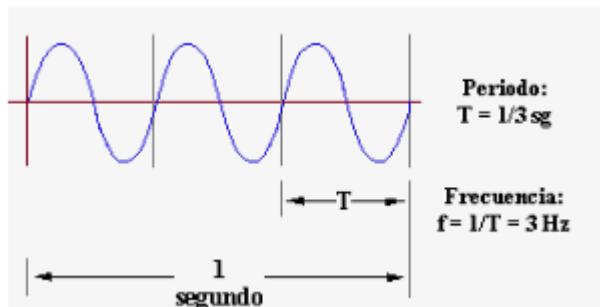


### 3.- El Circuito Telefónico.

#### Conceptos Fundamentales de los circuitos eléctricos.

En un circuito eléctrico alimentado por un generador de señales en corriente alterna, sus valores de tensión y de corriente presentan infinitos valores positivos y negativos que pueden representarse en forma de una onda sinusoidal.

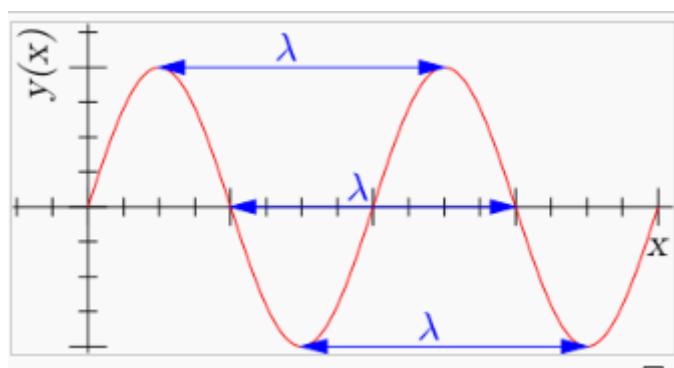
Los parámetros de una onda sinusoidal son el período, la frecuencia, y la longitud de onda.



El período ( $T$ ) es el tiempo que tarda la señal en recorrer un ciclo completo, y se mide en fracciones de segundo.

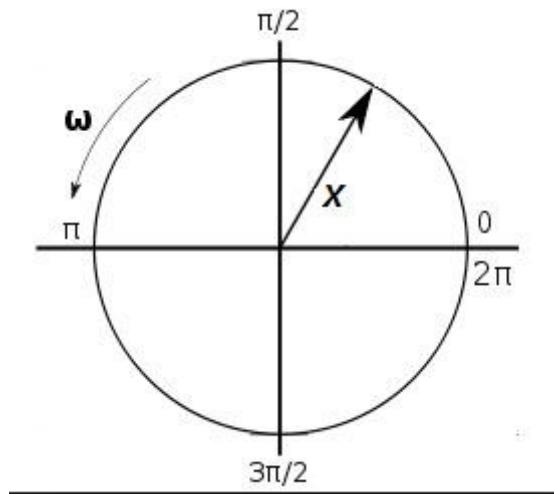
La frecuencia ( $f$ ) es la inversa del período ( $f = 1/T$ ) y es el número de ciclos que se recorren en 1 segundo. Se mide en ciclos/seg o Herzios (Hz).

La longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia entre dos crestas o valles consecutivos, esto es, lo larga que es la señal.



#### Velocidad Angular.

La velocidad angular (pulsación o frecuencia angular) es una medida de la velocidad de rotación. Se define como el ángulo girado por una unidad de tiempo y se designa mediante la letra griega  $\omega$ . Su unidad de medida es el radián por segundo. La circunferencia completa tiene  $2\pi$  radianes.



