

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

DEPARTAMENT D'ENGINYERIA ELÈCTRICA

TESIS DOCTORAL

**Estudio y modelización en régimen permanente de cargas
no lineales para el análisis armónico de redes eléctricas**

Autor: Oriol Boix Aragonès

Director: Joaquín Pedra Durán

Barcelona, 1996

Deseo expresar mi agradecimiento al doctor Joaquín Pedra por el apoyo demostrado durante la realización de esta tesis y por sus ideas que me han permitido salir en más de una ocasión de un callejón sin salida.

También quiero dar las gracias, por las ideas y sugerencias aportadas, a mis compañeros Luís Sainz, Antoni Sudrià, Miquel Salichs, Joan Rull, Joan Bergas, Francesc Suelves y Ricard Bosch.

Deseo también agradecer la ayuda aportada por el proyecto PIE en el que se ha tenido ocasión de implementar y probar la mayoría de las aportaciones de esta tesis.

Finalmente quiero pedir disculpas a Sandra y a Maria por las horas robadas, sin las cuales no habría finalizado el presente trabajo.

Índice

Presentación	13
Parte I: Antecedentes y aplicaciones	15
1. Introducción	17
1. Justificación	17
2. Principales cargas no lineales	18
3. Objetivos del estudio realizado	18
2. Métodos de estudio de armónicos	21
1. Métodos de análisis	22
2. Modelización de cargas	24
3. Algoritmos de resolución	26
3.1. Método de Newton	27
3.2. Métodos de Newton modificados	29
3.3. Método de Davidenko	29
3.4. Método de h-Newton	31
3. Método de linealización	35
1. Obtención de los parámetros del modelo	36
1.1. Fuente de corriente	36
1.2. Impedancia	36
1.3. Metodología utilizada en los estudios realizados	37
2. Alumbrado de descarga	38
2.1. Obtención del modelo	38
2.2. Resultados	39
3. Regulador de tensión	41
3.1. Obtención del modelo	41
3.2. Resultados	42
3.2.1. Caso de carga resistiva ($\phi = 0^\circ$)	42
3.2.1.1. Caso de carga resistiva ($\phi = 0^\circ$) con $\alpha = 45^\circ$	42
3.2.1.2. Caso de carga resistiva ($\phi = 0^\circ$) con $\alpha = 90^\circ$	43
3.2.1.3. Caso de carga resistiva ($\phi = 0^\circ$) con $\alpha = 135^\circ$	44
3.2.2. Caso de carga mixta con $\phi = 30^\circ$	46
3.2.2.1. Caso de carga mixta con $\phi = 30^\circ$ y $\alpha = 45^\circ$	46
3.2.2.2. Caso de carga mixta con $\phi = 30^\circ$ y $\alpha = 90^\circ$	47
3.2.2.3. Caso de carga mixta con $\phi = 30^\circ$ y $\alpha = 135^\circ$	48
3.2.3. Caso de carga mixta con $\phi = 60^\circ$	50
3.2.3.1. Caso de carga mixta con $\phi = 60^\circ$ y $\alpha = 90^\circ$	50
3.2.3.2. Caso de carga mixta con $\phi = 60^\circ$ y $\alpha = 135^\circ$	51

3.2.4. Caso de carga inductiva pura ($\phi = 90^\circ$)	52
4. Fuente de alimentación	54
5. Conclusiones respecto al método de linealización	55
Parte II: Modelización por circuitos lineales a tramos	57
4. Descripción del método	59
1. Introducción	59
2. Caso lineal	59
3. Caso no lineal	60
3.1. Determinación de los tramos	60
3.2. Ecuaciones de los tramos y solución de las mismas	60
3.3. Condiciones de cambio	61
3.4. Condiciones de continuidad y periodicidad	61
3.5. Inicializaciones	61
3.6. Formas de onda y descomposición armónica	62
3.7. Derivación	62
4. Aplicaciones	63
5. Lámparas de descarga	65
1. Modelo físico	65
2. Ecuaciones de los tramos	67
3. Solución de las ecuaciones	67
3.1. Solución de la homogénea	67
3.2. Solución particular	68
3.3. Solución completa	68
4. Condiciones de cambio	69
4.1. Sistema a resolver	70
5. Condiciones de continuidad y periodicidad	70
5.1. Determinación de constantes	71
6. Elección del valor inicial	71
7. Descomposición armónica	72
8. Simplificaciones por simetría	75
8.1. Solución completa de las ecuaciones	76
8.2. Sistema a resolver	77
8.3. Determinación de constantes	77
8.4. Elección del valor inicial	77
8.5. Descomposición armónica	77
6. Lámparas de descarga con salto de tensión	81
1. Modelo físico	81
2. Ecuaciones de los tramos	82

3. Solución de las ecuaciones	83
3.1. Solución de la homogénea	83
3.2. Solución particular	83
3.3. Solución completa	84
4. Condiciones de cambio	85
4.1. Sistema a resolver	86
5. Condiciones de continuidad y periodicidad	86
5.1. Determinación de constantes	87
6. Elección del valor inicial	88
7. Descomposición armónica	88
8. Simplificaciones por simetría	92
8.1. Solución completa de las ecuaciones	93
8.2. Sistema a resolver	94
8.3. Determinación de constantes	94
8.4. Elección del valor inicial	95
8.5. Descomposición armónica	95
7. Fluorescente con condensador en serie	99
1. Modelo físico	99
2. Ecuaciones de los tramos	101
3. Solución de las ecuaciones	101
3.1. Solución de la homogénea	101
3.1.1. Análisis del discriminante	102
3.1.2. Solución de la homogénea para el caso oscilante	104
3.2. Solución particular	104
3.3. Solución completa	105
4. Condiciones de cambio	107
4.1. Sistema a resolver	107
5. Condiciones de continuidad y periodicidad	107
5.1. Determinación de constantes	108
6. Elección del valor inicial	110
7. Descomposición armónica	110
8. Simplificaciones por simetría	114
8.1. Solución completa de las ecuaciones	115
8.2. Sistema a resolver	116
8.3. Determinación de constantes	116
8.4. Elección del valor inicial	117
8.5. Descomposición armónica	117
8. Fluorescente con reactancia saturable	121
1. Modelo físico	121
2. Ecuaciones de los tramos	122

