

con

$$X^{(l)} = \begin{bmatrix} x_1^{(l)} \\ x_2^{(l)} \\ \vdots \\ x_m^{(l)} \end{bmatrix} \quad DF(X^{(l)}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_m} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_m} \end{bmatrix}_{X=X^{(l)}} \quad F(X^{(l)}) = \begin{bmatrix} f_1(X^{(l)}) \\ f_2(X^{(l)}) \\ \vdots \\ f_m(X^{(l)}) \end{bmatrix}$$

La convergencia está garantizada [41] y es rápida si se cumplen determinados requisitos entre los que destaca que la primera aproximación ($X^{(0)}$) esté suficientemente cerca de la solución y que ambas estén dentro de un recinto donde $F(X)$ sea continuamente diferenciable. En caso contrario pueden ocurrir tres cosas:

- El método converge después de un número inaceptable de iteraciones
- El método no puede converger
- El método converge hacia una solución falsa

Este último caso se refiere a soluciones matemáticamente correctas pero que corresponden a situaciones físicamente incorrectas o imposibles.

3.2. Métodos de Newton modificados

Se trata de modificaciones del método de Newton en las que el inverso del jacobiano se multiplica por un factor amortiguante λ (menor que la unidad). Si recordamos la interpretación geométrica del método de Newton, el salto hacia la solución que se da es λ veces menor. La expresión del método sería

$$X^{(l+1)} = X^{(l)} - \lambda^{(l)} [DF(X^{(l)})]^{-1} F(X^{(l)})$$

Este parámetro, según el método escogido puede ser fijo o variable según la iteración o el error. En la referencia [41] se discuten algunos criterios de elección del factor amortiguante. Estos métodos pueden facilitar la convergencia pero no la aseguran.

3.3. Método de Davidenko

El método de Davidenko es uno de los varios métodos de continuación, en los que se define una homotopía [40] que va desde un valor inicial arbitrario $X^{(0)}$ hasta la solución del problema. En el caso del método de Davidenko [41] la homotopía es de tipo exponencial

$$H(t, X(t)) = F(X) - F(X^{(0)}) e^{-t} = 0 \quad \forall t$$

donde el parámetro t va de 0 a ∞ . La homotopía lleva al problema en forma continua desde el valor inicial arbitrario $X^{(0)}$ hasta la solución $X^{(s)}$.

$$H(0, X(0)) = F(X^{(0)}) - F(X^{(0)}) e^0 = 0 \quad H(\infty, X(\infty)) = F(X^{(s)}) - F(X^{(0)}) e^{-\infty} = F(X^{(s)}) = 0$$

Derivando la homotopía respecto al parámetro t se tiene

$$\frac{d}{dt} H(t, X(t)) = 0 = \frac{d}{dt} F(X) - F(X^{(0)}) \frac{d}{dt} e^{-t} = \frac{d}{dt} X(t) \frac{d}{dX} F(X) + F(X^{(0)}) e^{-t}$$

si tenemos en cuenta que

$$F(X) = F(X^{(0)}) e^{-t}$$

se obtiene

$$\frac{d}{dt} H(t, X(t)) = X'(t) DF(X) + F(X) = 0$$

de donde

$$X'(t) = -[DF(X)]^{-1} F(X)$$

con $X(0) = X^{(0)}$. La resolución de esta ecuación diferencial equivale a seguir el camino que recorre la homotopía al variar t y que alcanza la solución $X^{(s)}$ cuando $t \rightarrow \infty$; aunque con valores relativamente pequeños de t (por ejemplo, del orden de $t = 5$) se obtienen ya buenas aproximaciones de la solución.

Para resolver esta ecuación diferencial puede utilizarse el método de Euler. Este método toma una ecuación del tipo

$$X'(t) = G(X, t)$$

y la resuelve iterativamente mediante

$$X^{(l+1)} = X^{(l)} + h G(X^{(l)}, t^{(l)})$$

donde h es el paso de avance del método. El paso debe ser pequeño pero no demasiado [3] ya que aumentan los errores por redondeo y el método es muy lento.

Esta expresión puede ser resuelta por cualquier método de resolución de ecuaciones diferenciales, como los métodos de Euler, Runge-Kutta o predictor-corrector. Si aplicamos el método de Euler para resolver la expresión de Davidenko obtenemos

$$X^{(l+1)} = X^{(l)} - h [DF(X^{(l)})]^{-1} F(X^{(l)})$$

que cuando $h = 1$ coincide con el método de Newton y si $h = \lambda$ con los de Newton modificados.

El método converge si el camino definido por la homotopía existe y el paso es suficientemente pequeño. La existencia del camino [37][38] queda asegurada si el valor inicial $X^{(0)}$ que se toma corresponde a una situación físicamente real del sistema. Una forma simple de encontrar una situación físicamente real es tomar las condiciones de reposo del sistema que suele ser una situación trivial [40] puesto que todos los nudos estarán aproximadamente a la misma tensión y no se consumirá potencia. Si se parte de la situación de reposo, el método de Davidenko puede interpretarse como una lenta puesta en marcha del sistema.

3.4. Método de h-Newton

El método de h-Newton [37][38][41] puede presentarse como una combinación del método de Davidenko y los métodos de Newton modificados. Así en este método se pretende seguir un camino como el que se sigue en el método de Davidenko y, por tanto, se aplicarán las mismas condiciones iniciales que en dicho método, pero se intentará reducir el tiempo de cálculo que produce el pequeño paso que utiliza el método de Davidenko. La expresión será

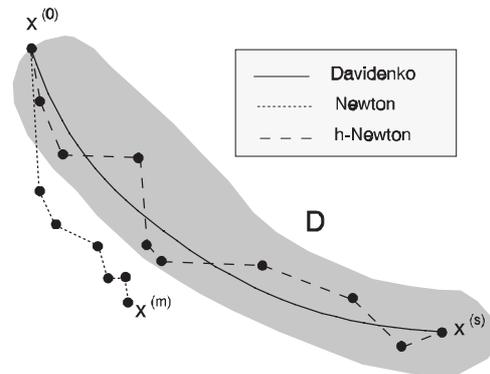
$$X^{(l+1)} = X^{(l)} - h^{(l)} [DF(X^{(l)})]^{-1} F(X^{(l)})$$

Por ello se inicia el problema con paso unitario y éste se reduce localmente cuando se detecta que en un punto $X^{(i+1)}$ el error es mayor que en el anterior $X^{(i)}$. Una vez hallado un punto $X^{(i+1)}$ en que el error es menor que en el punto anterior, vuelve a aumentarse el paso al valor inicial. La reducción de paso se hace partiendo de la expresión

$$h = \frac{1}{2^p}$$

donde inicialmente $p = p_0 = 0$ y cada vez que se reduce el paso se hace $p = p + 1$ para ir reduciendo el valor de h .

La figura siguiente muestra un ejemplo, para una variable, de la evolución seguida por los métodos de Newton, Davidenko y h-Newton a partir de una aproximación inicial $x^{(0)}$ que corresponde a un estado físicamente real del sistema. Se observa que el método de Davidenko sigue un camino continuo desde la aproximación inicial y consigue evolucionar lentamente hasta la solución $x^{(s)}$ sin salir del dominio D dentro del cual el jacobiano es invertible.



