

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

Se sabe que la serie compacta de Fourier dada por (1.42) puede ser reescrita como:

$$f(t) = c_0 + c_1 \cdot \text{sen}(\omega_0 t + \phi'_1) + \sum_{n=2}^{\infty} (c_n \cdot \text{sen}(n\omega_0 t + \phi'_n)) \quad (2.1)$$

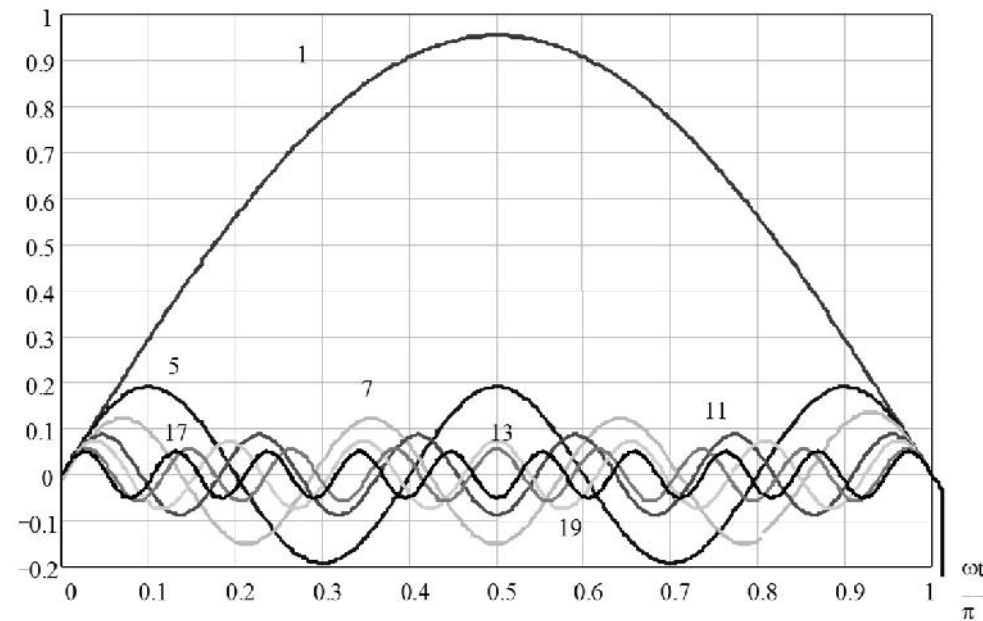


Fig. 2.1

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

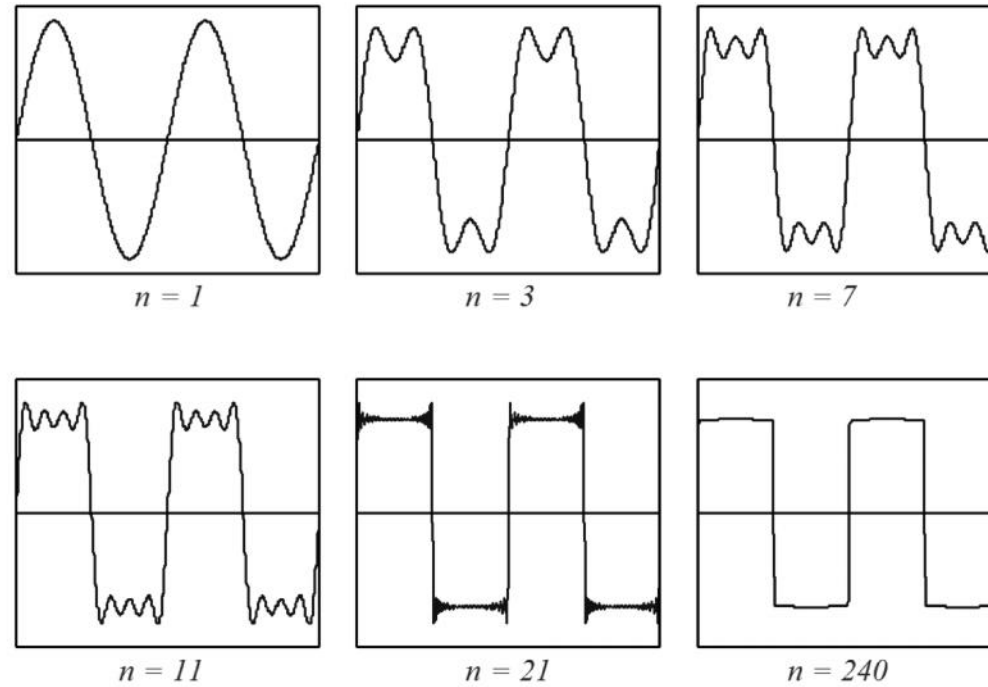


Fig. 2.2

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

2.1 - DEFINICIÓN DE POTENCIA MEDIA PARA SEÑALES NO SINUSOIDALES:

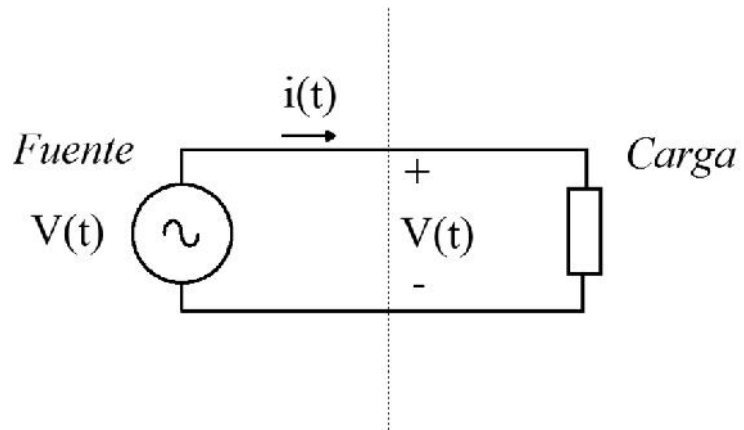


Fig. 2.3

La tensión y la corriente, consideradas no sinusoidales, pueden ser expresadas como:

$$v(t) = V_o + \sum_{n=1}^{\infty} (V_n \cdot \text{sen}(n\omega_0 t - \delta_n)) \quad (2.2)$$

e

$$i(t) = I_o + \sum_{m=1}^{\infty} (I_m \cdot \text{sen}(m\omega_0 t - \theta_m)) \quad (2.3)$$

