

MÓDULO DOS ELECTROTENIA

U.D. 5 SISTEMAS ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS

M 2 / UD 5

ÍNDICE

Introducción.....	195
Objetivos.....	197
1. Generador	199
1.1. El generador elemental de ca monofásica	199
1.2. El generador elemental de ca trifásica	199
1.3. Conexiones de los 3 arrollamientos.....	199
2. Generador trifásico – línea trifásica.....	201
2.1. Conexión generador - línea en triángulo.....	201
2.2. Conexión generador-línea en estrella	201
2.3. Cálculo de la razón estrella-triángulo	202
3. Línea: distribución. Tensiones.....	204
3.1. Distribución desde sistema triángulo.....	204
3.2. Distribución desde sistema estrella	204
3.3. Tensiones en BT.....	205
4. Utilización. Cargas trifásicas. Conexión de receptores.....	206
4.1. Carga trifásica equilibrada y desequilibrada	206
4.2. Potencia en los sistemas trifásicos	206
4.3. Receptores trifásicos	206
4.4. Otras consideraciones.....	210
Resumen	213

INTRODUCCIÓN

Toda la distribución y utilización de la energía eléctrica es trifásica. Solamente en nuestras casas tenemos siempre monofásica. Entender claramente los sistemas trifásicos y su funcionamiento es básico para cualquier técnico, no sólo por el desarrollo de su trabajo sino también por su seguridad personal.

La intuición simple de la distribución monofásica, en la que la corriente va por un hilo y vuelve por el otro, no sirve en trifásica. La circulación de corriente, el reparto de carga, el cálculo de potencias, el campo giratorio y muchos otros fenómenos pertenecen directamente al mundo de los sistemas trifásicos.

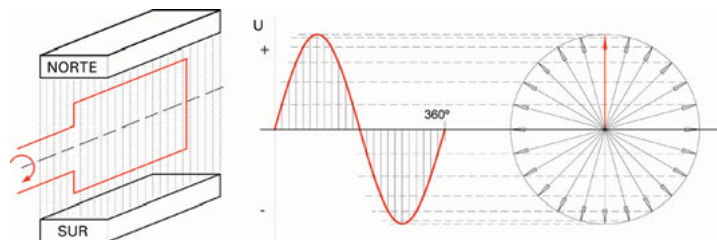
OBJETIVOS

- Entender claramente la generación de la tensión y corriente trifásicas para poder entender su aplicación.
- Conocer y distinguir los valores de línea y fase en la máquina generadora y en la distribución para poder distinguirlos siempre en la utilización.
- Conocer la conexión de motores trifásicos de inducción.

1. GENERADOR

1.1. El generador elemental de ca monofásica

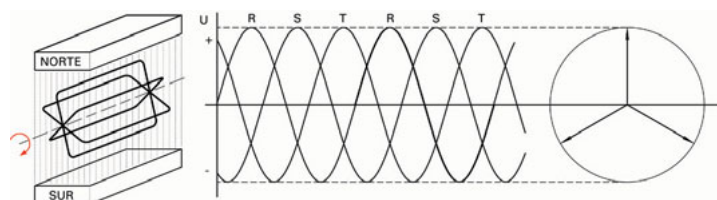
Si hacemos girar una espira conductora dentro de un campo magnético uniforme, con velocidad angular constante, de modo que el eje de giro sea perpendicular al campo, se induce en la espira una f.e.m., que toma un conjunto de valores que dependen del valor del seno del ángulo de rotación.



1.2. El generador elemental de ca trifásica

Es aquél que está formado por tres f.e.m. alternas senoidales monofásicas inducidas, de igual valor eficaz e igual frecuencia, desfasadas entre sí 120° eléctricos.

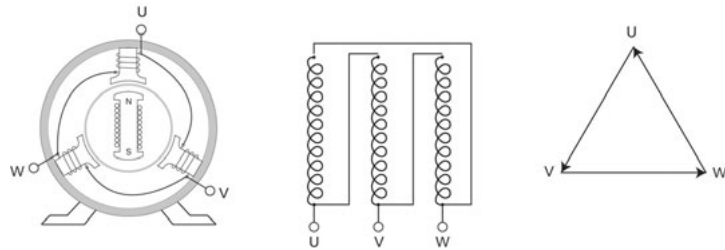
A cada una de las tensiones producidas por un generador trifásico se les denomina "fases" (porque están desfasadas unas respecto a las otras 120°) y se les designa ordinariamente con las letras «R», «S» y «T».



