

El sistema es el de una planta industrial que se alimenta de un circuito de 44 kV en delta aislada. El punto de común acople (PCC), en este caso, sería la barra de 44 kV en la subestación de la planta. La planta básica la forman un transformador de potencia de 5 MVA 44000/480 V, una carga electrónica tipo puente rectificador de 6 pulsos de 3.5 MW, FP de 0.88 y el resto de la planta que puede representarse por una carga lineal de 2.0 MW y 2.23 MVAR.

Durante condiciones de demanda máxima, el factor de potencia de la planta alcanza el valor de 0.8 y se desea compensar este valor a 0.93, mediante la instalación de un banco de condensadores al 100 % de operación.

### **8.3 OBJETIVOS**

Familiarizarse con los modelos implementados y verificar los cálculos realizados para el sistema base (equivalente del sistema, transformador y carga lineal).

Con el sistema sin compensación reactiva (sistema base) observar las formas de onda de la tensión y la corriente en 44 kV y 480V.

Calcular los reactivos necesarios para obtener un  $FP = 0.93$ . Modelar el sistema compensado y observar las formas de onda de la tensión y la corriente.

Calcular el contenido armónico y THD de las ondas de tensión y corriente mediante la subrutina Fourier o mediante el uso de los MODELS (para el caso actual se suministran dos modelos para cálculo el de armónicos).

Verificar si existen problemas de resonancia armónica y determinarla con el cálculo de la impedancia armónica en barras de 480 V, mediante la subrutina Frequency Scan.

Diseñar el banco de condensadores como filtro de absorción, para disminuir el impacto de la carga no lineal dentro de la planta y hacia el sistema.

Con el sistema compensado y sintonizado, observar las formas de onda de la tensión y la corriente y calcular su contenido armónico y distorsión total THD.

En cada uno de los ítems se debe verificar en el punto de común acople con la planta (nivel de 44 kV). Los índices de distorsión, con los límites establecidos en la norma IEEE 519 de 1992.

Debe verificarse, mediante cálculos manuales (similar a lo hecho en clase), el efecto de la resonancia generada por los condensadores y el impacto del filtro diseñado a la frecuencia armónica del problema.

### 8.4 PUENTE RECTIFICADOR DE SEIS PULSOS

La carga no lineal electrónica típica es el puente rectificador de seis pulsos, como se observa en la figura 49.

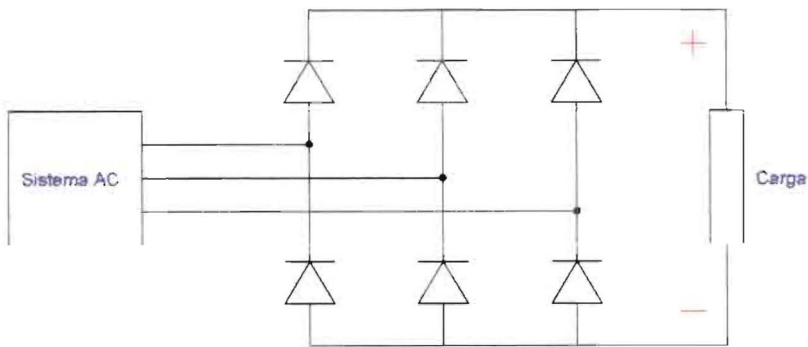


Figura 49. Puente rectificador de seis pulsos

El elemento básico del puente es el diodo, que dentro de la librería del programa ATP es el suiche tipo 11.