3. Solución de las ecuaciones	123
3.1. Solución de la homogénea	123
3.2. Solución particular	123
3.3. Solución completa	124
4. Condiciones de cambio	125
4.1. Sistema a resolver	125
5. Condiciones de continuidad y periodicidad	125
5.1. Determinación de constantes	126
6. Elección del valor inicial	127
7. Descomposición armónica	127
8. Simplificaciones por simetría	129
8.1. Solución completa de las ecuaciones	130
8.2. Sistema a resolver	131
8.3. Determinación de constantes	131
8.4. Elección del valor inicial	132
8.5. Descomposición armónica	132
9. Fluorescente con reactancia saturable (v.2)	135
1. Modelo físico	135
2. Ecuaciones de los tramos	137
3. Solución de las ecuaciones	137
3.1. Solución de la homogénea	137
3.2. Solución particular	138
3.3. Solución completa	138
4. Condiciones de cambio	139
4.1. Sistema a resolver	139
5. Condiciones de continuidad y periodicidad	140
5.1. Determinación de constantes	141
6. Elección del valor inicial	141
7. Descomposición armónica	142
8. Simplificaciones por simetría	144
8.1. Solución completa de las ecuaciones	145
8.2. Sistema a resolver	146
8.3. Determinación de constantes	146
8.4. Elección del valor inicial	147
8.5. Descomposición armónica	147
10. Fuente de alimentación	149
1. Modelo físico	149
2. Ecuaciones de los tramos	150
2.1. Tramos 1 y 3	151
2.2. Tramo 2	151
2.3. Tramo 4	152

3. Solución de las ecuaciones	152
3.1. Tramos 1 y 3	152
3.2. Tramos 2 y 4	153
3.2.1. Solución de la homogénea	153
3.2.1.1. Caso aperiódico	154
3.2.1.2. Caso oscilante	155
3.2.2. Solución particular	156
3.2.3. Solución completa	156
3.2.3.1. Caso aperiódico ($D > 0$)	157
3.2.3.2. Caso oscilante ($D < 0$)	158
4. Condiciones de cambio	159
4.1. Sistema a resolver	159
4.1.1. Caso aperiódico	159
4.1.2. Caso oscilante	160
5. Condiciones de continuidad y periodicidad	160
5.1. Determinación de constantes	161
5.1.1. Caso aperiódico	161
5.1.2. Caso oscilante	163
6. Elección del valor inicial	164
7. Descomposición armónica	165
7.1. Caso aperiódico ($D > 0$)	166
7.2. Caso oscilante ($D < 0$)	168
8. Simplificaciones por simetría	172
8.1. Solución completa de las ecuaciones	172
8.1.1. Tramo 1	172
8.1.2. Tramo 2	173
8.1.2.1. Caso aperiódico ($D > 0$)	173
8.1.2.2. Caso oscilante ($D < 0$)	174
8.2. Sistema a resolver	174
8.2.1. Caso aperiódico	175
8.2.2. Caso oscilante	175
8.3. Determinación de constantes	176
8.3.1. Caso aperiódico	176
8.3.2. Caso oscilante	176
8.4. Elección del valor inicial	177
8.5. Descomposición armónica	177
8.5.1. Caso aperiódico ($D > 0$)	177
8.5.2. Caso oscilante ($D < 0$)	179
11. Cargador de baterías	183
1. Modelo físico	183

2. Ecuaciones de los tramos	184
2.1. Tramos 1 y 3	184
2.2. Tramo 2	185
2.3. Tramo 4	185
3. Solución de las ecuaciones	186
3.1. Solución de la homogénea	186
3.2. Solución particular	187
3.3. Solución completa	187
4. Condiciones de cambio	188
4.1. Sistema a resolver	189
5. Condiciones de continuidad y periodicidad	189
5.1. Determinación de constantes	190
6. Elección del valor inicial	190
7. Descomposición armónica	191
8. Simplificaciones por simetría	194
8.1. Solución completa de las ecuaciones	194
8.2. Sistema a resolver	195
8.3. Determinación de constantes	195
8.4. Elección del valor inicial	196
8.5. Descomposición armónica	196
12. Fuente de alimentación trifásica	199
1. Modelo físico	199
2. Ecuaciones de los tramos	200
2.1. Tramos pares	201
2.2. Tramos impares	201
3. Solución de las ecuaciones	202
3.1. Tramos pares	202
3.2. Tramos impares	203
3.2.1. Solución de la homogénea	203
3.2.1.1. Caso aperiódico	204
3.2.1.2. Caso oscilante	205
3.2.2. Solución particular	206
3.2.3. Solución completa	206
3.2.3.1. Caso aperiódico ($D > 0$)	207
3.2.3.2. Caso oscilante ($D < 0$)	207
4. Condiciones de cambio	208
4.1. Sistema a resolver	208
4.1.1. Caso aperiódico	209
4.1.2. Caso oscilante	209

