

2 MEDIDAS DE CORRIENTE ALTERNA

En este segundo capítulo del curso veremos algunos conceptos básicos al respecto de la corriente alterna monofásica. Los detalles de la alimentación trifásica quedan fuera del alcance de este curso. También recordaremos la definición de la capacidad eléctrica, la inductancia y la impedancia.

Los puntos a ser tratados son:

- Valores representativos de la corriente alterna.
- Medidas de corriente alterna con multímetro.
- Medidas de corriente alterna con osciloscopio.
- Concepto de impedancia y ángulo de fase.

En este capítulo se trata la corriente alterna o AC, los instrumentos que miden AC están pensados para medir valores eficaces. Muchas veces el instrumento asume que se trata de una alterna sinusoidal.

2.1 Distribución de energía eléctrica en Uruguay.

En este capítulo cuando nos referimos a corriente alterna, estamos pensando en distribución de corriente eléctrica. En Uruguay el suministro eléctrico es realizado por la Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (**UTE**). La misma se realiza a frecuencia de 50 Hz en distintas modalidades dependiendo de la escala de aplicación.

Suministro en baja tensión:

- Monofásica, 230 V
- Trifásica, 380 V
- Trifásica, 400 V

A grandes consumidores, la red puede suministrar en media tensión 6.3 kV, 15 kV y 31.5 kV y cuenta con anillos de alta tensión en 63 kV, 150 kV y 500 kV. [[Notas Instalaciones Eléctricas - Tipos de Suministro y Enlaces](#)]

Vemos dos grandes tipos de distribución: Monofásica y Trifásica. La monofásica se utiliza en instalaciones domiciliarias y pequeñas industrias, mientras que la trifásica se utiliza cuando la potencia a suministrar es grande o son necesarios motores eficientes.

A nivel de la red, la distribución siempre es trifásica. Para la monofásica, dependiendo del caso, la UTE suministra dos fases (neutro aislado y no distribuido - IT) o una fase y neutro (neutro aterrado y distribuido - TT). La doble letra indica la conexión del Neutro y de la Tierra de la instalación.

El neutro de la red y la puesta a tierra tienen importancia a la hora de evaluar las protecciones en el caso de fallos. La siguiente figura 2.1 muestra los esquemas neutro IT y TT.

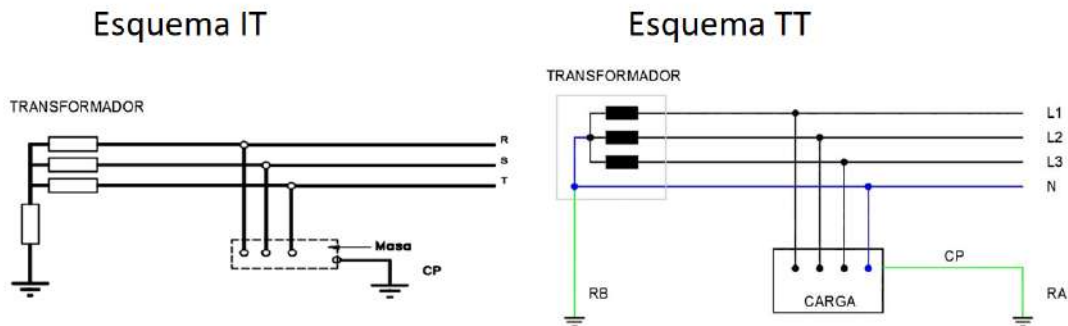


Figura 2.1 Esquemas de conexión a tierra

2.2 Principales parámetros de la Corriente Alterna monofásica.

La tensión disponible en una instalación de baja tensión es normalmente 230 V - 50 Hz. Esto significa que el voltaje de red es sinusoidal, con período $T = 20$ ms y con un voltaje de pico de 325 V. La figura 2.2 muestra el voltaje de red.