El método de Newton, en este caso, evoluciona saliendo fuera del dominio D y alcanza un mínimo local $x^{(m)}$. Lo mismo sucede con el método de h-Newton pero el método de h-Newton está preparado para superar estas situaciones. Si se detectan problemas de convergencia se reinicializa el algoritmo con un paso inicial más pequeño $p_0 = p_0 + 1$ hasta un valor de p_0 en que no aparezcan problemas. Una forma de detectar problemas de convergencia [41] es detectar cuando h se hace demasiado pequeño (es decir cuando p se hace demasiado grande, por ejemplo mayor que 5). En la figura vemos que el método de h-Newton, una vez reducido el paso inicial consigue no salir del dominio D y alcanzar la solución en un número razonable de iteraciones.

En nuestro caso, y teniendo en cuenta las problemáticas que aparecen en la inicialización de algunas cargas (como se verá más adelante), se recomienda introducir otro criterio para evitar la convergencia hacia soluciones falsas. Un posible criterio consistiría en comprobar que los tiempos de conmutación entre tramos tienen valores correlativos y dentro del margen de validez (normalmente entre 0 y T); otro criterio que también puede utilizarse es limitar la longitud del avance en cada iteración.

El algoritmo finalmente propuesto es el que se presenta en el recuadro de la página siguiente. Obsérvese que como medida del error de la función se ha tomado, tanto para el control de estabilidad como para el de convergencia, la suma de los valores absolutos, es decir la norma unidad que es la que se presenta en la referencia [5]

$$\|F(X^{(i+1)})\|_1 = \sum_{j=1}^m |f_j(X^{(i+1)})|$$

puesto que su obtención es sencilla y ahorra tiempo de cálculo; en cambio Sainz [41] utiliza la norma 2 para la convergencia y la norma infinito para la estabilidad.

$$\|F(X^{(i+1)})\|_2 = \sqrt{\sum_{j=1}^m [f_j(X^{(i+1)})]^2}$$

$$\|F(X^{(i+1)})\|_\infty = \text{máx}[f_j(X^{(i+1)})]$$

El cambio de una norma a otra es simple y puede realizarse a voluntad. Las normas 1 e infinito son las más fáciles de calcular pero en muchos casos la norma unidad es más restrictiva y, por tanto, puede requerir más iteraciones.

```

subrutina h-newton(X)                                entramos la primera aproximación en X
p0 = 0                                                se inicia con paso unitario
repetir
  k = 0                                                contador de iteraciones
  repetir
    k = k + 1
    hallar F(X) y DF(X)
    errf = 0
    para i = 1 hasta n hacer
      errf = errf + abs(fi(X))                        error de función
    finpara
    si errf > tolf entonces
      hallar B = (DF(X))-1 F(X)                       incremento de la variable
      p = p0
      repetir
        h = 1/2p                                       hallar el paso
        X = X + h B                                       nuevo punto
        hallar F(X)
        errp = 0
        para i = 1 hasta n hacer
          errp = errp + abs(fi(X))                    error de función
        finpara
        p = p + 1
      hasta (p > pmáx) o (errp < errf)
    finsi
    comprobar valores de X
    si valores fuera de límites entonces p = pmáx + 1 finsi
  hasta (p > pmáx) o (errf < tolf) o (k > kmáx)
  p0 = p0 + 1
hasta (errf < tolf) o (k > kmáx) o (p0 > pmáx)
fin subrutina

```

Algoritmo del método de h-Newton

3. Método de linealización

Como ya se ha comentado, este método pretende ser una mejora de la simple modelización de la carga no lineal como fuente de corriente. Si las cargas no lineales pudieran modelizarse con una fuente de corriente para cada armónico, estas tendrían un valor que variaría proporcionalmente con la componente fundamental de la tensión de alimentación.

$$I_h = Y_h V_1$$

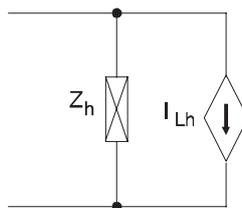
Dado que la aparición de armónicos en la tensión de alimentación hace variar las corrientes armónicas inyectadas, se desea relacionar dichas componentes de la corriente con sus correspondientes de la tensión mediante una admitancia.

$$I_h = Y_{h1} V_1 + Y_{hh} V_h$$

Así pues este modelo puede verse como un caso particular del propuesto por Fauri [28] ya que puede escribirse en la forma

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ \dots \\ I_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ Y_{21} & Y_{22} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ Y_{31} & 0 & Y_{33} & 0 & \dots & 0 \\ Y_{41} & 0 & 0 & Y_{44} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{N1} & 0 & 0 & 0 & \dots & Y_{NN} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ \dots \\ V_N \end{pmatrix}$$

El método equivale pues a representar la carga no lineal, a las frecuencias armónicas, según un esquema equivalente Norton. Según este modelo la carga tiene, a cada una de las frecuencias armónicas, un esquema formado por una fuente de corriente (cuyo valor depende sólo de la componente fundamental de la tensión en bornes de la carga) en paralelo con una impedancia (o admitancia). En la figura siguiente se ha representado dicho esquema equivalente.



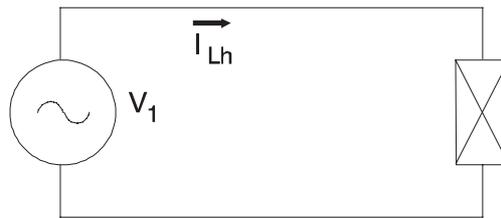
El valor de la fuente de corriente será diferente para cada armónico y variará, en principio, con la componente fundamental de la tensión de alimentación; el valor de la impedancia será diferente a cada frecuencia. El modelo propuesto da lugar, para cada armónico, a una corriente I_h compuesta por la que introduce la fuente de corriente (I_{Lh}) y la que absorbe la impedancia (I_{Zh}). La primera de ellas depende de la componente fundamental (V_1) de la tensión de alimentación de la carga y la segunda de las tensiones armónicas del punto de conexión.

1. Obtención de los parámetros del modelo

Para la obtención de los parámetros del modelo propuesto se hallará primero el valor de la fuente de corriente y luego el valor de la impedancia.

1.1. Fuente de corriente

Si se alimenta la carga mediante una fuente senoidal de tensión V_1 a la frecuencia de red (frecuencia fundamental) se consumirá (ver figura siguiente) una corriente no senoidal I_L .

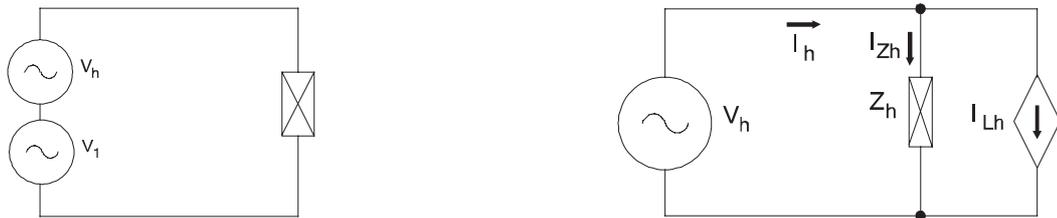


La descomposición de la onda de corriente hallada en serie de Fourier nos dará los valores I_{Lh} de la fuente de corriente a cada una de las frecuencias armónicas. Repitiendo el ensayo para diferentes valores de la tensión de alimentación podrá determinarse la dependencia de la corriente respecto a la tensión.