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

Se define primeramente la potencia instantánea $p(t)$, dada en watts, y expresada como::

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.4)$$

Con esta expresión es posible obtener la energía transmitida de la fuente a la carga en cada ciclo de funcionamiento, y a través de esta conocemos la expresión de la potencia media:

$$W_{\text{ciclo}} = \int_0^T p(t) dt = \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt = P_{\text{med}} \cdot T \quad (2.5)$$

De esta forma se sustituyen las expresiones de tensión y corriente dados por (2.2) y (2.3), luego:

$$P_{\text{med}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left[V_o + \sum_{n=1}^{\infty} (V_n \cdot \text{sen}(n\omega_0 t - \delta_n)) \right] \cdot \left[I_o + \sum_{m=1}^{\infty} (I_m \cdot \text{sen}(m\omega_0 t - \theta_m)) \right] \cdot dt \quad (2.6)$$

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

Considerando un sistema alterno donde sus componentes continuas son cero y como las señales de tensión y corriente alternos son conjuntos ortogonales entonces, se tiene que:

$$\int_0^T \left[\sum_{n=1}^{\infty} (V_n \cdot \text{sen}(n\omega_0 t - \delta_n)) \right] \cdot \left[\sum_{m=1}^{\infty} (I_m \cdot \text{sen}(m\omega_0 t - \theta_m)) \right] \cdot dt \begin{cases} 0 & \text{si } n \neq m \\ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n \cdot I_n}{2} \cdot \cos(\delta_n - \theta_n) & \text{si } n = m \end{cases} \quad (2.7)$$

Por lo tanto la expresión de potencia media se vuelve:

$$P_{med} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n \cdot I_n}{2} \cdot \cos(\delta_n - \theta_n) \quad (2.8)$$

Por lo tanto la energía del circuito es transmitida a la carga solamente cuando la serie de Fourier de $v(t)$ e $i(t)$ contienen términos en la misma frecuencia.