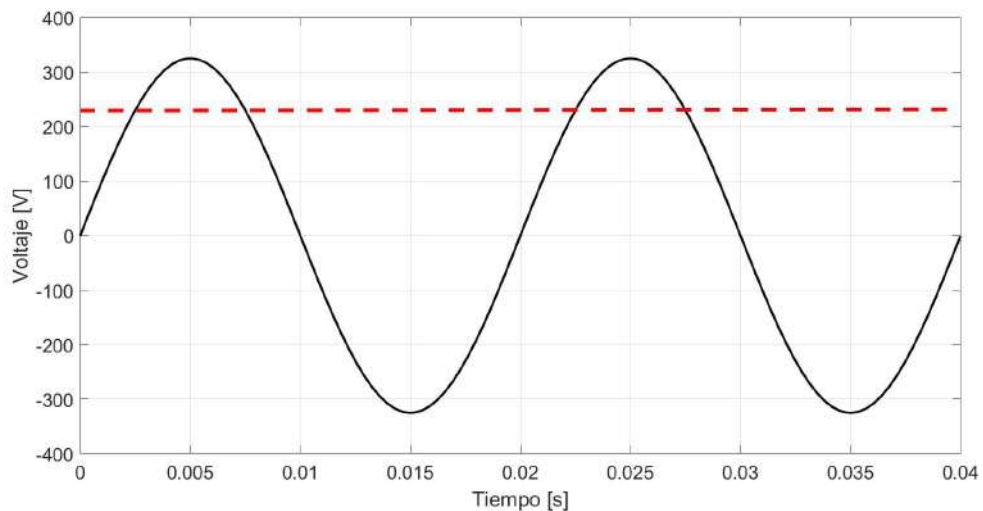


Figura 2.2 Voltaje alterno sinusoidal. La línea roja indica el valor eficaz.

La expresión analítica de este voltaje es:

$$v(t) = 325 \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) \quad \text{Ec 2.1}$$

Donde el voltaje se expresa en voltios, y el tiempo en segundos. Como vemos aquí en la expresión analítica aparece el llamado voltaje de pico $V_p = 325$ V. Sin embargo estamos familiarizados con que el voltaje de la red es 230 V. Esto es porque siempre damos el valor eficaz de una señal alterna como descriptiva de la misma. Si no se especifica otra cosa, el valor de una señal alterna es su valor eficaz.

Definición de valor eficaz o Root Mean Square (RMS)

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Para el caso de una señal sinusoidal, el valor eficaz es:

$$V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Definiciones análogas aplican para la corriente.

Esta situación ideal, en la que la forma de onda es una senoide pura, puede verse afectada en la práctica por la presencia de cargas no lineales. Esto produce una distorsión en la forma de onda de la señal generando armónicos de la componente fundamental.

Supongamos una señal periódica no sinusoidal de periodo fundamental T_0 . Dicha señal puede descomponerse en serie de Fourier de la forma

$$i(t) = I_m + \sum_1^{\infty} A_k \cos(\omega_k t) + B_k \sin(\omega_k t) \quad \text{Ec. 2.3}$$

Con

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$
$$A_k = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos(\omega_k t) dt$$
$$B_k = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \text{sen}(\omega_k t) dt$$

A partir de la definición de valor eficaz puede calcularse el valor eficaz de una función periódica en función de sus armónicos. Para el armónico k el valor eficaz es

$$I_{eff,k} = \sqrt{\frac{A_k^2 + B_k^2}{2}} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Mientras que para la señal completa tenemos

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{I_m^2 + \sum \frac{A_k^2 + B_k^2}{2}} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Para caracterizar el contenido de armónicos de una señal se definen algunos indicadores prácticos como el factor de cresta F_{cresta} , el factor de forma F_{forma} y la distorsión armónica HD .

$$F_{cresta} = \frac{I_{pico}}{I_{eff}} \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$F_{forma} = \frac{I_{eff}}{I_{aav}} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde I_{aav} es el promedio del valor absoluto de la corriente. Estas definiciones son válidas para una tensión y una señal genérica. Para el caso de una senoide pura

$$F_{cresta} = \frac{I_{pico}}{\frac{I_{pico}}{\sqrt{2}}} = \sqrt{2}$$

$$F_{forma} = \frac{\frac{I_{pico}}{\sqrt{2}}}{\frac{2I_{pico}}{\pi}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$$

Otra medida de cuánto se aparta una señal eléctrica de una senoide pura es la Distorsión Armónica (**HD**). La distorsión armónica puede definirse para un armónico en particular

$$HD_k = \frac{I_{eff,k}}{I_{eff,1}} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Note que el primer término ($k = 1$) es la componente fundamental de la onda. La distorsión armónica total se define como el cociente entre la potencia de los armónicos y la potencia de la componente fundamental.

$$THD = 100 \sqrt{\sum_2^{\infty} HD_k^2} \quad \text{Ec. 2.9}$$

La THD se expresa en %, cargas fuertemente no lineales como las afectadas por fuentes conmutadas tienen una distorsión mayor al 100%.