Como una **velocidad** es el **cociente** entre **espacio recorrido** y **tiempo empleado** en recorrerlo, tenemos que

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

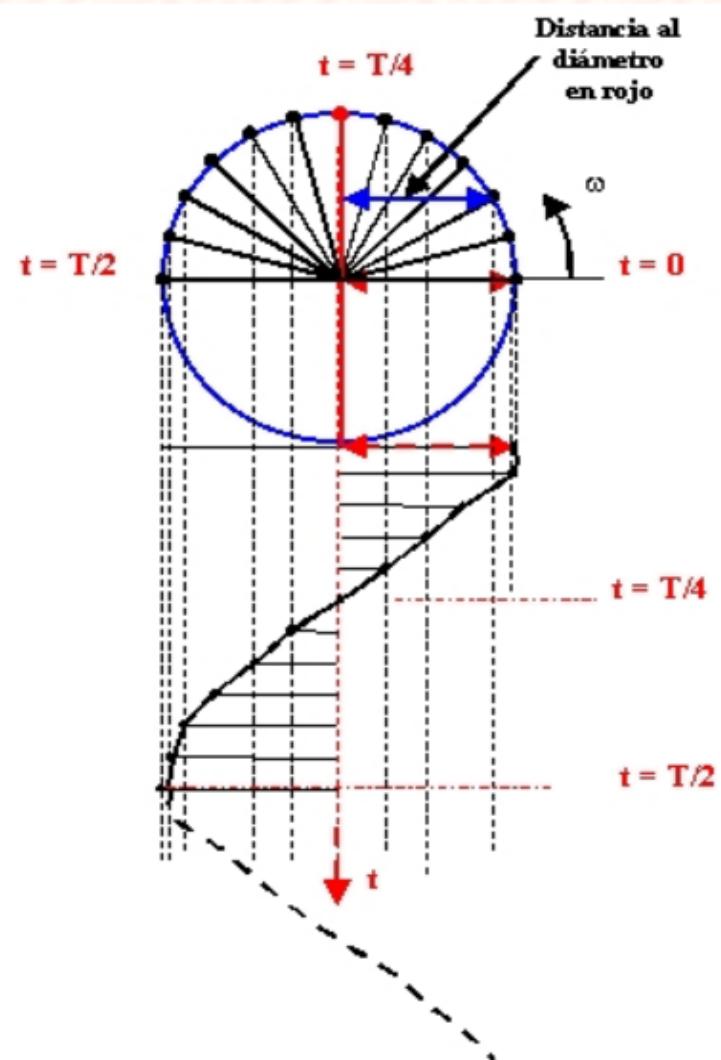
Donde  $2\pi$  es el **espacio recorrido** (la circunferencia completa) y  $T$  el **tiempo empleado** (que equivale a un período, puesto que recorrer la circunferencia equivale a recorrer un ciclo completo).

### Relación entre el movimiento sinusoidal y el rotacional.

Si consideramos cada vuelta circular completa equivalente al recorrido de un ciclo de una onda sinusoidal, tenemos que cada uno de los valores que toma la sinusoide puede también representarse como un punto equivalente en la circunferencia.

De esta forma, medio ciclo de la onda sinusoidal se corresponde con el recorrido de la mitad de la circunferencia ( $\pi$ ). Después vendrían los valores negativos de la sinusoide, que se corresponderían con la parte inferior de la circunferencia.

En conclusión, y tal como podemos apreciar en el gráfico de la siguiente figura, el **movimiento sinusoidal** puede representarse por su **modelo equivalente rotacional**, y por tanto heredar sus fórmulas.



## La Impedancia en los Circuitos Eléctricos.

En los circuitos eléctricos puede haber **elementos** que se comportan como resistencias **R**, inductancias **L** y capacitancias **C**. Al **valor conjunto de todos ellos** los denominamos **impedancia**, la cual se representa con un número complejo compuesto de parte real y parte imaginaria.

$$Z = R + j X$$

Los **elementos resistivos** constituyen la **parte real** de la impedancia, **R**, mientras que los **elementos inductivos y capacitivos** constituyen la **parte imaginaria, o reactancia, X**.

La **reactancia** de un circuito puede ser **capacitiva** cuando **X es negativa**, e **inductiva** cuando **X es positiva**. Cuando **X=0** el circuito es **resistivo puro**.