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

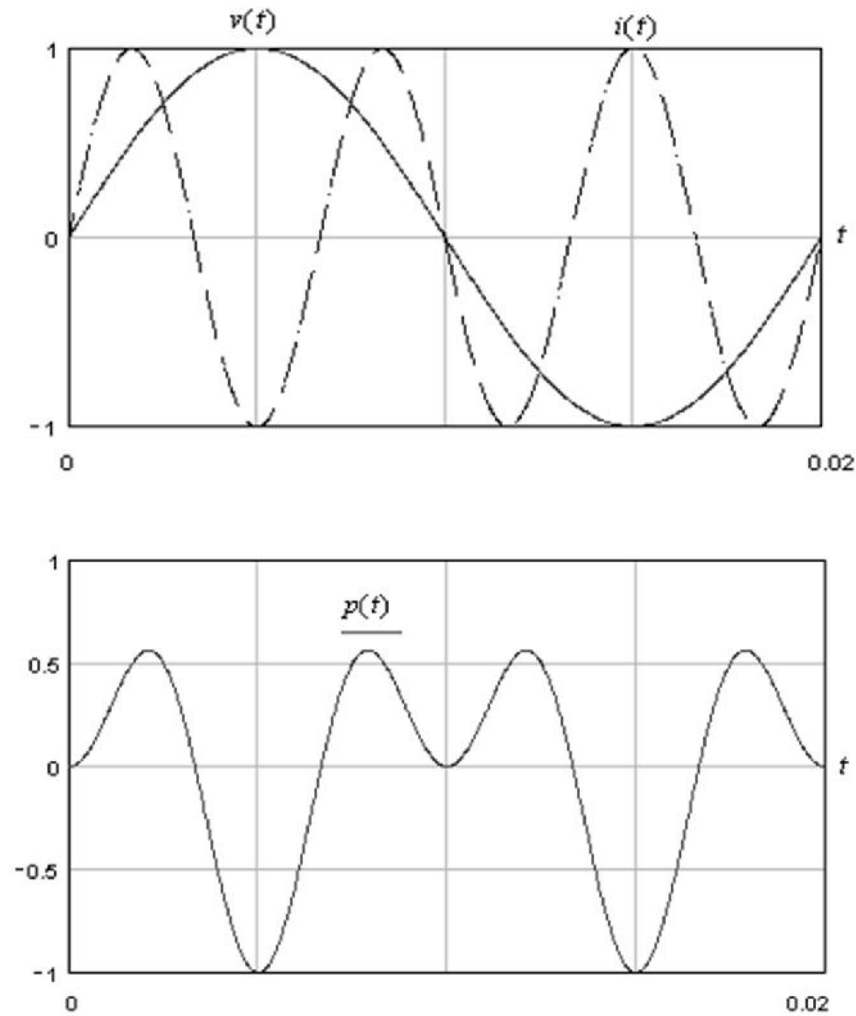


Fig. 2.4

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

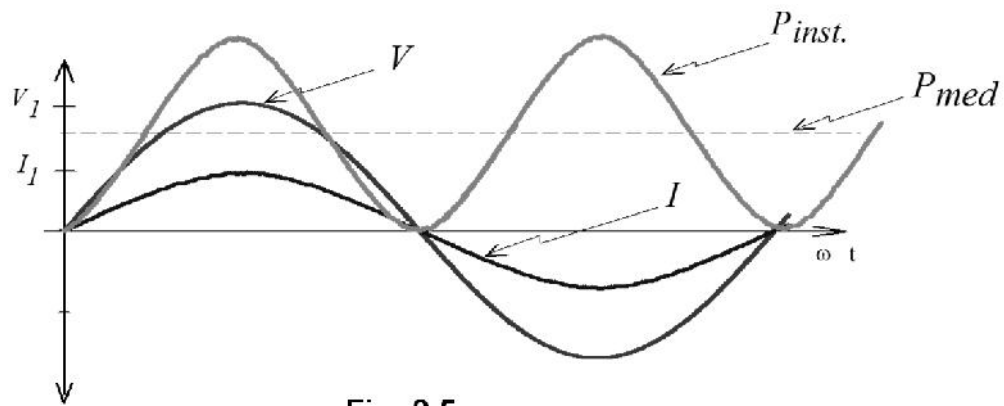


Fig. 2.5

$$P_{med} = \frac{V_1 \cdot I_1}{2} \quad (2.9)$$

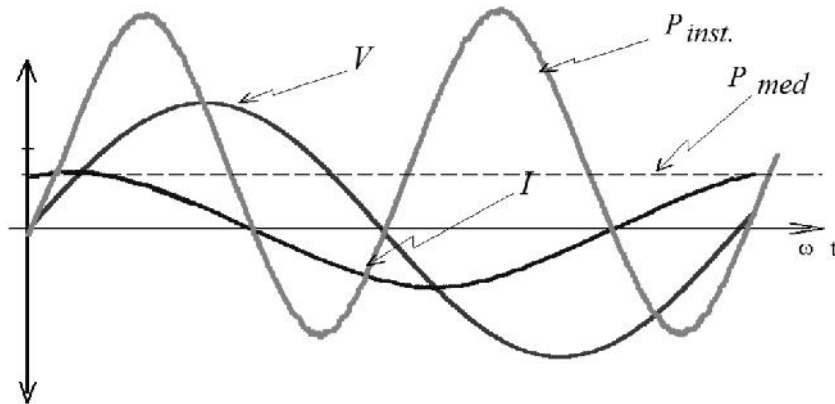
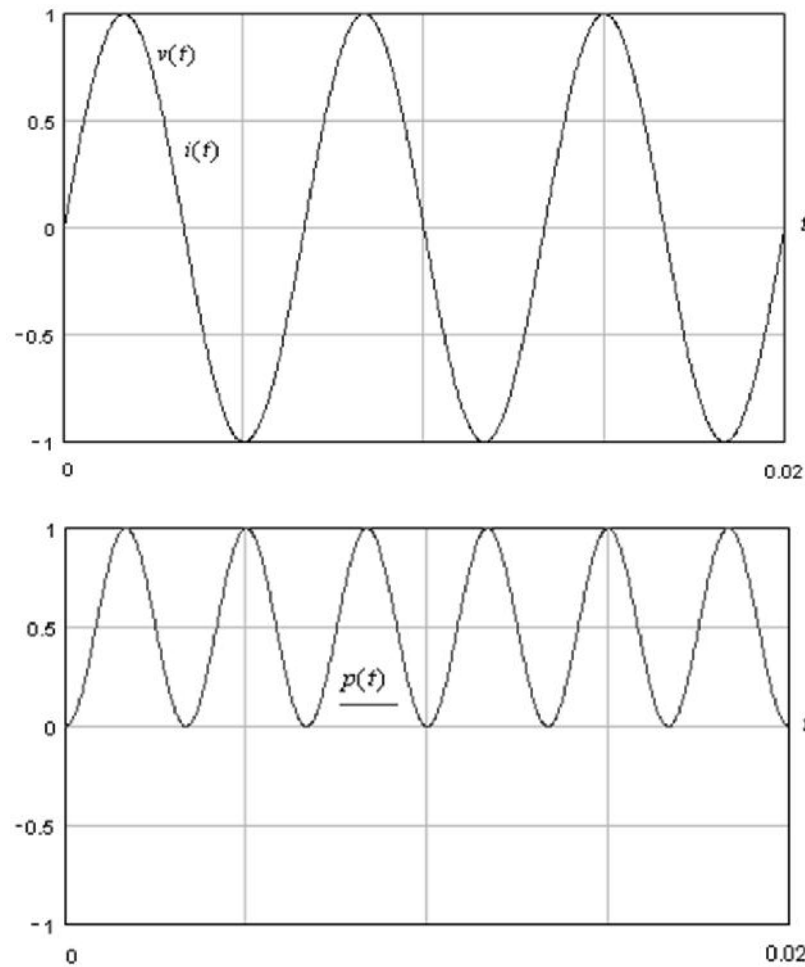


Fig. 2.6

$$P_{med} = \frac{V_1 \cdot I_1}{2} \cdot \cos(45^\circ) \quad (2.10)$$

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales



$$P_{med3} = \frac{V_3 \cdot I_3}{2} \quad (2.11)$$

Ejercicio

Si se tiene una tensión que tiene las siguientes componentes en frecuencia:

$$v(t) = 1,2 \cos(\omega t) + 0,33 \cos(3\omega t) + 0,2 \cos(5\omega t)$$

Y una corriente representada por:

$$i(t) = 0,6 \cos(\omega t + 30^\circ) + 0,1 \cos(5\omega t + 45^\circ) + 0,1 \cos(7\omega t + 60^\circ)$$

Calcular la potencia media del sistema.

Fig. 2.7

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

2.2 - DEFINICIÓN DEL VALOR EFICAZ (RMS) PARA SEÑALES NO SINUSOIDALES:

La obtención de la media geométrica ó valor eficaz (ó RMS) de una señal es dada por:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v^2(t) \cdot dt} \quad (2.12)$$

Donde $v(t)$ es dado por (2.1), luego:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left[V_o + \sum_{n=1}^{\infty} (V_n \cdot \text{sen}(n\omega_o t - \delta_n)) \right] \cdot \left[V_o + \sum_{n=1}^{\infty} (V_n \cdot \text{sen}(n\omega_o t - \delta_n)) \right] \cdot dt} \quad (2.13)$$

Desarrollando la multiplicación de términos y sabiendo que la multiplicación de términos no iguales son cero (ortogonalidad) se tiene:

$$V_{ef} = \sqrt{V_o^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{2}} \quad (2.14)$$

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

Haciendose un análisis similar, se obtiene de igual forma la expresión de la corriente eficaz.

$$I_{ef} = \sqrt{I_o^2 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{I_m^2}{2}} \quad (2.15)$$

Se puede concluir:

- Las componentes armónicas siempre aumentan el valor eficaz.
- Que las componentes armónicas no necesariamente aumentan la potencia media.
- Y finalmente se puede decir que valores eficaces grandes, significan en un circuito grandes pérdidas.