1.2. Impedancia

Para hallar el valor de la impedancia, mantendremos la componente fundamental de la tensión de alimentación a un valor fijo V_1 y añadiremos una pequeña perturbación de tensión (V_h) a una de las frecuencias armónicas (de orden h) que se desean estudiar. Esto se pone de manifiesto en la figura de la izquierda al inicio de la página siguiente. La figura de la derecha representa el esquema equivalente del circuito a la frecuencia de orden h ; donde el valor I_{Lh} de la fuente de corriente depende sólo de la tensión fundamental (V_1). A partir de este circuito podemos escribir

$$I_h = I_{Zh} + I_{Lh} = \frac{V_h}{Z_h} + I_{Lh} \qquad Z_h = \frac{V_h}{I_h - I_{Lh}}$$



La impedancia obtenida debe ser independiente del módulo y el ángulo de la tensión armónica (V_h) inyectada. Pero, por otro lado, la expresión anterior de Z_h tiene en el denominador la diferencia entre dos números parecidos que, indudablemente, introducirá un cierto error. Por ello se realizarán ensayos con varios módulos diferentes (por ejemplo un 1% y un 2% de V_1) y con varios ángulos cubriendo la circunferencia completa y, dada la dificultad para determinar cuál de las impedancias halladas es más adecuada, se realizará el promedio entre ellas.

Se considerará que el modelo de este tipo es inviable cuando las diferencias entre las impedancias que se promedian sean importantes. También se considerará que el modelo no es válido cuando al inyectar un armónico de tensión se produzcan variaciones importantes de los demás armónicos de corriente de la carga.

1.3. Metodología utilizada en los estudios realizados

En lo que resta de capítulo se comentarán las pruebas que se hicieron para estudiar si el modelo de linealización alrededor del punto de trabajo era viable y adecuado. Dado que no se disponía de equipo de laboratorio adecuado (por ejemplo el descrito en la referencia [28]) para realizar este tipo de ensayos se decidió comprobar la utilidad del modelo a partir de simulaciones por ordenador. Los estudios se realizaron a partir del programa PSPICE [42] versión 5.2 que se disponía en dicho momento y de versiones de evaluación posteriores.

Para ello se obtuvo un modelo en régimen transitorio (estudio temporal) de cada una de las cargas que se deseaban comprobar y se realizaron los ensayos descritos. En una primera fase se hacía el estudio a una única frecuencia armónica haciendo inyecciones de tensión con cuatro valores diferentes de fase ($0, \pi/2, \pi$ y $3\pi/2$). Si las impedancias obtenidas en cada uno de los casos probados eran parecidas se consideraba que el modelo era aplicable y se pasaba a un estudio posterior más completo.

Las cargas que se estudiaron fueron las siguientes:

- Lámparas de descarga
- Regulador de tensión (recortador)
 - con carga resistiva
 - con carga inductiva pura (TCR, SVC)
 - con carga inductiva mixta
- Fuente de alimentación (rectificador con condensador de filtrado)

En los apartados siguientes se presentarán los estudios realizados y los resultados obtenidos con cada una de las cargas mencionadas. Se verá que el modelo propuesto ha dado resultados bastante aceptables para algunas cargas y, en cambio, ha dado resultados inaceptables para otras. Por este motivo no se ha realizado un estudio amplio que podría incluir, por ejemplo, la variación de la fuente de corriente con la tensión de red, la comprobación de la independencia de la impedancia hallada respecto a la magnitud de la perturbación inyectada, etc.

2. Alumbrado de descarga

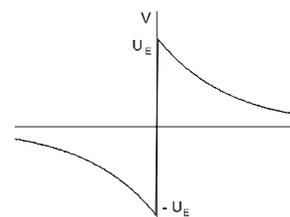
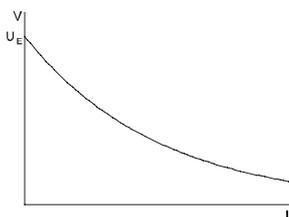
2.1. Obtención del modelo

Un equipo de alumbrado de descarga funcionando en régimen permanente está formado por un balasto en serie con la lámpara. Puede haber además un condensador para compensar la energía reactiva pero, al conectarse en paralelo con el resto del equipo, podemos considerarlo aparte para dar más simplicidad al modelo.

El balasto está formado normalmente por una bobina con núcleo de hierro, por tanto podemos representarla, para su simulación con PSPICE, con una inductancia pura en serie con una resistencia. En este modelo supondremos, como ocurre a menudo, que la bobina puede considerarse lejos de la saturación en el intervalo de valores que toma la corriente.

La modelización de la lámpara de descarga es más compleja pues se trata de un elemento no lineal. En régimen permanente podemos considerar la lámpara como un arco eléctrico que se establece en atmósfera gaseosa cerrada y a una temperatura que podemos considerar constante. En estas circunstancias la tensión en bornes del arco disminuye al aumentar la intensidad, requiriéndose una tensión mínima (tensión de cebado) para iniciar la conducción. La figura siguiente a la izquierda presenta el tipo de curva tensión-corriente para un arco de este tipo.

En este caso el circuito está alimentado en corriente alterna por lo que deberá presentar el mismo fenómeno para los dos sentidos de la intensidad. La modelización de este fenómeno es imposible con PSPICE pues a intensidad nula se presenta una indeterminación del valor de tensión; por ello se toma una estrecha franja alrededor de la intensidad nula en que la tensión es lineal y da continuidad a la curva. La función descrita se ha representado en la figura siguiente a la derecha.

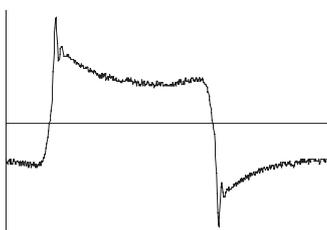


La curva representada deberá aproximarse mediante una función decreciente adecuada. Para simplificar la programación se ha decidido usar una función exponencial. Así si la tensión de cebado es U_E , la tensión de arco en el tramo de corriente positiva será

$$u_A = U_E \theta^{-1/\xi}$$

donde ξ es un parámetro, con unidades de intensidad, que permite ajustar la inclinación de la curva. La misma expresión cambiando el signo del exponente y de la función se utiliza para el tramo de corriente negativa.

Para determinar los parámetros U_E y ξ puede visualizarse la tensión de la lámpara con un osciloscopio. Dicha tensión (véase la figura siguiente) tiene un valor máximo que corresponde al inicio de la conducción para luego decrecer al aumentar la intensidad y finalmente volver a crecer levemente justo antes del final de la conducción.

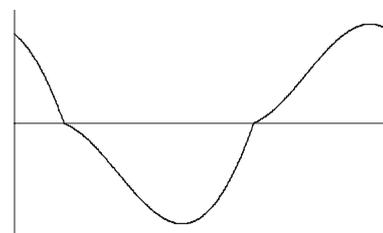
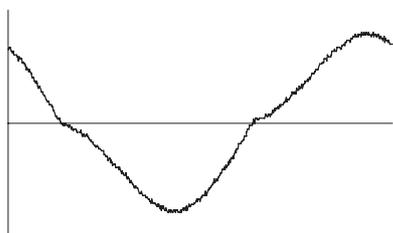


El valor de U_E se tomará igual al valor más alto de la tensión de arco (tensión de inicio de la conducción) y se harán simulaciones, con tensión de alimentación senoidal, con diferentes valores de ξ hasta encontrar el valor que hace coincidir el valor de la tensión de valle de la lámpara simulada con el de la lámpara real.

Para realizar las pruebas se tomó una lámpara fluorescente de características 220 V, 50 Hz y 58 W y se midió el balasto de la misma, obteniéndose 16 Ω y 0.58 H. Se conectó la lámpara y se midieron con osciloscopio una tensión de cebado de 175 V y una tensión de valle de 100 V; a partir de aquí se realizaron simulaciones hasta encontrar un valor de $\xi = 2.5$ A.

2.2. Resultados

Se simuló primero el modelo alimentando a tensión senoidal y se obtuvo una onda de intensidad como la representada a la derecha, a la izquierda se ha reproducido la intensidad medida con el osciloscopio sobre el fluorescente de estudio.



