

CONICET



INSTITUTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

ESTUDIO DE ARMONICOS EN SISTEMAS ELECTRICOS

Ing. Gustavo D. Baron

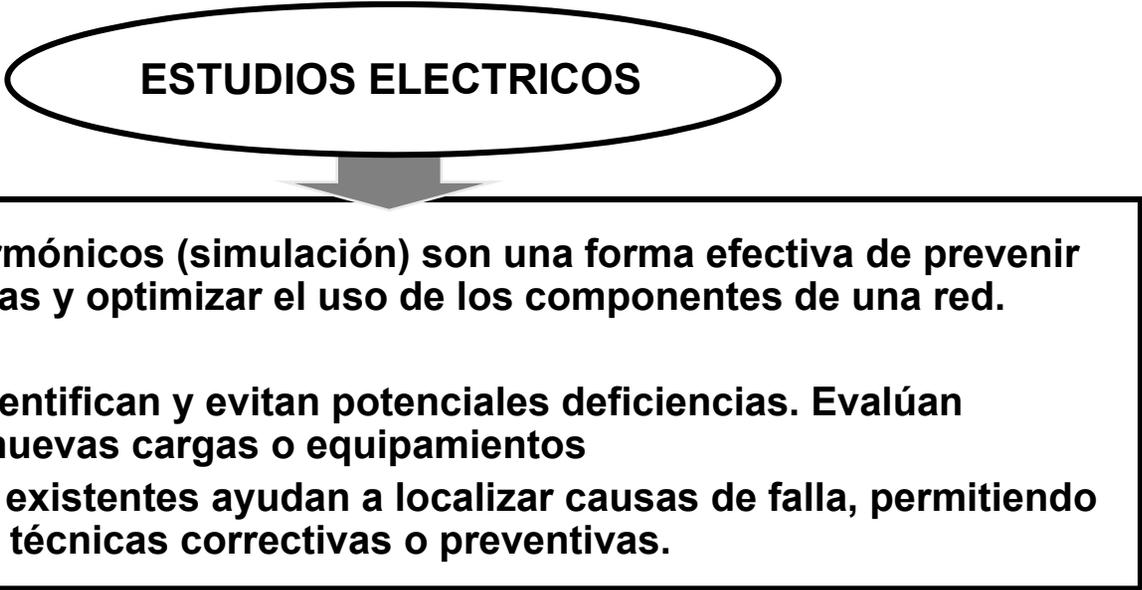
*Av. Libertador 1109 (Oeste) - San Juan - Argentina
Tel: 0054 - 264 - 4226444 - Fax: 0054 - 264 - 4210299
email: ieedir@iee.unsj.edu.ar
Web: www.iee.unsj.edu.ar*



INSTITUTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA - UNSJ - CONICET

INTRODUCCIÓN: PROBLEMÁTICA

La planificación, diseño y operación de sistemas eléctricos requiere de un continuo y comprensivo análisis para evaluar su desempeño y plan de expansión, como también para una operación segura y dentro de los lineamientos de calidad deseados.



ESTUDIOS ELECTRICOS

Estudios de armónicos (simulación) son una forma efectiva de prevenir problemas y optimizar el uso de los componentes de una red.

- En diseño identifican y evitan potenciales deficiencias. Evalúan impacto de nuevas cargas o equipamientos
- En sistemas existentes ayudan a localizar causas de falla, permitiendo implementar técnicas correctivas o preventivas.

Resultados a obtener: Niveles de distorsión armónica (tensión y/o corriente) para uno o varios nodos (o ramas) de un sistema, siendo necesario en algunos casos conocer las formas de ondas distorsionadas.

INTRODUCCIÓN: PROBLEMÁTICA

Antes del desarrollo de la electrónica de potencia, las fuentes de distorsión armónica en sistemas eléctricos eran algunas cargas especiales (hornos de arco, soldadoras, balastos, etc.), máquinas rotantes y transformadores.

Estos últimos no causan niveles significativos de distorsión, excepto bajo regímenes transitorios, sobretensiones o condiciones que provoquen corrientes magnetizantes elevadas.

El aumento en el uso de electrónica alteró este escenario y su desarrollo no se enfocó inicialmente en generar menos perturbaciones o diseños mas robustos.

En general, fabricantes siempre han estado interesados en mejorar la funcionalidad o eficiencia más que en valorar el impacto de sus diseños.



Muchos equipos electrónicos además de ser sensibles a perturbaciones se comportan como generadores importantes de perturbaciones.

ANALISIS DE ARMÓNICOS: MOTIVACIÓN

- **Instalación de nuevos componentes o equipamientos.**
- **Evaluación y determinación de las técnicas adecuadas de mitigación.**
- **Consecuencias de armónicos sobre elementos de la red.**
- **Detección de condiciones de resonancias, evaluando el contexto de ocurrencia y estableciendo condicionamientos de operación.**
- **Medición de referencia. Niveles cotejados con límites aceptables por norma.**
- **Impacto de nuevas tecnologías (FACTs, ASD, equipamiento de REID, etc.)**

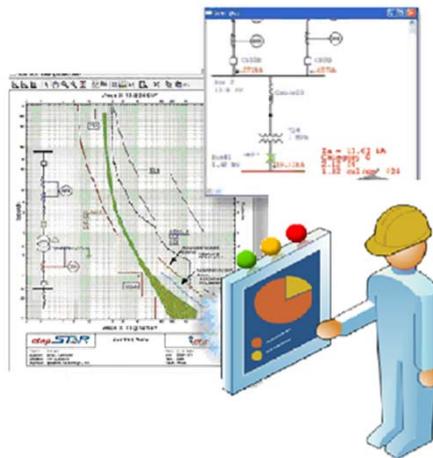
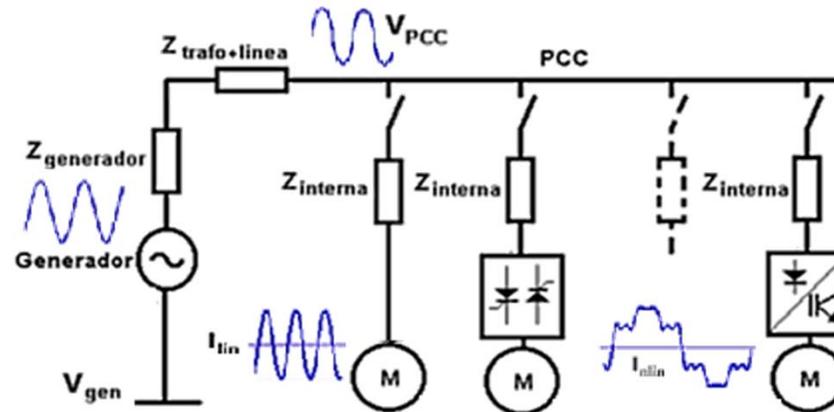
Al igual que en otros tipos de estudios, para armónicos se desarrollan pasos básicos:

- 1. Identificar posibles elementos que provocan perturbaciones.**
- 2. Definir los modelos más adecuados para su representación y simulación.**
- 3. Determinar los modelos para el resto de los componentes del sistema.**
- 4. Realizar simulaciones (diferentes escenarios, condiciones de cargas, etc.).**

ANALISIS DE ARMÓNICOS : CONSIDERACIONES

Aunque se debe concentrar esfuerzos en cargas contaminantes (electrónica de potencia de grandes industrias), los componentes “lineales” deben ser bien modelados.