2.3 Medidas de AC con un instrumento analógico .

Hay diversos instrumentos analógicos que miden corriente y voltaje en AC. Los más comunes son los de Hierro Móvil y de Imán Permanente. Para realizar una medida de alterna con este tipo de instrumentos, debe utilizarse un rectificador y obtener la medida del valor eficaz a partir del valor medio. Las escalas ya están graduadas tomando en cuenta este factor, por lo que si la onda a medir es sinusoidal miden el valor eficaz. La siguiente figura muestra un instrumento de imán permanente AC.



Figura 2.3 Voltímetro AC de Imán Permanente y Bobina Móvil

En los tableros industriales y voltajes o corrientes altas suelen utilizarse los instrumentos de Hierro Móvil. Estos instrumentos son robustos y se caracterizan por una escala no lineal como se muestra en la figura 2.4.



Figura 2.4 Voltímetro AC de Hierro Móvil.

2.4 Medidas de AC con un instrumento digital .

En los instrumentos digitales tenemos dos clases diferentes, los instrumentos que miden el valor eficaz asumiendo que se trata de una senoide y los que miden el verdadero valor eficaz TRUE RMS.

Los multímetros de bajo costo generalmente miden valor eficaz asumiendo una señal sinusoidal. La corriente puede medirse intercalando el amperímetro en la línea o utilizando un lazo inductivo. Las pinzas amperimétricas y los transformadores de corriente implementan este tipo de conexión. La siguiente figura 2.4 muestra un instrumento de tablero para la medida de tensión y corriente alterna. Este instrumento asume sinusoides y tiene un transformador para la medida de corriente.



Figura 2.4 Instrumento de tablero para la medida de CA. Note que el amperímetro tiene asociado un transformador de corriente.

Para la selección de los instrumentos debe tener cuenta:

- 1) Que el instrumento sea apto para el rango de medida deseado. Como criterio puede utilizar que el fondo de escala sea 25% mayor que el valor nominal que desea medir.
- 2) La apreciación e incertidumbres sean suficientes para su aplicación (valen las notas del capítulo 1)
- 3) La categoría de la red eléctrica que desea medir.

Categorías de redes eléctricas asociadas a la aislación de instrumentos:

La norma IEC 61010 ([International Electrotechnical Commission](#)) establece cuatro categorías de redes eléctricas desde el punto de vista de la seguridad que deben cumplir los instrumentos que se usen en ellas **CAT I**, **CAT II**, **CAT III** y **CAT IV**. Esta clasificación es válida para **redes de baja tensión hasta 1000 V**.

Un instrumento CAT IV quiere decir que es apto para utilizar en una red CAT IV. A su vez, las categorías tienen subdivisiones dependiendo del máximo voltaje de operación de la red. De esta forma, puede tenerse una red CAT II - 600 V u otra CAT II 1000 V. [La figura 2.5 da una idea intuitiva de donde encontrar las diferentes categorías en una instalación eléctrica.](#)

