

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS I

Reporte 1

INTEGRANTES

FÉLIX SUÁREZ BONILLA A45276

FECHA DE ENTREGA

JUEVES, 15 DE FEBRERO

Índice de Figuras

Figura 1. Generador trifásico conectado en estrella.....	4
Figura 2. Diagrama fasorial del voltaje línea a línea y el voltaje línea a neutro en un generador trifásico conectado en estrella.....	6
Figura 3. Carga trifásica con conectada en delta.....	6
Figura 4. Carga trifásica con conexión tipo estrella.....	7
Figura 5. Circuito trifásico con carga balanceada conectada en Y a una fuente con conexión tipo Y, con neutro.....	8
Figura 6. Circuitos monofásicos equivalentes.....	8
Figura 7. Circuito trifásico con carga desbalanceada conectada en Y a una fuente con conexión tipo Y, con neutro.....	9
Figura 8. Circuitos monofásicos equivalentes con carga desbalanceada.....	10
Figura 9. Circuito trifásico con carga desbalanceada conectada en Y a una fuente con conexión tipo Y, sin neutro.....	10
Figura 10. Circuito trifásico con carga desbalanceada conectada en delta a una fuente con conexión tipo Y, sin neutro.....	10
Figura 11. Circuito trifásico con carga balanceada conectado en delta a una fuente con conexión tipo estrella.....	11
Figura 12. Circuito trifásico con carga desbalanceada conectado en delta a una fuente con conexión tipo estrella.....	11
Figura 13. Diagrama fasorial para carga desbalanceada conectada en estrella.....	18
Figura 14. Diagrama fasorial para carga desbalanceada conectada en estrella.....	18
Figura 15. Diagrama fasorial de un circuito trifásico con carga conectada en desbalanceada estrella y sin neutro. Caso 1.....	20
Figura 16. Diagrama fasorial de un circuito trifásico con carga desbalanceada conectada en estrella y sin neutro. Caso 2.....	21
Figura 17. Diagrama fasorial de un circuito trifásico con carga balanceada conectado en delta.....	22

Índice de Tablas

Tabla 1. Carga balanceada en estrella, con neutro. (Experimental).....	14
Tabla 2. Comparación teórica-experimental de circuito con carga balanceada conectada en estrella.....	14
Tabla 3. Carga desbalanceada conectada en estrella, con neutro. (Experimental).....	15
Tabla 4. Carga desbalanceada conectada en estrella, con neutro. (Teórica)..	16
Tabla 5. Carga desbalanceada conectada en estrella, con neutro. (Porcentajes de error)	
Tabla 6. Carga desbalanceada conectada en estrella, sin neutro. (Experimental).....	18
Tabla 7. Carga desbalanceada conectada en estrella, sin neutro. (Teórico)....	18
Tabla 8. Carga desbalanceada conectada en estrella, sin neutro. (Porcentaje de Error).....	19
Tabla 9. Carga balanceada conectada en delta.....	20
Tabla 10. Carga balanceada conectada en delta. (Teórico).....	21
Tabla 11. Carga balanceada conectada en delta. (Porcentaje de error).....	21

Nota Teórica

Circuitos trifásicos

En la actualidad casi toda la generación, transmisión y utilización de potencia eléctrica se hace a través de circuitos trifásicos, esto debido a sus ventajas, tanto económicas como en su funcionamiento ^[1].

Generador trifásico

Un generador trifásico consta de tres generadores monofásicos con voltajes de igual magnitud, pero desfasados 120° una con respecto a otro. En la siguiente figura se muestra un generador trifásico conectado en estrella:

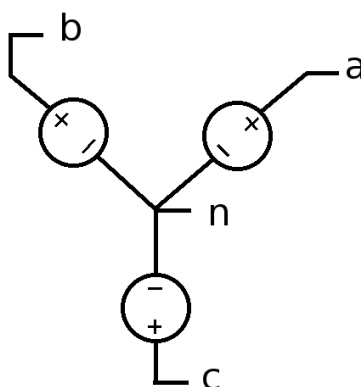


Figura 1. Generador trifásico conectado en estrella.