El desarrollo armónico de la onda de intensidad dio como resultado las componentes que se presentan en la tabla siguiente y que, exceptuando la fundamental (presentada sólo como referencia), corresponderán con los valores I_{Lh} de la fuente de corriente del esquema equivalente Norton. Los ángulos se dan en grados sexagesimales para una más fácil interpretación.

h	módulo (A)	fase (°)
1	1.141	122.9
3	0.1329	138.3
5	0.04812	52.44
7	0.02457	-33.67
9	0.01514	-119.6

h	módulo (A)	fase (°)
11	0.01022	155.8
13	7.154m	70.58
15	5.305m	-16.81
17	4.255m	-103.6
19	3.470m	172.3

A continuación se fue introduciendo una pequeña perturbación del 1% (respecto a la componente fundamental) para cada uno de los armónicos impares hasta el 19 y con doce ángulos diferentes (de 0 a 330°, variando de 30 en 30). Así se obtuvieron 12 valores de impedancia (módulo y fase) para cada armónico. Con ellos se halló un promedio de módulo y ángulo de impedancia para cada armónico y se acotó el margen de variación. También se halló la impedancia descompuesta en parte real (resistencia) y parte imaginaria (reactancia); esta última se dividió por el índice del armónico (reactancia a la componente fundamental). Los resultados obtenidos aparecen en la tabla siguiente.

h	módulo (Ω)		fase (°)		R	X/h
3	381.0	$\pm 27.6\%$	80.72	$\pm 12.4^\circ$	61.44	125.3
5	650.4	$\pm 16.7\%$	84.79	$\pm 8.2^\circ$	59.06	129.5
7	905.6	$\pm 10.9\%$	86.43	$\pm 6.4^\circ$	56.39	129.1
9	1160	$\pm 7.6\%$	86.64	$\pm 4.4^\circ$	67.99	128.7
11	1436	$\pm 6.2\%$	86.75	$\pm 3.7^\circ$	81.41	130.3
13	1717	$\pm 7.1\%$	87.55	$\pm 3.8^\circ$	73.40	132.0
15	1971	$\pm 6.6\%$	88.30	$\pm 3.0^\circ$	58.47	131.3
17	2221	$\pm 4.6\%$	88.29	$\pm 2.3^\circ$	66.28	130.6
19	2495	$\pm 4.7\%$	87.98	$\pm 2.7^\circ$	87.95	131.2

En este caso vemos que los valores del módulo de la impedancia a cada armónico varían poco entre sí, menos del 30% (y la mayoría menos del 20%) y los de la fase también sufren variaciones pequeñas, menos de 15° (y la mayoría menos de 10°). Por ello podemos decir que el modelo es bastante apto para la mayoría de aplicaciones.

Mirando las dos últimas columnas de la tabla podemos ver que, además, podemos utilizar los mismos valores de resistencia y reactancia a todas las frecuencias si tenemos en cuenta la variación de reactancia proporcionalmente a la frecuencia; este hecho permite reducir el número de variables a almacenar y simplifica los cálculos. Los valores obtenidos son (valor y margen de variación) los siguientes: $R = 68.04 \Omega (\pm 29.3\%)$ y $X/h = 129.8 \Omega (\pm 3.5\%)$.

3. Regulador de tensión

3.1. Obtención del modelo

La carga consiste en una impedancia en serie con un interruptor estático formado por dos tiristores en anti-paralelo (o un triac para potencias pequeñas). En este dispositivo, variando el ángulo (α) de disparo de los tiristores puede variarse el valor eficaz de la tensión aplicada a la impedancia y, por tanto, las potencias consumidas.

Según la relación entre resistencia y reactancia de esta carga, corresponderá a diferentes equipos electrónicos. Definimos un ángulo ϕ de forma que su coseno ($\text{Cos } \phi$) sea igual a la relación entre la resistencia y la impedancia y su seno (relación entre la reactancia y la impedancia) sea siempre positivo (carga inductiva) o nulo. Los equipos considerados son:

- Reguladores de tensión para carga resistiva ($\phi = 0^\circ$) como reguladores de luminosidad para lámparas de incandescencia, reguladores de potencia para circuitos de caldeo, etc.
- Reguladores de tensión para carga inductiva ($0^\circ < \phi < 90^\circ$) como reguladores de velocidad para pequeños motores de corriente alterna, equipos de arranque suave para motores de inducción, ahorradores de energía para máquinas de inducción, etc. (funcionando en régimen permanente).
- Compensadores estáticos de energía reactiva ($\phi \approx 90^\circ$) en que la inductancia regulada se conectará en paralelo con una batería de condensadores para variar la reactiva total suministrada a la red.

En este tipo de circuito carece de sentido trabajar con ángulos $\alpha < \phi$ pues el circuito se comporta como si $\alpha = \phi$ pero se complica la simulación con PSPICE pues se requiere un tiempo bastante largo para alcanzar el régimen permanente. Tampoco tienen sentido ángulos $\alpha > 180^\circ$ y $\phi > 90^\circ$.

El modelo utilizado para la carga es equivalente a la propia carga pues se han empleado una resistencia y una reactancia en serie con la pareja de tiristores en antiparalelo. Los valores de ϕ se irán variando según el caso que se desee obtener. Todos los casos se han hecho con una impedancia de 10Ω alimentada, a través del regulador, a 220 V . El modelo de los tiristores es una variación del que presenta Mohan [4] al que se ha añadido un diodo en serie (según recomendación del propio autor) y se le ha preparado para un ángulo de cebado α variable.

3.2. Resultados

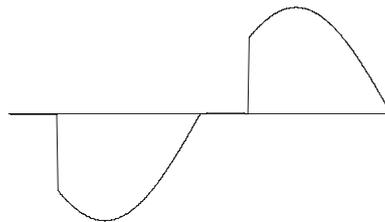
Se han estudiado cuatro casos con ángulos ϕ de 0, 30, 60 y 90°. Para cada uno de los tres primeros se han probado varios ángulos de disparo. Los resultados se presentan en los apartados siguientes.

3.2.1. Caso de carga resistiva ($\phi = 0^\circ$)

Se han estudiado tres casos, para ángulos de disparo α de 45, 90 y 135°; ya que el caso de 0° corresponde a una corriente senoidal pura (carga lineal) y el de 180° corresponde al caso de no conducción.

3.2.1.1. Caso de carga resistiva ($\phi = 0^\circ$) con $\alpha = 45^\circ$

Se simuló primero el modelo alimentando a tensión senoidal y se obtuvo una onda de intensidad como la representada en la figura siguiente.