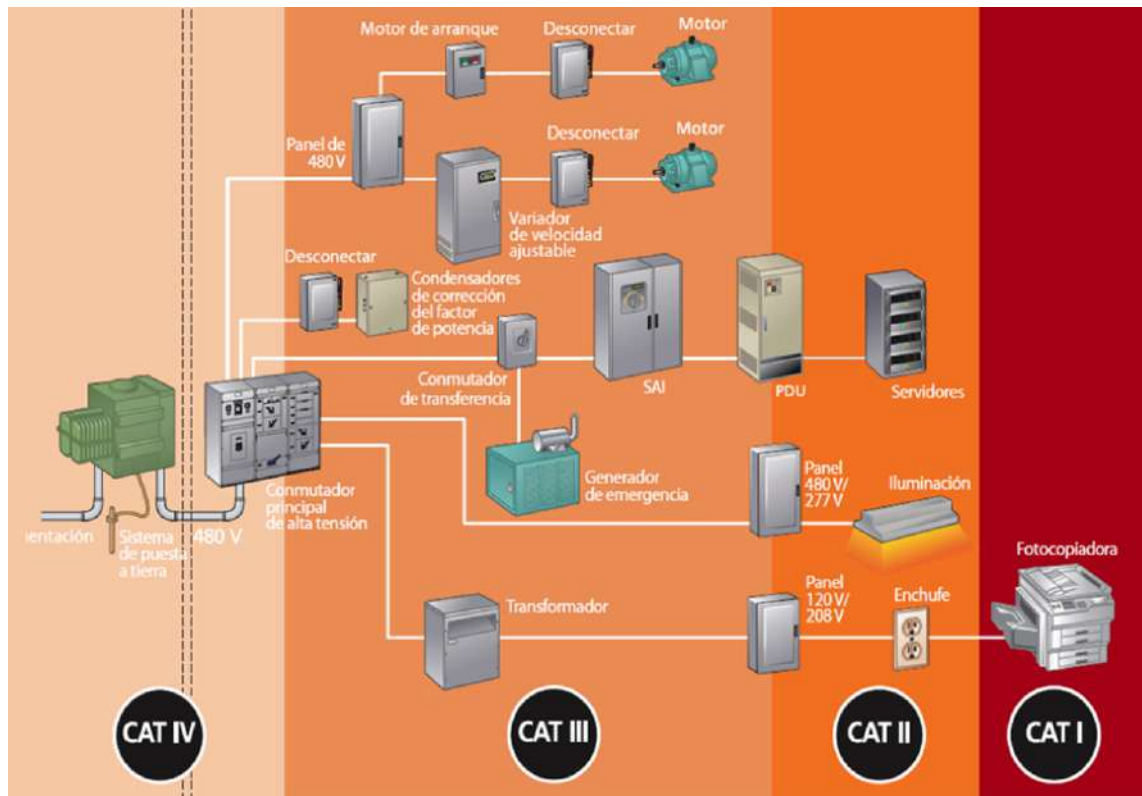


Figura 2.5 Categorías de redes eléctricas

Hay cuatro parámetros que caracterizan una red:

Tensión máxima de operación: el voltaje eficaz de trabajo de la red debe ser menor que este valor.

Tensión transitoria máxima: es el voltaje transitorio máximo que se espera en una falla de la red. Por ejemplo frente a la caída de un rayo o a un fallo en una máquina.

Corriente máxima de operación: Es la corriente de operación máxima de la red.

Corriente transitoria máxima: Es la corriente máxima en un fallo transitorio.

Muchas veces en lugar de dar las corrientes se da el valor de la resistencia de la fuente de ensayo R_e . Esto es simplemente, si un generador tiene un voltaje V entonces la corriente será V/R_e . [Esto es válido para el régimen y para los valores transitorios.](#)

CAT I	Dispositivos electrónicos	Cualquier dispositivo, desde una placa de circuito pequeña hasta un dispositivo más grande con alto voltaje pero baja potencia
CAT II	Cargas de CA monofásicas	Aparatos o herramientas portátiles
CAT III	Sistemas de distribución trifásica	Algunos sistemas de iluminación de edificios grandes y motores polifásicos
CAT IV	Conexiones a servicios públicos trifásicos o conductores al aire libre	Multímetros, conexiones exteriores, cualquier conexión de bajo voltaje y alta energía