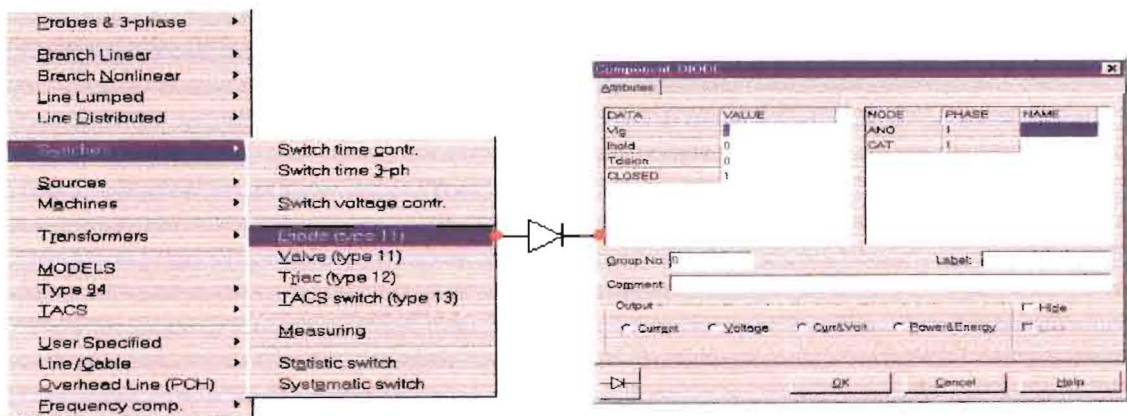
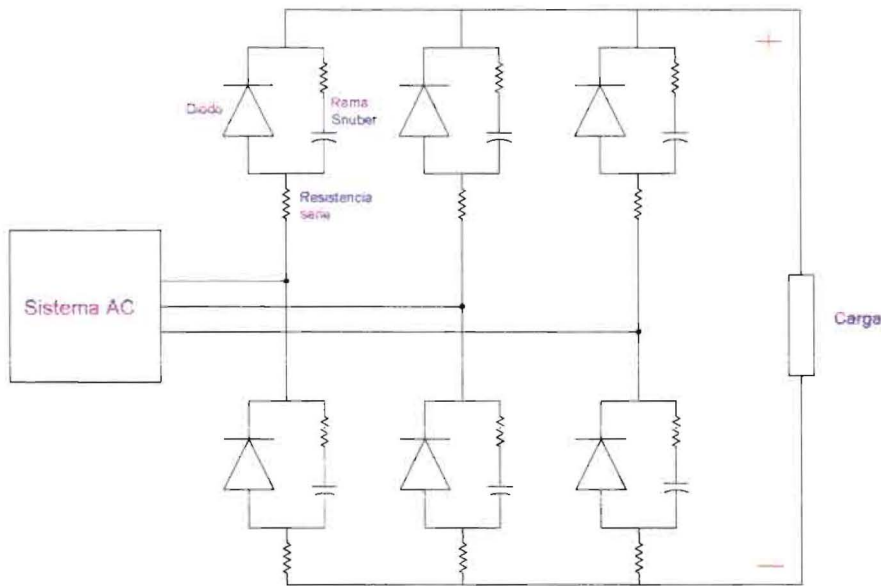


Figura 50. Suiche tipo 11 o diodo

Para efectos de simulación, al diodo se le colocan elementos que normalmente están presentes en un sistema real (figura 51). En paralelo con cada diodo se coloca una rama tipo "snubber" (amortiguador), formada por la serie de una resistencia y un capacitor, típicamente de valores de  $1200\ \Omega$  y  $0.1\ \mu\text{F}$ , y una resistencia serie, que debe ser pequeña con respecto al valor de resistencia, con la cual se simula la carga que se coloca al rectificador. En este caso, se colocó una resistencia serie de  $0.001\ \Omega$  (comparar con respecto a la resistencia de carga de  $0.093\ \Omega$ ).



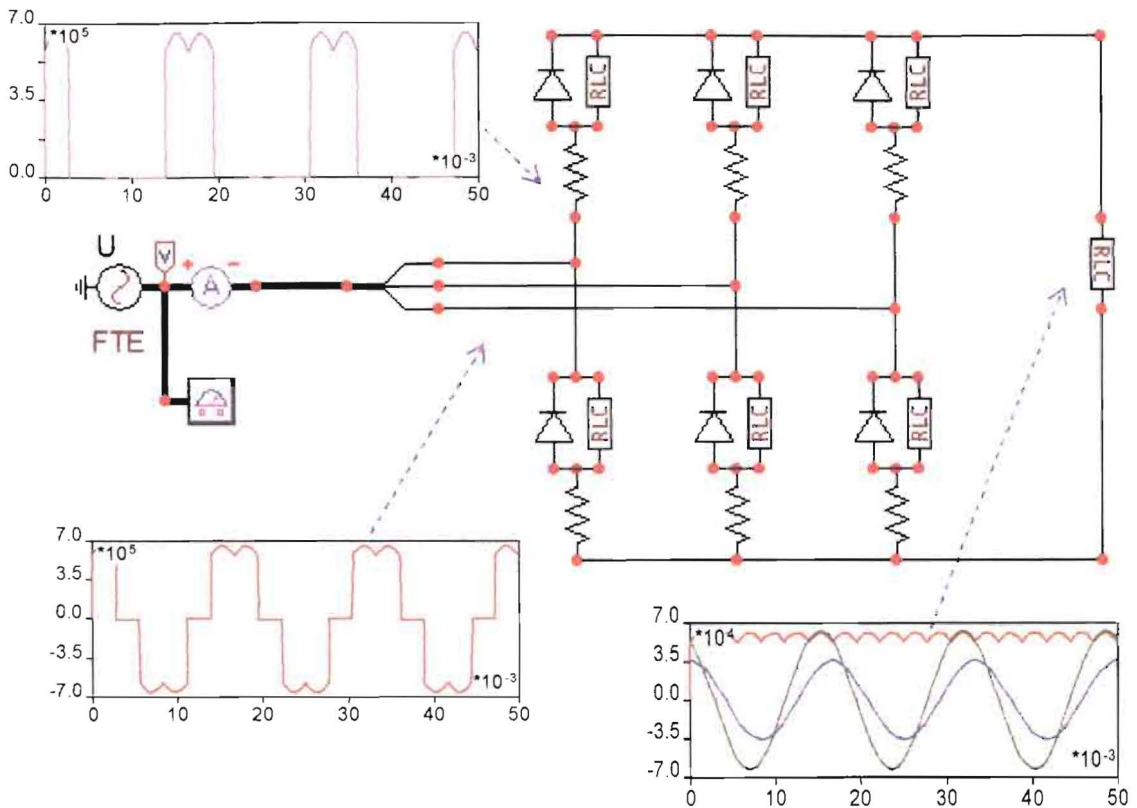
**Figura 51.** Puente rectificador para simulación