La **reactancia capacitiva**,  $X_C$  ofrece una oposición al paso de la corriente eléctrica.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Esta oposición es mayor para frecuencias bajas, y menor para frecuencias altas.

La **reactancia inductiva**,  $X_L$  también ofrece oposición al paso de la corriente eléctrica.

$$X_L = 2\pi f L$$

Esta oposición es menor para frecuencias bajas, y mayor para frecuencias altas.

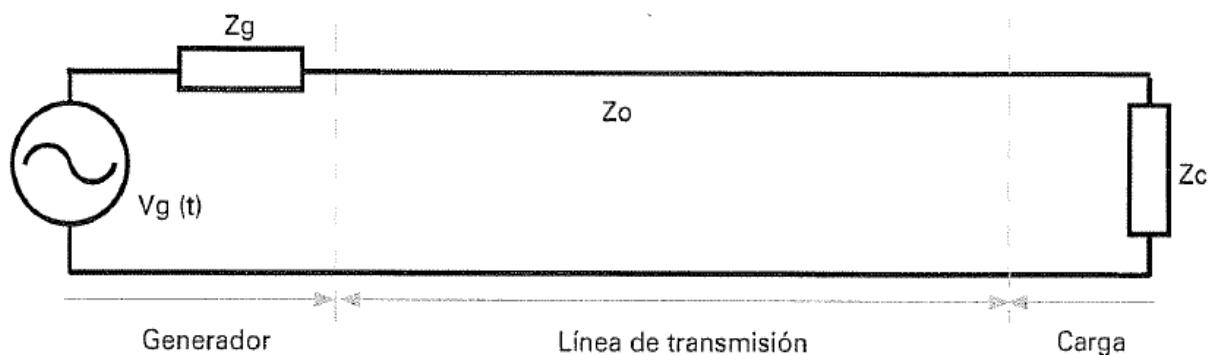
## El Circuito Telefónico.

Un circuito telefónico **se comporta igual que un circuito eléctrico** formado por un **generador** que **produce señales alternas** de ciertas frecuencias, y una **carga** que las recibe, y que está situada a cierta distancia.

Ambos están unidos entre si por una **línea de transmisión** que se encarga de transportar las señales desde el generador hasta la carga.

**La línea de transmisión** consiste en un conductor que puede tener formato de cable de par trenzado, cable coaxial, fibra óptica, o medio inalámbrico.

El circuito de la siguiente figura se compone de un generador de señal con una impedancia  $Z_g$ , y de una carga cuya impedancia es  $Z_c$ . Esta carga recibe la potencia transmitida por la línea de transmisión.



La señal que se transmite es **alterna** y se compone de la **suma de diferentes señales con frecuencias comprendidas** dentro de la banda de 300 a 3400 Hz.

$Z_g$  es la **impedancia** del circuito generador de señales, que en el caso del sistema telefónico **es la suma de todos sus elementos**: la **resistencia** del micrófono, los devanados de la bobina de inducción, etc. Lo mismo sucede con la **impedancia  $Z_c$** .

Todos estos elementos no presentan un comportamiento meramente **resistivo**, sino que **también intervienen las inductancias y capacitancias** de los elementos, siendo estas **muy dependientes de la frecuencia** de las señales.