El desarrollo armónico de la onda de intensidad dio como resultado las componentes que se presentan en la tabla siguiente y que, exceptuando la fundamental (presentada sólo como referencia), corresponderán con los valores I_{Lh} de la fuente de corriente del esquema Norton.

h	módulo (A)	fase (°)
1	28.51	170.1
3	4.962	-1.312
5	3.677	-65.37
7	2.309	-138.0
9	1.390	130.4

h	módulo (A)	fase (°)
11	1.198	28.67
13	1.177	-58.43
15	0.9879	-141.6
17	0.7734	126.7
19	0.7121	29.97

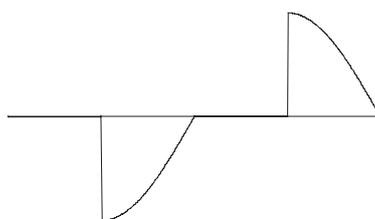
A continuación se fue introduciendo una pequeña perturbación del 1% (respecto a la componente fundamental) para cada uno de los armónicos impares hasta el 19 y con doce ángulos diferentes (de 0 a 330°, variando de 30 en 30). Así se obtuvieron 12 valores de impedancia (módulo y fase) para cada armónico. Con estos valores se halló un promedio de módulo y ángulo de impedancia para cada armónico y se acotó el margen de variación. Los resultados obtenidos aparecen en la tabla siguiente.

h	módulo (Ω)		fase ($^\circ$)	
	3	9.477	$\pm 10.2\%$	-0.345
5	9.454	$\pm 6.6\%$	-0.492	$\pm 3.5^\circ$
7	9.444	$\pm 4.4\%$	-0.727	$\pm 2.6^\circ$
9	9.412	$\pm 3.5\%$	-0.605	$\pm 2.2^\circ$
11	9.400	$\pm 2.6\%$	-0.759	$\pm 1.5^\circ$
13	9.392	$\pm 2.9\%$	-0.732	$\pm 1.5^\circ$
15	9.383	$\pm 1.9\%$	-0.760	$\pm 1.0^\circ$
17	9.376	$\pm 2.5\%$	-0.790	$\pm 1.1^\circ$
19	9.371	$\pm 1.5\%$	-0.791	$\pm 0.9^\circ$

En este caso vemos que los valores del módulo de la impedancia a cada armónico varían poco entre sí, bastante menos que con la lámpara de descarga y lo mismo sucede con los de la fase. Por ello podemos decir que el modelo es muy apto para la mayoría de aplicaciones. Observamos también que los valores de impedancia disminuyen con la frecuencia, por tanto no tiene sentido intentar hallar unos valores de R y X/h válidos a todas las frecuencias.

3.2.1.2. Caso de carga resistiva ($\phi = 0^\circ$) con $\alpha = 90^\circ$

Se simuló primero el modelo alimentando a tensión senoidal y se obtuvo una onda de intensidad como la representada en la figura siguiente.



El desarrollo armónico de la onda de intensidad dio como resultado las componentes que se presentan en la tabla siguiente y que, exceptuando la fundamental (presentada sólo como referencia), corresponderán con los valores I_{Lh} de la fuente de corriente del esquema equivalente Norton.

A continuación se fue introduciendo una pequeña perturbación del 1% (respecto a la componente fundamental) para cada uno de los armónicos impares hasta el 19 y con doce ángulos diferentes (de 0 a 330° , variando de 30 en 30). Así se obtuvieron 12 valores de impedancia (módulo y fase) para cada armónico.

h	módulo (A)	fase (°)
1	18.20	147.7
3	9.852	-91.14
5	3.290	87.43
7	3.279	-92.88
9	1.978	85.59

h	módulo (A)	fase (°)
11	1.967	-94.62
13	1.415	83.74
15	1.406	-96.37
17	1.102	81.91
19	1.095	-98.14

Con estos valores se halló un promedio de módulo y ángulo de impedancia para cada armónico y se acotó el margen de variación. Los resultados obtenidos aparecen en la tabla siguiente.

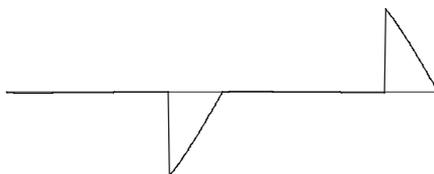
h	módulo (Ω)		fase (°)	
	3	14.29	$\pm 21.3\%$	-0.902
5	14.14	$\pm 12.5\%$	-1.450	$\pm 7.5^\circ$
7	14.03	$\pm 8.9\%$	-1.912	$\pm 5.1^\circ$
9	13.92	$\pm 6.5\%$	-2.161	$\pm 4.2^\circ$
11	13.82	$\pm 5.5\%$	-2.310	$\pm 3.2^\circ$
13	13.73	$\pm 4.4\%$	-2.387	$\pm 2.8^\circ$
15	13.67	$\pm 4.4\%$	-2.436	$\pm 2.5^\circ$
17	13.61	$\pm 3.4\%$	-2.401	$\pm 2.1^\circ$
19	13.57	$\pm 3.6\%$	-2.343	$\pm 1.9^\circ$

En este caso vemos que los valores del módulo de la impedancia a cada armónico varían poco entre sí, excepto los tres primeros y lo mismo sucede con los de la fase. Por ello podemos decir que el modelo es apto para la mayoría de aplicaciones. Observamos también que los valores de impedancia disminuyen con la frecuencia, por tanto no tiene sentido intentar hallar unos valores de R y X/h válidos a todas las frecuencias.

3.2.1.3. Caso de carga resistiva ($\phi = 0^\circ$) con $\alpha = 135^\circ$

Se simuló primero el modelo alimentando a tensión senoidal y se obtuvo una onda de intensidad como la representada en la figura siguiente.

El desarrollo armónico de la onda de intensidad dio como resultado las componentes que se presentan en la tabla siguiente y que, exceptuando la fundamental (presentada sólo como referencia), corresponderán con los valores I_{Lh} de la fuente de corriente del esquema equivalente Norton.



h	módulo (A)	fase (°)
1	5.468	120.4
3	4.890	178.8
5	3.651	-118.5
7	2.324	-47.76
9	1.403	40.77

h	módulo (A)	fase (°)
11	1.176	140.9
13	1.162	-132.5
15	0.9980	-51.20
17	0.7828	37.11
19	0.6975	132.1

A continuación se fue introduciendo una pequeña perturbación del 1% (respecto a la componente fundamental) para cada uno de los armónicos impares hasta el 19 y con doce ángulos diferentes (de 0 a 330°, variando de 30 en 30). Así se obtuvieron 12 valores de impedancia (módulo y fase) para cada armónico. Con estos valores se halló un promedio de módulo y ángulo de impedancia para cada armónico y se acotó el margen de variación. Los resultados obtenidos aparecen en la tabla siguiente.

h	módulo (Ω)		fase (°)	
3	28.93	$\pm 47.1\%$	-2.811	$\pm 20.3^\circ$
5	32.19	$\pm 5.0\%$	-43.36	$\pm 2.1^\circ$
7	27.16	$\pm 15.3\%$	-5.589	$\pm 7.7^\circ$
9	26.50	$\pm 9.2\%$	-6.325	$\pm 5.3^\circ$
11	25.97	$\pm 9.4\%$	-6.567	$\pm 4.8^\circ$
13	25.45	$\pm 5.5\%$	-6.628	$\pm 3.6^\circ$
15	25.07	$\pm 7.1\%$	-6.707	$\pm 3.2^\circ$
17	24.71	$\pm 4.5\%$	-6.586	$\pm 2.4^\circ$
19	24.49	$\pm 4.9\%$	-6.432	$\pm 2.7^\circ$

En este caso vemos que los valores del módulo de la impedancia a cada armónico sufren variaciones mayores que en los casos anteriores, especialmente el primero y el tercero, y lo mismo sucede con los de la fase. Aunque el número de casos estudiado no permite hacer afirmaciones categóricas, parece que cuanto más se recorta la onda, peores son los resultados a la hora de obtener este tipo de modelos.

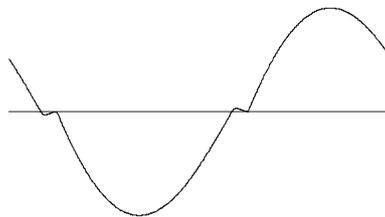
Observamos también que los valores de impedancia, en general, disminuyen con la frecuencia, por tanto no tiene sentido intentar hallar unos valores de R y X/h válidos a todas las frecuencias.

3.2.2. Caso de carga mixta con $\phi = 30^\circ$

Se han estudiado tres casos, para ángulos de disparo α de 45, 90 y 135°; ya que el caso de 180° corresponde al caso de no conducción.