5. Condiciones de continuidad y periodicidad	210
5.1. Determinación de constantes	211
5.1.1. Caso aperiódico	211
5.1.2. Caso oscilante	212
6. Elección del valor inicial	213
7. Descomposición armónica	214
7.1. Caso aperiódico ($D > 0$)	215
7.2. Caso oscilante ($D < 0$)	216
7.3. Determinación de las componentes	218
8. Simplificaciones por simetría	218
8.1. Solución completa de las ecuaciones	219
8.1.1. Tramo 1	220
8.1.1.1. Caso aperiódico ($D > 0$)	221
8.1.1.2. Caso oscilante ($D < 0$)	222
8.1.2. Tramo 2	222
8.2. Sistema a resolver	222
8.2.1. Caso aperiódico	222
8.2.2. Caso oscilante	223
8.3. Determinación de constantes	223
8.3.1. Caso aperiódico	223
8.3.2. Caso oscilante	224
8.4. Elección del valor inicial	224
8.5. Descomposición armónica	225
8.5.1. Caso aperiódico ($D > 0$)	225
8.5.2. Caso oscilante ($D < 0$)	226
8.5.3. Desarrollo de las ondas completas	227
Parte III: Resultados y conclusiones	231
13. Resultados obtenidos a tensión conocida	233
1. Introducción	233
2. Variabilidad de los armónicos introducidos por un fluorescente	233
3. Influencia del salto de tensión en la forma de onda	237
4. Estudio del fluorescente con condensador en serie	238
5. Estudio de la convergencia de la fuente de alimentación	239
6. Estudio de la saturación en los balastos	244
7. Variación de la onda de corriente de un cargador de baterías	246
14. Resultados obtenidos con flujo de cargas	249
1. Introducción	249
2. Influencia de la interacción armónica	249
3. Ensayo de la fuente de alimentación trifásica	251
4. Variación de parámetros en la fuente de alimentación	252

5. Resonancias en instalaciones de lámparas fluorescentes	253
6. Compensación de armónicos entre sistemas de alumbrado	254
15. Conclusiones	257
1. Aportaciones de la tesis	257
2. Futuros temas de investigación	258
Bibliografía	261
1. Libros	261
2. Artículos de revistas	261
3. Ponencias en congresos	263
4. Otras publicaciones	264
Notaciones y símbolos	267
1. Magnitudes temporales	267
2. Valores eficaces, valores medios y módulos	268
3. Constantes, índices y parámetros	269
4. Funciones	275
5. Vectores y matrices	275
6. Funciones matemáticas	276

Presentación

El estudio del comportamiento de la mayoría de las cargas no lineales frente a excitaciones senoidales ya ha sido realizado con anterioridad por numerosos autores. El objetivo de este trabajo es presentar modelos del comportamiento de varias cargas no lineales frente a excitaciones periódicas no senoidales para utilizarlas en análisis de armónicos, especialmente dentro de un flujo armónico de cargas.

Se trata pues de obtener, para cada una de las cargas no lineales estudiadas, la función temporal $i(t)$ de la intensidad (o una buena aproximación de la misma) que absorbe la carga no lineal cuando se la alimenta con una tensión $v(t)$ periódica no senoidal. En el caso del flujo armónico de cargas esto es equivalente a obtener las componentes I_h de la intensidad que absorbe la carga no lineal cuando se la alimenta con una tensión cuyas componentes V_h se conocen para un estado de funcionamiento dado.

La presente tesis se ha estructurado en tres partes cuyos contenidos se comentan a continuación.

En la primera parte se analizan los antecedentes que han precedido a este trabajo, especialmente algunos autores que ya han utilizado modelos de cargas no lineales con una sistemática parecida. Dado que el flujo armónico de cargas requiere la resolución de un elevado número de ecuaciones no lineales se han estudiado los principales métodos para resolver este tipo de sistemas de ecuaciones.

El método de Newton es de evolución rápida pero sólo garantiza la convergencia con condiciones muy restrictivas y puede llevar a soluciones falsas; los métodos de Newton modificados se basan en reducir los "saltos" mediante un factor amortiguante pero tampoco garantizan que se alcance la solución. El método de Davidenko es de evolución lenta pero, si se parte de una aproximación inicial adecuada, lleva a la solución. Como combinación de ambos métodos puede utilizarse el método de h-Newton que, si se parte también de una aproximación inicial adecuada, lleva a la solución con un compromiso entre rapidez y seguridad. Tanto el método de Davidenko como el de h-Newton requieren una aproximación inicial que corresponda a una situación físicamente real. En los elementos del sistema eléctrico y las cargas lineales esta aproximación es fácil de obtener partiendo de las condiciones de reposo del sistema y, de esta forma, el método de Davidenko equivale a una lenta puesta en marcha del mismo. Con las cargas no lineales no siempre es tan fácil la obtención de una buena inicialización. En el presente trabajo, después de numerosas pruebas ensayando metodologías diferentes, se han tenido que tomar criterios diferentes para las distintas cargas ya que no siempre era aplicable el mismo método.

Se han intentado aplicar dos tipos de modelos; el primero (método de linealización alrededor del punto de trabajo) consistente en encontrar una relación lineal de dependencia de cada armónico de corriente respecto al correspondiente armónico de tensión. Este método no dio, como se verá más adelante, un resultado suficientemente aceptable y, por tanto, se desestimó.

El segundo método aplicado fue el de modelización por circuitos lineales a tramos que consiste en descomponer el funcionamiento del circuito correspondiente a la carga y, por tanto, la onda de corriente, en tramos de tal forma que en cada tramo el circuito sea lineal utilizando, si es necesario, simplificaciones en el funcionamiento del mismo. Para cada tramo se obtienen unas ecuaciones de características similares a las de un régimen transitorio pero que, dentro del tramo en que están definidas, describen el régimen permanente de la carga no lineal.

La segunda parte contiene los modelos de cada una de las ocho cargas estudiadas determinados mediante modelización por circuitos lineales a tramos. Los modelos desarrollados son:

- Lámpara de descarga
- Lámpara de descarga con salto de tensión
- Fluorescente con condensador en serie
- Fluorescente con reactancia saturable (dos modelos)
- Fuente de alimentación
- Cargador de baterías
- Fuente de alimentación trifásica

Para cada carga se hace primero la descripción de las hipótesis o simplificaciones realizadas y luego se presentan las ecuaciones de la misma, las expresiones para la determinación de las variables y constantes, la forma de obtener la primera aproximación necesaria para el método numérico y, finalmente, la descomposición armónica de la intensidad.

Para cada tramo deben definirse las condiciones iniciales o condiciones de continuidad (condición de periodicidad en el caso del primer tramo) que lo relacionan con el anterior y a partir de las cuales determinamos el valor de las constantes que aparecen en las expresiones matemáticas obtenidas. También definimos las condiciones finales o condiciones de cambio que nos permiten determinar el instante en que termina un tramo y comienza el siguiente.