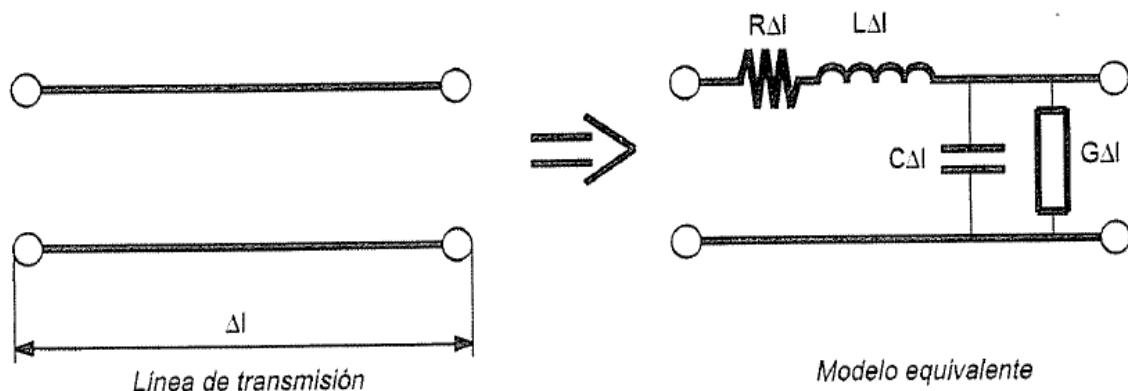
Por lo tanto, ambas impedancias **tendrán un componente real** y un componente **complejo**, en la siguiente forma:

$$Z = R + j X$$

El **circuito** anterior **viene definido** por **dos tipos de parámetros**: los **parámetros primarios**, que pueden medirse en la propia línea, y los **parámetros secundarios**, que se generan como consecuencia de los primarios.

## Parámetros Primarios.

Si consideramos un trozo de línea de transmisión compuesto por conductores de cierta longitud, éste se comporta como un circuito en el que tenemos una **resistencia**  $R$  en serie con la línea, una **capacidad**  $C$  en paralelo, una **autoinducción**  $L$  en serie, y una **conductancia**  $G$  en paralelo. Todas ellas dependen de la longitud de la línea, multiplicando su valor por dicha longitud.



Estos parámetros pueden medirse directamente en un tramo de línea de 1 kilómetro, en cuyo caso tenemos:

- **Resistencia kilométrica.** Es la resistencia presente en 1 Km de línea. Se mide cortocircuitando la línea en un extremo y midiendo la resistencia del bucle formado.
- **Capacidad y Autoinducción kilométrica.** Corresponden a 1 kilómetro de línea, y se miden directamente en circuito abierto. La inductancia es consecuencia del hecho de que por todo conductor por el que circula una corriente variable tiene asociada una inductancia. Por otra parte, la línea está formada por varios conductores separados por un aislante o dieléctrico, y por tanto se comporta como un condensador, cuya capacidad depende del área de los conductores, de su separación, y de la constante dieléctrica del material que los separa.
- **Conductancia kilométrica.** Es la que corresponde a 1 Km de línea. Se mide con la línea en circuito abierto, y su valor es el inverso de la resistencia de aislamiento, esto es, de la resistencia entre ambos hilos conductores. Como el aislamiento entre conductores no es perfecto, y su resistividad es finita, de modo que una parte de la corriente se "fuga" de un conductor al otro, produciendo pérdidas por atenuación.

Los parámetros más perjudiciales para la línea son la resistencia y la conductancia, ya que son responsables de las pérdidas de potencia de las señales transportadas por la línea. Por lo tanto, para minimizar al máximo estas pérdidas, los valores de  $R$  y  $G$  deben ser lo menor posible.