El puente en la herramienta Atpdraw puede quedar como se observa en la figura 52. Los datos más relevantes de simulación son los siguientes:

$T_{\text{max}} = 50\ \text{ms}$

$\Delta t = 1\ \mu\text{s}$

Plot Freq = 3



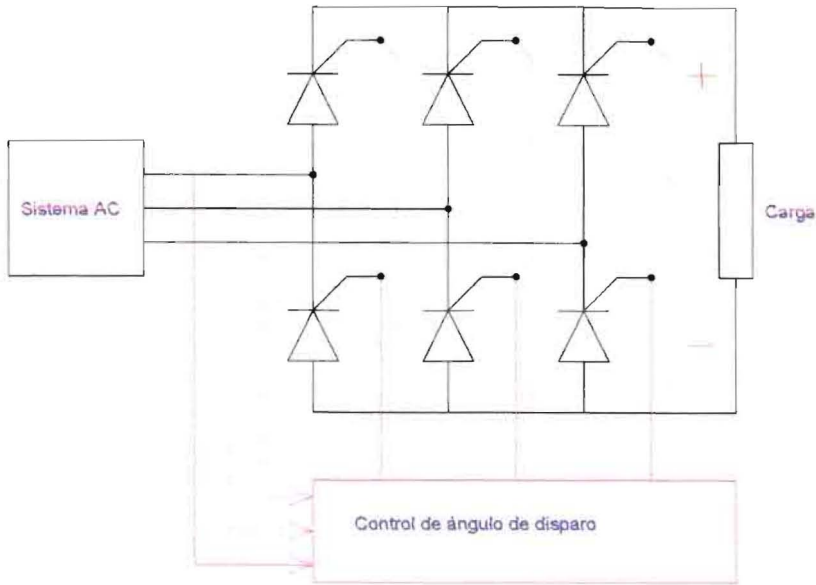
**Figura 52.** Puente rectificador en Atpdraw y variables de interés

Para este puente se debe realizar mínimo lo siguiente:

- Identificar las formas de onda de voltaje DC para carga resistiva. Deducir la expresión para calcular el valor DC de este voltaje.
- Identificar la forma de la corriente AC, para carga resistiva.
- Deducir los armónicos para la corriente AC, suponiendo carga RL.

