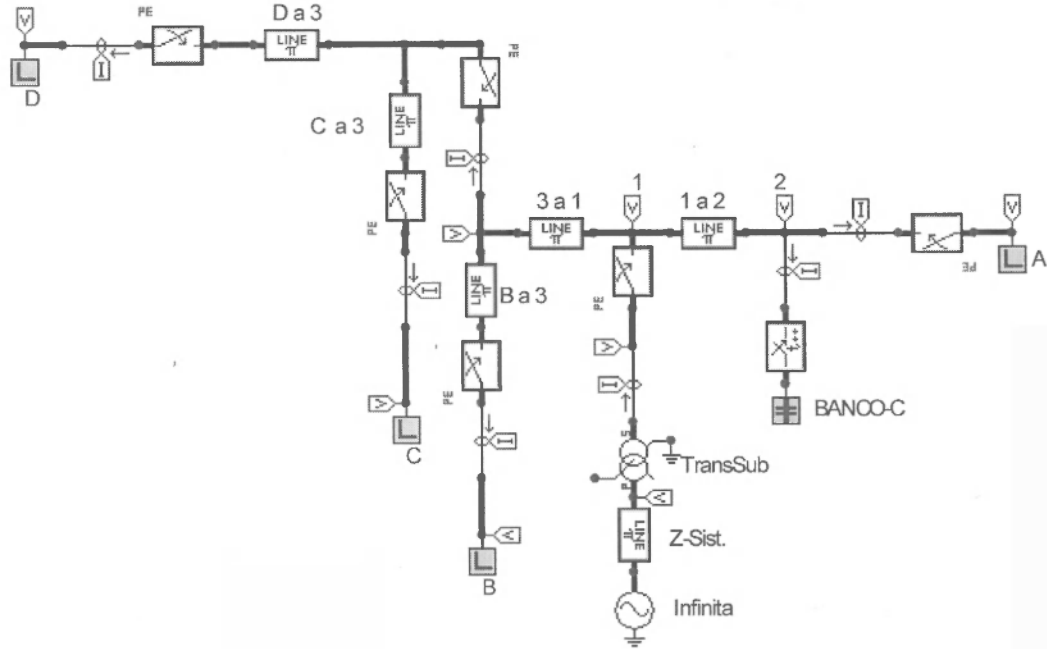


Figura E.15: Caso 11 de simulación.

Los oscilogramas de la simulación se pueden apreciar en el capítulo 5.

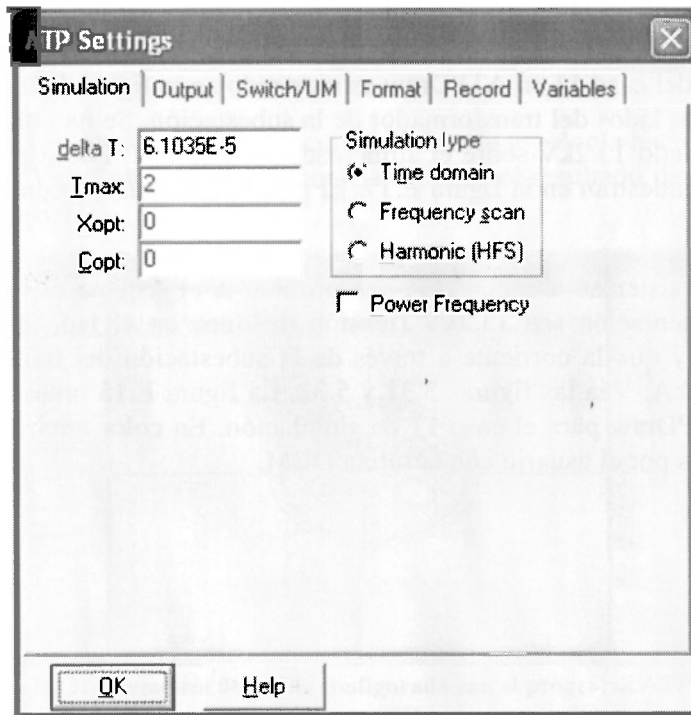


Figura E.16: ATP Settings, configuración del caso a ser simulado, paso de integración y tiempo máximo.