Los voltajes en cada fase, para una secuencia abc se listan a continuación:

$$\bar{V}_{an} = V \angle 0^\circ \quad (1,0)$$

$$\bar{V}_{bn} = V \angle -120^\circ \quad (1,1)$$

$$\bar{V}_{cn} = V \angle 120^\circ \quad (1,2)$$

A partir de estos voltajes se puede determinar el voltaje de línea a línea en un generador trifásico conectado en estrella, esto se hace usando la Ley de Voltaje de Kirchhoff.

$$\bar{V}_{ab} = \bar{V}_{an} - \bar{V}_{bn} \quad (1,3)$$

$$= V \angle 0^\circ - V \angle -120^\circ$$

$$= V - \left(-\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}jV \right)$$

$$= \frac{3}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}jV$$

$$= \sqrt{3}V \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}j \right)$$

$$= \sqrt{3}V \angle 30^\circ \quad (1,4)$$

$$\bar{V}_{ca} = \bar{V}_{cn} - \bar{V}_{an} \quad (1,5)$$

$$= V \angle 120^\circ - V \angle 0^\circ$$

$$= \left(-\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}jV \right) - V$$

$$= -\frac{3}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}jV$$

$$= \sqrt{3}V \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2}j \right)$$

$$= \sqrt{3}V \angle 150^\circ \quad (1,6)$$

$$\bar{V}_{bc} = \bar{V}_{bn} - \bar{V}_{cn} \quad (1,7)$$

$$= V \angle -120^\circ - V \angle 120^\circ$$

$$= \left(-\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}jV \right) - \left(-\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}jV \right)$$

$$= -\sqrt{3}jV$$

$$= \sqrt{3}V \angle -90^\circ \quad (1,8)$$

Entonces, la relación entre las magnitudes del voltaje de línea a línea y el voltaje línea a neutro en un generador trifásico con conexión tipo estrella es:

$$V_L = \sqrt{3} V_\phi \quad (1,9)$$

Note además que el voltaje de línea siempre adelanta en 30° al voltaje de fase. Esto se muestra en el siguiente diagrama fasorial:

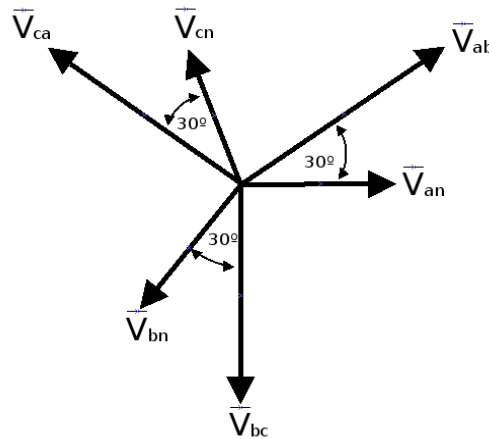


Figura 2. Diagrama fasorial del voltaje línea a línea y el voltaje línea a neutro en un generador trifásico conectado en estrella.

Carga trifásica

Cada generador y cada carga en un circuito trifásico pueden estar conectados en "Y" o en " Δ ". Las siguientes dos figuras corresponden a una carga conectada en delta (Δ) y a una carga conectada en estrella (Y).

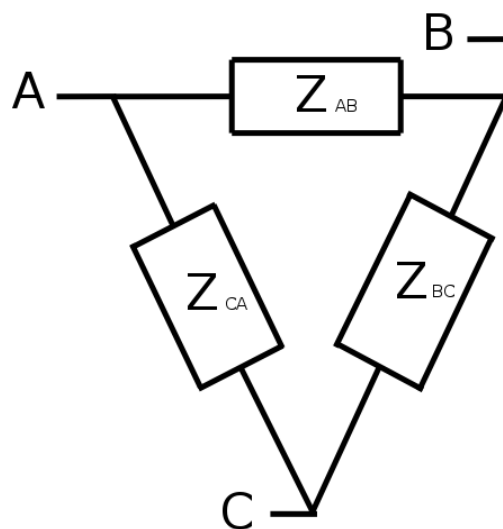


Figura 3. Carga trifásica con conectada en delta.

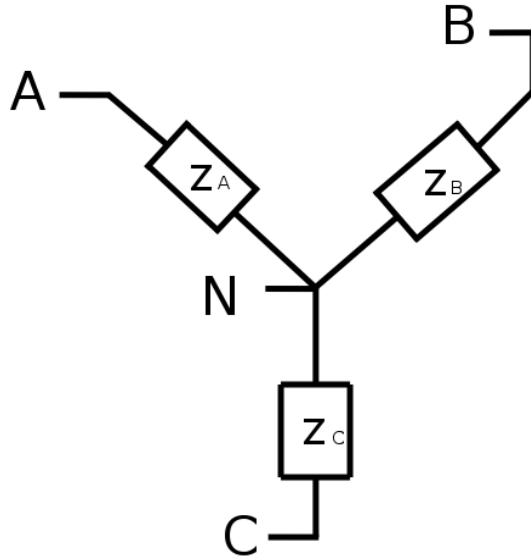


Figura 4. Carga trifásica con conexión tipo estrella.