Categoría de medida	Voltajes de trabajo	Voltajes transitorio	Fuente de prueba (impedancia)	Corriente de trabajo	Corriente transitoria
CAT I	150 V	800 V	30 ohmios	5 A	26.6 A
CAT I	300 V	1500 V	30 ohmios	10 A	50 A
CAT I	600 V	2500 V	30 ohmios	20 A	83.3 A
CAT I	1000 V	4000 V	30 ohmios	33.3 A	133.3 A
CAT II	150 V	1500 V	12 ohmios	12.5 A	125 A
CAT II	300 V	2500 V	12 ohmios	25 A	208.3 A
CAT II	600 V	4000 V	12 ohmios	50 A	333.3 A
CAT II	1000 V	6000 V	12 ohmios	83.3 A	500 A
CAT III	150 V	2500 V	2 ohmios	75 A	1250 A
CAT III	300 V	4000 V	2 ohmios	150 A	2000 A
CAT III	600 V	6000 V	2 ohmios	300 A	3000 A
CAT III	1000 V	8000 V	2 ohmios	500 A	4000 A
CAT IV	150 V	4000 V	2 ohmios	75 A	2000 A
CAT IV	300 V	6000 V	2 ohmios	150 A	3000 A
CAT IV	600 V	8000 V	2 ohmios	300 A	4000 A
CAT IV	1000 V	12000 V	2 ohmios	500 A	6000 A

Los instrumentos digitales de calidad informa la categoría de red a la cual pueden utilizarse. Por ejemplo la figura 2.6 muestra los terminales de conexión de un multímetro FLUKE 179. En este caso la suelen tener en su carcasa y en las puntas de prueba del instrumento.

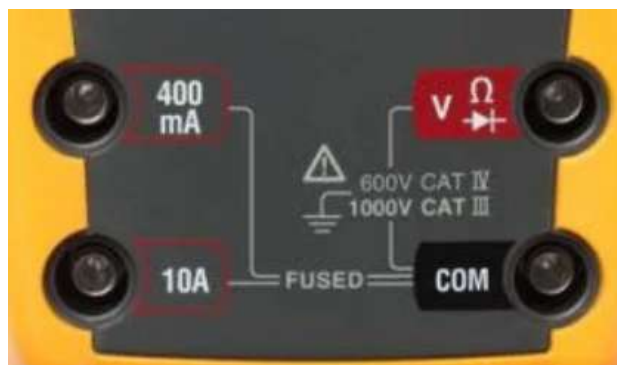


Figura 2.6 Terminales del FLUKE 179

Note que el instrumento es apto para 600 V en CAT IV y para 1000 en CAT III.

2.5 Medidas de AC con osciloscopio.

Para la visualización de la forma de onda de la corriente alterna suele utilizarse un osciloscopio. A nivel de campo tenemos dos tipos, los osciloscopios de mano, como el mostrado en la figura 2.7 y los osciloscopios de banco como el mostrado en la figura 2.8.



Figura 2.7 Osciloscopio de mano FLUKE 199

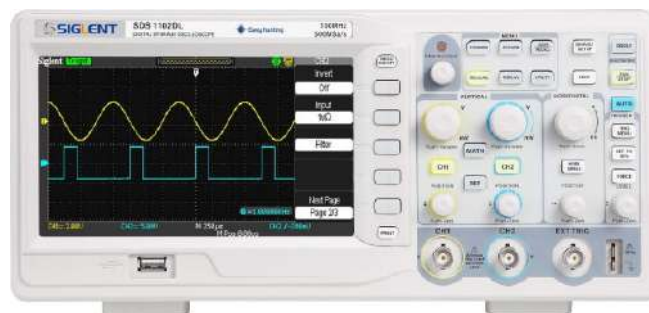


Figura 2.8 Osciloscopio de banco Siglent SDS 1102DL

Generalmente los osciloscopios nos permiten visualizar dos formas de ondas simultáneas (existen versiones de más canales) ajustando la posición y la escala vertical en forma independiente. Sus entradas son de voltaje, si queremos visualizar corriente debemos tener una punta de prueba que convierta de corriente a voltaje.

En la vertical se visualiza la amplitud en voltios, un mando del osciloscopio fija los VOL/DIV (voltios por división) de cada canal en forma independiente. Se cuenta con un control de nivel que permite subir o bajar la señal en la pantalla.

En la horizontal tenemos el eje del tiempo, en este caso el mando es común a todos los canales y permite fijar TIM/DIV (tiempo por división) de la pantalla. Se cuenta con un mando común a las dos señales para desplazarlas a la derecha o izquierda.