E.2.7 Paso 7: Modelos de Cargas No Lineales

El ATP y ATPDraw no poseen modelos para cargas electrónicas. Sin embargo, estas cargas se pueden llegar a construir utilizando elementos individuales tales como resistores, capacitores, inductores, diodos, transformadores, etc., y al mismo tiempo utilizar “TACS-controlled switches” para simular la operación de los dispositivos semiconductores tales como tiristores, transistores e IGBTs (éste fue el caso 10 de simulación, presentado en el capítulo 5). La construcción de modelos de cargas no lineales por este medio resulta bastante tediosa y requiere una información detallada de la carga específica en cuestión.

La ley de control, tal como la relación para mantener constante voltios por Hz, para el control de variadores de velocidad (de sus iniciales en inglés: ASD) se simula mejor utilizando la rutina MODELS [6]. Esta rutina permite introducir la ley de control de la carga no lineal en forma de subrutinas dentro del ATP. En cada paso de solución, el ATP llama las subrutinas creadas por el usuario en MODELS, y estas subrutinas pasan los parámetros a las fuentes “TACS-controlled o switches” en ATP.

Tal como se explica en el ATP Rule Book [3], los archivos TACS pueden ser simultáneamente compatibles con MODELS en el mismo archivo ATP.

Explorando estas capacidades en MODELS se han desarrollado unos subprogramas en MODELS para representar de la manera más general a una carga no lineal. Cada tipo de carga no lineal es representada como una fuente de inyección de corriente con su espectro característico particular. La carga en cuestión incluye hasta el 49o armónico. La corriente total es determinada de acuerdo con la potencia de la carga y el factor de desplazamiento. Los modelos se han concentrado para mostrar el comportamiento de los variadores de velocidad de seis pulsos (ASD) y permiten usar todas las combinaciones de desfase entre transformadores. También pueden incluirse modelos para cargas monofásicas de tipo electrónico (e.j., PC, televisores, etc.). El nombre y el espectro de corriente para estos modelos se presentan las tablas E.4 y E.5. La corriente fundamental y los ángulos de fase se ajustan automáticamente de acuerdo al ángulo de la tensión fundamental y al factor de desplazamiento específico.

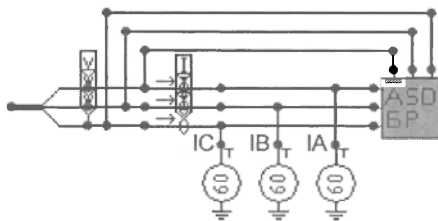


Figura E.17: Modelo del Variador de velocidad (ASD) desarrollado con MODELS [1].

El modelo del ASD mostrado en la figura E.17 permite introducir los parámetros a través de la ventana que se muestra en la figura E.18:

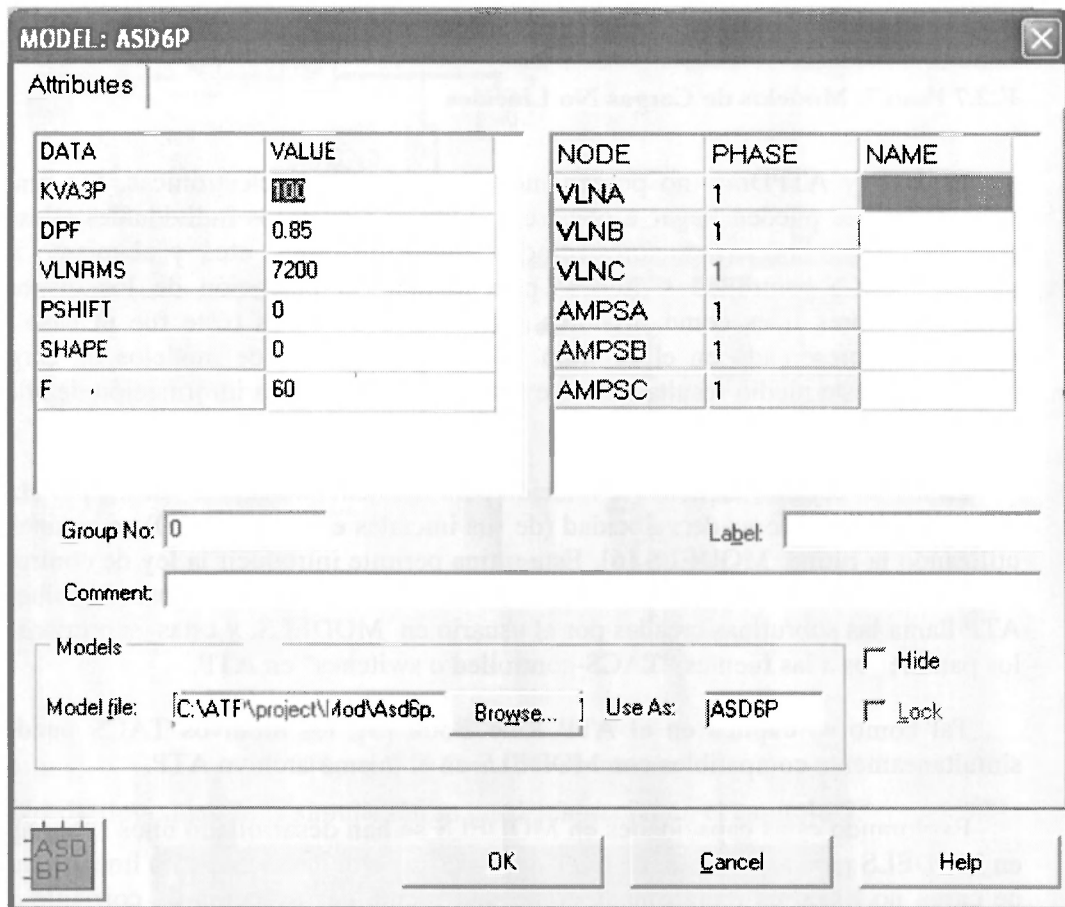


Figura E.18: Modelo de un ASD de 100kVA con tensión de alimentación del lado de alta tensión.

Con la filosofía de MODELS se programa el espectro como se muestra en la figura E.19.

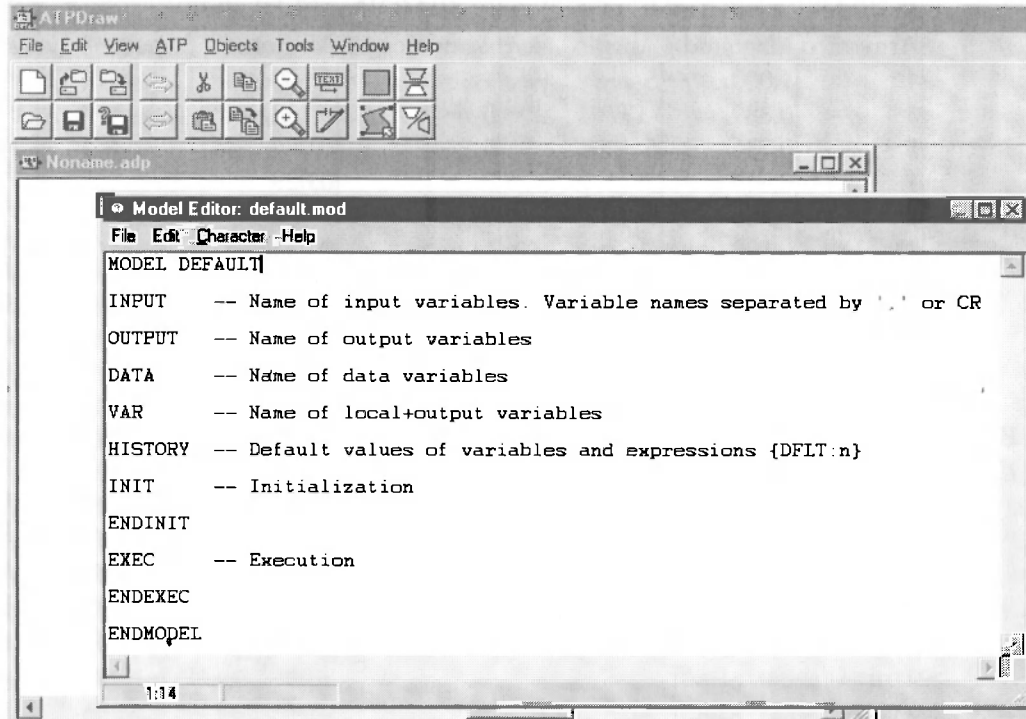


Figura E.19: Estructura por defecto que presenta el programa ATP para la programación en MODELS