3.2.2.1. Caso de carga mixta con $\phi = 30^\circ$ y $\alpha = 45^\circ$

Se simuló primero el modelo alimentando a tensión senoidal y se obtuvo una onda de intensidad como la representada en la figura.



El desarrollo armónico de la onda de intensidad dio como resultado las componentes que se presentan en la tabla siguiente y que, exceptuando la fundamental (presentada sólo como referencia), corresponderán con los valores I_{Lh} de la fuente de corriente del esquema Norton.

h	módulo (A)	fase (°)
1	29.10	145.3
3	1.744	-86.68
5	1.100	-174.6
7	0.7632	102.9
9	0.5562	22.48

h	módulo (A)	fase (°)
11	0.4149	-57.08
13	0.3114	-136.3
15	0.2325	144.5
17	0.1708	65.00
19	0.1220	-15.16

A continuación se fue introduciendo una pequeña perturbación del 1% (respecto a la componente fundamental) para cada uno de los armónicos impares hasta el 19 y con doce ángulos diferentes (de 0 a 330°, variando de 30 en 30). Así se obtuvieron 12 valores de impedancia (módulo y fase) para cada armónico. Con estos valores se halló un promedio de módulo y ángulo de impedancia para cada armónico y se acotó el margen de variación. También se halló la impedancia descompuesta en parte real (resistencia) y parte imaginaria (reactancia); esta última se dividió por el índice del armónico (reactancia a la componente fundamental). Los resultados obtenidos aparecen en la tabla de la página siguiente.

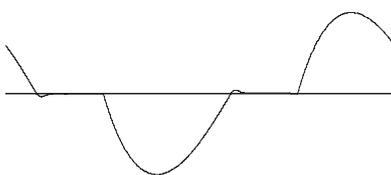
h	módulo (Ω)		fase ($^\circ$)		R	X/h
3	13.83	$\pm 18.6\%$	53.93	$\pm 7.0^\circ$	8.143	3.726
5	20.85	$\pm 5.2\%$	66.17	$\pm 2.8^\circ$	8.424	3.815
7	28.05	$\pm 1.6\%$	72.01	$\pm 0.8^\circ$	8.663	3.811
9	35.45	$\pm 2.0\%$	75.11	$\pm 1.1^\circ$	9.109	3.807
11	42.81	$\pm 3.0\%$	77.19	$\pm 1.7^\circ$	9.492	3.795
13	50.12	$\pm 3.6\%$	78.52	$\pm 1.9^\circ$	9.975	3.778
15	57.46	$\pm 3.0\%$	79.53	$\pm 1.9^\circ$	10.44	3.767
17	64.77	$\pm 2.3\%$	80.36	$\pm 1.1^\circ$	10.85	3.756
19	72.18	$\pm 1.3\%$	80.99	$\pm 0.8^\circ$	11.30	3.752

En este caso vemos que los valores del módulo de la impedancia a cada armónico varían poco entre sí, bastante menos que con la lámpara de descarga y lo mismo sucede con los de la fase. Por ello podemos decir que el modelo es muy apto para la mayoría de aplicaciones.

Mirando las dos últimas columnas de la tabla podemos ver que, con reservas ya que la resistencia aumenta monótonamente con la frecuencia, también se podría llegar a utilizar los mismos valores de resistencia y reactancia a todas las frecuencias si tenemos en cuenta la variación de reactancia proporcionalmente a la frecuencia; este hecho permite reducir el número de variables a almacenar y simplifica los cálculos. Los valores obtenidos son (valor y margen de variación) los siguientes: $R = 9.600 \Omega (\pm 17.7\%)$ y $X/h = 3.779 \Omega (\pm 1.4\%)$.

3.2.2.2. Caso de carga mixta con $\phi = 30^\circ$ y $\alpha = 90^\circ$

Se simuló primero el modelo alimentando a tensión senoidal y se obtuvo una onda de intensidad como la representada en la figura siguiente.



El desarrollo armónico de la onda de intensidad dio como resultado las componentes que se presentan en la tabla de la página siguiente y que, exceptuando la fundamental (presentada sólo como referencia), corresponderán con los valores I_{Lh} de la fuente de corriente del esquema equivalente Norton.

h	módulo (A)	fase (°)
1	17.86	125.4
3	6.545	-160.4
5	1.567	50.23
7	0.6186	159.8
9	0.7647	7.611

h	módulo (A)	fase (°)
11	0.3116	-135.6
13	0.1761	-31.56
15	0.2822	-179.8
17	0.1453	38.81
19	0.07117	151.9

A continuación se fue introduciendo una pequeña perturbación del 1% (respecto a la componente fundamental) para cada uno de los armónicos impares hasta el 19 y con doce ángulos diferentes (de 0 a 330°, variando de 30 en 30). Así se obtuvieron 12 valores de impedancia (módulo y fase) para cada armónico. Con estos valores se halló un promedio de módulo y ángulo de impedancia para cada armónico y se acotó el margen de variación.

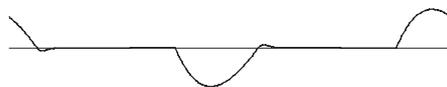
También se halló la impedancia descompuesta en parte real (resistencia) y parte imaginaria (reactancia); esta última se dividió por el índice del armónico (reactancia a la componente fundamental). Los resultados obtenidos aparecen en la tabla siguiente.

h	módulo (Ω)		fase (°)		R	X/h
3	20.40	$\pm 18.6\%$	51.98	$\pm 11.6^\circ$	12.57	5.357
5	29.75	$\pm 4.2\%$	62.89	$\pm 2.1^\circ$	13.56	5.296
7	40.89	$\pm 5.6\%$	67.20	$\pm 3.5^\circ$	15.85	5.385
9	52.01	$\pm 6.5\%$	68.30	$\pm 3.7^\circ$	19.23	5.369
11	62.25	$\pm 2.7\%$	66.98	$\pm 1.7^\circ$	24.34	5.208
13	71.07	$\pm 3.5\%$	65.08	$\pm 2.1^\circ$	29.95	4.958
15	77.47	$\pm 4.0\%$	63.81	$\pm 2.5^\circ$	34.19	4.634
17	82.19	$\pm 0.8\%$	63.23	$\pm 0.5^\circ$	37.02	4.317
19	86.61	$\pm 2.4\%$	63.76	$\pm 1.5^\circ$	38.29	4.089

En este caso vemos que los valores del módulo de la impedancia a cada armónico varían poco entre sí y lo mismo sucede con los de la fase. Por ello podemos decir que el modelo es muy apto para la mayoría de aplicaciones. Mirando las dos últimas columnas de la tabla podemos ver que no se podría llegar a utilizar los mismos valores de resistencia y reactancia a todas las frecuencias puesto que hay un aumento importante de la resistencia con la frecuencia.

3.2.2.3. Caso de carga mixta con $\phi = 30^\circ$ y $\alpha = 135^\circ$

Se simuló primero el modelo alimentando a tensión senoidal y se obtuvo una onda de intensidad como la representada en la figura siguiente.