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

2.3 - DEFINICIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE SISTEMAS CON SEÑALES NO SINUSOIDALES:

$$FactorDePotencia(FP) = \frac{(PotenciaMedia)}{(TensiónEficaz_{total}) \cdot (CorrienteEficaz_{total})} \quad (2.16)$$

El factor de potencia siempre oscila entre cero y uno.

Para un sistema alterno se tiene que:

$$FP = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n \cdot I_n}{2} \cdot \cos(\delta_n - \theta_n)}{\sqrt{\frac{V_1^2}{2} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{V_n^2}{2}} \cdot \sqrt{\frac{I_1^2}{2} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}} \quad (2.17)$$

Ya que V_o y I_o son nulos, donde δ_n desfase de tensión y θ_n desfase de corriente.

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

2.3.1 - Factor de potencia para diferentes tipos de carga

Ciertas cargas producen formas de onda de corrientes no sinusoidales con voltaje sinusoidal. A este tipo de cargas se le conoce como no lineales y generan armónicas.

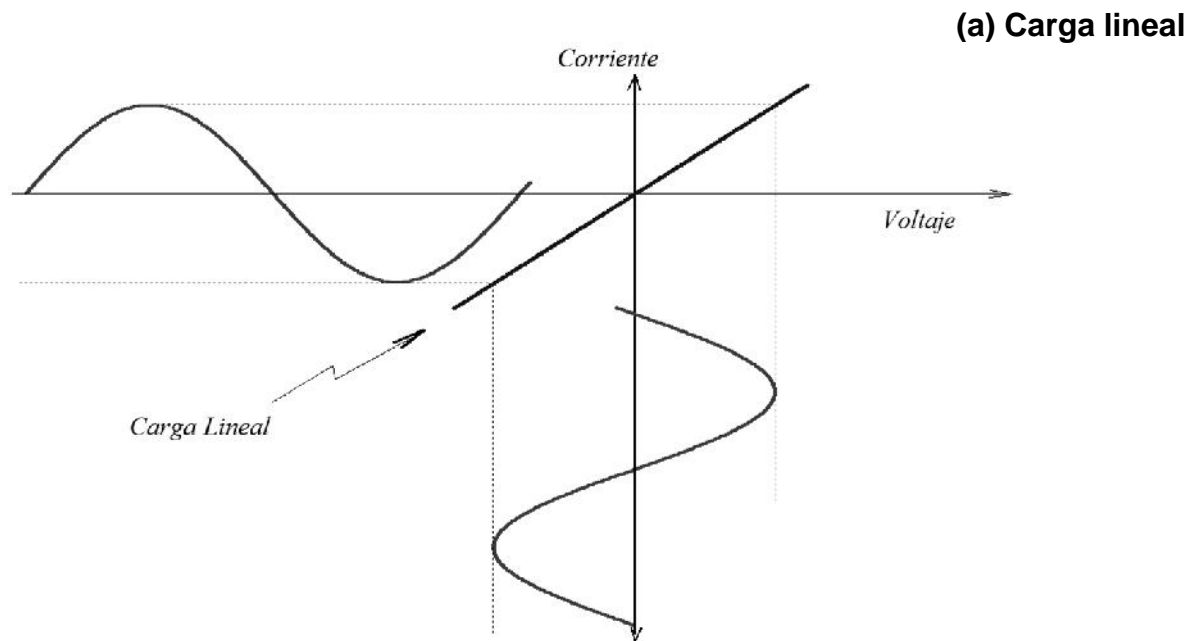


Fig. 2.8

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

(b) Carga no-lineal

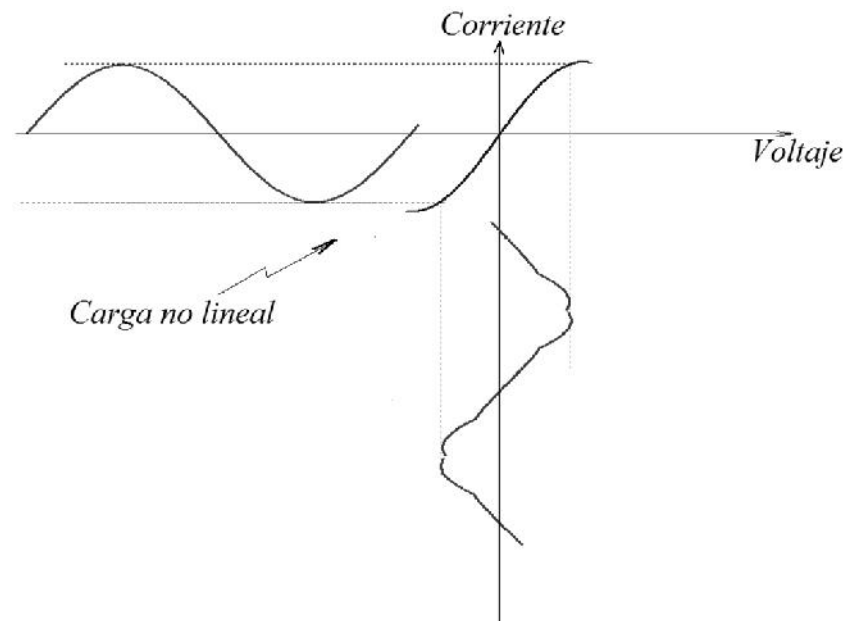


Fig. 2.9

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

La tabla 2.1 da una relación de las cargas no lineales típicas en los sistemas eléctricos de potencia.