Tabla E.4: Serie Seno de Fourier para el Espectro de inyección de corriente en un ASD de seis y doce pulsos (nota – los armónicos de corriente 5,7,17,19,29,31,41,43 valen cero en el de doce pulsos)

ASD6P.MOD						
Armónico	Fuente de Corriente		Fuente de Tensión, alta potencia		Fuente de tensión, baja potencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1,000000	0	1,000000	0	1,000000	0
5	0,226326	180	0,298141	180	0,588927	180
7	0,113163	180	0,032162	180	0,307808	0
11	0,090531	0	0,089498	0	0,052979	0
13	0,064665	0	0,031225	0	0,084609	180
17	0,056582	180	0,050466	180	0,003407	0
19	0,045265	180	0,025171	180	0,030434	0
23	0,041150	0	0,034800	0	0,014329	180
25	0,034819	0	0,020688	0	0,008465	180
29	0,032332	180	0,026466	180	0,014776	0
31	0,028291	180	0,017469	180	0,001375	180
35	0,026627	0	0,021322	0	0,012036	180
37	0,023824	0	0,015086	0	0,005541	0
41	0,022633	180	0,017838	180	0,008433	0
43	0,020575	180	0,013263	180	0,006671	180
47	0,019681	0	0,015327	0	0,004929	180
49	0,018106	0	0,011826	0	0,006120	0

Tabla E.5: Serie Seno de Fourier para el Espectro de inyección de corriente en carga genérica y Lámparas fluorescentes (nota – armónicos de corriente 3,9,15 valen cero en cargas trifásicas)

PC3P.MOD y PC1P.MOD			FL3P.MOD y FL1P.MOD		
Armónico	Magnitud	Angulo	Armónico	Magnitud	Angulo
1	1,000	5	1	1,000	-2
3	0,889	-177	3	0,158	-150
5	0,736	5	5	0,086	-128
7	0,544	-173	7	0,029	-73
9	0,356	9	9	0,020	-32
11	0,190	-167	11	0,014	6
13	0,074	20	13	0,008	29
15	0,010	-88	15	0,004	32

E.2.7.1 Subrutina para un ASD de seis pulsos, segunda y tercera columna de la tabla E.4:

```

AMAG1:= 1.000000
AMAG5:= 0.226326 / AMAG1
AMAG7:= 0.113163 / AMAG1
AMAG11:= 0.090531 / AMAG1
AMAG13:= 0.064665 / AMAG1
AMAG17:= 0.056582 / AMAG1
AMAG19:= 0.045265 / AMAG1
AMAG23:= 0.041150 / AMAG1
AMAG25:= 0.034819 / AMAG1
AMAG29:= 0.032332 / AMAG1
AMAG31:= 0.028291 / AMAG1
AMAG35:= 0.026627 / AMAG1
AMAG37:= 0.023824 / AMAG1
AMAG41:= 0.022633 / AMAG1
AMAG43:= 0.020575 / AMAG1
AMAG47:= 0.019681 / AMAG1
AMAG49:= 0.018106 / AMAG1
AMAG1:= 1.0000
A1:= 0 * PI180
A5:= 180 * PI180
A7:= 180 * PI180
A11:= 0 * PI180
A13:= 0 * PI180
A17:= 180 * PI180
A19:= 180 * PI180
A23:= 0 * PI180
A25:= 0 * PI180
A29:= 180 * PI180
A31:= 180 * PI180
A35:= 0 * PI180
A37:= 0 * PI180
A41:= 180 * PI180
A43:= 180 * PI180
A47:= 0 * PI180
A49:= 0 * PI180