El desarrollo armónico de la onda de intensidad dio como resultado las componentes que se presentan en la tabla siguiente y que, exceptuando la fundamental (presentada sólo como referencia), corresponderán con los valores I_{Lh} de la fuente de corriente del esquema Norton.

h	módulo (A)	fase (°)
1	4.533	104.0
3	3.559	130.0
5	1.814	158.2
7	0.3383	-151.1
9	0.4465	2.391

h	módulo (A)	fase (°)
11	0.3467	35.65
13	0.06268	179.0
15	0.2094	-116.2
17	0.08660	-78.89
19	0.08598	87.82

A continuación se fue introduciendo una pequeña perturbación del 1% (respecto a la componente fundamental) para cada uno de los armónicos impares hasta el 19 y con doce ángulos diferentes (de 0 a 330°, variando de 30 en 30). Así se obtuvieron 12 valores de impedancia (módulo y fase) para cada armónico. Con estos valores se halló un promedio de módulo y ángulo de impedancia para cada armónico y se acotó el margen de variación. También se halló la impedancia descompuesta en parte real (resistencia) y parte imaginaria (reactancia); esta última se dividió por el índice del armónico (reactancia a la componente fundamental). Los resultados obtenidos aparecen en la tabla siguiente.

h	módulo (Ω)		fase (°)		R	X/h
3	36.81	$\pm 31.5\%$	40.82	$\pm 13.7^\circ$	27.86	8.021
5	48.30	$\pm 15.3\%$	37.89	$\pm 11.0^\circ$	38.12	5.933
7	78.93	$\pm 12.8\%$	52.39	$\pm 8.0^\circ$	48.17	8.932
9	95.13	$\pm 2.6\%$	47.42	$\pm 1.4^\circ$	64.37	7.783
11	107.5	$\pm 5.1\%$	38.99	$\pm 2.9^\circ$	83.56	6.149
13	103.3	$\pm 9.5\%$	33.37	$\pm 4.7^\circ$	86.27	4.371
15	99.57	$\pm 3.9\%$	33.05	$\pm 2.4^\circ$	83.46	3.624
17	94.74	$\pm 2.3\%$	34.56	$\pm 1.3^\circ$	78.02	3.161
19	93.48	$\pm 1.3\%$	39.04	$\pm 0.8^\circ$	72.61	3.099

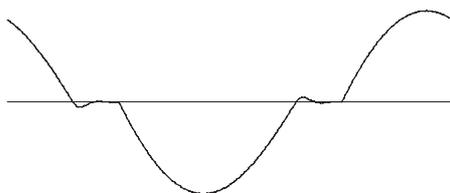
En este caso vemos que los valores del módulo de la impedancia a cada armónico varían poco entre sí, excepto los tres primeros, y lo mismo sucede con los de la fase. Por ello podemos decir que el modelo es muy apto para la mayoría de aplicaciones. Mirando las dos últimas columnas de la tabla podemos ver que no se podría llegar a utilizar los mismos valores de resistencia y reactancia a todas las frecuencias puesto que hay una variación muy grande de la resistencia.

3.2.3. Caso de carga mixta con $\phi = 60^\circ$

Se han estudiado dos casos, para ángulos de disparo α de 90° y 135° ; ya que el caso de 180° corresponde al caso de no conducción.

3.2.3.1. Caso de carga mixta con $\phi = 60^\circ$ y $\alpha = 90^\circ$

Se simuló primero el modelo alimentando a tensión senoidal y se obtuvo una onda de intensidad como la representada en la figura.



El desarrollo armónico de la onda de intensidad dio como resultado las componentes que se presentan en la tabla siguiente y que, exceptuando la fundamental (presentada sólo como referencia), corresponderán con los valores I_{Lh} de la fuente de corriente del esquema Norton.

h	módulo (A)	fase ($^\circ$)
1	20.12	110.4
3	3.883	152.6
5	1.808	3.310
7	0.8100	-142.8
9	0.2563	76.37

h	módulo (A)	fase ($^\circ$)
11	0.05983	60.13
13	0.1781	-57.91
15	0.1958	157.3
17	0.1521	8.958
19	0.08519	-144.4

A continuación se fue introduciendo una pequeña perturbación del 1% (respecto a la componente fundamental) para cada uno de los armónicos impares hasta el 19 y con doce ángulos diferentes (de 0 a 330° , variando de 30 en 30). Así se obtuvieron 12 valores de impedancia (módulo y fase) para cada armónico.

Con estos valores se halló un promedio de módulo y ángulo de impedancia para cada armónico y se acotó el margen de variación. También se halló la impedancia descompuesta en parte real (resistencia) y parte imaginaria (reactancia); esta última se dividió por el índice del armónico (reactancia a la componente fundamental). Los resultados obtenidos aparecen en la tabla siguiente.

h	módulo (Ω)		fase ($^\circ$)		R	X/h
3	24.93	$\pm 5.9\%$	70.92	$\pm 3.6^\circ$	8.149	7.853
5	39.81	$\pm 7.0\%$	77.28	$\pm 4.1^\circ$	8.766	7.767
7	54.18	$\pm 1.7\%$	77.19	$\pm 0.9^\circ$	12.01	7.547
9	68.60	$\pm 6.6\%$	75.59	$\pm 3.5^\circ$	17.07	7.382
11	82.00	$\pm 7.9\%$	73.95	$\pm 3.8^\circ$	22.67	7.164
13	93.69	$\pm 3.1\%$	73.72	$\pm 1.9^\circ$	26.26	6.918
15	103.8	$\pm 1.4\%$	74.77	$\pm 1.1^\circ$	27.27	6.677
17	113.2	$\pm 1.8\%$	76.31	$\pm 1.2^\circ$	26.79	6.470
19	122.6	$\pm 0.9\%$	77.80	$\pm 0.5^\circ$	25.91	6.307

En este caso vemos que los valores del módulo de la impedancia a cada armónico varían muy poco entre sí, bastante menos que con la lámpara de descarga y lo mismo sucede con los de la fase. Por ello podemos decir que el modelo es muy apto para la mayoría de aplicaciones. Mirando las dos últimas columnas de la tabla podemos ver que no se podría llegar a utilizar los mismos valores de resistencia y reactancia a todas las frecuencias puesto que hay un aumento importante de la resistencia con la frecuencia.

3.2.3.2. Caso de carga mixta con $\phi = 60^\circ$ y $\alpha = 135^\circ$

Se simuló primero el modelo alimentando a tensión senoidal y se obtuvo una onda de intensidad como la representada en la figura siguiente.



El desarrollo armónico de la onda de intensidad dio como resultado las componentes que se presentan en la tabla siguiente y que, exceptuando la fundamental (presentada sólo como referencia), corresponderán con los valores I_{Lh} de la fuente de corriente del esquema equivalente Norton.

h	módulo (A)	fase (°)
1	4.276	97.30
3	3.048	110.0
5	1.101	121.8
7	0.2309	-51.97
9	0.4223	-46.91

h	módulo (A)	fase (°)
11	0.03644	-174.3
13	0.2106	141.1
15	0.01306	125.5
17	0.1053	-29.89
19	0.02817	-0.8788

A continuación se fue introduciendo una pequeña perturbación del 1% (respecto a la componente fundamental) para cada uno de los armónicos impares hasta el 19 y con doce ángulos diferentes (de 0 a 330°, variando de 30 en 30). Así se obtuvieron 12 valores de impedancia (módulo y fase) para cada armónico. Con estos valores se halló un promedio de módulo y ángulo de impedancia para cada armónico y se acotó el margen de variación. También se halló la impedancia descompuesta en parte real (resistencia) y parte imaginaria (reactancia); esta última se dividió por el índice del armónico. Los resultados obtenidos aparecen en la tabla siguiente.

h	módulo (Ω)		fase (°)		R	X/h
3	40.88	$\pm 25.9\%$	58.69	$\pm 12.9^\circ$	21.24	11.64
5	53.12	$\pm 23.4\%$	72.91	$\pm 14.7^\circ$	18.55	12.07
7	109.1	$\pm 24.9\%$	53.44	$\pm 12.4^\circ$	64.99	12.52
9	95.13	$\pm 2.6\%$	47.42	$\pm 1.4^\circ$	64.37	7.783
11	115.1	$\pm 13.0\%$	33.68	$\pm 7.7^\circ$	95.78	5.803
13	111.9	$\pm 1.9\%$	37.14	$\pm 1.2^\circ$	89.20	5.197
15	102.4	$\pm 4.4\%$	43.98	$\pm 3.1^\circ$	73.69	4.740
17	109.4	$\pm 1.8\%$	51.79	$\pm 0.9^\circ$	67.67	5.057
19	115.3	$\pm 2.3\%$	57.70	$\pm 1.2^\circ$	61.61	5.129

En este caso vemos que los valores del módulo de la impedancia a cada armónico varían poco entre sí, excepto los tres primeros, y lo mismo sucede con los de la fase. Por ello podemos decir que el modelo es apto para la mayoría de aplicaciones. Mirando las dos últimas columnas de la tabla podemos ver que no se podría llegar a utilizar los mismos valores de resistencia y reactancia a todas las frecuencias puesto que hay una variación importante de la resistencia.