CARGAS	NO	LINEALES
Convertidores estáticos	Dispositivos a Arco	Ferromagnéticos
<u>Alta potencia</u> ✓ Rectificadores e inversores de control de fase. <u>Media Potencia</u> ✓ Accionamiento de Motores (inversores de voltaje y corriente). ✓ Rectificación semicontrolada etc. <u>Baja potencia</u> ✓ Fuentes conmutadas ✓ Ballast electrónicos	✓ Hornos a arco ✓ Lámparas de descarga alta y baja presión. ✓ Lámparas fluorescentes etc.	✓ Amplificadores magnéticos ✓ Transformadores ✓ Ballast magnéticos etc.

Tabla N° 2.1

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

2.3.1.1 - CASO 1: Carga Lineal con tensión sinusoidal

En este caso la corriente es reflejo de la tensión que es completamente sinusoidal (es decir no tiene armónicas), por lo tanto (2.17) se convierte en:

$$FP = \frac{\frac{V_1 \cdot I_1}{2} \cdot \cos(\delta_1 - \theta_1)}{\frac{V_1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_1}{\sqrt{2}}} = \cos(\delta_1 - \theta_1) \quad (2.18)$$

Luego se concluye que si la carga lineal es una resistencia, $\theta_1 = 0$, entonces $FP=1$
La expresión (2.18) se le redefine como factor de desplazamiento del sistema.

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

2.3.1.2 - CASO 2: Carga no lineal con tensión sinusoidal

Si se tiene carga no lineal y tensión de alimentación sinusoidal (caso normal en los sistemas eléctricos de potencia), las corrientes armónicas no contribuyen a la potencia media.

$$FP = \frac{(PotenciaMedia)}{(TensiónEficaz) \cdot (CorrienteEficaz)} = \frac{\frac{V_1 \cdot I_1}{2} \cdot \cos(\delta_1 - \theta_1)}{\frac{V_1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{I_1^2}{2} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}} \quad (2.19)$$

Luego, factorizando por la corriente eficaz fundamental se tiene:

$$FP = \frac{\cos(\delta_1 - \theta_1)}{\sqrt{1 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n^2}{I_1^2}}} \quad (2.20)$$

ó

$$FP = \frac{Factor\ De\ Desplazamiento}{Factor\ De\ Distorsión} \quad (2.21)$$

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

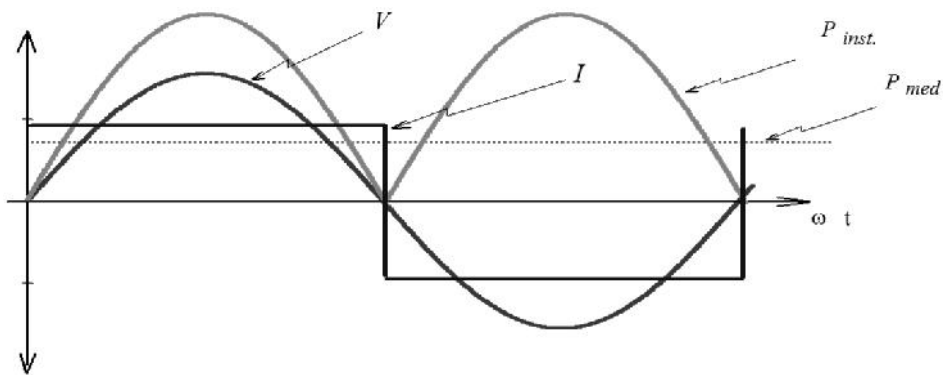


Fig. 2.10

Observe que la potencia instantánea ya no es sinusoidal, en este caso específico, no es más una onda sinusoidal rectificadora con el doble de la frecuencia de la red, esto producto de los aportes armónicos.

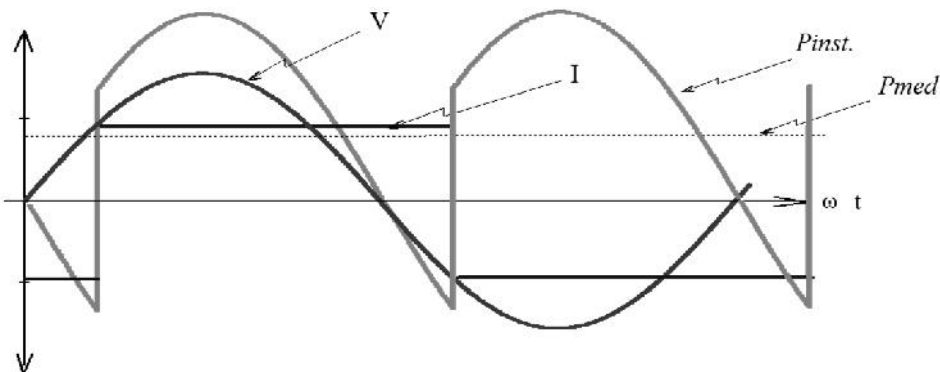


Fig. 2.11

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

Redefiniendo las relaciones entre las magnitudes de potencias, estas pueden ser expresadas por:

$$S_T^2 = P^2 + Q^2 + H^2 \quad (2.22)$$

Siendo:

- S_T : potencia aparente total.
- P : potencia activa.
- Q : potencia reactiva.
- H : potencia armónica
- S_1 : potencia aparente.