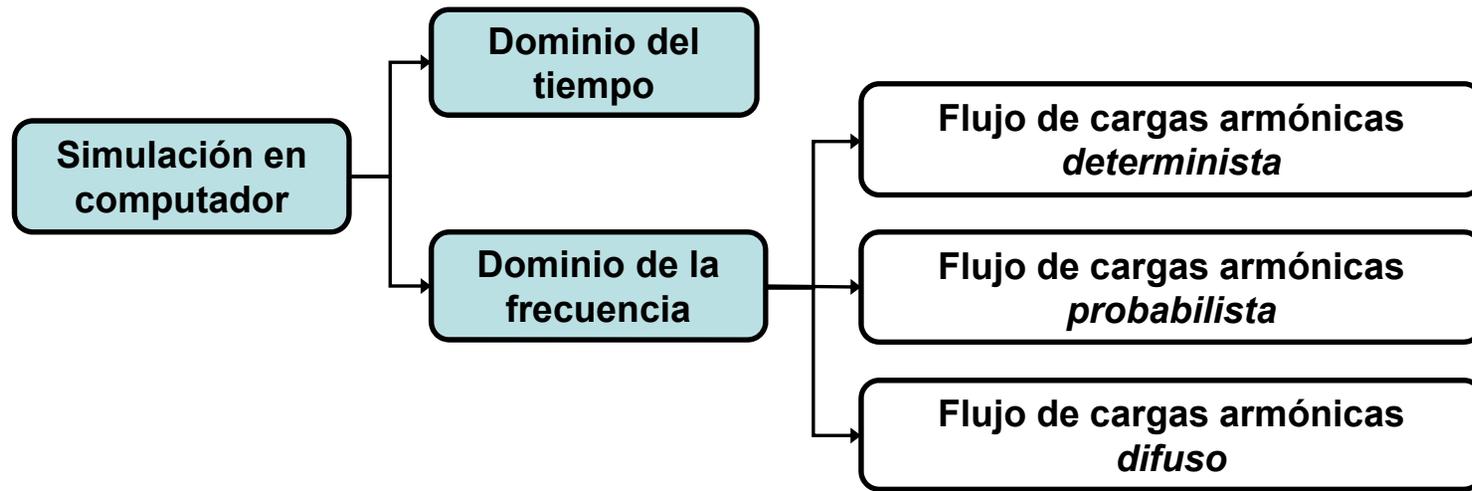
Equipamientos industriales (ASD, PLC, UPS, etc.) son fuentes de perturbación, pero electrónica de consumo masivo (reguladores de iluminación, PC, lámparas fluorescentes, TV, Fax, etc.) puede que también deban considerarse.



RECONOCER LOS ELEMENTOS A INCLUIR EN EL MODELO Y ESCOGER LA REPRESENTACIÓN Y PRECISIÓN ADECUADA SEGÚN EL ESTUDIO A REALIZAR

CONOCIMIENTO DE METODOLOGÍAS Y TIPOS DE ANÁLISIS, COMO TAMBIÉN DE LOS DIFERENTES MODELOS DE COMPONENTES

ANALISIS DE ARMÓNICOS: TIPOS



Estudios en el *dominio del tiempo*

Resuelve los sistemas de ecuaciones diferenciales y algebraicas que describen el comportamiento dinámico de los componentes del sistema, resultando en las ondas de tensión y corriente. Debido al esfuerzo computacional involucrado, esta técnica se aplica casi que exclusivamente a pequeños sistemas eléctricos.

Estudios en el *dominio de la frecuencia*

Se basan en encontrar la matriz de admitancia del sistema desarrollada a partir de los modelos individuales e interconectados de acuerdo a la topología de la red. Esta técnica permite el análisis mono y polifásicos, dando como resultado las tensiones y corrientes armónicas para cada nodo y rama de un sistema.

SIMULACION EN TIEMPO: GENERALIDADES

Estudios en el dominio del tiempo

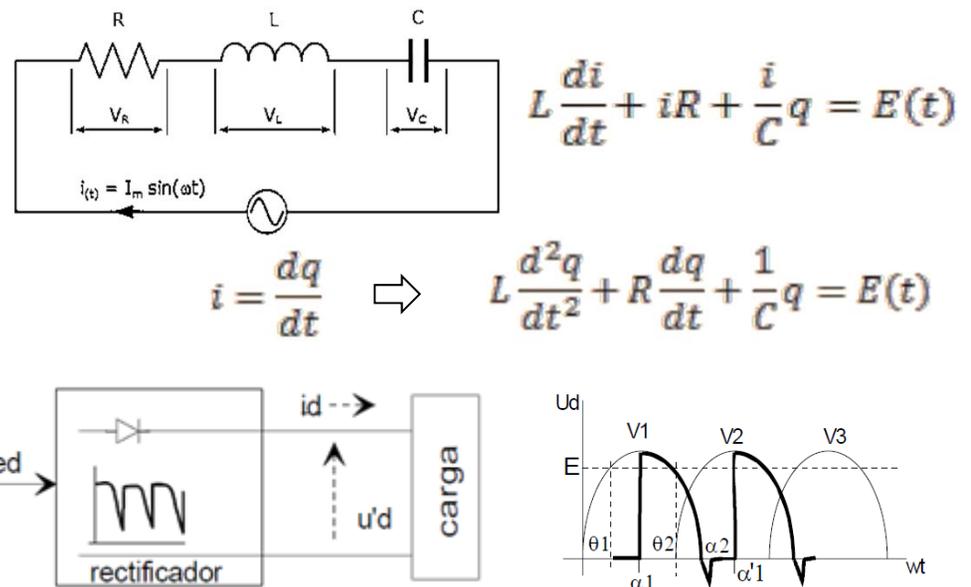
A diferencia de estudios en frecuencia, la simulación es enteramente realizada en el dominio temporal obligando a contar con modelos magnitud-tiempo del sistema y de las cargas.

En general los modelos de cargas son derivados del funcionamiento de estos componentes expresado mediante ecuaciones diferenciales.

Esta metodología permite el estudio de todo tipo de cargas y condiciones, con precisión acorde a los modelos disponibles, aumentando la complejidad y tiempo de simulación.

Este tipo de simulación permite estudiar mejor el comportamiento de cargas no lineales con la frecuencia y su variabilidad en el tiempo.

El cálculo resulta en las formas de ondas de tensiones y corrientes, y luego las componentes armónicas pueden ser calculadas mediante Fourier, después de alcanzar el estado estacionario.



SIMULACION EN FRECUENCIA: GENERALIDADES

La experiencia muestra que muchos casos reales presentan sistemas con baja distorsión de fondo donde puede identificarse una carga dominante. Estos pueden estudiarse con herramientas sencillas (planilla de cálculo) haciendo una evaluación simplificada de impedancias y frecuencias de resonancias.

Otros sistemas con varias cargas no-lineales o combinaciones de estas, amerita de herramientas mas específicas basadas en el dominio de la frecuencia, las cuales son conocidas en general como flujos de cargas armónicas (HLF).

Hay distintas variantes según los datos requeridos, complejidad de modelos, formulación y algoritmos de solución, pero básicamente la solución pasa por resolver la ecuación que representa el sistema, para cada frecuencias de análisis.

$$[I_h] = [Y_h][V_h] \quad \text{con } h = 1, 2 \dots n$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_j \\ \bar{I}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{11} & \bar{y}_{1i} & \bar{y}_{1j} & \bar{y}_{1N} \\ \bar{y}_{i1} & \bar{y}_{ii} & \bar{y}_{ij} & \bar{y}_{iN} \\ \bar{y}_{j1} & \bar{y}_{ji} & \bar{y}_{jj} & \bar{y}_{jN} \\ \bar{y}_{N1} & \bar{y}_{Ni} & \bar{y}_{Nj} & \bar{y}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_j \\ \bar{V}_N \end{bmatrix}$$

Donde:

$[Y_h]$ matriz de admitancia nodal

$[I_h]$ vector corrientes de nodo para cada armónico h

$[V_h]$ vector tensiones de nodo para cada armónico h

En cálculos avanzados de armónicos, el vector de corriente llega a ser una función de las tensiones del sistema.

SIMULACION EN FRECUENCIA: MATRIZ DE ADMITANCIAS

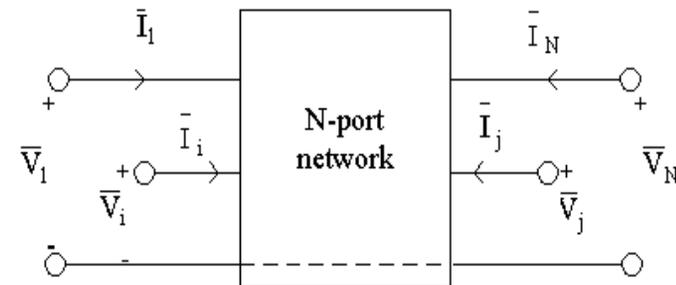
Matriz de admitancia: Representa al sistema y contiene las admitancia de las ramas entre nodos para una topología y/o estado de operación.

Obtención:

Cada elemento es representado por cuadripolos o multipolos ajustados según sus admitancia. Es posible incluir dependencias de las condiciones de operación, tensiones armónicas, etc., siempre que puedan expresarse a través de admitancias.