Además, teniendo en cuenta que muchas veces se realiza el estudio por el método del flujo de cargas suponiendo simetría de semionda (es decir, sin tener en cuenta los armónicos pares), se ha realizado además todo el desarrollo del modelo de cada carga monofásica para el caso de simetría de semionda. Siguiendo un razonamiento parecido, se ha estudiado también el modelo de la única carga trifásica tratada considerando simetría trifásica.

En la tercera parte se presenta y comenta una representación de los resultados obtenidos con los modelos; así se han presentado un conjunto de resultados obtenidos por utilización de los modelos de las cargas alimentadas a tensión conocida. Con estos cálculos se ha querido probar la bondad y robustez de los modelos al mismo tiempo que mostrar una parte de las posibles aplicaciones de los modelos obtenidos. También se han presentado algunos de los resultados obtenidos en varios casos utilizando un programa de flujo de cargas. Finaliza la tercera parte con la enumeración de las aportaciones de la tesis y de algunos de los posibles futuros temas de investigación a desarrollar.

Al final se incluyen la bibliografía, clasificada por tipo de publicaciones y ordenada alfabéticamente, y una lista con las notaciones y símbolos utilizados.

Antecedentes y aplicaciones

P A R T E I

1. Introducción

1. Justificación

Los estudios de electrotecnia se han realizado principalmente sobre cargas lineales y no es de extrañar pues si bien existían causas de no linealidad (por ejemplo la saturación de transformadores y motores), la suposición de carga lineal no cambiaba sustancialmente los resultados con respecto a los valores medidos experimentalmente.

La aparición de cargas no lineales, principalmente de tipo electrónico, en las instalaciones eléctricas [2] va en aumento y cada vez es más difícil encontrar cargas totalmente lineales. En la industria cada vez más motores llevan equipos de alimentación electrónica ya sea para variar la velocidad, ahorrar energía o mejorar las prestaciones. Dentro de las fábricas y almacenes la automatización ha hecho desaparecer los movimientos manuales y los ha sustituido por elementos de transporte con motores dotados de alimentación electrónica o en otros casos (carretillas, elevadores de palets, etc.) alimentados con baterías que luego hay que recargar. Además los automóviles eléctricos están ya saliendo al mercado aunque ya hace años que se estudian sus efectos en la red eléctrica [17][18][19].

En los sectores doméstico y servicios la mayoría de las lámparas de incandescencia son regulables y ha aparecido recientemente una campaña de las compañías de suministro eléctrico para sustituir las lámparas de incandescencia no reguladas por lámparas ahorradoras de energía (que en realidad son fluorescentes compactos) y por lámparas electrónicas.

Hay una gran proliferación de equipos electrónicos tanto para ocio (televisores, videoreproductores, equipos de sonido, etc), como herramientas de trabajo (ordenadores, fotocopiadoras, fax, etc.). Cada vez hay más electrodomésticos que llevan equipos de regulación electrónica o que basan su funcionamiento en circuitos electrónicos (cocinas de inducción, aparatos de aire acondicionado, lavadoras, microondas, etc.).

Flory y otros [9] pronosticaron en 1990 que en el año 2010 entre el 50 y el 60% de la potencia eléctrica consumida lo sería por cargas electrónicas. Mitchell [35] fijó, un año después, la cifra en el 50% para el año 2000. Hay que pensar que una parte importante del 40 a 50% restante serán cargas no lineales de otros tipos.

Los problemas causados por el aumento de las cargas no lineales y, por tanto, de los armónicos, no se ha hecho esperar [10][11][20][21][22][30][33][34][44].

La mayor parte de los estudios de armónicos los realizan las compañías suministradoras para analizar la influencia de los grandes consumidores no lineales sobre las redes de transporte y distribución. Debemos tener en cuenta que en los próximos años, como ya está empezando a ocurrir, será necesario también el estudio de las instalaciones privadas para analizar cómo las cargas no lineales conectadas en una parte de la instalación afectan a otras partes de la misma.

2. Principales cargas no lineales

Las cargas no lineales pueden clasificarse, básicamente, en tres categorías [32]; a continuación se presenta una lista con las más importantes. La lista no pretende ser exhaustiva. Cabe destacar que, además, las cargas señaladas con el signo (***) no pueden ser tratadas en régimen permanente lo que complica su estudio.

A- Basadas en arcos y descargas eléctricas

A1- Lámparas de descarga (fluorescentes, ahorradoras de energía, neón, vapores de sodio y mercurio, etc.)

A2- Soldadores de arco (***)

A3- Hornos de arco (***)

B- Basadas en inductancias saturables

B1- Transformadores

B2- Motores

B3- Reactancias para limitar los arcos de descarga

C- Electrónicas

C1- Rectificadores para cargas resistivas e inductivas

C2- Fuentes de alimentación (aparatos electrónicos domésticos y de oficina, variadores de frecuencia, sistemas de alimentación ininterrumpida, lámparas electrónicas, etc.)

C3- Reguladores y recortadores (variación de velocidad de pequeños motores, ahorradores de energía para motores, reguladores de luz, compensadores estáticos de energía reactiva (SVC, TCR), reguladores para dispositivos de caldeo, etc.)

C4- Cargadores de baterías

C5- Cicloconvertidores

C6- Convertidores continua-alterna sobre la red (energía solar, accionamientos con recuperación de energía, cascadas hiposíncronas, transmisión de energía en corriente continua, etc.)

3. Objetivos del estudio realizado

La mayoría de los estudios referentes a cargas no lineales realizados hasta la fecha por otros autores se han basado en la suposición de alimentación senoidal o en otras simplificaciones restrictivas. En la bibliografía consultada durante la preparación de este trabajo se hallaron únicamente dos modelizaciones de cargas no lineales en régimen permanente que tuvieran en cuenta los armónicos de la tensión de alimentación. Así en la referencia [39] se presenta el rectificador trifásico con filtro inductivo considerando simetría del sistema trifásico y en la referencia [15] se presenta el rectificador monofásico con filtro capacitivo (fuente de alimentación) analizado por el método de la transformada de Laplace y considerando simetría de semionda.