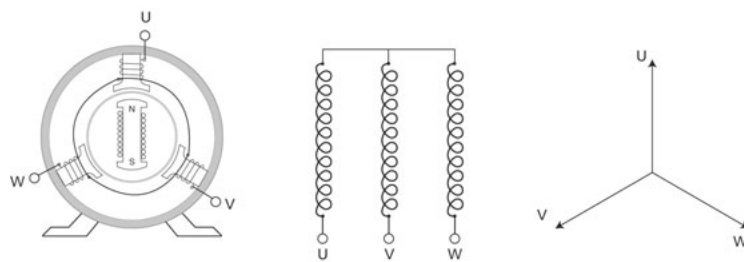
1.3. Conexiones de los tres arrollamientos

Puesto que tenemos 3 arrollamientos y 6 bornes, podemos realizar dos tipos de conexiones:

- **En triángulo:** uniendo el final de un devanado con el principio del otro y usando estos puntos como bornes de salida de la máquina. Las figuras corresponden a un alternador, un transformador (secundario) y su representación vectorial.



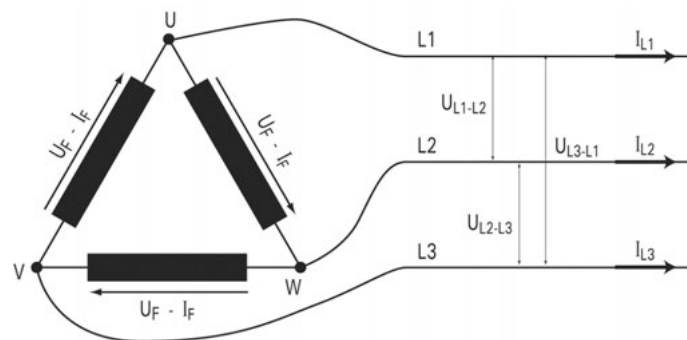
- **En estrella:** uniendo los extremos homólogos de todos los devanados y dejando libre, como borne, el otro extremo. Las figuras corresponden a un alternador, un transformador (secundario) y su representación vectorial.



2. GENERADOR TRIFÁSICO - LÍNEA TRIFÁSICA

2.1. Conexión generador – Línea en triángulo

Partimos de las bobinas de fase del generador, que generan una tensión U_F y por las que circulará, si se cierra circuito, una corriente I_F . Hay 3 bornes de salida; hay 3 hilos de línea. Unimos generador y línea.

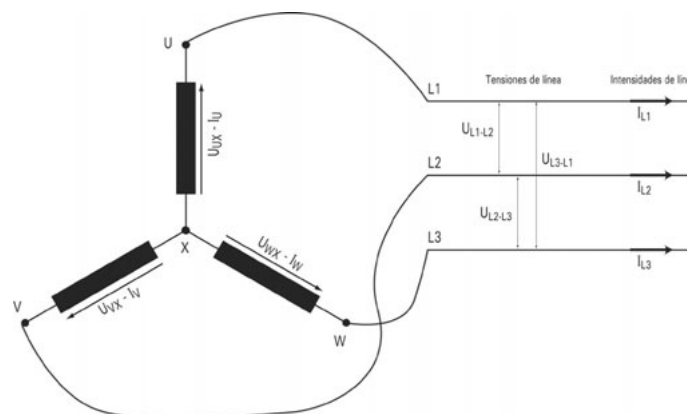


Relación entre valores de fase y línea.

- 1) Evidentemente, la tensión de línea, U_L , es igual a la tensión de fase, U_F , puesto que entre cada dos hilos hay una bobina de fase.
- 2) La relación entre valores de fase (generador) y de línea es $\sqrt{3}$ (ver apartado 2.3).

$$\begin{cases} U_L = U_F \\ I_L = I_F \cdot \sqrt{3} \end{cases}$$

2.2. Conexión generador – Línea en estrella



- 1) Evidentemente, la corriente de línea es la misma que la de las bobinas de fase, puesto que no hay ninguna otra conexión entre bobina y línea.
- 2) Las tensiones de línea son la suma vectorial de las de las fases de la máquina generadora (ver apartado 2.3).