```

```

AMPSA:= BS * SIN(WT + ANG) + AS * COS(WT + ANG)
AMPSB:= BS * SIN(WT + ANG - A120) + AS * COS(WT + ANG - A120)
AMPSC:= BS * SIN(WT + ANG + A120) + AS * COS(WT + ANG + A120)
    IF IFIRST > 0 THEN
        ANG:= ANGDPF + ATAN2(AFOURI,BFOURI)
        IFIRST:= -1
        ANG1:= A1 + ANG
        ANG5:= A5 + 5 * ANG
        ANG7:= A7 + 7 * ANG
        ANG11:= A11 + 11 * ANG
        ANG13:= A13 + 13 * ANG
        ANG17:= A17 + 17 * ANG
        ANG19:= A19 + 19 * ANG
        ANG23:= A23 + 23 * ANG
        ANG25:= A25 + 25 * ANG
        ANG29:= A29 + 29 * ANG
        ANG31:= A31 + 31 * ANG
        ANG35:= A35 + 35 * ANG
        ANG37:= A37 + 37 * ANG
        ANG41:= A41 + 41 * ANG
        ANG43:= A43 + 43 * ANG
        ANG47:= A47 + 47 * ANG
        ANG49:= A49 + 49 * ANG

        ENDEXEC
    ENDMODEL

```

E.2.7.2 Archivos que se generan para modelar una carga no lineal:

Cada modelo no lineal requiere para su funcionamiento en ATP los siguientes archivos:

- *.MOD (código fuente en MODELS tal y como se mostró en el apartado anterior),
- *.SUP (Archivo suplementario del ATPDraw) en el se especifican los datos a ingresar en ATPDRAW por medio de un menú para cada modelo individual,
- *.ADP (el diagrama de circuito para el modelo en ATPDraw),
- *.HLP (archive de ayuda).

Todos los archivos individuales *.MOD usados en este trabajo son para cargas no lineales, por el método de inyección de corrientes y tienen la misma estructura del ejemplo del apartado anterior. Hablando de manera general, sólo el espectro de corriente cambiará para cada carga particular. Así, el usuario puede crear su propio archivo *.MOD utilizando como guía el ejemplo dado del ASD. Los otros tres archivos (e.j., *.SUP, *.ADP, y *.HLP) se construyen fácilmente y se describen en el “ATPDraw User Manual”[2].

E.3 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE PRUEBA DE IEEE DE 13 BARRAS:

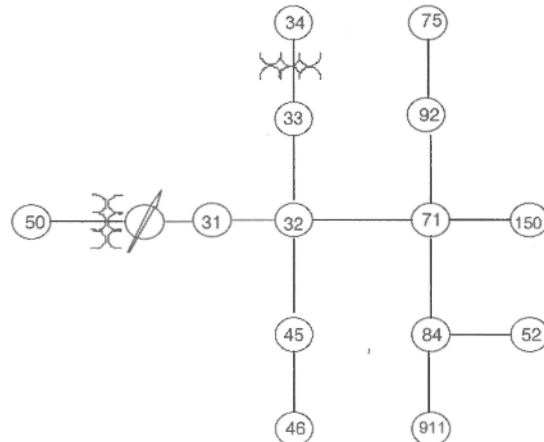


Figura E.20: Esquema propuesto por IEEE para simbolizar el circuito de prueba de 13 barras [5].

E.3.1 Parámetros lineales del sistema.

E.3.1.1 Nudo 50, fuente del sistema.

Potencia de corto circuito 1100 MVA con 82 grados de atraso. Balanceado.

E.3.1.2 Subestación: Nodos 50 -31

Transformador: 5 MVA, 115 kV delta -4.16 kV estrella puesto a tierra

Impedancia $z = 1 + j 8 \%$ a 60 Hz.

E.3.1.3 Regulador de tensión: Conectado en el nodo 31

Con control individual de fase y conectado en estrella. Relación en los transformadores de potencia: relación=20, TC Relación=700 A, $R + jX = 3 + j9 \%$, nivel de tensión = 122 V

E.3.1.4 Transformador: Nodo 33 - Nodo 34

500 KVA, 4160V delta – 480V, estrella, $z = 1.1 + j 2.0 \%$

E.3.1.5 Líneas y su Matriz de Impedancia característica a 60 Hz:

Todos los conductores son del tipo ACSR. La geometría de la línea se puede encontrar en [3]. El triángulo superior de las matrices de las impedancias en el dominio