A partir de estos cuadripolos, existen métodos clásicos para determinar la matriz de admitancia de todo el sistema o red:

Las técnicas mas difundidas hacen uso de una matriz auxiliar denominada *índice*, que representa la conectividad de los elementos, y de la *Matriz Primitiva*, que contiene los modelos individuales de admitancia de cada elemento.

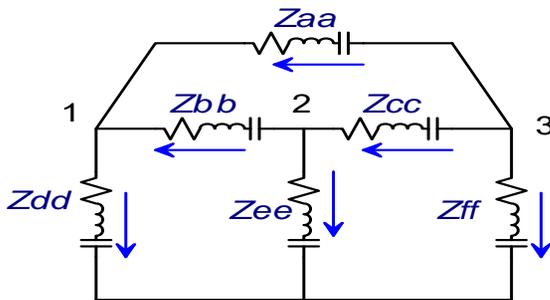


$$\left[\bar{Y}_{sys} \right] = [Q] \left[\bar{Y}_{prim} \right] [Q]^T$$

No existe un método para extrapolar la matriz de una frecuencia a otra y debe ser formulada para cada frecuencia.

OBTENCIÓN MATRIZ DE ADMITANCIAS (Ejemplo)

Obtención de Matrices Índice y Primitiva:



$$V_{Rama} = \mathbf{A} \times V_{Nodo}$$

$$I_{Nodo} = \mathbf{A}^T \times I_{Rama}$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_d \\ u_e \\ u_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -1 & +1 & 0 \\ 0 & -1 & +1 \\ +1 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

Matriz \mathbf{A} contiene información de como inciden las ramas en los nodos. Se denomina **Matriz Incidencia de Nodos** o **Matriz Índice**

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 & 0 & +1 & 0 \\ +1 & 0 & +1 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \\ i_f \end{bmatrix}$$

$$V_{Rama} = \mathbf{Z}_{Rama} \times I_{Rama}$$

$$I_{Rama} = \mathbf{Y}_{Rama} \times V_{Rama}$$

Matriz \mathbf{Z}_{Rama} (\mathbf{Y}_{Rama}) contiene información de las impedancias entre nodos, se denomina **Matriz Primitiva**

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_d \\ u_e \\ u_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{bb} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{cc} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{dd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{ee} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \\ i_f \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \\ i_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{aa} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{bb} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_{cc} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_{dd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & y_{ee} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_d \\ u_e \\ u_f \end{bmatrix}$$

OBTENCIÓN MATRIZ DE ADMITANCIAS (Cont.)

Obtención de Matriz de Admitancias:

$$I_{Nodo} = A^T \times I_{Rama}$$

$$I_{Nodo} = A^T \times Y_{Rama} \times A \times V_{Nodo}$$

$$I_{Rama} = Y_{Rama} \times V_{Rama}$$

$$V_{Rama} = A \times V_{Nodo}$$

$$I_{Rama} = Y_{Rama} \times A \times V_{Nodo}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 & 0 & +1 & 0 \\ +1 & 0 & +1 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{aa} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{bb} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_{cc} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_{dd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & y_{ee} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -1 & +1 & 0 \\ 0 & -1 & +1 \\ +1 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

Matriz de admitancias (Y), relaciona tensiones de nodos con corrientes

$$I_{Nodo} = Y_{Adm} \times V_{Nodo}$$

$$Y_{Adm} = A^T \times Y_{Rama} \times A$$

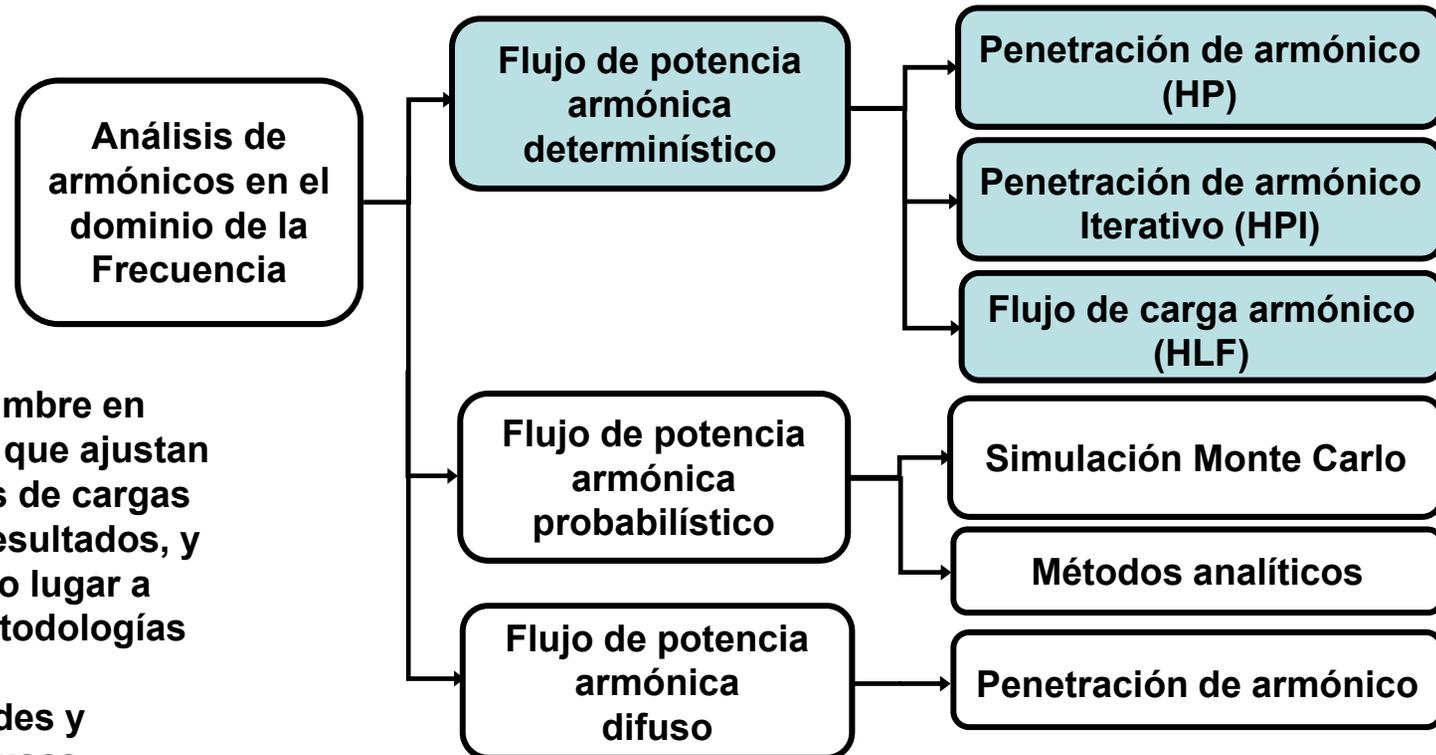
$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{aa} + y_{bb} + y_{dd} & -y_{bb} & -y_{aa} \\ -y_{bb} & y_{bb} + y_{cc} + y_{ee} & -y_{cc} \\ -y_{aa} & -y_{cc} & y_{aa} + y_{cc} + y_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

Matriz Y, no será diagonal cuando hay acoplamientos entre ramas, mientras que la Índice no cambia.

Solución del sistema:

$$V_{Nodo}^{(h)} = \left[Y_{Admitancias}^{(h)} \right]^{-1} \times I_{Nodo}^{(h)}$$

SIMULACION EN FRECUENCIA: TIPOS



La incertidumbre en parámetros que ajustan los modelos de cargas afecta los resultados, y esto ha dado lugar a plantear metodologías en base a probabilidades y técnicas difusas.