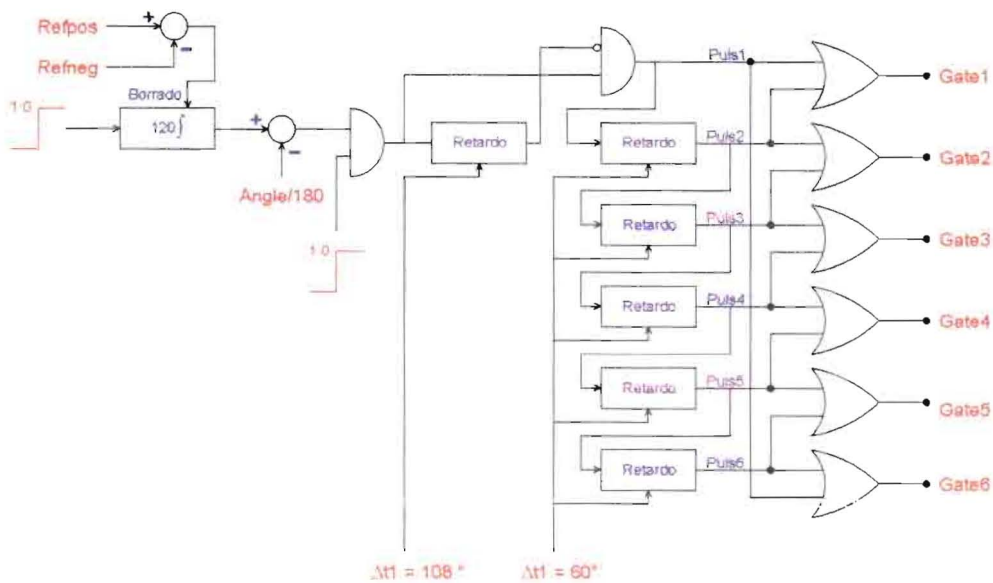
### 8.5 PUENTE RECTIFICADOR CONTROLADO DE SEIS PULSOS

Cuando el puente se encuentra formado por diodos, su conmutación se hace en forma natural, pero si se quiere un control del voltaje DC hay que controlar el ángulo de disparo de los tiristores, mediante una estrategia de control de los mismos.



**Figura 53.** Puente rectificador controlado

El puente controlado no existe directamente como modelo en el ATP. Lo que se debe es desarrollar un modelo mediante alguna de las dos herramientas disponibles para realizar funciones de control, que son los TACS o los MODELS.



**Figura 54.** Estrategia de control del puente

La estrategia de control se puede implementar con la opción TACS. El código correspondiente se observa en el cuadro siguiente.

**Tabla 4.** Estrategia de control para el puente en código TACS

```

11DLY60D .00277778
90REFPOS
90REFNEG
98VAC =REFPOS-REFNEG
98RAMP1_58+UNITY 120.00 0.0 1.0VAC__
98COMP1_ =(RAMP1_ ANGLE_/180) .AND. UNITY
98DCMP1_54+COMP1_ 5.0E-3
98PULS1_ = .NOT. DCMP1_ .AND. COMP1_
98PULS2_54+PULS1_ DLY60D
98PULS3_54+PULS2_ DLY60D
98PULS4_54+PULS3_ DLY60D
98PULS5_54+PULS4_ DLY60D
98PULS6_54+PULS5_ DLY60D
98GATE1_ = PULS1_ .OR. PULS2_
98GATE2_ = PULS2_ .OR. PULS3_
98GATE3_ = PULS3_ .OR. PULS4_
98GATE4_ = PULS4_ .OR. PULS5_
98GATE5_ = PULS5_ .OR. PULS6_
98GATE6_ = PULS6_ .OR. PULS1_

```

Todo el puente formado por los tiristores, sus ramas snubber, resistencias serie y la estrategia de control implementada en TACS, se puede agrupar en un solo modelo al cual se le asigna un ícono, como aparece en el cuadro siguiente.