El objetivo de la tesis es encontrar modelos del comportamiento de cargas no lineales frente a tensiones distorsionadas, principalmente para aplicarlos en programas de flujo armónico de cargas.

Al desarrollar los modelos se han querido tratar en forma general (con tensiones de alimentación asimétricas y modelización trifásica) pero se ha prescindido de la componente continua ya que ésta es una simplificación normalmente válida y de uso generalizado.

Muchos programas de flujo de cargas trabajan considerando las cargas trifásicas a partir de sus esquemas equivalentes reducidos a monofásico y considerando simetría de semionda ya que de esta forma se reduce el número de variables a tratar y, consecuentemente, el tiempo de ejecución. Por este motivo se ha presentado una segunda versión de todos los modelos aplicando las simplificaciones citadas para poder utilizar una u otra modelización según convenga.

Al plantearse la tesis, se inició el trabajo prescindiendo del estudio de los rectificadores para cargas inductivas pues, aunque en versión simplificada, ya habían sido tratados con anterioridad [23][24][39][41]. Así pues se decidió estudiar las lámparas de descarga y las fuentes de alimentación ya que estas cargas eran las que más interesaban de cara a un programa de flujo de cargas que está siendo desarrollado por el equipo de investigación.

Con ánimo de encontrar modelos sencillos de las cargas no lineales, para no complicar los programas de flujo de cargas, se estudiaron primero modelos del tipo esquema equivalente Norton (método de linealización alrededor del punto de trabajo). Estos modelos, en unas primeras pruebas, funcionaron bastante bien para lámparas fluorescentes. Entonces se decidió probar con reguladores de tensión y el funcionamiento fue simplemente aceptable. Finalmente, se probó el método con fuentes de alimentación; en este caso no dio buenos resultados. A la vista de los resultados, que se presentan más adelante, se decidió prescindir del esquema equivalente Norton y utilizar el método de modelización por circuitos lineales a tramos.

Con este nuevo método se empezó primero por el alumbrado de descarga. Una vez desarrollado el modelo se vio que no todas las lámparas de descarga tenían la misma forma de onda de tensión de arco sino que algunas, especialmente las de vapor de sodio y varios modelos de lámpara fluorescente, presentaban un pico apreciable en el inicio de la tensión de arco; a partir de aquí se desarrolló un segundo modelo para estos casos. También se tuvo en cuenta la posibilidad de fluorescentes gemelos, desarrollando un modelo del fluorescente con condensador en serie.

A partir de registros de intensidad, presentes en la bibliografía [8][36] y medidos en el laboratorio, se observó que a menudo la intensidad no tenía la forma que podía obtenerse con los modelos estudiados e, incluso, podía llegar a ser triangular. Entonces se dedujo que esto se debía a la saturación de la reactancia realizándose primero un modelo sencillo basado en descomponer la curva de saturación en dos rectas [7] y luego otro en que se hizo la descomposición mediante tres rectas.

A continuación se empezó a estudiar la fuente de alimentación y luego, como evolución lógica de la misma, el cargador de baterías. Finalmente se estudió la fuente de alimentación trifásica pues es de uso corriente en los variadores de frecuencia.

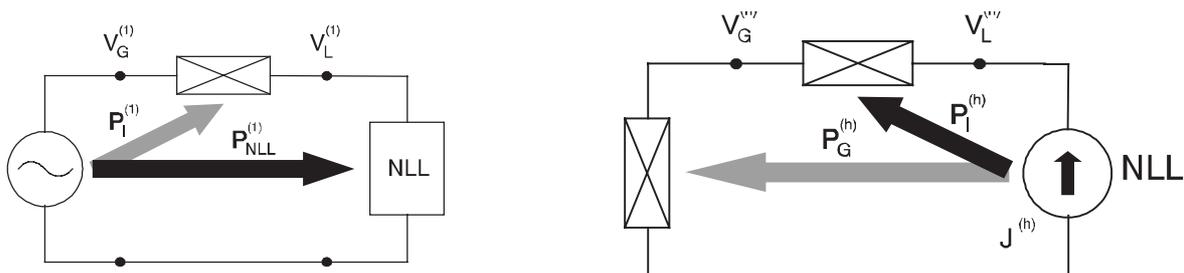
Se han estudiado sólo algunas de las posibles cargas y, probablemente, no se trata de las más importantes puesto que su potencia unitaria es pequeña; pero no debemos dejar de considerar que se trata de cargas que tienden a agruparse en grandes cantidades (alumbrado de edificios y vías públicas, salas de ordenadores y edificios de oficinas, etc.) por tanto su importancia como conjunto no es pequeña.

2. Métodos de estudio de armónicos

Los métodos de análisis armónico de redes eléctricas sirven para determinar como afecta la presencia de cargas no lineales a los valores de las magnitudes del sistema (tensiones, corrientes, potencias, etc.). La figura siguiente, que representa un circuito muy simple, sirve como base para analizar la interacción que se produce entre las distintas magnitudes y componentes.



El circuito está formado por un generador, una línea y una carga no lineal. Llamamos v_G a la tensión en el nudo de generación y v_L a la tensión del nudo de carga. A frecuencia fundamental (frecuencia del sistema impuesta por el generador) el sistema se comporta como en la figura siguiente a la izquierda, mientras que a frecuencias armónicas (valores de frecuencia múltiplos enteros de la fundamental) el sistema se puede representar como el circuito de la derecha en el que la carga no lineal se comporta como una fuente de corriente.



A frecuencia fundamental, la potencia activa generada se absorbe principalmente en la carga no lineal ($P_{NLL}^{(1)}$) y una pequeña parte se consume en la línea ($P_I^{(1)}$). La tensión fundamental existente en bornes del generador ($V_G^{(1)}$) normalmente es superior a la existente en la carga ($V_L^{(1)}$) ya que se produce una caída de tensión en la línea.