Las técnicas en base a probabilidades asumen que los parámetros inciertos son variables aleatorias con distribuciones de probabilidad (media y varianza, etc.) En la práctica su aplicación se dificulta, la información disponible no suele ser insuficiente para determinar tales distribuciones. Permite modelar comportamientos aleatorios

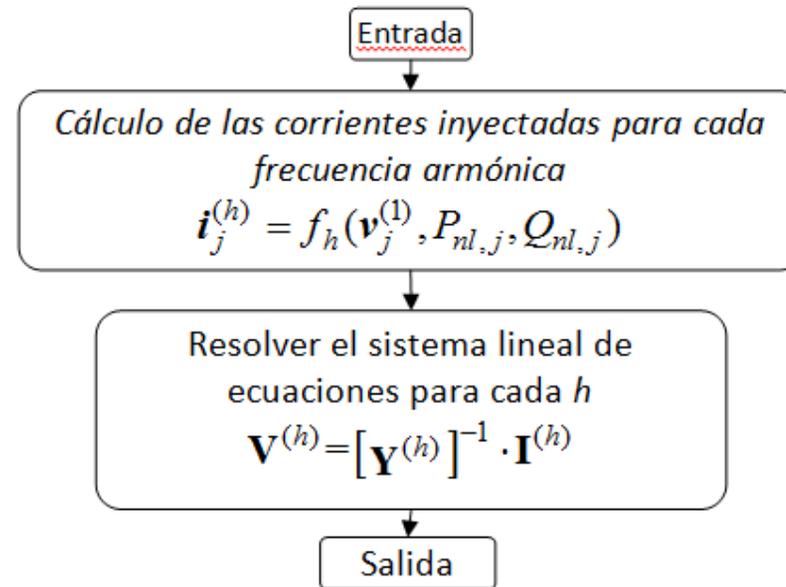
Las técnicas en base a posibilidades se proveen medidas de incertidumbre que permiten lidiar con la deficiencia en la información, formulada en términos de números difusos.

ANALISIS DE PENETRACION DE ARMÓNICOS (HP)

Permite analizar el sistema en función de la frecuencia, analizando la red y su respuesta para las frecuencias de interés.

Básicamente consiste en calcular repetidamente la matriz de admitancia para cada frecuencia, resolviendo la ecuación que representa al sistema para encontrar las tensiones armónicas en los distintos nodos de la red.

$$V_{\text{Nodo}}^{(h)} = \left[Y_{\text{Admitancias}}^{(h)} \right]^{-1} \times I_{\text{Nodo}}^{(h)}$$



La matriz $Y^{(h)}$ corresponde a la matriz de admitancias que caracteriza el conjunto red-cargas pasivas a la frecuencia armónica de orden h .

$V^{(h)}$ corresponde al vector de estado y representa las tensiones de orden h en los nodos del sistema.

$I^{(h)}$ corresponde al vector de corrientes inyectadas por las cargas no lineales para el orden h , en los nodos correspondientes del sistema.

HP CON MULTIPLES FUENTES DE CORRIENTE

Se eliminan todas las fuentes de la red y las cargas no lineales se modelan por fuentes de corriente las cuales se inyectan en los nodos correspondientes y con las frecuencia armónicas características de las cargas.

Se resuelve la matriz de admitancia para cada h y se calculan las tensiones en cada nodo.

Considerando que la red sin cargas perturbadoras es de carácter lineal y utilizando fuentes de corriente para modelar cargas no lineales, se logra linealizar el modelo. Esto permite una solución sencilla y la aplicación del principio de superposición.

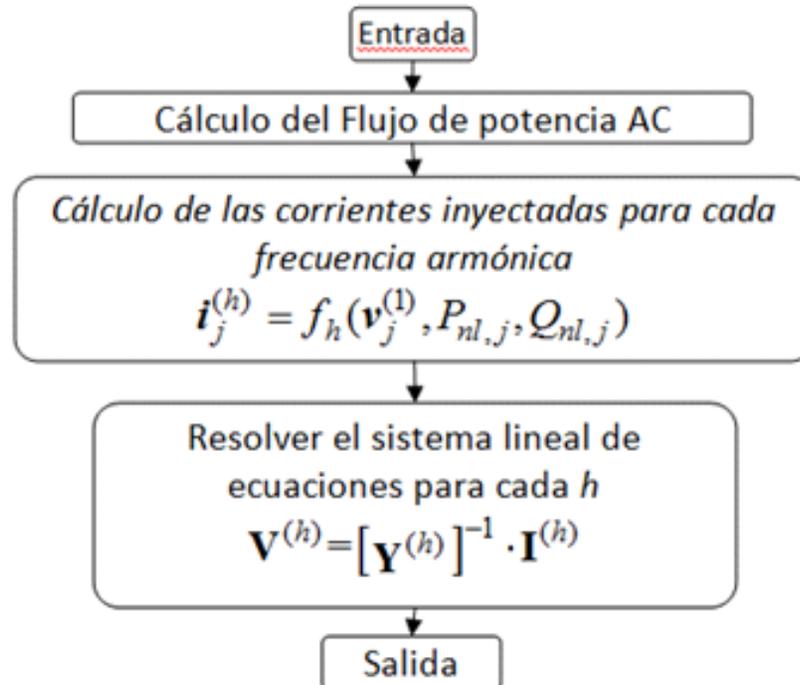
Las limitaciones de la técnica HP se encuentra en los modelos de las cargas no lineales (No considera dependencia de la tensión distorsionada, condiciones de operación, carga mecánica, velocidad de rotación, etc.)

- Los resultados son válidos para el escenario considerado al definir los modelos de las cargas no lineales, no pudiendo generalizar resultados.
- Pueden obtenerse formas de onda por sintetización.
- No se obtienen buenos resultados cuando la impedancia propia de una carga no lineal es grande para alguna frecuencias (distorsiones >10%).

Mejoras:

- Considerar no solo magnitud, sino también fase de la corrientes inyectadas.
- Considera la magnitud y fases de la tensión en los nodos donde se conectan las cargas no lineales, para ajustar las fases de corriente respecto de estas.

HP MEJORADO CON CALCULO FLUJO DE 50Hz



Mejora en la precisión de resultados al considerar fase de tensión fundamental en nodos donde se conectan las cargas no lineales.

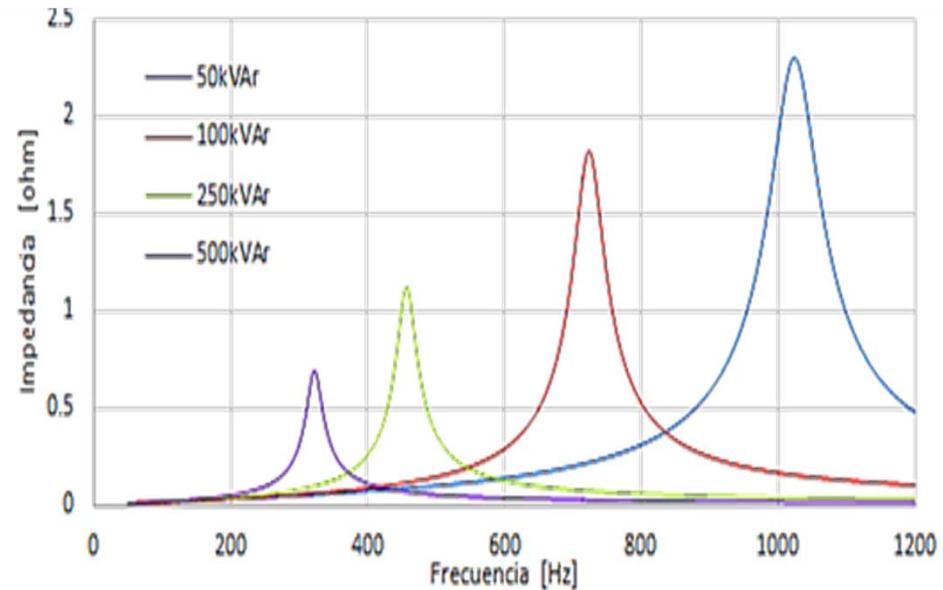
A partir de las fases obtenidas con el calculo de flujo, los modelos de cargas no lineales inyectarán su espectro característico en relación a la fase de la tensión de suministro en el punto de conexión.

Si no se cuenta con los desfases de las corrientes armónicas es usual considerar $h \times \delta$, siendo h el orden armónico y δ el desfase a frecuencia fundamental.

HP: ANALISIS POR ESCANEEO DE FRECUENCIA

Es una versión simple de HP. Permite evaluar la impedancia de la red para una variación sistemática de frecuencia.

Considerando que el modelo de red sin fuentes activas, contiene las admitancias que vinculan nodos, al inyectar corriente en un nodo se tendrá como resultado las tensiones en todos ellos debido a la corriente inyectada.



Si se inyecta una corriente de $1A/0^\circ$ con diferentes frecuencias asociadas a un barrido dentro de un rango determinado, se tiene en el resto de los nodos la tensión provocada por esa única corriente. Esa tensión es en si misma el valor de impedancia.