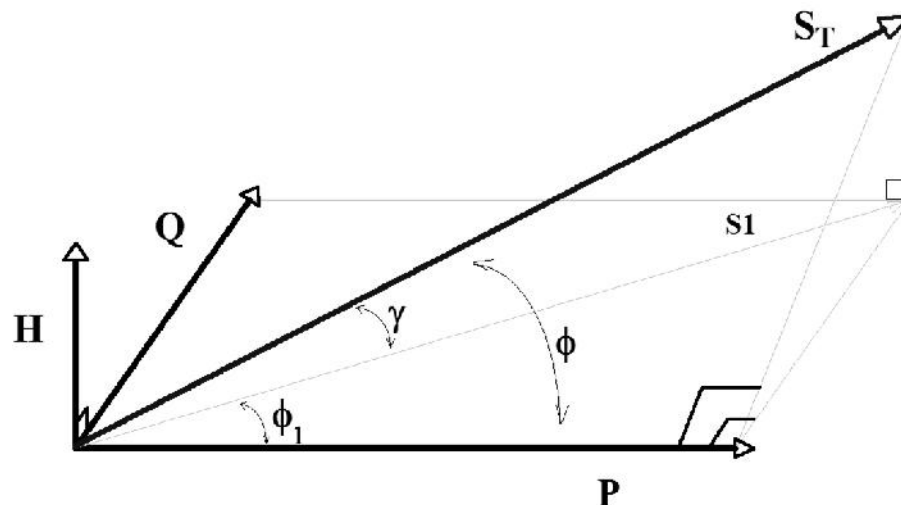


Fig. 2.12

La Fig. 2.12, representa gráficamente esta relación entre estas potencias.
(caso de voltaje sinusoidal y corriente distorsionada)

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

2.4 - INDICES ARMÓNICOS

2.4.1 - Distorsión armónica total (THD)

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{ef_n}^2}}{I_{ef_1}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.23)$$

También :

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{ef_n}^2}}{V_{ef_1}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.24)$$

Y el THD está relacionado con el factor de distorsión por:

$$FactorDeDistorsión = \sqrt{1 + THD^2} \quad (2.25)$$

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

2.4.2 - Distorsión total de demanda (TDD)

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{ef_n}^2}}{\overline{I_L}} \quad (2.26)$$

Donde $\overline{I_L}$ es el promedio de las corrientes de carga demanda máxima (15 o 30 minutos de demanda) en la frecuencia fundamental en el punto de conexión común (PCC- Point of Common Coupling), calculado como el promedio de las demandas máximas para los 12 meses previos. El concepto de TDD es particularmente relevante en la aplicación de la norma Chilena respecto armónicas (recomendación basada en el standard IEEE519).

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

2.4.3 - Factor de influencia telefónica (TIF)

El TIF es ajustado basado en la sensibilidad del sistema telefónico (rango entre 200 y 3500Hz) y del oído humano a ruidos en varias frecuencias. Siendo definido como

$$TIF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (\zeta_n \cdot I_{efn})^2}}{I_{ef1}} \quad (2.27)$$

$$TIF_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (\zeta_n \cdot V_{efn})^2}}{V_{ef1}} \quad (2.28)$$

En las ecuaciones (2.27) y (2.28) solo se consideran las componentes armónicas secuencia 0 que son las que circulan por el neutro. Además ζ_n es un factor de peso que toma en cuenta los efectos de acoplamiento inductivo, y de audio, en la frecuencia del enésimo armónico.

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

El IEEE ha recomendado los valores de factores, ζ , mostrados en la tabla 2.2.

FREC.	ζ	FREC.	ζ	FREC.	ζ
60	0.5	1020	5100	3000	9670
180	30	1080	5400	3180	8740
300	225	1140	5630	3300	8090
360	400	1260	6050	3540	6730
420	650	1380	6370	3660	6130
540	1320	1440	6650	3900	4400
660	2260	1500	6680	4020	3700
720	2760	1620	6970	4260	2750
780	3360	1740	7320	4380	2190
900	4350	1800	7570	5000	840
1000	5000				

Tabla N°2.2

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

2.4.4 - Producto VT e IT

En la práctica, la interferencia telefónica es frecuentemente expresada como VT o IT , la cual es definida como:

$$V \cdot T = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (\zeta_n \cdot V_{ef_n})^2} \quad (2.29)$$

o

$$I \cdot T = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (\zeta_n \cdot I_{ef_n})^2} \quad (2.30)$$

donde ζ_n es el mismo factor de peso previamente descrito.

La interferencia telefónica es debida principalmente a las corrientes residuales (secuencia cero), la cual es $3I_0$ en un sistema de potencia 3ϕ .

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

2.4.5 - Índice C-Message

Es similar al TIF, con la excepción que cada factor de peso, C_n es usado en lugar ζ_n . Este índice es definido como:

$$C_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (C_n \cdot V_{ef_n})^2}}{V_{ef}} \quad (2.31)$$

o

$$C_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (C_n \cdot I_{ef_n})^2}}{I_{ef}} \quad (2.32)$$

La relación entre el factor de peso del TIF y el factor de peso de C-message es :

$$\zeta_n = 5 \cdot C_n \cdot f_n \quad (2.33)$$

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

2.4.6 - Factor K del transformador

Es un índice usado para calcular el 'derating' de los transformadores cuando corrientes armónicas están presentes, el factor K es definido como:

$$K = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} n^2 \cdot \left(\frac{I_{efn}}{I_{ef1}} \right)^2}{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_{efn}}{I_{ef1}} \right)^2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (n^2 \cdot I_{efn}^2)}{\sum_{n=1}^{\infty} I_{efn}^2} \quad (2.34)$$

Donde n es la orden armónica y (I_{efn}/I_{ef1}) es la correspondiente distorsión armónica individual, la expresión (2.34) es calculada suponiéndose que las pérdidas producidas por corrientes parásitas en cada bobinado, causadas a su vez por cada componente armónico, son proporcionales al cuadrado de la orden armónica y al cuadrado de la magnitud de la componente armónica.