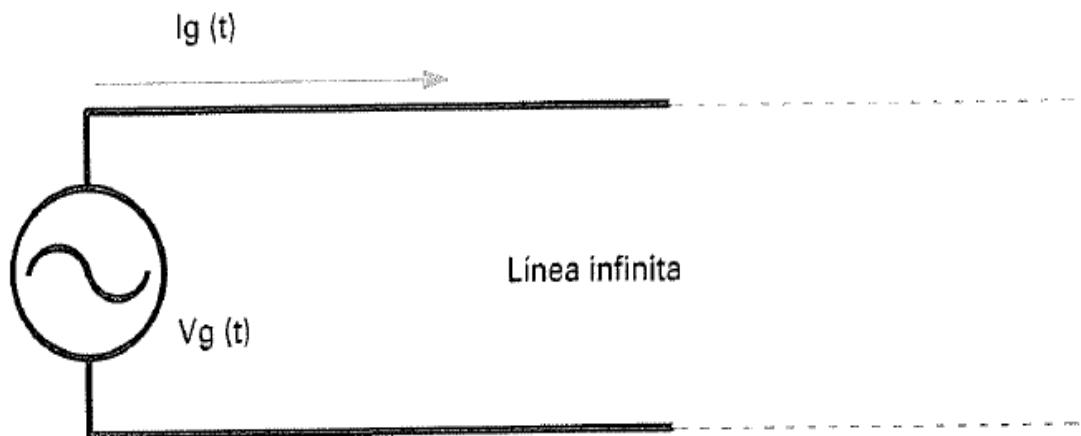
Se denomina **conductancia** eléctrica a la facilidad que ofrece un material al paso de la corriente eléctrica, es decir, que la conductancia es la propiedad inversa de la resistencia eléctrica. Se mide en siemens.

## Parámetros Secundarios.

Son dos: La **impedancia característica**, y la **Constante de Propagación**.

### Impedancia Característica.

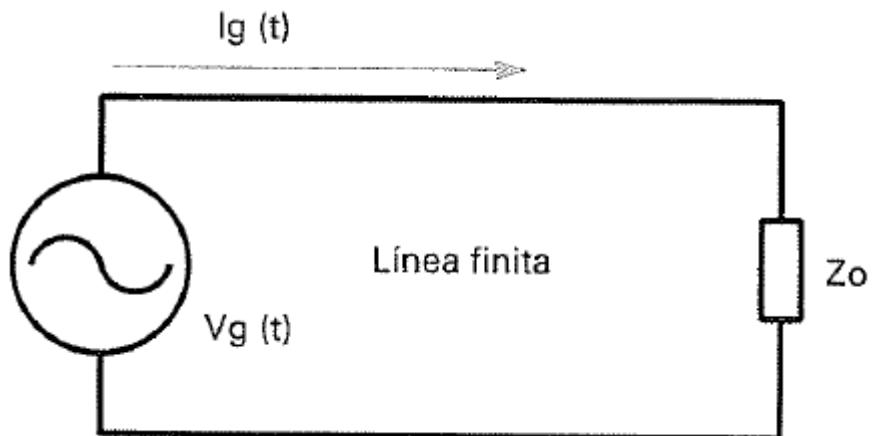
Se denomina  $Z_0$  y es la impedancia que presenta una línea de longitud infinita en uno de sus extremos.



Su valor se calcula como:

$$Z_0 = \frac{V_g(t)}{I_g(t)}$$

Si sustituimos la línea por su impedancia característica  $Z_0$ , el generador no notaría la diferencia.



La **impedancia característica** depende de los parámetros primarios mediante la siguiente fórmula:

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

Donde R, L, G, y C son las constantes kilométricas de la señal, y  $\omega$  es la velocidad angular que puede calcularse como:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Siendo f la frecuencia de la señal.

En la fórmula de la impedancia característica observamos que ésta contiene una parte real y una parte compleja que varía con  $\omega$ .

Esta parte compleja se debe a los elementos capacitivos e inductivos de la línea, siendo positiva si prevalece la parte inductiva, y negativa si prevalece la parte capacitiva. Esto hace que la impedancia dependa de las frecuencias de las señales a transmitir, lo cual debe evitarse, para que la fórmula de la impedancia sólo tenga parte real.

De esta forma, la impedancia sólo tendría un componente resistivo que no dependería de las frecuencias de las señales que se transmiten.