Como resultado del barrido se tiene un perfil de impedancia visto desde el nodo de inyección, escalable para corrientes diferentes a la unidad.

ANALISIS POR METODOS ITERATIVOS (HPI)

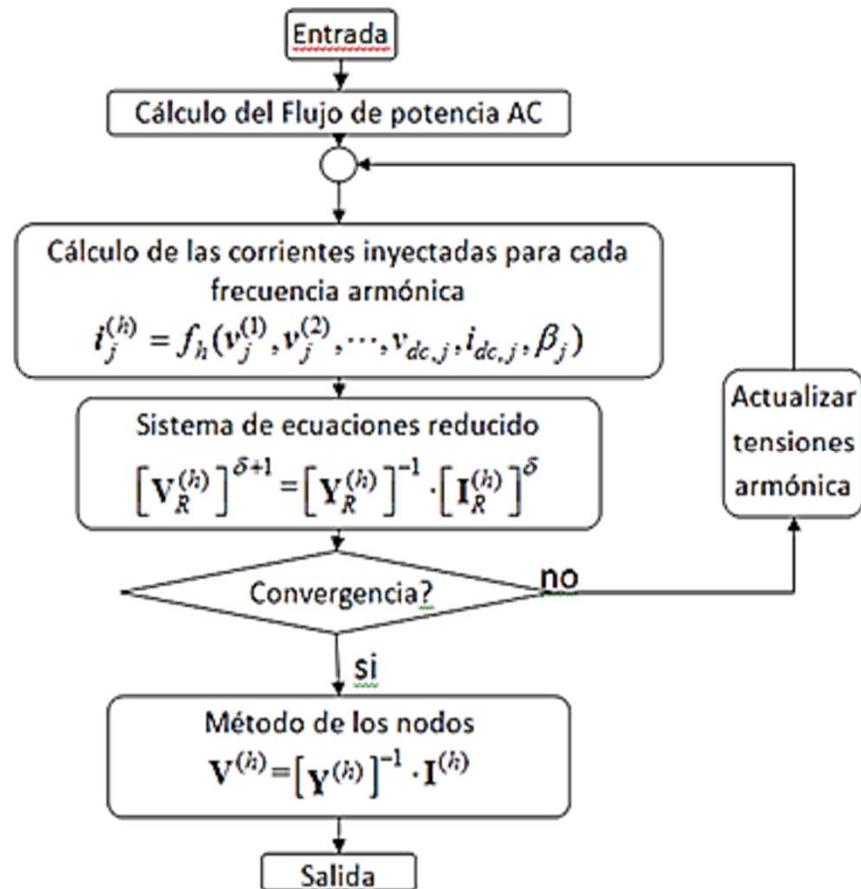
Es una variación del método anterior que incluye una etapa de análisis armónico iterativo en busca de considerar el comportamiento de la carga debido a la distorsión de la tensión de suministro.

Consiste en ajustar las corriente inyectadas por cargas no-lineales, para cada instancia de cálculo, a través de una solución iterativa.

En ciertos casos es necesario representar las cargas mediante ecuaciones diferenciales resueltas en cada iteración. Un cálculo de flujo brinda la condición inicial y se resuelve el modelo temporal hasta una solución estacionaria, conformando así el vector de corrientes a inyectar.

Un nuevo cálculo de admitancias permite actualizar los valores de tensión que nuevamente modifican las corrientes.

Esta técnica híbrida tiempo-frecuencia es muy potente y precisa, aunque requiere de mayores esfuerzos de ingeniería y cálculo, pudiendo mejorar la precisión tanto como sea necesario según el modelo de carga.



ANALISIS POR FLUJO DE POTENCIA ARMONICO (HPF)

Es una reformulación del flujo de cargas convencional que incorpora las ecuaciones que modelan las cargas no-lineales al modelo de la red; constituyendo así un solo sistema de

ecuaciones no-lineales a ser resuelto por un método numérico (Newton-Raphson).

Un HFP, además de considerar $I_h=f(V_h)$, logra el balance de potencia (P y Q) nodal.

Ecuación no lineal	CHLF, considerando potencia fundamental	CHLF, considerando potencias fundamental y armónicas
Nodos PV	$P_j = \text{Re} \left(\mathbf{v}_j^{(1)} \left(\sum_{k=1}^n \mathbf{y}_{jk}^{(1)} \mathbf{v}_k^{(1)} \right)^* \right)$ $ \mathbf{v}_j = \sqrt{\sum_{h=1,2,\dots} (\mathbf{v}_j^{(h)})^2}$	$P_j = \sum_{h=1,2,\dots} \text{Re} \left(\mathbf{v}_j^{(h)} \left(\sum_{k=1}^n \mathbf{y}_{jk}^{(h)} \mathbf{v}_k^{(h)} \right)^* \right)$ $ \mathbf{v}_j = \sqrt{\sum_{h=1,2,\dots} (\mathbf{v}_j^{(h)})^2}$
Nodos PQ	$\mathbf{S}_j = \mathbf{v}_j^{(1)} \left(\sum_{k=1}^n \mathbf{y}_{jk}^{(1)} \mathbf{v}_k^{(1)} \right)^*$	$\mathbf{S}_j = \sum_{h=1,2,\dots} \left(\mathbf{v}_j^{(h)} \left(\sum_{k=1}^n \mathbf{y}_{jk}^{(h)} \mathbf{v}_k^{(h)} \right)^* \right)$
Nodo de referencia	$ \mathbf{v}_1 = \sqrt{\sum_{h=1,2,\dots} (\mathbf{v}_1^{(h)})^2}$	
Balance de corrientes en nodos con cargas lineales	$\mathbf{y}_{j0}^{(h)} \mathbf{v}_j^{(h)} + \sum_{k=1}^n \mathbf{y}_{jk}^{(h)} \mathbf{v}_k^{(h)} = 0$	
Balance de corrientes en nodos con cargas no lineales	$\sum_{k=1}^n \mathbf{y}_{jk}^{(h)} \mathbf{v}_k^{(h)} = \mathbf{i}_j^{(h)}$	
Ecuaciones de las cargas no lineales	$\mathbf{i}_j^{(h)} = f_h(\mathbf{v}_j^{(1)}, \mathbf{v}_j^{(2)}, \dots, \mathbf{v}_{dc,j}, i_{dc,j}, \beta_j)$	
Relación de cargas PQ con admitancias de nodo a tierra	$\mathbf{y}_{j0}^{(h)} = \mathbf{g}_j(P_j, Q_j, \dots, h)$	

CONSIDERACIONES SOBRE MODELO DE CARGA

Los métodos de análisis varían en gran parte por como se modelan cargas no lineales.

Los modelos dinámicos son necesarios en sistemas con niveles de distorsión elevados o suministros no balanceados, aunque para la mayoría de los estudios una modelación por fuentes de corrientes es suficiente.

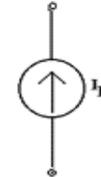
Bibliografía propone clasificar y tratar a las fuentes de distorsión según lo siguiente:

- **Con electrónica de potencia:** Son poco sensibles a la tensión siendo bien representados por fuentes de corrientes, con o sin consideraciones sobre la fase. Presentan dependencia del balance y se recomienda modelos más detallados para grandes potencias (HVDC y SVC) en transmisión.
- **Con características tensión-corriente no lineal de origen (iluminación de descarga gaseosas, hornos de arco y transformadores saturados):** Provocan corrientes muy dependientes de la forma de la tensión y es recomendable usar modelo dinámicos.
- **Maquinas rotantes bajo ciertas condiciones.** Es un fenómeno complejo y no puede ser bien modelado por fuentes o modelos dinámicos, amén de la saturación magnética. No obstante, solo maquinas sincrónicas de polos salientes bajo suministro no balanceado son relevantes y se recomienda seguir procedimientos especiales de modelación.
- **Fuentes de alta frecuencia (balastros electrónicos o fuentes conmutadas >20 kHz):** A estas frecuencias las corrientes distorsionantes son rápidamente atenuadas. Descartando posibles resonancias, estas cargas pueden ser despreciadas.

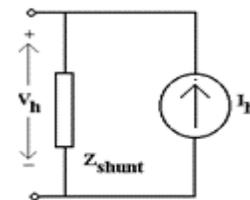
MODELO DE CARGA: TIPOS

Elegir un modelo de carga no lineal, dependerá de como éstas producen armónicos y de limitaciones relacionadas a la metodología de simulación.