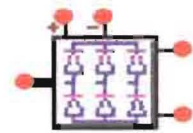


**Tabla 5.** Modelo completo del puente controlado en código TACS

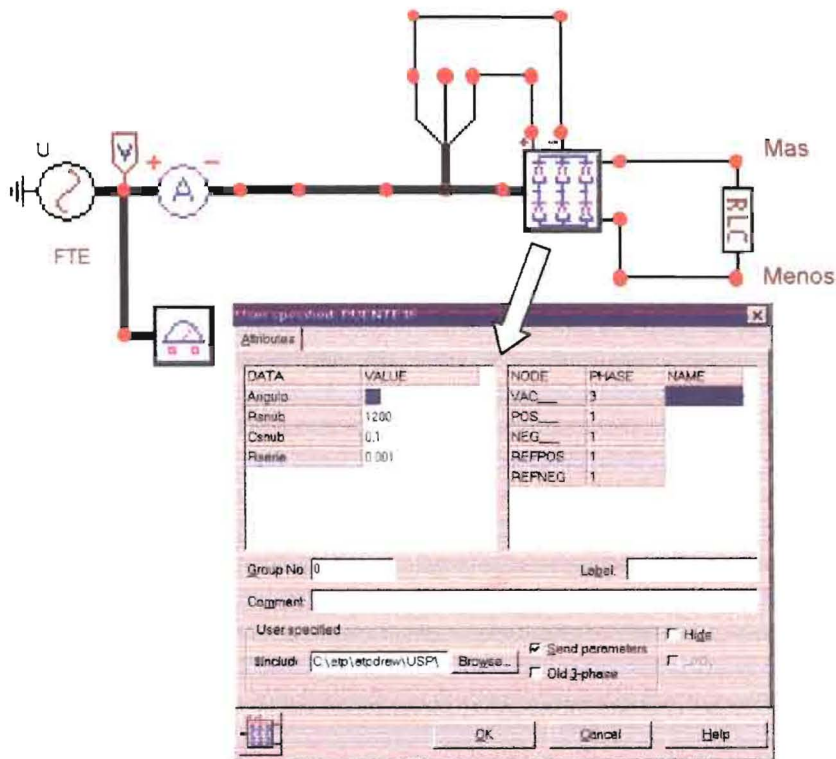
```

/TACS
11DLY60D .002777778
90REFPOS
90REFNEG
98VAC___ =REFPOS-REFNEG
98RAMP1_58+UNITY 120.00 0.0 1.0VAC___
98COMP1_=(RAMP1_-ANGLE_/180) .AND. UNITY
98DCMP1_54+COMP1_ 5.0E-3
98PULS1_ = .NOT. DCMP1_ .AND. COMP1_
98PULS2_54+PULS1_
98PULS3_54+PULS2_
98PULS4_54+PULS3_
98PULS5_54+PULS4_
98PULS6_54+PULS5_
98GATE1_ = PULS1_ .OR. PULS2_
98GATE2_ = PULS2_ .OR. PULS3_
98GATE3_ = PULS3_ .OR. PULS4_
98GATE4_ = PULS4_ .OR. PULS5_
98GATE5_ = PULS5_ .OR. PULS6_
98GATE6_ = PULS6_ .OR. PULS1_
/BRANCH
$VINTAGE,0
POS___MID1___ Rsnub___ Csnub___
POS___MID3___ POS___MID1___
POS___MID5___ POS___MID1___
U___AMID4___ POS___MID1___
U___BMID6___ POS___MID1___
U___CMID2___ POS___MID1___
MID1___U___A Rserie
MID3___U___BMID1___U___A
MID5___U___CMID1___U___A
MID4___NEG___MID1___U___A
MID6___NEG___MID1___U___A
MID2___NEG___MID1___U___A
/SWITCH
11MID1___POS___ GATE1___
11MID3___POS___ GATE3___
11MID5___POS___ GATE5___
11MID4___U___A GATE4___
11MID6___U___B GATE6___
11MID2___U___C GATE2___
$EOF User-supplied header cards follow. 09-Feb-02 03.59.12
ARG,U___A,U___B,U___C,POS___,NEG___,REFPOS,REFNEG
ARG,ANGLE___,Rsnub___,Csnub___,Rserie
NUM,ANGLE___,Rsnub___,Csnub___,Rserie
DUM,PULS1___,PULS2___,PULS3___,PULS4___,PULS5___,PULS6___,MID1___,MID2___,MID3___
DUM,GATE1___,GATE2___,GATE3___,GATE4___,GATE5___,GATE6___,VAC___,RAMP1___,COMP1___
DUM,DCMP1___,DLY60D,MID4___,MID5___,MID6___

```



La figura 55 indica la utilización del modelo. Los parámetros de este modelo son los siguientes: Ángulo de disparo, resistencia de la rama Snubber, capacitancia de la rama Snubber, resistencia en serie con los tiristores.



**Figura 55.** Utilización del modelo de puente rectificador controlado y su ventana de diálogo

Los datos más relevantes de la simulación son los siguientes:

$T_{max} = 50 \text{ ms}$

$\Delta t = 5 \times 10^{-7} \text{ s}$

Print Freq = 25000

Plot Freq = 15

Para el puente controlado se debe realizar como mínimo lo siguiente:

- Identificar las formas de onda de voltaje DC, para carga resistiva y para diferentes ángulos de disparo.
- Identificar la forma de la corriente AC, para carga resistiva.
- Identificar el desfase existente entre el voltaje de fase AC de la fuente y la fundamental de corriente. Interesa en este caso identificar en forma cualitativa y cuantitativa el concepto de factor de potencia de desplazamiento y el factor de potencia verdadero, introducido por el puente controlado.



## 8.6 MODELO ARMÓNICO

Este modelo es simplemente de cálculo y lo que hace es evaluar cualquier armónico de voltaje o de corriente y el correspondiente valor RMS.

La forma como se implementa este modelo con la herramienta MODELS se indica en la tabla siguiente:

Tabla 6. Modelo ARMO en lenguaje MODELS

```
MODEL ARMO
INPUT in
DATA n
VAR freq
    tb
    sample
    reset
    int1
    int2
    fsen
    fcos
    prosen
    procos
    an
    bn
    cn
    ang
    armo
    vrms
OUTPUT armo, vrms
HISTORY int1 (DELT : 0)
        int2 (DELT : 0)
INIT an := 0.0
      bn := 0.0
      int1 := 0.0
      int2 := 0.0
      ang := 0.0
ENDINIT
EXEC
--Generación de base de tiempo entre 0-T
tb := t-trunc(t*freq)/freq

--Generación de señal de muestreo y borrado
IF (tb>=1/freq-timestep AND tb<1/freq)THEN sample:=1.0
ELSE sample := 0.0
ENDIF

fsen := sin(2*3.1416*freq*n*t)*2*freq
fcos := cos(2*3.1416*freq*n*t)*2*freq
prosen := in*fsen
procos := in*fcos

--Integración
LAPLACE(int1/prosen) := 1/(1/s)
LAPLACE(int2/procos) := 1/(1/s)

--Muestreo y borrado de integrales
IF sample > 0.0 THEN
    an := int1
    bn := int2
    int1 := 0.0
    int2 := 0.0
ENDIF
cn := sqrt(an**2 +bn**2)
IF an 0.0 THEN ang := 1.57079
ELSE ang:=atan2(bn, an)
ENDIF
armo:= cn*sin(2*3.1416*freq*n*t+ang)
vrms:= cn/sqrt(2)