Para que esto se cumpla, debe cumplirse lo que se denomina **condición de HEAVISIDE**, que establece la siguiente relación:

$$\frac{R}{G} = \frac{L}{C}$$

Así, la fórmula de la impedancia característica quedaría así:

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{L\left(\frac{R}{L} + j\omega\right)}{C\left(\frac{G}{C} + j\omega\right)}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \sqrt{\frac{\frac{R}{L} + j\omega}{\frac{G}{C} + j\omega}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Si la frecuencia es suficientemente alta como para que se cumpla que  $R \ll \omega L$  y  $G \ll \omega C$ , tenemos que aproximadamente, la impedancia es igual a

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

## Constante de Propagación.

Esta constante tiene dos componentes: el parámetro  $\beta$ , que es la **constante de fase**, y el parámetro  $\alpha$ , que es la **constante de atenuación**. Estos parámetros causan dos tipos de distorsión diferentes en las señales a transmitir:

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

La **constante de atenuación**  $\alpha$  indica que la amplitud de la señal disminuye a lo largo de la línea, produciendo una **distorsión de atenuación**. Esta atenuación se puede calcular con la fórmula:

$$A = 8.69 \alpha l \text{ (dB)}$$

La **constante de fase**  $B$  indica las variaciones de la longitud de onda que experimentan las señales al recorrer la línea de transmisión.

$$B = \frac{v_p}{f}$$

Siendo  $v_p$  la velocidad de propagación de la señal en la línea, y  $f$  la frecuencia de la señal.

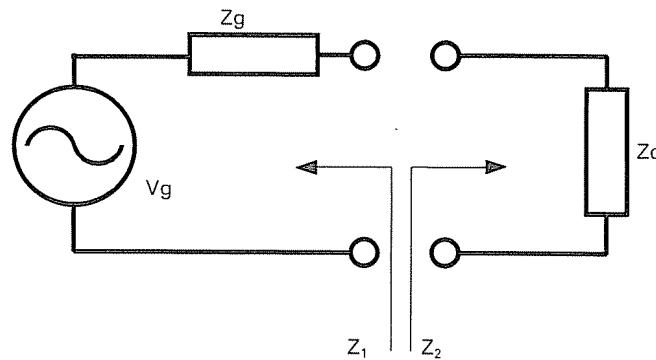
Podemos calcular el **tiempo de propagación** de la señal ( $t_p$ ) en una línea de longitud  $l$  por medio de la siguiente fórmula:

$$t_p = l \frac{\beta}{2\pi f}$$

Esto significa que si una señal es suma de varias señales sinusoidales, sus componentes emplearán tiempos distintos para recorrer la línea, lo cual se denomina **distorsión de retardo**.

## Adaptación de Impedancias.

En el circuito siguiente, tenemos dos impedancias:  $Z_1$  que es la medida hacia el generador, y  $Z_2$  que se mide hacia la carga. Podemos decir que tenemos una señal transmitida del generador a la carga, y otra señal reflejada que retorna al generador.



Esta circunstancia hace que la potencia que transmitimos a la carga se divide entre la señal realmente transmitida, y la señal reflejada, esto es, tenemos una pérdida de potencia, y la señal sufre una **atenuación**.

Estas pérdidas se denominan **pérdidas por reflexión**.

Otro aspecto perjudicial es que la señal reflejada produce inestabilidades en el circuito que se pueden cuantificar mediante el parámetro denominado **coeficiente de reflexión**, que a su vez tiene dos vertientes: coeficiente de reflexión de tensión (tensión de la señal reflejada entre la tensión de la señal transmitida) y coeficiente de reflexión de corriente (corriente de la señal reflejada entre la corriente de la señal transmitida).

$$\rho_v = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} ; \quad \rho_i = \frac{i_r}{i_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

De ambas fórmulas se deduce que si  $Z_1 = Z_2$ , tenemos que el circuito está adaptado y no tenemos reflexión de la señal.

Las pérdidas de retorno se definen como la atenuación de la señal reflejada con respecto a la señal transmitida, y se calcula según las siguientes fórmulas.

$$A_r = \frac{P_r}{P_i} = \left| \frac{Z_2 + Z_1}{Z_2 - Z_1} \right|^2$$

Si el circuito está adaptado, esto es,  $Z_1 = Z_2$ , las pérdidas de retorno son infinitas, es decir que no tendremos señal reflejada.