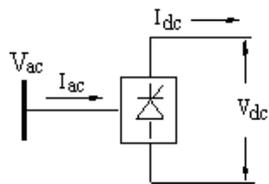
- **Modelo fuente de corriente:** Cuando hay carga dominante o para conocer el impacto de ésta. Son invariantes en el tiempo y uno de los más utilizados. Magnitud y fase pueden obtenerse de mediciones o cálculo, aunque es común no considerar la fase de la corriente o su referencia a la fundamental.



- **Modelo equivalente Norton:** Una admitancia asociada a la fuente permite considerar parte de la dependencia con la tensión armónica (p ej.: en un convertidor, la relación entre el ángulo disparo con la tensión armónica). La simulación pueden ser iterativa, convirtiendo HP en HPI con mayor precisión y convergencia que otros modelos en el tiempo.



- **Modelo de matriz de acoplamiento armónica:** Es una versión más general del modelo Norton, con una matriz que permite relacionar el bus CC con terminales AC. Muy útil para cargas electrónicas con bus CC (ADS, SVC, etc.)



$$\begin{bmatrix} I_{ac} \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ac} \\ I_{dc} \end{bmatrix}$$

Los elementos A, B, C y D son funciones que consideran estados de operación y conmutación. Pueden resolverse en el dominio del tiempo o frecuencia mediante aproximaciones sucesivas.

- **Modelo a nivel de componentes de la carga:** Representación por ecuaciones diferenciales a resolver en el dominio de tiempo. Modelo utilizado en HPI y solución temporal.

CONSIDERACIONES SOBRE EL ANGULO DE FASE

Considerar ángulos de fase de tensiones y corrientes armónicas permite:

- Evaluar flujos de armónicos a través del sistema (Identificar fuentes y sumideros).
- Estimar mejor la contribución de diferentes cargas a un mismo nodo.

En sentido estricto, los armónicos provocados por diferentes cargas en un mismo nodo, deben sumarse fasorialmente (magnitud y fases). Los armónicos pueden cancelarse parcial o totalmente o en el peor de los casos sumarse con la misma fase.

La suma fasorial es muy importante para rectificadores controlados, donde diferentes ángulos de disparo y condiciones de operación provocan armónicos con desplazamiento de fase variable.

Esto puede ser más simple para rectificadores no controlados con carga capacitiva (fuentes conmutadas), donde las corrientes tienen fases fijas respecto de la tensión.

Soluciones a adoptar:

- Suma aritmética (caso mas conservador) o Suma fasorial si se dispone de fases.

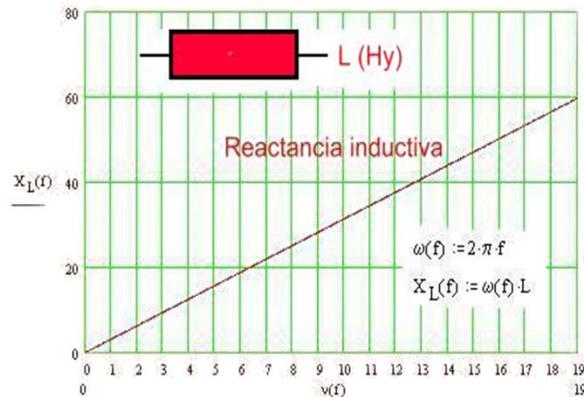
Para rectificadores controlados:

- Aproximación determinística, cuando el proceso tecnológico al cual están asociados las carga es bien conocido y pueden estimarse ángulos de disparo y fases.
- Aproximación estadística. Aunque deben plantearse hipótesis de simultaneidad y condiciones de operación, verificando la no ocurrencia de situaciones muy inusuales que escapan a al estadística.

DEPENDENCIA DE R y L CON LA FRECUENCIA

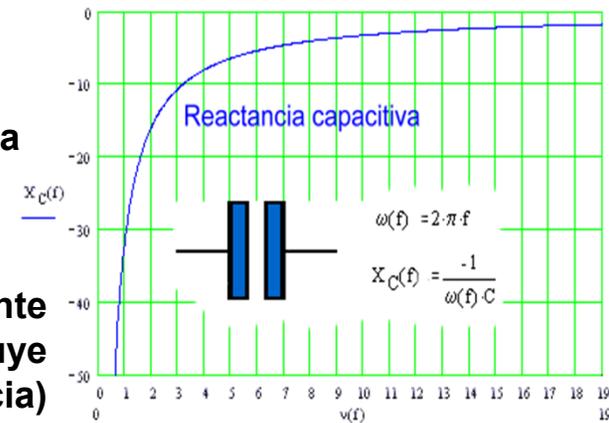
En estudios armónicos y de transitorios, se deben considerar los efectos de la frecuencia en los elementos. Componentes resistivos e inductivos por los que fluyen corrientes armónicas presentan magnitudes diferentes según la frecuencia.

X_L y X_C varían con la frecuencia:



X_L : Aumenta proporcionalmente con la frecuencia

X_C : Inversamente proporcional (Disminuye con la frecuencia)

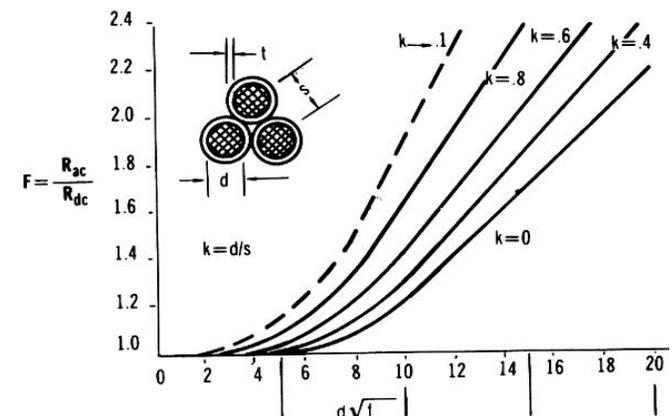


Además debe considerarse:

Efecto "skin": La densidad de corriente es diferente en el centro que en la periferia, para distintas frecuencias.

Efecto "proximidad": densidad de corriente cambia por campo magnético cercano.

Por estos efectos la resistencia efectiva aumenta y la inductancia disminuye en relación a la frecuencia.



DEPENDENCIA DE R y L CON LA FRECUENCIA (Cont.)

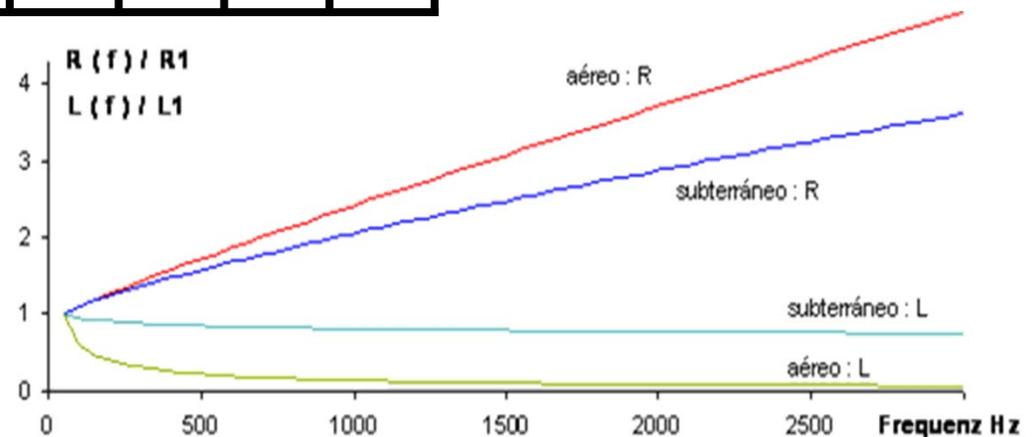
Los efectos están presentes en conductores, transformadores, motores, generador, etc. y pueden describirse por las siguientes expresiones.