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Para generar un modelo nuevo se empieza como aparece en la figura 56.



Figura 56. Generación de un nuevo elemento con MODELS

En el editor nativo del Atpdraw aparecen las partes con las que se estructuraría en MODELS un modelo general. En esta misma ventana se puede editar o en otro editor de archivos planos y se guarda con la correspondiente extensión \*.MOD en el directorio C:\Atp\Atpdraw\Mod. La forma como se incorpora el modelo ARMO dentro del ATPDRAW con la herramienta MODELS se ilustra en la figuras 57 y 58.

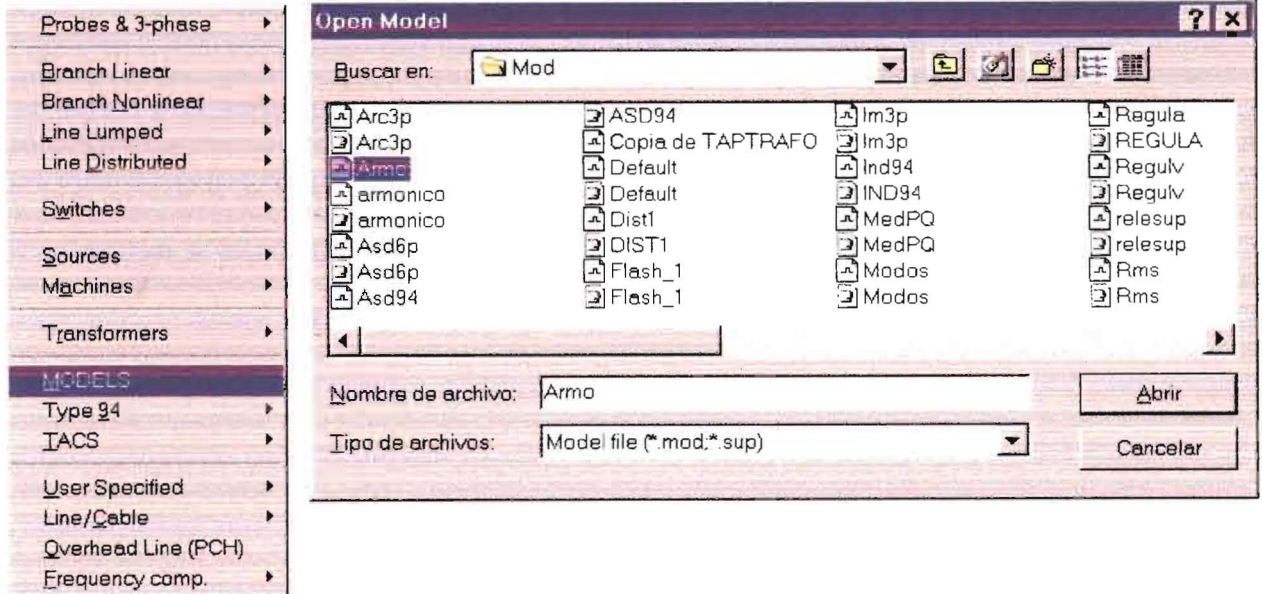


Figura 57. Incorporación del modelo ARMO dentro de la librería de MODELS

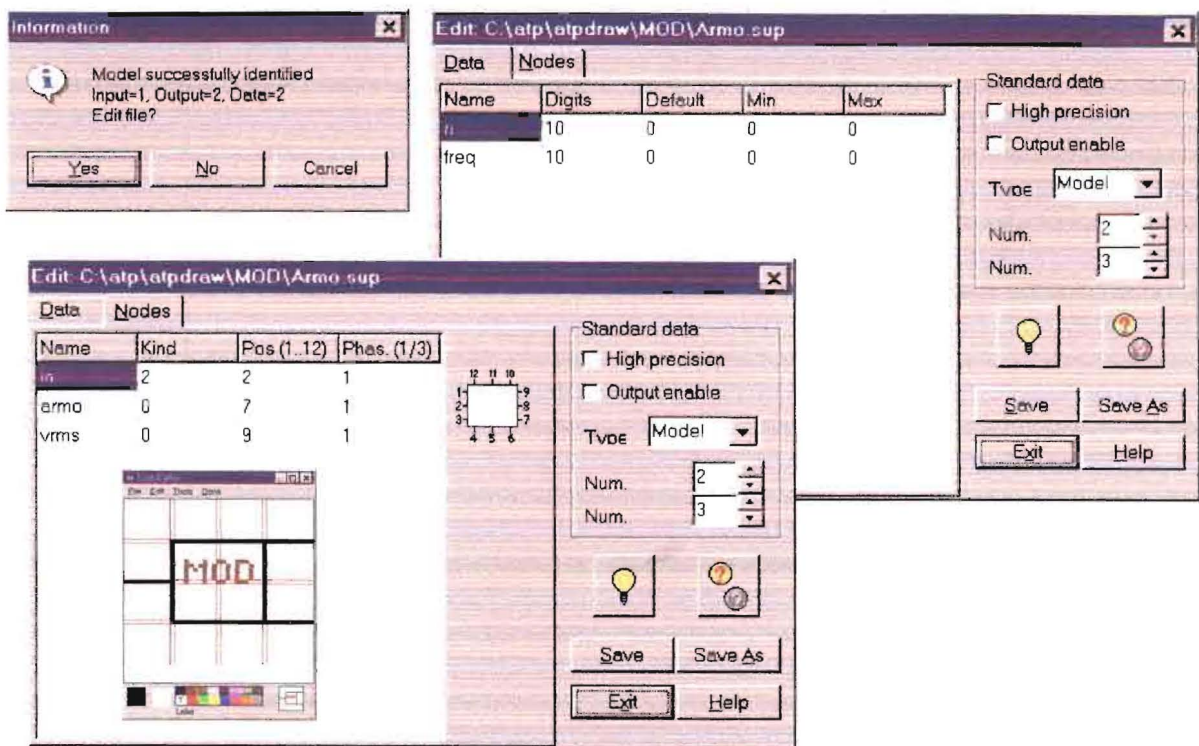
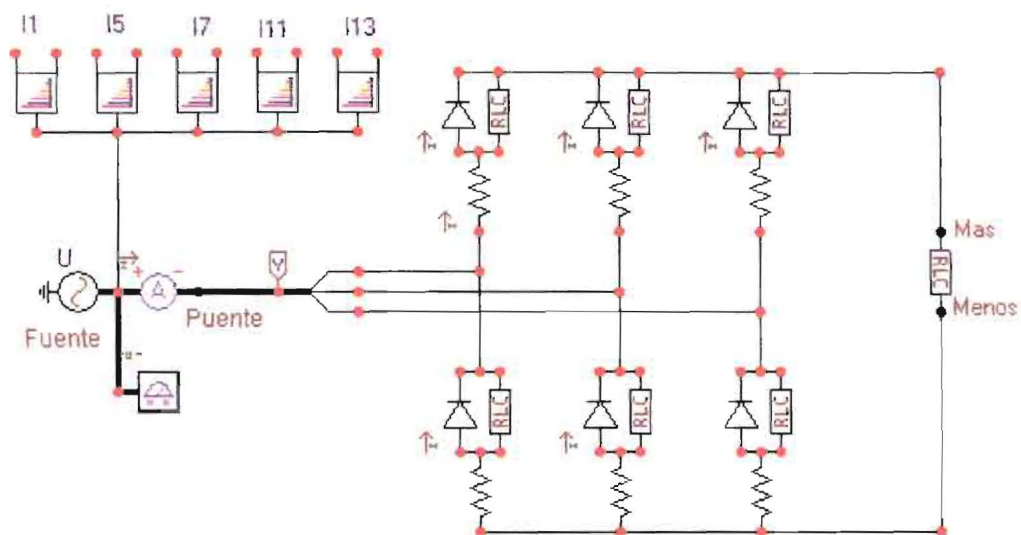


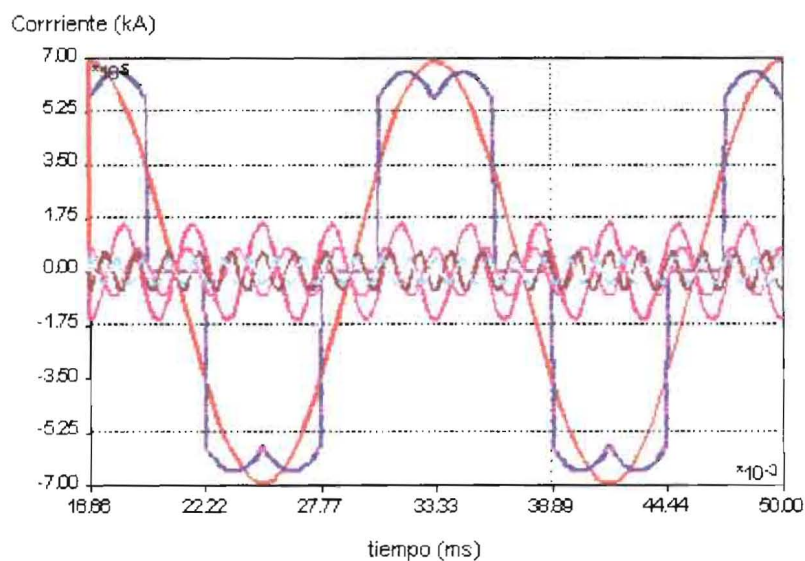
Figura 58. Definición de datos y nodos del modelo ARMO

Utilizando el modelo ARMO determinar:

- La descomposición armónica de la corriente del puente
- Calcular el factor de distorsión para la corriente.