Una parte de la potencia absorbida por la carga no lineal ($P_{NLL}^{(1)}$) se convierte en potencia útil ($P_u^{(1)}$) y en pérdidas de potencia activa en la misma ($P_p^{(1)}$), mientras que el resto ($P_H^{(1)}$) se convierte en corrientes de frecuencias armónicas que son inyectadas por la carga no lineal en la red.

$$P_{NLL}^{(1)} = P_u^{(1)} + P_p^{(1)} + P_H^{(1)}$$

A cada una de las frecuencias armónicas, se puede considerar que la carga no lineal se comporta como una fuente de corriente de valor $J^{(h)}$ cuyo valor depende de la tensión en sus propios bornes; mientras que el generador (que puede suponerse que no inyecta armónicos en la red) aparece sólo como su impedancia interna. La intensidad armónica inyectada por la carga no lineal provoca caídas de tensión en la línea y en el generador.

La tensión en cada uno de los nudos estará compuesta por la tensión fundamental y las tensiones correspondientes a cada una de las frecuencias armónicas; por tanto ambas tensiones (la del generador y la de la carga) estarán distorsionadas. Las corrientes inyectadas dan lugar también a pérdidas de potencia en la línea ($P_l^{(h)}$) y en el generador ($P_G^{(h)}$).

Debe tenerse en cuenta, además, que las corrientes armónicas ($J^{(h)}$) inyectadas por la carga no lineal dependen del valor y de la forma de onda de la tensión en bornes de dicha carga; esta dependencia se conoce con el nombre de interacción armónica.

En el estudio de redes eléctricas con armónicos se pueden distinguir las siguientes áreas de investigación:

- Métodos de análisis (formulación del problema); es decir, la forma en que se tienen en cuenta los datos del problema. Por ejemplo, el conocimiento de las potencias activa y reactiva consumidas dará lugar a un flujo de cargas mientras que si se conocen las impedancias de las cargas se utilizará un método de penetración armónica.
- Modelización de cargas; o sea, el método utilizado para obtener, para cada carga (lineal o no), la relación $I_h = f(V_j)$ con $j=1..h_{m\acute{a}x}$ entre la intensidad absorbida por la carga y la tensión en sus bornes.
- Algoritmos de resolución del sistema de ecuaciones no lineal que se tiene una vez planteado el problema

En los apartados siguientes se analizarán cada una de estas áreas. Los trabajos de investigación en el campo de redes eléctricas con armónicos se centran normalmente en una de estas tres partes y se basan habitualmente en la mejora de uno de los métodos existentes o en proponer uno nuevo.

1. Métodos de análisis

A un nivel general los métodos de análisis en presencia de armónicos pueden clasificarse según si se conocen o no las impedancias de las cargas en tres tipos:

- Impedancias conocidas de antemano; se utiliza el método de penetración armónica.
- Las impedancias de las cargas son, de entrada, desconocidas pero se determinan después de resolver un flujo de cargas considerando sólo las potencias correspondientes a la frecuencia fundamental; un ejemplo sería el método del análisis armónico iterativo.
- Las impedancias son desconocidas durante todo el proceso de cálculo; en este caso se utiliza el flujo armónico de cargas.

Los métodos utilizados serán con interacción armónica cuando se tenga en cuenta los efectos de la distorsión de tensión sobre la forma de onda de la corriente de las cargas no lineales.

La primera metodología (método de penetración de armónicos) consiste en considerar constantes las intensidades armónicas \underline{I}_h inyectadas por las cargas no lineales y, conociendo la modelización armónica de los elementos lineales de la red (líneas, transformadores, cargas, etc.), determinar las tensiones en todos los nudos de la misma mediante la resolución del sistema

$$\left[\underline{I}_h \right]_{bus} = \left[\underline{Y}_h \right]_{bus} \cdot \left[\underline{V}_h \right]_{bus} \quad \underline{I}_h = \text{constante}$$

para cada armónico h (incluyendo el fundamental). Este método puede ser bastante inexacto pues no tiene en cuenta la interacción armónica.

El método del análisis armónico iterativo (IHA) empieza conociendo las impedancias armónicas y suponiendo unos valores \underline{V}_j iniciales se obtienen las intensidades armónicas \underline{I}_h inyectadas por las cargas no lineales

$$\underline{I}_h = f(\underline{V}_j) \quad j=1..h_{m\acute{a}x}$$

con las que se resuelve la expresión

$$\left[\underline{I}_h \right]_{bus} = \left[\underline{Y}_h \right]_{bus} \cdot \left[\underline{V}_h \right]_{bus}$$

para obtener las tensiones en los nudos de la red y luego, a partir de ellas, determinar los nuevos valores de las intensidades armónicas \underline{I}_h inyectadas por las cargas no lineales. Con los valores hallados se recalculan las tensiones de los nudos, y así sucesivamente hasta acotar las soluciones dentro del margen de error deseado.

La obtención de las relaciones

$$\underline{I}_h = f(\underline{V}_j) \quad j=1..h_{m\acute{a}x}$$

para cada carga (en cada iteración) suele realizarse resolviendo (ver [41]) el transitorio de conexión de la carga (con la tensión de alimentación correspondiente) hasta que pueda considerarse alcanzado el régimen permanente. Este método, como puede suponerse, es de ejecución muy lenta ya que la determinación de los transitorios requiere un elevado tiempo de cálculo.