Equipamiento	Datos	Rango 50 Hz a los 5 kHz			
		AR	BR	AL	BL
Generador	10,5 kV, 1750 kVA	0,5	1,2	1	-0,1
Generador	21 kV, 825 MVA	0,1	0,9	1	-0,03
Transformador	20/04 kV, 250 kVA	1,2	1,5	1	-0,03
Transformador	108/10,5kV, 40 MVA	0,2	1,4	1	-0,02
Línea aérea	20 kV	0,1	0,8	1	-0,07
Cable subterráneo	20 kV, 3x1x70	0,1	0,9	1	-0,65
Cable subterráneo	110 kV, 3x1x240	0,1	0,9	1	-0,25
Máq. de inducción	6 kV, 400 kW	0,2	1,6	1	-0,02

$$R(f) = R_1 \left(1 + AR \left(\frac{f}{f_1} - 1 \right)^{BR} \right)$$

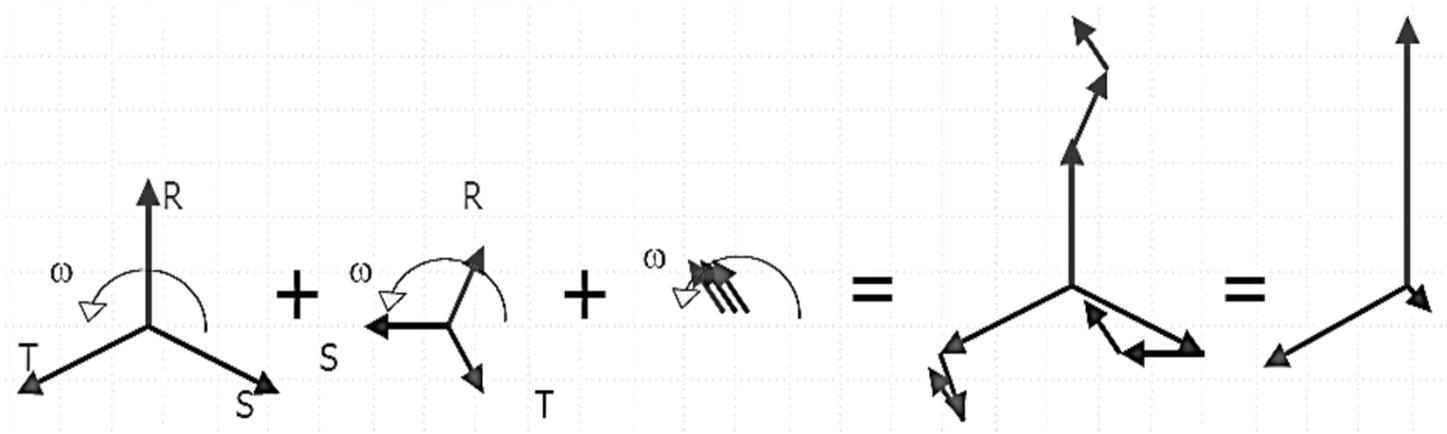
$$L(f) = L_1 AL \left(\frac{f}{f_1} \right)^{BL}$$

Variación de R y L con la frecuencia para líneas aéreas y cables de 20 kV.



REPRESENTACIÓN EN COMPONENTES SIMÉTRICAS

Permiten estudiar la red como tres sistemas monofásicos independientes. Un sistema desbalanceado es correctamente representado a través de la suma de las componentes, siendo posible extender esta técnica para el análisis de armónicas.



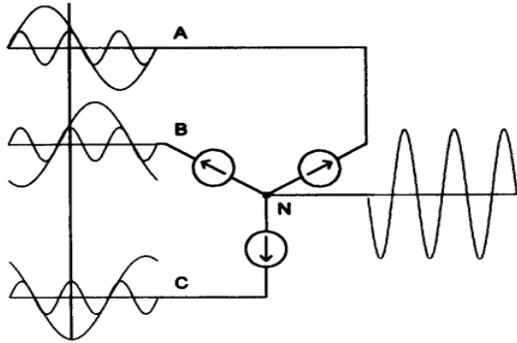
Para analizar un sistema distorsionado, es necesario extender el análisis a las frecuencias que las cargas provocan: las armónicas serán ternas de fasores que giran h veces más rápido, y que representan las tensiones o corrientes para cada frecuencia.

$$v_{an} = V_1 \cos(\omega t) + V_3 \cos(3\omega t) + V_5 \cos(5\omega t) + \dots$$

$$v_{bn} = V_1 \cos(\omega t - 2\pi/3) + V_3 \cos 3(\omega t - 2\pi/3) + V_5 \cos 5(\omega t - 2\pi/3) + \dots$$

$$v_{cn} = V_1 \cos(\omega t + 2\pi/3) + V_3 \cos 3(\omega t + 2\pi/3) + V_5 \cos 5(\omega t + 2\pi/3) + \dots$$

REPRESENTACIÓN EN COMPONENTES SIMÉTRICAS



$$v_{an} = V_1 \cos(\omega t) + V_3 \cos(3\omega t) + V_5 \cos(5\omega t) + \dots$$

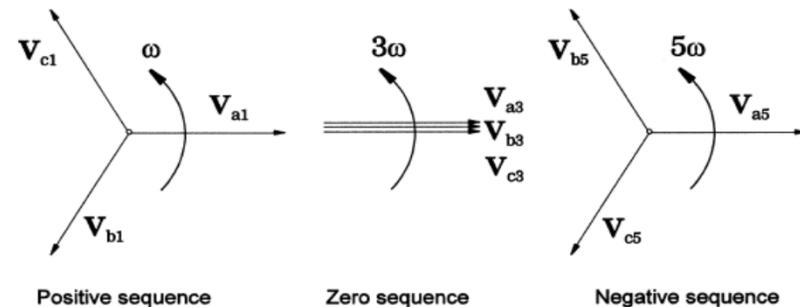
$$v_{bn} = V_1 \cos(\omega t - 2\pi/3) + V_3 \cos(3\omega t) + V_5 \cos(5\omega t + 2\pi/3) + \dots$$

$$v_{cn} = V_1 \cos(\omega t + 2\pi/3) + V_3 \cos(3\omega t) + V_5 \cos(5\omega t - 2\pi/3) + \dots$$

En condición balanceada los sistemas para las armónicas están compuestos por una de las secuencias, siendo posible clasificar a los armónicos según la secuencia que los describe.

Orden del armónico (k : número entero)	Componente simétrica
3, 6, 9, 12, ..., $3k$	Secuencia cero u homopolar
1, 4, 7, 10, 13, ..., $3k - 2$	Secuencia positiva
2, 5, 8, 11, 14, ..., $3k - 1$	Secuencia negativa

Debido a las asimetrías, las corrientes armónicas pueden estar compuestas de cualquiera de las secuencias e incluso pueden aparecer frecuencias no características.



Consideraciones especiales:

Armónicas de sec⁰ se suman aritméticamente y fluyen por el neutro o cap. transversales.

Circulación de sec⁰ a través de transformadores depende del grupo de conexión.

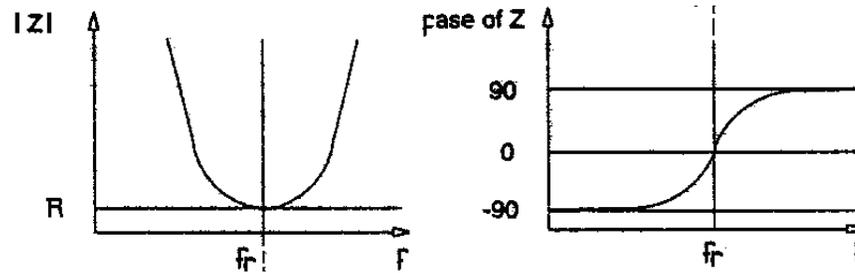
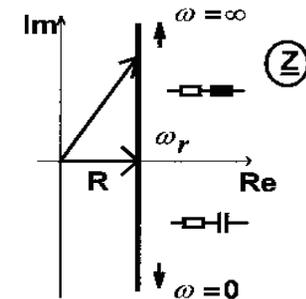
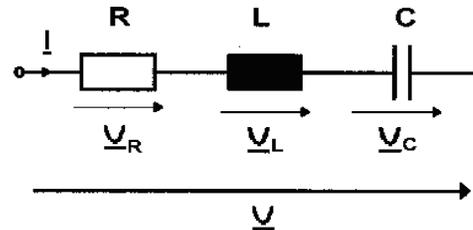
En máquinas rotantes $Z^+ \neq Z^-$ debido a pérdidas adicionales por armónicas de seq. negativa.