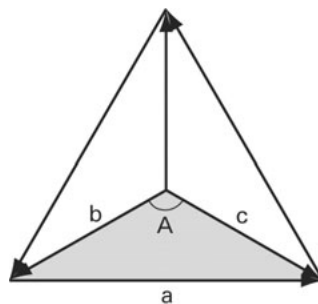
$$\boxed{\begin{array}{l} I_L = I_F \\ U_L = U_F \cdot \sqrt{3} \end{array}}$$

En la conexión estrella, aparece un 4º borne libre, X en la figura anterior, que es equidistante de los de las fases. Es el borne del conductor de neutro, N.

En el apartado de distribución se amplía su utilización.

2.3. Cálculo de la razón estrella-triángulo

La razón $\sqrt{3}$ entre los vectores de una conexión estrella y triángulo se puede calcular por el teorema de coseno, aplicándolo, por ejemplo, en el triángulo sombreado.



Enunciado del teorema del coseno:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos A$$

pero,

$$\hat{a} = 120^\circ \quad \cos \hat{a} = -1/2$$

$$b = c$$

por tanto:

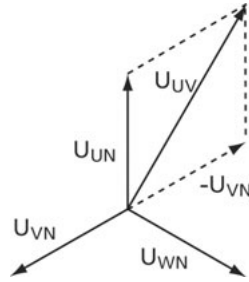
$$a^2 = b^2 + b^2 - 2 \cdot b \cdot b \cdot \left(-\frac{1}{2}\right) = 2b^2 - 2b^2 \left(-\frac{1}{2}\right) = 2b^2 + b^2 = 3b^2$$

$$\sqrt{a^2} = \sqrt{3b^2}$$

$$\boxed{a = b \sqrt{3}}$$

es decir, la razón del vector del triángulo respecto al vector de la estrella es $\sqrt{3}$.

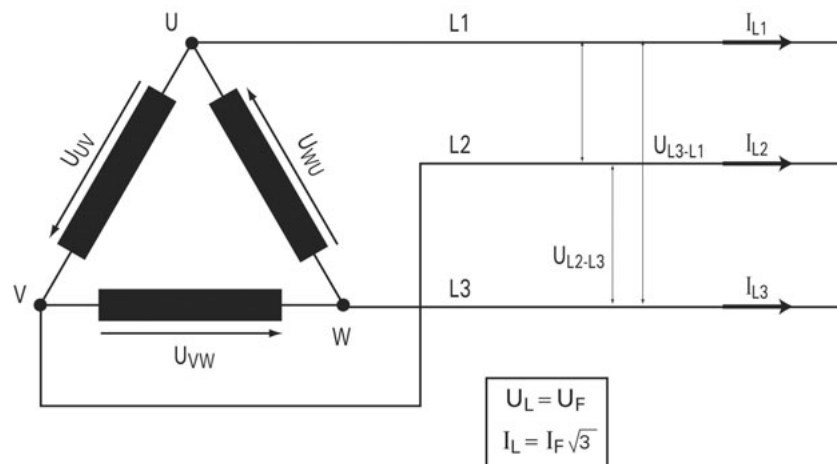
Aplicando esta relación a la conexión estrella, se tiene:



3. LÍNEA: DISTRIBUCIÓN. TENSIONES

3.1. Distribución desde sistema triángulo

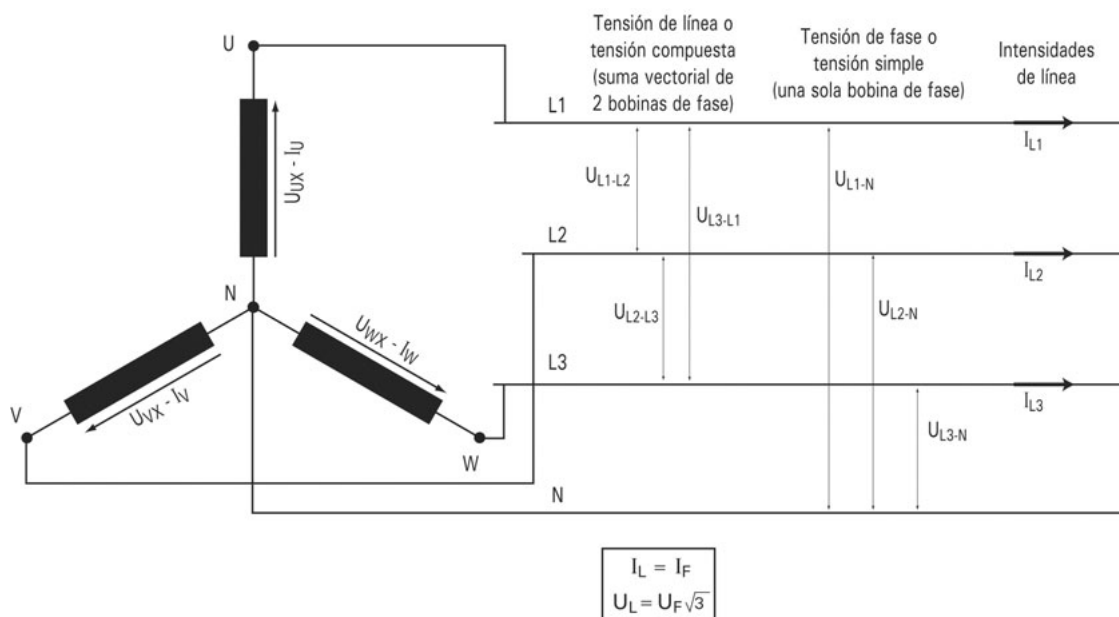
El sistema se usa en transporte (MT), pero muy poco en distribución y utilización BT.