Con el propósito de poder simplificar el análisis de un circuito trifásico se suelen hacer transformaciones de un tipo de carga a otro ^[2]. Para transformar una carga en estrella a una carga en delta se hace la siguiente transformación (Véase figura 3 y figura 4):

$$\bar{Y}_{ab} = \frac{\bar{Y}_a \bar{Y}_b}{\bar{Y}_a + \bar{Y}_b + \bar{Y}_c} \quad (2,0)$$

$$\bar{Y}_{bc} = \frac{\bar{Y}_b \bar{Y}_c}{\bar{Y}_a + \bar{Y}_b + \bar{Y}_c} \quad (2,1)$$

$$\bar{Y}_{ca} = \frac{\bar{Y}_c \bar{Y}_a}{\bar{Y}_a + \bar{Y}_b + \bar{Y}_c} \quad (2,2)$$

Para obtener la transformación de delta a estrella (Véase figura 3 y figura 4):

$$\bar{Z}_a = \frac{\bar{Z}_{ab} \bar{Z}_{ca}}{\bar{Z}_{ab} + \bar{Z}_{bc} + \bar{Z}_{ca}} \quad (2,3)$$

$$\bar{Z}_b = \frac{\bar{Z}_{bc} \bar{Z}_{ab}}{\bar{Z}_{ab} + \bar{Z}_{bc} + \bar{Z}_{ca}} \quad (2,4)$$

$$\bar{Z}_c = \frac{\bar{Z}_{ca} \bar{Z}_{bc}}{\bar{Z}_{ab} + \bar{Z}_{bc} + \bar{Z}_{ca}} \quad (2,5)$$

Tipos de conexión

Los voltajes y corrientes en cada generador monofásico se llaman cantidades de fase, y los voltajes entre las líneas, y las corrientes en las líneas se denominan cantidades de línea^[3]. La relación entre las cantidades de línea y de fase, tanto en la carga como en el generador depende del tipo conexión.

1. Carga balanceada conectada en Y con neutro.

El esquemático del circuito, se muestra a continuación.

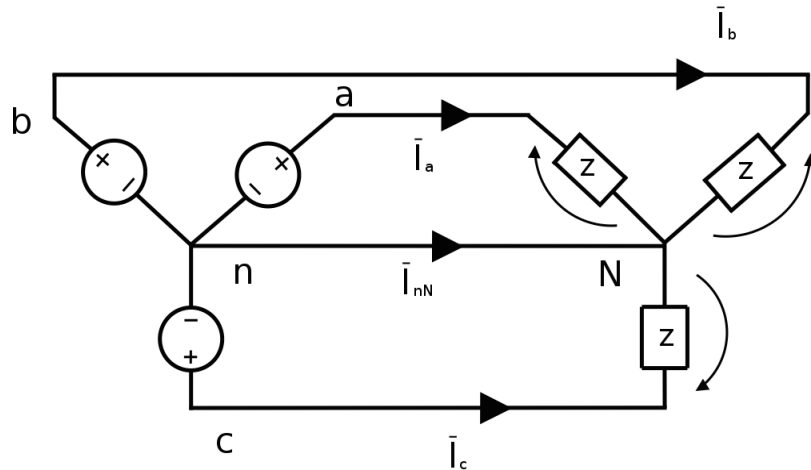


Figura 5. Circuito trifásico con carga balanceada conectada en Y a una fuente con conexión tipo Y, con neutro.

Este sistema consta de tres circuitos monofásicos idénticos (exceptuando por la diferencia de fase), estos tres circuitos se muestran en la siguiente figura:

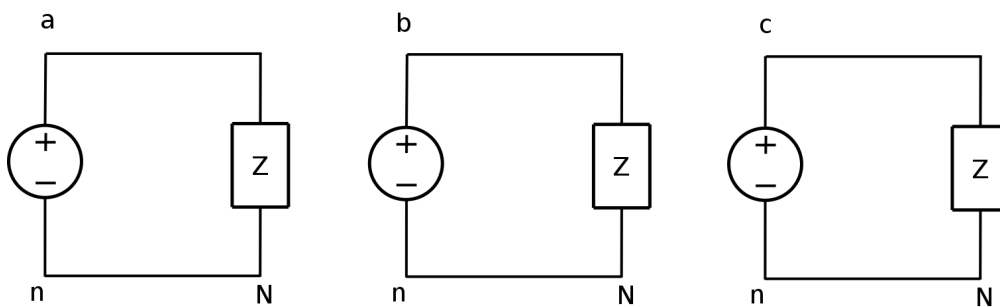


Figura 6. Circuitos monofásicos equivalentes

La Ley de Ohm permite calcular la corriente en las tres fases:

$$\bar{I}_a = \frac{V_{<0^\circ}}{Z_{<\theta}} = I_{<-\theta} \quad (3,0)$$

$$\bar{I}_b = \frac{V \angle -120^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -120^\circ - \theta \quad (3,1)$$

$$\bar{I}_c = \frac{V \angle 120^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle 120^\circ - \theta \quad (3,2)$$

Donde:

$$I = \frac{V}{Z} \quad (3,3)$$

Al aplicar la ley de corrientes de Kirchhoff al nodo N, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\bar{I}_{Nn} = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c \quad (3,4)$$

Al resolver dicha ecuación se obtiene el siguiente resultado:

$$I_{Nn} = 0A \quad (3,5)$$

Siendo nula la corriente I_{nN} , se puede retirar el neutro sin afectar el sistema.