RESONANCIA: CIRCUITO RESONANTE SERIE

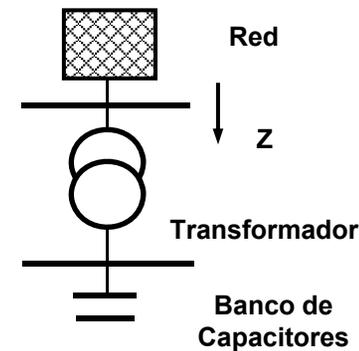
Resonancia: condición de operación en que la magnitud de la impedancia puede alcanzar valores extremos, mínimos o máximos, provocando corrientes o tensiones elevadas.

RLC en conexión serie: existe una frecuencia para la cual la reactancia inductiva es igual a la capacitiva.

$$Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = R$$



Las resonancia serie puede darse en la conexión de capacitores suministrado a través de transformadores.

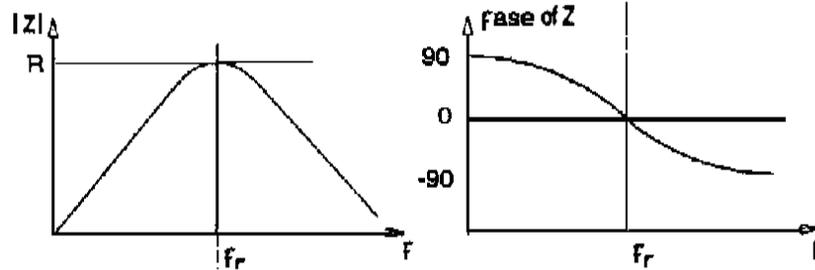
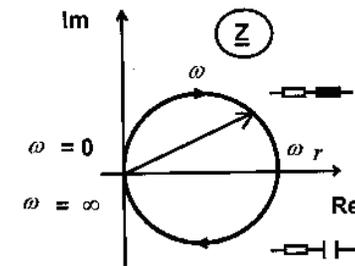
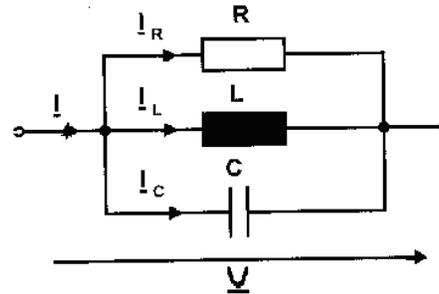


Debe prestarse especial cuidado en el diseño considerando las condiciones de operación a las cual serán sometidos.

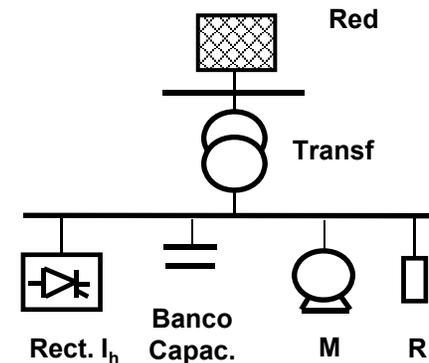
RESONANCIA: CIRCUITO RESONANTE PARALELO

RLC en conexión paralelo: existe una frecuencia para la cual la susceptancia inductiva es igual a la capacitiva.

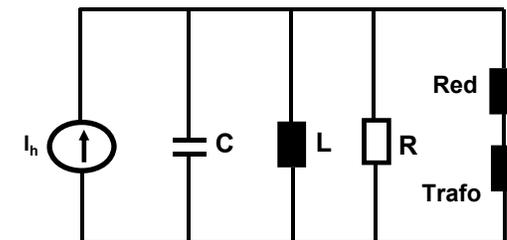
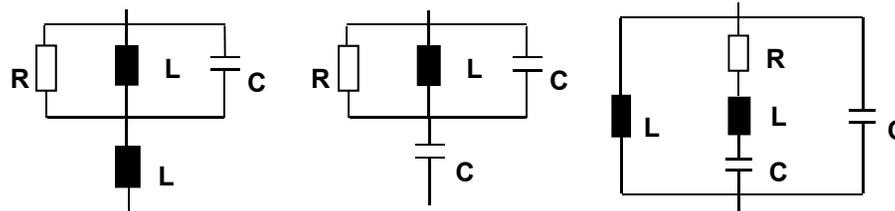
$$Y = G + j(\omega C - \frac{1}{\omega L}) = G$$



Las resonancia paralelo puede darse en la conexión de cargas a un mismo transformador.



Hay situaciones más complejas donde se producen combinaciones de ambos tipos de circuitos resonantes.

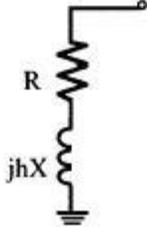
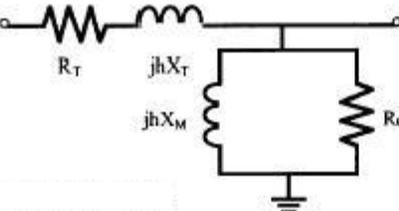
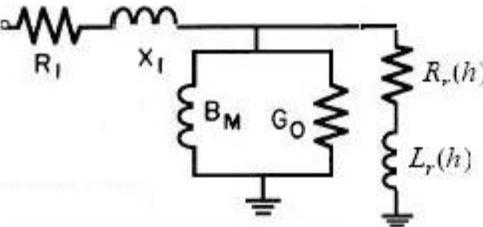


IEEE 399-1997 BROWN BOOK

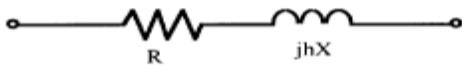
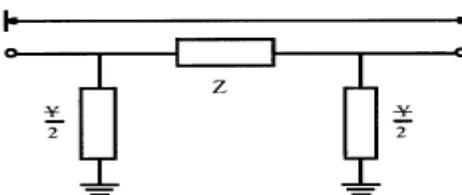
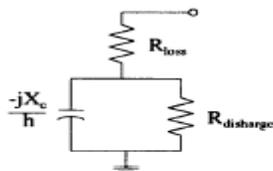
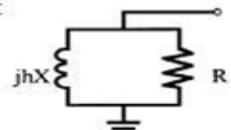
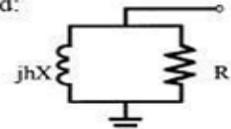
Modelos y metodologías a utilizar pueden encontrarse en :

IEEE 399-1997 Brown Book.

Para cada uno de los modelos deben estimarse parámetros que permiten ajustar estos a las condiciones de contexto de cada estudio en particular. Estas condiciones deben ser analizadas para utilizar el modelo mas adecuado y sus simplificaciones mas en cada caso.

System components	Equivalent circuit model	Model parameters
Synchronous machines		$R = R_{dc}(1 + Ah^B)$ $X = X'' \text{ or } X_2 = \frac{X''_d + X''_q}{2}$
Transformer		$R_T = R_{dc}(1 + Ah^B)$ <p>R_T and X_T are transformer rated R and X values</p>
Induction machines		$R_1 = \text{stator resistance}$ $X_1 = \text{stator inductance}$ $R_r(h) = \frac{R_{r0}}{S_h} \times (1 + CR \times S_h)$ $L_r(h) = L_{r0} \times (1 + CX \times S_h)$ <p>where $S_h \cong \frac{n \pm 1}{h}$</p> <p>“-” is applied to + sequence h “+” is applied to - sequence h $S_h = 1$ for zero sequence h</p>

IEEE 399-1997 BROWN BOOK

System components	Equivalent circuit model	Model parameters
Line and cable	<p>Short line and cable:</p>  <p>Long line (equivalent Pi):</p> 	$M = 0.001585 \sqrt{\frac{f}{R_{dc}}}$ <p> f = frequency (Hz) R_{dc} = dc resistance (Ω/m) l = length in meters $R = R_{dc} (0.035 M^2 + 0.938)$, $M < 2.4$ $R = R_{dc} (0.35 M^2 + 0.3)$, $M \geq 2.4$ $z = r + jx_L$ (Ω/m) $y = g + jb_C$ (S/m) </p> $Z_C = \sqrt{\frac{z}{y}}; \gamma_e = \sqrt{zy}$ $Z = Z_C \sinh(\gamma_e l)$ $\frac{Y}{2} = \frac{1}{Z_C} \tanh\left(\frac{\gamma_e l}{2}\right)$
Shunt capacitor		
Load	<p>Static load:</p>  <p>Motor load:</p> 	$R = \frac{V^2}{P} \quad X = \frac{V^2}{Q}$ $R = \frac{V^2}{P} \quad X = \frac{V^2}{Q}$