3.2. Distribución desde sistema estrella

El sistema en estrella es el sistema normal de distribución y utilización en BT.

En él se tiene este conjunto de valores:



3.3. Tensiones en BT

El REBT y diversos Reales Decretos, establecen las siguientes tensiones:

- Tensiones usuales:

230 V entre fases con red trifásica de 3 conductores

230 V entre fase y neutro y 400 V entre fases, con red trifásica de 4 conductores.

Tolerancia en tensión: $\pm 7\%$ (RD 1955/2000. Art. 104-3).

Frecuencia: 50 Hz, $\pm 0,3\%$ (RD 1995/2000 remite a UNE 50 160).

Así tenemos:

- Distribución a 230/400 V.
- Distribución a 127/230 V; este valor tiende a desaparecer, pero aún quedan amplias zonas con estas tensiones de distribución.

4. UTILIZACIÓN. CARGAS TRIFÁSICAS. CONEXIÓN DE RECEPTORES

4.1. Carga trifásica equilibrada y desequilibrada

Se denomina sistema trifásico equilibrado o carga trifásica equilibrada la que absorbe la misma intensidad de corriente de cada una de las fases.

Por ejemplo: motores trifásicos.

Se denomina sistema trifásico desequilibrado o carga trifásica desequilibrada la que absorbe corrientes de fase no iguales; por tanto, en estrella, el neutro conduce la diferencia (vectorial). Es el caso, típicamente, de los sistemas de alumbrado y otros receptores monofásicos.

4.2. Potencia en los sistemas trifásicos

En los sistemas trifásicos, se tiene:

- Potencia activa,

$$P = \sqrt{3}U.I.\cos \varphi$$

Además, la potencia activa de un sistema trifásico es igual a la suma aritmética de las potencias activas de las tres fases.

- Potencia reactiva,

$$Q = \sqrt{3}U.I.\sen \varphi$$

Además, la potencia reactiva total es igual a la suma algebraica de las potencias reactivas de las tres fases.

- Potencia aparente,

$$S = \sqrt{3}U.I$$

4.3. Receptores trifásicos

La conexión de receptores en estrella o en triángulo tiene un aspecto muy diferente respecto a la conexión de generadores (alternadores y transformadores de distribución).

En generación y distribución, según cómo se conecten las bobinas de la máquina generadora, se suministra una u otra tensión, se tiene un sistema a 3 ó a 4 hilos y los receptores se adaptan a esa tensión.

Pero, en recepción, el receptor a conectar está hecho para trabajar a una determinada tensión. Si un receptor se alimenta a más tensión, se quema; si se alimenta a menos tensión, trabaja mal y también puede quemarse.




Por tanto, vamos a estudiar la conexión de receptores en estrella o en triángulo de receptores considerando que el receptor está adecuadamente alimentado y adaptado a la red de distribución.

Los receptores trifásicos son los que se alimentan de una red trifásica, por ejemplo, motores o transformadores trifásicos.

Estudiemos su alimentación respecto a la línea y tensiones trifásicas.

Estas máquinas, tienen 3 bobinas, iguales, que pueden conectarse en estrella o en triángulo.

Para trabajar correctamente, tienen que ser alimentadas de manera que sus devanados trabajen con una tensión U_F o, dicho más gráficamente, U_{bobina} .