El método del flujo armónico de cargas [23][24][29][40][41] aparece como una ampliación del flujo de cargas convencional en el que, además de las ecuaciones de balance de potencias en la red, aparecen las ecuaciones del balance de corrientes y las expresiones de las cargas no lineales (que se utilizan para determinar las incógnitas internas de las mismas). El planteo puede escribirse, para un nudo i en un sistema de $n_{m\acute{a}x}$ nudos, de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \underline{S}_j &= \underline{g}(\underline{V}_{hj}) & j=1..n_{m\acute{a}x} & \quad h=1..h_{m\acute{a}x} & \text{balance de potencias} \\ \underline{J}_{hi} &= f(\underline{V}_{ki}) = \underline{Y}_{hi} \underline{V}_{hi} & & \quad k=1..h_{m\acute{a}x} & \text{balance de corrientes} \\ f'(t_q) &= 0 & & & \text{ecuaciones de las cargas} \end{aligned}$$

Las ecuaciones del balance de potencias son las que relacionan las potencias (activa y reactiva) en los nudos con las tensiones en los mismos. Las expresiones del balance de corrientes relacionan las intensidades de las cargas con las tensiones del nudo al que están conectadas. Las expresiones de las cargas no lineales, como se verá en el apartado siguiente, permiten obtener las variables internas que definen el funcionamiento de las mismas.

Las incógnitas que se deben determinar con estas ecuaciones son el módulo y la fase de las tensiones (fundamental y armónicas) en todos los nudos (excepto el de referencia, en el que la fundamental es conocida), las admitancias (fundamental y armónicas) de las cargas lineales y los parámetros de funcionamiento de las cargas no lineales.

En el caso general se considera la potencia introducida por todas las componentes (onda fundamental y armónicas), pero una simplificación muy habitual consiste en considerar sólo la potencia relacionada con la componente fundamental. Esta simplificación permite reducir el número de incógnitas [41] ya que no requiere el cálculo de las admitancias (fundamental y armónicas) de las cargas.

Los modelos de las cargas no lineales que han sido estudiados en el presente trabajo, cuya metodología se comentará más adelante, pueden ser utilizados tanto por el método del análisis armónico iterativo (IHA) como por el del flujo armónico de cargas.

2. Modelización de cargas

La modelización de las cargas puede realizarse con métodos en el dominio del tiempo o con métodos en el dominio de la frecuencia.

Los métodos en el dominio del tiempo, utilizados normalmente en el análisis armónico iterativo (IHA), consisten básicamente en la resolución del transitorio de las cargas que se desean estudiar hasta alcanzar un estado que puede considerarse de régimen permanente. Para este tipo de estudios pueden utilizarse programas como EMTP o SPICE y se emplean especialmente cuando interesa también el estudio del transitorio. Cuando el régimen transitorio no interesa, pueden utilizarse métodos [29] para alcanzar antes el régimen permanente.

Los métodos en el dominio de la frecuencia se basan en definir los armónicos de intensidad en función de los armónicos de tensión y de los parámetros de las cargas no lineales dando lugar a un sistema de ecuaciones no lineal.

En cuanto a la modelización de cargas en el dominio de la frecuencia pueden encontrarse en la bibliografía numerosas metodologías. La más simple, pero probablemente la más inexacta, es la que utiliza Gilker [12] consistente en modelizar las cargas no lineales como fuentes de tensión o de corriente para cada una de las frecuencias consideradas. Grady [31] propone utilizar una resistencia no lineal.

Xu [25] utiliza un esquema equivalente Norton que permite considerar el efecto que una carga no lineal causa sobre los armónicos generados por las demás. La obtención de los parámetros del esquema Norton la realiza algebraicamente para el caso de un recortador aplicado a una inductancia (TCR) pero no todas las cargas no lineales admiten este desarrollo.

Fauri [28] propone el método de la matriz de admitancias armónicas en el que cada armónico de intensidad de la carga depende linealmente de cada uno de los armónicos de tensión.

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \dots & Y_{NN} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_N \end{pmatrix}$$

Los valores de los elementos de la matriz los determina, para el caso de un motor asíncrono monofásico, en dos fases. Primero alimentando la carga con una tensión senoidal, de diferentes valores, para determinar la primera columna y luego introduciendo cada vez una tensión armónica superpuesta a la fundamental de forma que se vayan obteniendo los diferentes elementos de la matriz; cada elemento debe hallarse varias veces utilizando diferentes valores y ángulos de los armónicos inyectados.

El método es de aplicación complicada puesto que se necesitan realizar muchos ensayos de la carga para encontrar los elementos de la matriz. Para ensayar las cargas Fauri recomienda un método de ensayo a partir de un generador programable controlado por ordenador. También podrían utilizarse para la obtención de la matriz simulaciones en el dominio del tiempo con la misma estructura de ensayo.

En este trabajo se ha intentado utilizar un esquema equivalente Norton determinando los componentes a partir de simulaciones en el dominio del tiempo (método de linealización alrededor del punto de trabajo). Como se verá, este método no ha dado buenos resultados.

El método de modelización por circuitos lineales a tramos, el finalmente escogido en la presente tesis, consiste [14][23][39][41] en tomar la onda de intensidad de la carga no lineal y descomponerla en un número adecuado de tramos de forma que la carga pueda considerarse lineal en cada tramo.

El trabajo realizado ha consistido, fundamentalmente, en obtener las expresiones del tipo

$$f'(t_q) = 0$$

que permiten obtener los valores de las variables internas que habitualmente corresponden a los instantes de cambio de tramo t_q . Estas variables luego se utilizarán para determinar las intensidades (tanto en expresiones temporales como en desarrollo armónico) en función de las componentes V_h de la tensión en bornes de la carga; es decir, los términos

$$J_{hi} = f\left(\frac{V}{kI}\right) \quad k=1..h_{m\phi x}$$

de los balances de corrientes. Por ejemplo, en el caso de las lámparas de descarga y en el supuesto de considerar simetría de semionda, las ecuaciones de las cargas son, en realidad, una única expresión que se escribe

$$f(t_1) = K e^{-T/2\tau} e^{-t_1/\tau} + I_0 - \sum_{\substack{l=1 \\ h=2l-1}}^{(h_{m\phi x}+1)/2} \sqrt{2} I_h \text{Cos}(h \omega t_1 + \varphi_{lh}) = 0$$

mientras que la expresión temporal de la intensidad es

$$i_1(t) = K e^{-t/\tau} + I_0 + \sum_{\substack{l=1 \\ h=2l-1}}^{(h_{m\phi x}+1)/2} \sqrt{2} I_h \text{Cos}(h \omega t + \varphi_{lh})$$

en la que aparece una constante K que se determina analíticamente a partir de la variable interna t_1 que se ha determinado con la expresión anterior.