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

2.5 - SECUENCIA DE FASE ARMÓNICA

Para el caso de un sistema 3 ϕ desbalanceado, tres redes balanceadas pueden ser obtenidas:

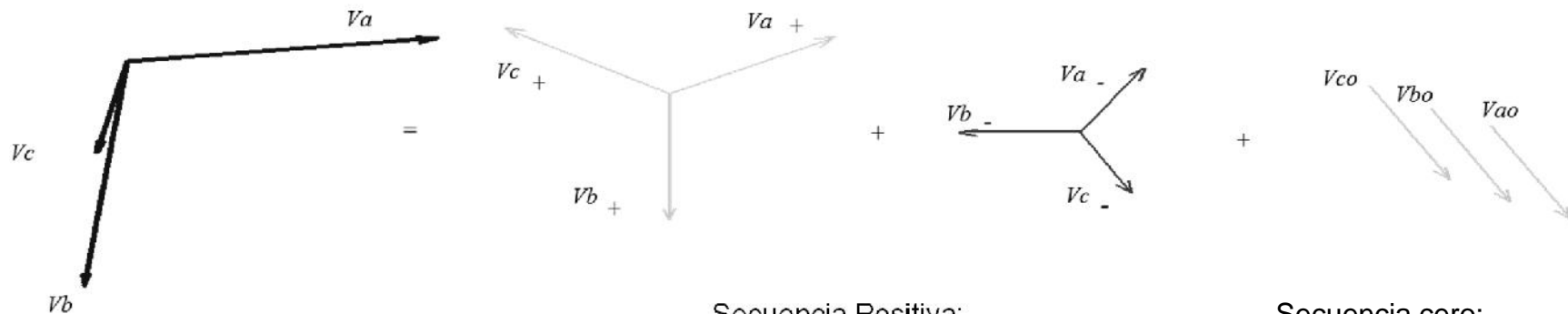


Fig. 2.13

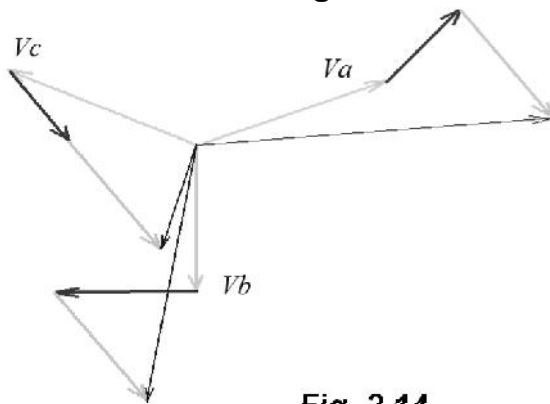


Fig. 2.14

Secuencia Positiva:

- ☒ tres fasores iguales en magnitud
- ☒ desplazados 120° uno de otro
- ☒ la misma secuencia de fase que los fasores originales.

Secuencia negativa:

- ☒ tres fasores iguales en magnitud
- ☒ desplazados 120° uno de otro
- ☒ secuencia fase opuesta que los fasores originales.

Secuencia cero:

- ☒ tres fasores iguales en magnitud
- ☒ en fase uno de otro
- ☒ sin rotación.

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

Es demostrado próximamente que, en sistemas 3ϕ , no todos los armónicos tienen la misma secuencia de fase que los fasores originales. De hecho, grupos de secuencia de tres, consistentemente con la teoría de componentes simétricas, pueden ser identificados:

- ☒ armónicas secuencia positiva
- ☒ armónicas secuencia negativa
- ☒ armónicas secuencia cero

- Secuencia armónica para sistemas balanceados

ARMÓNICA	SECUENCIA
1	+
2	-
3	0
4	+
5	-
6	0
7	+
8	-
9	0
10,11,12,.....	+, -, 0,

Tabla N° 2.3

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

Demostración:

$$i_R(\omega t) = A_n \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \text{sen}(n \cdot \omega t)$$

$$i_S(\omega t - 120^\circ) = A_n \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \text{sen}(n \cdot (\omega t - 120^\circ)) = A_n \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \text{sen}(n \cdot \omega t - n \cdot 120^\circ)$$

$$i_T(\omega t - 240^\circ) = A_n \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \text{sen}(n \cdot (\omega t - 240^\circ)) = A_n \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \text{sen}(n \cdot \omega t - n \cdot 240^\circ)$$

Notese que el desfase final para las fases **S** y **T** depende del valor de '**n**' (es decir del orden armónico). Se puede entonces concluir que el valor del desfase podrá tomar solamente tres valores finales, siendo estos: 0°, -120°, ó, -240°, tal como muestra la figura 2.15.

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

Observandose que para la fase **S** el desfase variará con intervalos regulares de -120° y para la fase **T** el intervalo a variar será de -240° .

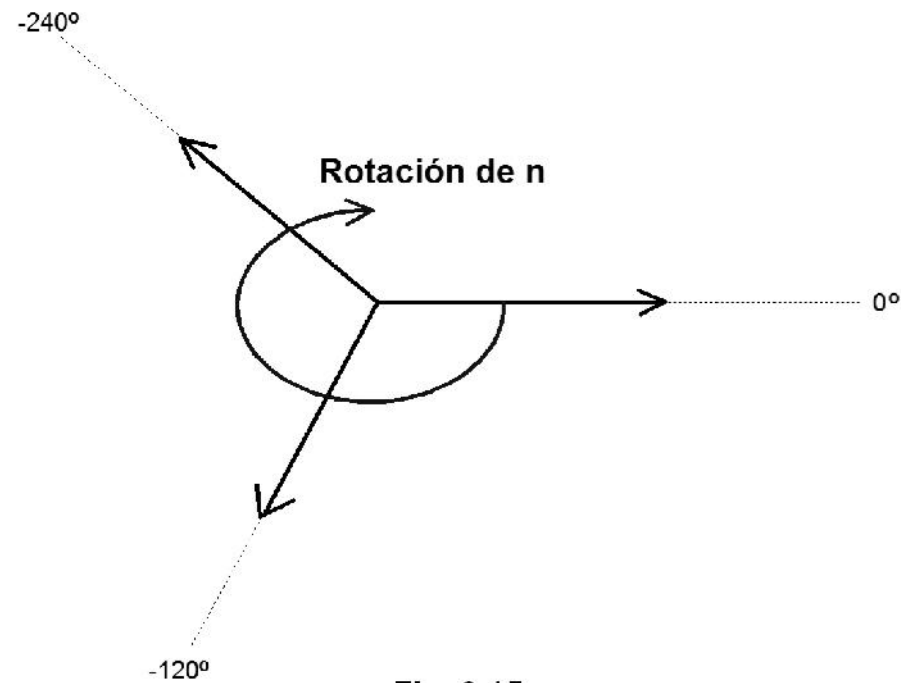


Fig. 2.15

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

Fase S

$$\sum_{n=1}^{\infty} \text{sen}(n \cdot \omega t - n \cdot 120^{\circ}) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{\infty} \text{sen}((3 \cdot k + 1) \cdot \omega t - 120^{\circ}) \\ \text{Denominado de secuencia positiva} \\ \sum_{k=1}^{\infty} \text{sen}(3 \cdot k \cdot \omega t) \\ \text{Denominado de secuencia Cero} \\ \sum_{k=1}^{\infty} \text{sen}((3 \cdot k - 1) \cdot \omega t - 240^{\circ}) \\ \text{Denominado de secuencia Negativa} \end{cases}$$