MOTOR		RED	
Datos placa	U_{bobina}	230/400 V	127/230 V
230/400 V	230 V		
127/220 V	127 V	No posible (se quema)	

4.3.1. Caso 1

Conexión de una carga en estrella o en triángulo para adaptarse a distintas redes (230/400 V o 127/220 V).

Es el caso normal de la mayoría de cargas trifásicas: hay que escoger su conexión interna (en estrella o triángulo) para conectarlos adecuadamente a la red de que se dispone.

Motor de 11 kW, 230/400 V, $\cos \varphi : 0,8$.

Con red 230/400 V, conexión estrella.

Los valores U e I de la potencia, son valores de línea.

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

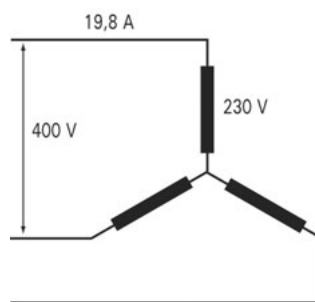
Cálculo de la corriente de línea:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,8} = 19,8 \text{ A}$$

evidentemente:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$11000 = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 19,8 \text{ A} \cdot 0,8$$



En cada bobina de fase del motor:

$$U_{\text{fase}} = 230 \text{ V}$$

$$I_{\text{fase}} = 19,8 \text{ A}$$

Con red 127/230 V, conexión triángulo

Los valores U e I de la potencia, son valores de línea.

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

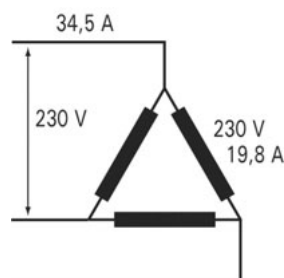
Cálculo de la corriente de línea:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 0,8} = 34,5 \text{ A}$$

evidentemente:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$11000 = \sqrt{3} \cdot 230 \text{ V} \cdot 34,5 \text{ A} \cdot 0,8$$



En cada bobina de fase del motor:

$$U_{\text{fase}} = 230 \text{ V}$$
$$I_{\text{fase}} = \frac{34,5 \text{ A}}{\sqrt{3}} = 19,9 \text{ A}$$

Conclusión: en ambos casos, la máquina da la misma potencia y en las bobinas de fase se tiene la misma tensión, corriente y potencia.

4.3.2. Caso 2

Conexión en estrella o en triángulo con una misma red.

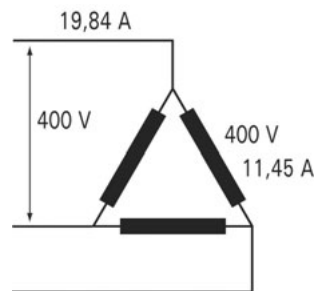
Cambio de conexión para que un receptor (motor, por ejemplo) desarrolle dos potencias diferentes (precauciones como problema real: en ningún caso, debe sobretensionarse el receptor; debe preverse, mecánica y eléctricamente, la situación de menor tensión y potencia).

Motor de 11 kW, 400/660 V, $\cos \varphi : 0,8$.

- Con red 230/400 y conexión triángulo,

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,8} = 19,84 \text{ A}$$

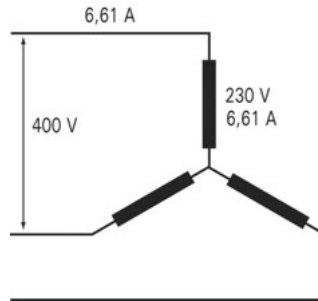


Funcionamiento normal en tensión, corriente y potencia tanto la máquina como cada fase.

- Con red 230/400 V y conexión estrella.

En estrella, la máquina debería conectarse a una red de 660 V, pero, al conectarla a sólo 400 V, la máquina está subtensionada.

Por tanto, vamos a calcular la potencia que suministra al hacerla trabajar con una red de 400 V:



$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot \frac{I}{\sqrt{3} \sqrt{3}} \cdot \cos \varphi$$

La tensión de línea es la misma, 400 V; pero la corriente de línea se divide por $\sqrt{3}$ por el cambio de conexión a estrella y otra 2ª vez porque la bobina queda subtensionada.