Para poder visualizar una señal estable en la pantalla hay que elegir una manera de comenzar la adquisición para que sea siempre igual. Esto se logra con el control del TRIGGER. Hay básicamente cuatro modos de disparar la adquisición de la señal:

NORM Este modo determina el inicio por nivel de voltaje y pendiente. Se puede elegir cuál señal se utilizará [CH1, CH2]

AUTO Es igual al NORM, pero si pasado un tiempo no se completa la condición de disparo se genera una adquisición sin sincronismo.

LINE El modo line es especialmente útil cuando trabajamos con señales de la red eléctrica. Genera un disparo sincrónico con la red de UTE.

EXT El disparo se recibe de una señal auxiliar que se introduce al osciloscopio. Es útil cuando tenemos un generador conocido.

Los osciloscopios modernos permiten realizar diversas medidas sobre la pantalla, voltajes de pico, eficaz, transformada de fourier, etc. Poseen también cursores para la mejor identificación de puntos notables de la señal.

Algo que debe prestar especial atención si trabaja con voltajes altos, por ejemplo 230 V, es el uso de puntas atenuadoras para reducir el voltaje a niveles medibles por el osciloscopio. Usualmente estas puntas dividen el voltaje por diez.

2.6 Impedancia eléctrica y ángulo de fase

Los circuitos llamados pasivos están formados por resistencias, bobinas y condensadores. Las resistencias disipan energía en forma de calor mientras que las bobinas almacenan energía en un campo magnético y los condensadores almacenan energía en un campo eléctrico. Los conceptos básicos sobre estos componentes se ven en el curso de Física III.

Cada uno de estos elementos tiene una relación básica entre la corriente y la tensión en sus bornes:

$$v = R \cdot i \quad \text{Ec 2.9}$$

$$v = L \frac{di}{dt} \quad \text{Ec 2.10}$$

$$v = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + v(0) \quad \text{Ec 2.11}$$

Cuando aplicamos una tensión alterna tipo

$$v(t) = \frac{V_{eff}}{\sqrt{2}} \cos(\omega t)$$

La relación entre la corriente y la tensión

$$V_{eff} = R \cdot I_{eff}$$

$$V_{eff} = j \cdot \omega \cdot L \cdot I_{eff} = X_L \cdot I_{eff}$$

$$V_{eff} = \frac{1}{j\omega C} \cdot I_{eff} = X_C \cdot I_{eff}$$

Las X_L y X_C son las reactancias capacitiva e inductiva respectivamente. Estas reactancias junto con las resistencias forman lo que se llama impedancia eléctrica. La impedancia puede pensarse como una “resistencia” a la corriente alterna. Sin embargo no solo cambia la intensidad de la corriente, al ser un número complejo también cambia su fase.

2.6.1 Diagrama de fasores

Existe una forma práctica de representar la corriente, la tensión y la impedancia en un circuito con resistencias, bobinas y condensadores. Se trata del diagrama de fasores o diagrama fasorial. En el representamos la impedancia de cada uno de los tres componentes en el plano complejo:

$$Z_R = R$$

$$Z_L = j X_L = j\omega L$$

$$Z_C = -j X_C = \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z = R + jX_L - jX_C$$

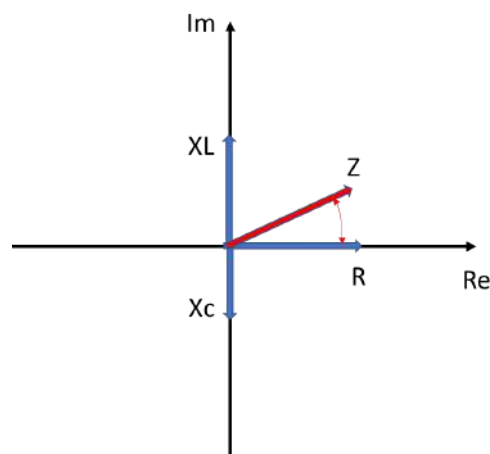


Figura 2.9 Diagrama de Impedancias

Note que la impedancia es un número complejo cuyo módulo representa cuánto disminuye el módulo de la corriente y su fase cuanto desfasa la corriente respecto a la tensión

$$V_{eff} = |Z| \cdot I_{eff}$$

Ángulo de I es - ángulo de Z