**Figura 59.** Utilización de modelo ARMO en descomposición de corriente del puente

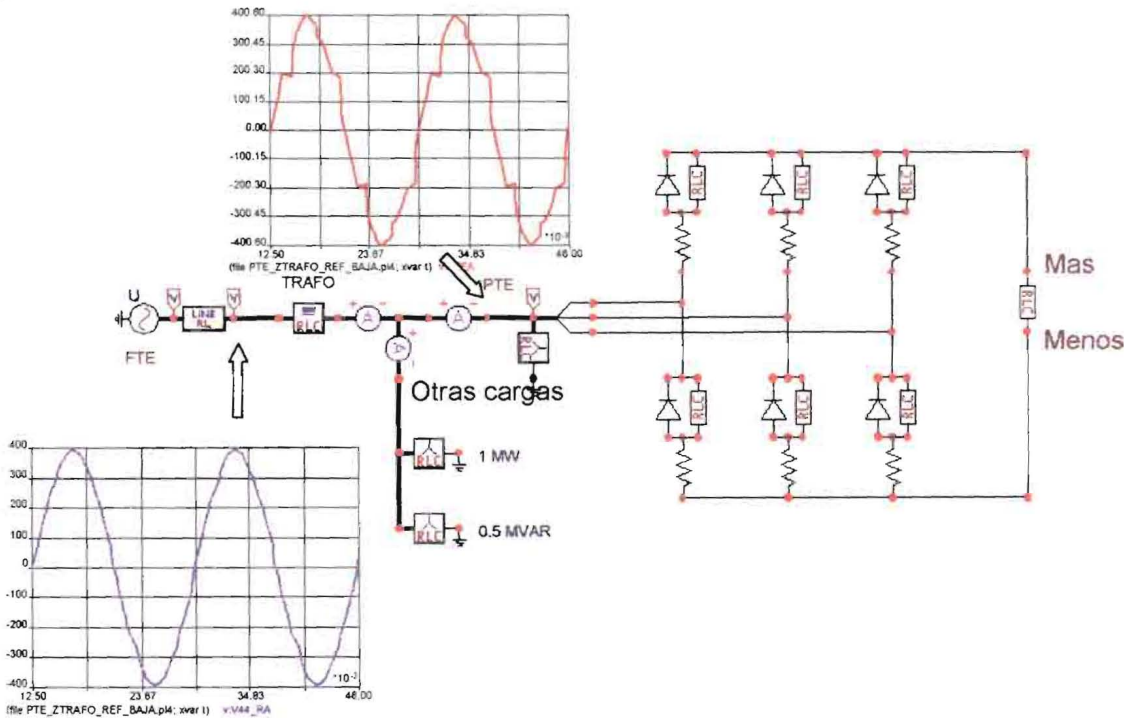


**Figura 60.** Resultado de la descomposición armónica de la corriente



## 8.7 DISTORSIÓN DEBIDA AL PUEBTE Y PRESENCIA DE TRANSFORMADOR

El verdadero problema por la presencia de corrientes armónicas, es que éstas circulan hacia la fuente por elementos de la red que tienen impedancia (transformadores y líneas), generando distorsiones que afectan la forma de onda del voltaje en mayor grado mientras más alejado se esté de la fuente. En la figura 61 el transformador de potencia se ha referido al lado de baja, de manera que se pueda observar la distorsión del voltaje antes y después del transformador.



**Figura 61.** Distorsión armónica del voltaje antes y después del transformador

El transformador se puede representar en forma real conectado a sus respectivos niveles de tensión nominales y teniendo en cuenta la forma de conexión de sus devanados primario y secundario. (Ver figura 62)