La forma de obtención de estas expresiones y el desarrollo armónico de la onda de intensidad correspondientes a la lámpara de descarga se encuentran en el capítulo 5, al igual que las dos expresiones presentadas aquí a modo de ejemplo.

3. Algoritmos de resolución

Las expresiones matemáticas que, para cada una de las cargas no lineales estudiadas, se obtendrán en la segunda parte nos darán tanto la forma de onda de intensidad como su descomposición armónica a partir de las componentes de la tensión en el nudo de conexión de la carga. Estas expresiones necesitarán como datos los instantes de conmutación de un tramo al otro de la función, que serán incógnitas internas de cálculo. Para obtener dichos instantes de conmutación se deben resolver las ecuaciones (que llamaremos ecuaciones de cambio) no lineales que se determinarán también en la segunda parte.

Si, además, utilizamos los modelos dentro de un flujo de cargas, necesitaremos resolver el sistema no lineal de ecuaciones [41] correspondiente al problema del flujo armónico de cargas. En este caso las ecuaciones de cambio se combinarán con las del flujo de cargas para crear el sistema completo de ecuaciones no lineales a resolver.

Vemos que, sea cual sea el problema planteado, deberemos resolver un sistema de ecuaciones no lineales cuyo número de ecuaciones dependerá del tipo de problema y de las cargas que intervengan. Por ello a continuación se presentan los métodos principalmente utilizados para la resolución de estos sistemas de ecuaciones.

Cabe destacar que es habitual aplicar el método del flujo de cargas manejando los parámetros del circuito (impedancias y/o admitancias) y las variables eléctricas (tensiones, intensidades y potencias) en valores por unidad (p.u.). Esta forma de proceder tiene la ventaja de que, si las bases de referencia se eligen convenientemente, la mayor parte de las variables están cerca del mismo orden de magnitud y, por tanto, las precisiones exigidas a cada variable y a cada función son parecidas.

Al introducir los modelos de las cargas no lineales se introducen nuevas variables en el problema que son los tiempos de conmutación entre tramos. El valor de estas variables está normalmente dentro de un periodo (intervalo de tiempo $\{0..T\}$) que corresponde a un valor muy pequeño (a 50 Hz $T = 0.02$ s) que puede no ser el orden de magnitud más adecuado, por ejemplo en el caso de utilizar derivación numérica.

Esta dificultad puede mejorarse expresando los tiempos de conmutación en "tanto por uno" utilizando como tiempo base el periodo; así las variables de tiempo estarán habitualmente en el intervalo $\{0..1\}$. Este método puede hacerse extensivo a otras variables de tiempo presentes en las ecuaciones, como por ejemplo las constantes de tiempo. Otra posibilidad que han utilizado ya otros autores [14] es hacer un cambio de variable y expresar los instantes de conmutación en forma de ángulo; así las variables de tiempo estarán habitualmente en el intervalo $\{0..2\pi\}$.

3.1. Método de Newton

Dada una función de una variable

$$f(x) = 0$$

deseamos hallar una raíz $x^{(s)}$ que verifique la expresión anterior

$$f(x^{(s)}) = 0$$

Si disponemos de un valor aproximado, $x^{(0)}$, de la raíz, podemos desarrollar en serie de Taylor [40] la función alrededor de $x^{(0)}$

$$f(x^{(s)}) = 0 = f(x^{(0)}) + (x^{(s)} - x^{(0)}) f'(x^{(0)}) + \frac{(x^{(s)} - x^{(0)})^2}{2} f''(x^{(0)}) + \dots$$

Si se desprecian todos los términos de orden superior a 1 en la expresión anterior, se tiene

$$0 = f(x^{(s)}) \approx f(x^{(0)}) + (x^{(s)} - x^{(0)}) f'(x^{(0)})$$

La resolución de esta ecuación no dará la raíz buscada pero sí, cumpliéndose determinadas condiciones, una aproximación $x^{(1)}$ mejor que $x^{(0)}$.

$$x^{(1)} = x^{(0)} - \frac{f(x^{(0)})}{f'(x^{(0)})} = x^{(0)} - [f'(x^{(0)})]^{-1} f(x^{(0)})$$

Repetiendo el cálculo con $x^{(1)}$ como aproximación se tiene un nuevo valor $x^{(2)}$ y así sucesivamente hasta encontrarse suficientemente cerca de la solución. Así el método de Newton consiste en repetir el cálculo

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} - [f'(x^{(i)})]^{-1} f(x^{(i)})$$

hasta un valor $x^{(i)}$ tal que

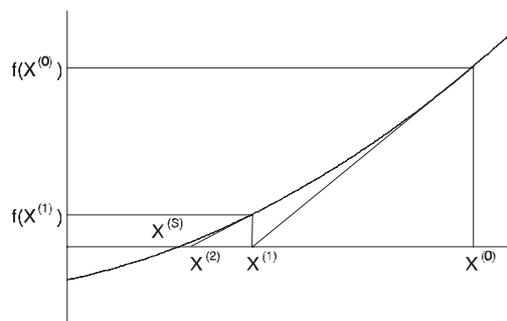
$$|f(x^{(i)})| < \epsilon$$

es decir que la función en el punto valga un valor suficientemente cercano a cero.

La interpretación geométrica es que el método consiste en trazar la tangente a $f(x)$ en el punto $x^{(i)}$ y hallar el punto donde esta corta al eje de abscisas; este punto será $x^{(i+1)}$; de esta forma el valor de la variable avanza

$$\Delta x^{(i)} = [f'(x^{(i)})]^{-1} f(x^{(i)})$$

hacia la solución, como puede verse gráficamente en la figura siguiente.



En el caso que nos ocupa nos interesará generalizar el método a m funciones de m variables; entonces el método se escribe de la forma siguiente

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