Por tanto, aplicando valores:

$$P_{\text{estrella}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot \frac{I}{\sqrt{3} \sqrt{3}} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \times 400 \times \frac{19,84}{\sqrt{3} \sqrt{3}} \times 0,8 = 3665,5 \text{ W}$$

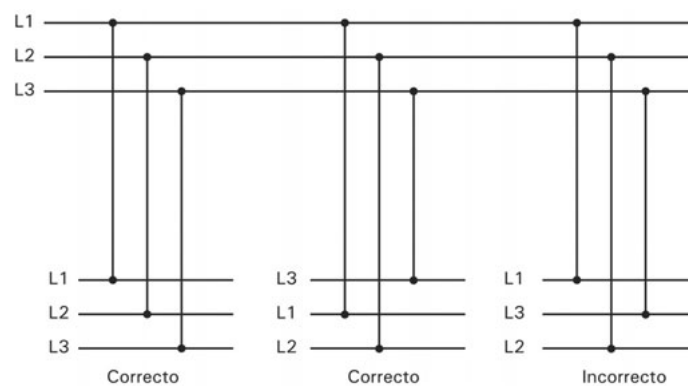
$$P_{\text{estrella}} = \frac{P_{\text{triángulo}}}{3}$$

$$3,66 \text{ kW} \approx \frac{11 \text{ kW}}{3}$$

4.4. Otras consideraciones

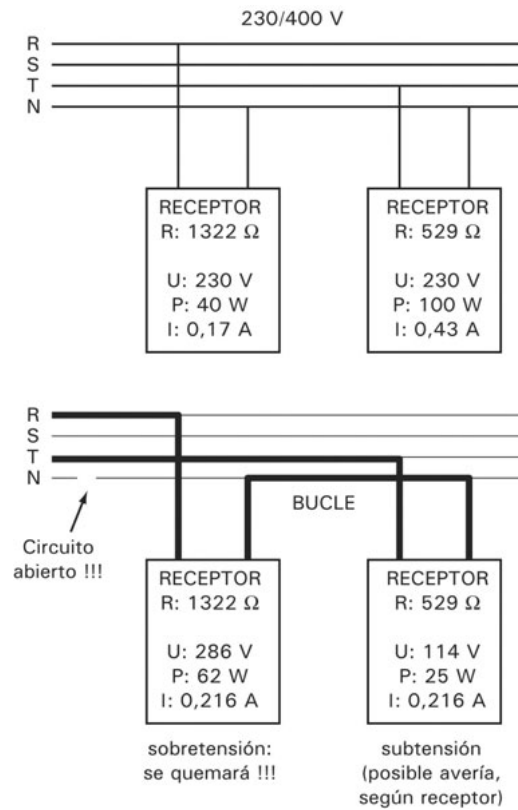
4.4.1. Secuencia de fases

En la conexión de receptores trifásicos a redes trifásicas, normalmente debe tenerse presente la secuencia de fases. Esto es crítico en motores porque provoca una inversión del sentido de giro. También puede ser crítico en algunos tipos de rectificadores.



4.4.2. Fallo de neutro

En los sistemas estrella con neutro distribuido y con receptores monofásicos, el fallo de neutro puede originar graves problemas.



4.4.3. Alimentación a 230 V desde una red 127/230 V

En las poblaciones o zonas en las que la red es todavía de 127/220 V, es frecuente que la distribución a 2 hilos, para los particulares, se haga entre fases; de esta forma los aparatos pueden ser de 230 V, porque muchos ya no existen a 127 V.

Por seguridad, esta situación debe conocerse y ser tomada en cuenta.

RESUMEN

- Los generadores trifásicos producen tres tensiones alternas senoidales de igual amplitud, desfasadas 120° .
- Si se conectan los 6 hilos de las bobinas en triángulo a una línea trifásica se tiene un sistema en el que:

$$\begin{array}{l} U_L = U_F \\ I_L = I_F \cdot \sqrt{3} \end{array}$$

- Si se conectan los 6 hilos de las bobinas en estrella a una línea trifásica se tiene un sistema en el que:

$$\begin{array}{l} I_L = I_F \\ U_L = U_F \cdot \sqrt{3} \end{array}$$

- La distribución en estrella permite utilizar un conductor neutro.
- Las cargas trifásicas pueden ser equilibradas (misma tensión en cada fase) o desequilibradas.
- Los receptores trifásicos pueden conectarse en estrella o en triángulo para adaptarse a las tensiones de la red en la que trabajan.
- En los motores, el cambio de secuencia de fases produce la inversión de sentido de giro.