3.2.4. Caso de carga inductiva pura ($\phi = 90^\circ$)

Se ha estudiado un único caso, para un ángulo de disparo α de 135° ; ya que el caso de 180° corresponde al caso de no conducción.

Se simuló primero el modelo alimentando a tensión senoidal y se obtuvo una onda de intensidad como la representada en la figura.



El desarrollo armónico de la onda de intensidad dio como resultado las componentes que se presentan en la tabla siguiente y que, exceptuando la fundamental (presentada sólo como referencia), corresponderán con los valores I_{Lh} de la fuente de corriente del esquema equivalente Norton.

h	módulo (A)	fase (°)
1	5.329	90.98
3	3.349	91.35
5	0.7209	84.31
7	0.5587	-86.26
9	0.2501	-114.5

h	módulo (A)	fase (°)
11	0.2799	82.46
13	0.07930	33.48
15	0.1412	-118.4
17	0.01460	-135.0
19	0.07230	53.04

A continuación se fue introduciendo una pequeña perturbación del 1% (respecto a la componente fundamental) para cada uno de los armónicos impares hasta el 19 y con doce ángulos diferentes (de 0 a 330°, variando de 30 en 30). Así se obtuvieron 12 valores de impedancia (módulo y fase) para cada armónico. Con estos valores se halló un promedio de módulo y ángulo de impedancia para cada armónico y se acotó el margen de variación. Los resultados obtenidos aparecen en la tabla siguiente.

h	módulo (Ω)		fase (°)	
3	35.61	$\pm 21.6\%$	77.26	$\pm 12.0^\circ$
5	73.72	$\pm 40.7\%$	106.3	$\pm 20.3^\circ$
7	102.9	$\pm 18.0\%$	69.33	$\pm 9.4^\circ$
9	139.4	$\pm 23.1\%$	37.59	$\pm 12.6^\circ$
11	125.8	$\pm 10.2\%$	47.71	$\pm 5.5^\circ$
13	103.5	$\pm 10.7\%$	43.30	$\pm 5.7^\circ$
15	113.7	$\pm 2.0\%$	53.97	$\pm 1.2^\circ$
17	115.3	$\pm 5.0\%$	60.67	$\pm 2.3^\circ$
19	130.8	$\pm 0.9\%$	65.93	$\pm 0.4^\circ$

En este caso vemos que los valores del módulo de la impedancia a cada armónico varían bastante entre sí y lo mismo sucede con los de la fase. Por ello podemos decir que el modelo no es muy apto. Además, dado que aparecen ángulos mayores que 90° , la resistencia será negativa para algunos armónicos.

4. Fuente de alimentación

Como ya se ha comentado anteriormente, se considerará que el modelo no es válido cuando al inyectar un armónico de tensión se produzcan variaciones importantes de los demás armónicos de corriente de la carga. Esto es precisamente lo que ocurrió en este caso.

Se ensayó el caso de una fuente de alimentación (rectificador con condensador de filtrado) que alimenta una carga resistiva. El modelo utilizado para la carga es equivalente a la propia carga pues se han empleado una resistencia (de 77Ω) y un condensador (de $538 \mu\text{F}$). Todos los casos se han hecho alimentando a 220 V con una reactancia de línea de 0.2 mH . El modelo de los diodos es el que presenta Mohan [4].

Alimentando la onda con tensión senoidal se obtuvieron las componentes armónicas y después se repitió la prueba varias veces inyectando una pequeña perturbación del armónico de orden 11 con diferentes ángulos. En la tabla siguiente se presentan los resultados para los casos de onda senoidal y perturbación a 0° . Obsérvese la importante variación (en la segunda cifra significativa, cuando en los casos anteriores lo hacía en la cuarta) que experimentan los módulos de todas las componentes al introducir la perturbación y que no hay una diferencia apreciable entre la variación que experimenta la que corresponde al armónico modificado (11) y las demás.

h	módulo (A)		módulo escalado $V_1 + V_{11}$	fase ($^\circ$)	
	V_1	$V_1 + V_{11}$		V_1	$V_1 + V_{11}$
1	5.431	5.480	5.431	-166.1	-166.6
3	5.226	5.303	5.256	41.34	40.00
5	4.835	4.967	4.923	-111.2	-113.4
7	4.292	4.494	4.453	96.08	92.96
9	3.642	3.918	3.883	-56.91	105.7
11	2.937	3.280	3.250	149.6	311.4
13	2.232	2.621	2.598	-4.506	156.6
15	1.573	1.984	1.966	-159.9	0.7500
17	1.002	1.404	1.391	42.18	203.3
19	0.5515	0.9108	0.9026	-121.9	42.52

Dado que también existe una importante variación en la componente fundamental, se decide hallar los valores correspondientes al caso perturbado escalando para que la fundamental coincida con la del caso no perturbado. Este dato aparece también en la tabla y se ve que la variación de todas las componentes también es importante.

A la vista de los resultados podemos deducir que el modelo de esquema equivalente Norton a partir del método de la pequeña perturbación no es adecuado para modelizar las fuentes de alimentación.

5. Conclusiones respecto al método de linealización

Se han analizado hasta el momento tres tipos de cargas diferentes; de una de ellas (regulador de tensión) se han estudiado nueve casos. Para cada uno de los casos estudiados, se ha observado la viabilidad de representar la carga con una fuente de corriente y una impedancia.

Para los casos en los que esto se ha considerado posible, se ha estudiado la posibilidad de que la impedancia estuviese constituida por una resistencia y una inductancia cuyos valores fueran constantes a todas las frecuencias.

Para poder considerar apto el modelo, debe ser posible aplicarlo a todas las cargas estudiadas admitiéndose que en algún caso haya un error importante. Los resultados obtenidos se han clasificado en la tabla siguiente, en los que las palabras bueno, regular y malo indican como se ha considerado el modelo en función de los márgenes de error hallados.

Carga	Caso	Impedancia	R y X/h
Fluorescente		Bueno	Bueno
Regulador	0 - 45	Bueno	Malo
	0 - 90	Bueno	Malo
	0 - 135	Regular	Malo
	30 - 45	Bueno	Regular
	30 - 90	Bueno	Malo
	30 - 135	Bueno	Malo
	60 - 90	Bueno	Malo
	60 - 135	Bueno	Malo
	90 - 135	Regular	Malo (R<0)
Fuente alimentación		Malo	-

Analizando todos los datos obtenidos hasta el momento (y, especialmente, a la vista de los resultados obtenidos con la fuente de alimentación) se decide abandonar totalmente este tipo de modelización.