Para la Fase T

$$\sum_{n=1}^{\infty} \text{sen}(n \cdot \omega t - n \cdot 240^{\circ}) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{\infty} \text{sen}((3 \cdot k + 1) \cdot \omega t - 240^{\circ}) \\ \text{Denominado de secuencia positiva} \\ \sum_{k=1}^{\infty} \text{sen}(3 \cdot k \cdot \omega t) \\ \text{Denominado de secuencia Cero} \\ \sum_{k=1}^{\infty} \text{sen}((3 \cdot k - 1) \cdot \omega t - 120^{\circ}) \\ \text{Denominado de secuencia Negativa} \end{cases}$$

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

Ejemplo:

Los armónicos para una onda cuadrada en un sistema trifásico son:

Para la **Fase R**

$$i_R(\omega t) = \text{sen}(\omega t) - \frac{1}{3} \cdot \text{sen}(3 \cdot \omega t) + \frac{1}{5} \cdot \text{sen}(5 \cdot \omega t) - \frac{1}{7} \cdot \text{sen}(7 \cdot \omega t) + \frac{1}{9} \cdot \text{sen}(9 \cdot \omega t) \dots$$

Para la **Fase S**

$$i_S(\omega t - 120^\circ) = \text{sen}(\omega t - 120^\circ) - \frac{1}{3} \cdot \text{sen}(3 \cdot \omega t - 3 \cdot 120^\circ) + \frac{1}{5} \cdot \text{sen}(5 \cdot \omega t - 5 \cdot 120^\circ) - \frac{1}{7} \cdot \text{sen}(7 \cdot \omega t - 7 \cdot 120^\circ) + \frac{1}{9} \cdot \text{sen}(9 \cdot \omega t - 9 \cdot 120^\circ) \dots$$

Ó,

$$i_S(\omega t - 120^\circ) = \text{sen}(\omega t - 120^\circ) - \frac{1}{3} \cdot \text{sen}(3 \cdot \omega t) + \frac{1}{5} \cdot \text{sen}(5 \cdot \omega t - 240^\circ) - \frac{1}{7} \cdot \text{sen}(7 \cdot \omega t - 120^\circ) + \frac{1}{9} \cdot \text{sen}(9 \cdot \omega t) \dots$$

Para la **Fase T**

$$i_T(\omega t - 240^\circ) = \text{sen}(\omega t - 240^\circ) - \frac{1}{3} \cdot \text{sen}(3 \cdot \omega t - 3 \cdot 240^\circ) + \frac{1}{5} \cdot \text{sen}(5 \cdot \omega t - 5 \cdot 240^\circ) - \frac{1}{7} \cdot \text{sen}(7 \cdot \omega t - 7 \cdot 240^\circ) + \frac{1}{9} \cdot \text{sen}(9 \cdot \omega t - 9 \cdot 240^\circ) \dots$$

Ó,

$$i_T(\omega t - 240^\circ) = \text{sen}(\omega t - 240^\circ) - \frac{1}{3} \cdot \text{sen}(3 \cdot \omega t) + \frac{1}{5} \cdot \text{sen}(5 \cdot \omega t - 120^\circ) - \frac{1}{7} \cdot \text{sen}(7 \cdot \omega t - 240^\circ) + \frac{1}{9} \cdot \text{sen}(9 \cdot \omega t) \dots$$

Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

– Secuencia armónica para sistemas no balanceados

Sin embargo, en la práctica, en sistemas no balanceados no existen secuencias armónicas únicas, es decir, una armónica determinada no tendrá una sola fase de secuencia, sino que cada armónica circulante será descompuesta en sec+, sec- y sec0, tal como ocurre con la componente fundamental en sistemas desbalanceados. Luego cada componente de secuencia es dada por:

$$\begin{bmatrix} I_{0n} \\ I_{+n} \\ I_{-n} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{an} \\ I_{bn} \\ I_{cn} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Donde:

$$a = 1 \angle 120^\circ = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (2.36)$$

finalmente la magnitud de corriente de cada componente de secuencia por el neutro será:

$$I_{neutro_n} = 3 \cdot I_{0n} \quad (2.37)$$

luego la corriente eficaz total por el neutro es dada por:

$$I_{neutro} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left(3 \cdot \frac{I_{0n}}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (2.38)$$



Capítulo 2

- Análisis de sistemas con señales no sinusoidales

En casos donde la distorsión armónica es severa, se han encontrado sobrecargas en el neutro de hasta 173% sobre su valor nominal. Cuando se manejan cargas no lineales, los componentes del circuito deben ser dimensionados con valores eficaces reales (true RMS) es decir considerando la contribución armónica.

TIPO DE CARGA	CONDUCTOR	SISTEMA 3 _w - 3 CABLES Tiene Armónica	SISTEMA 3 _w - 4 CABLES Tiene Armónica
3_w Balanceado	Fase	Impar, secuencia positiva y negativa.	Impar, secuencia positiva y negativa.
	Neutro	S/C	Sin corriente
1_w Balanceado	Fases	Impar, secuencia Pos., Neg., y Cero.	Impar, secuencia positiva y negativa.
	Neutro	S/C	Secuencia cero.
3_w Desbalanceado	Fase	Impar, secuencia Pos., Neg., y Cero.	Impar, secuencia positiva y negativa.
	Neutro	S/C	Componentes secuencia cero total, incluyendo la fundamental

Tabla N° 2.4

S/C = Sin Conexión.