2. Carga desbalanceada conectada en Y con neutro.

El esquemático del circuito es el siguiente:

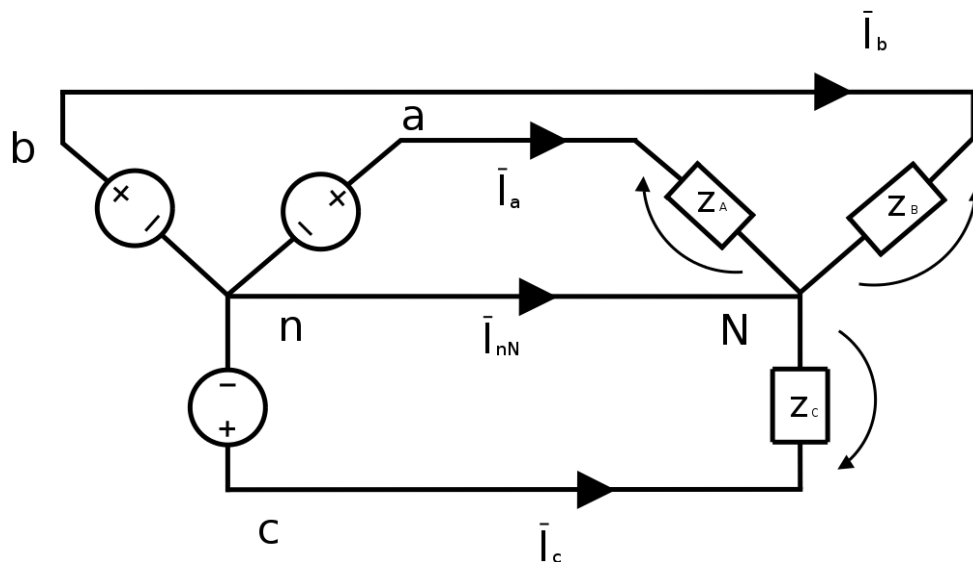


Figura 7. Circuito trifásico con carga desbalanceada conectada en Y a una fuente con conexión tipo Y, con neutro.

Este sistema es equivalente a los siguientes tres circuitos monofásicos.

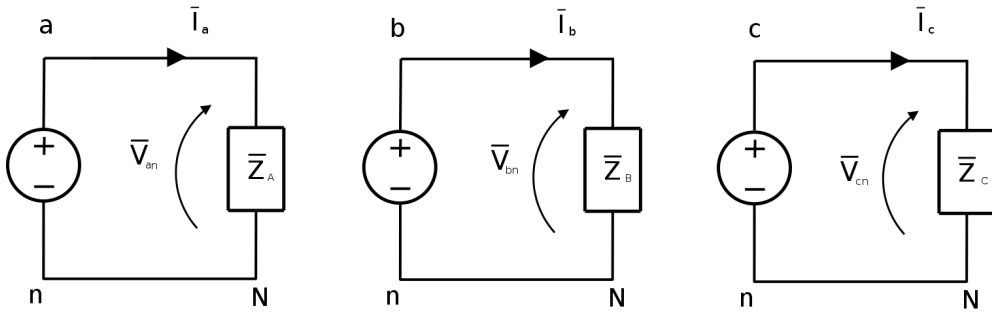


Figura 8. Circuitos monofásicos equivalentes con carga desbalanceada.

Lo que permite calcular la corriente en cada fase a través de la Ley de Ohm:

$$\bar{I}_a = \frac{V \angle 0^\circ}{Z_A \angle \theta_A} = \frac{V}{Z_A} \angle -\theta_A \quad (3,6)$$

$$\bar{I}_b = \frac{V \angle -120^\circ}{Z_B \angle \theta_B} = \frac{V}{Z_B} \angle -120^\circ - \theta_B \quad (3,7)$$

$$\bar{I}_c = \frac{V \angle 120^\circ}{Z_C \angle \theta_C} = \frac{V}{Z_C} \angle 120^\circ - \theta_C \quad (3,8)$$

La corriente de regreso en el neutro se calcula según (3,4) . Por tratarse de un sistema no balanceado la ecuación (3,5) deja de ser general y válida para todos los sistemas de este tipo.

3. Carga desbalanceada conectada en Y, sin neutro.

El esquemático del circuito, se muestra a continuación.

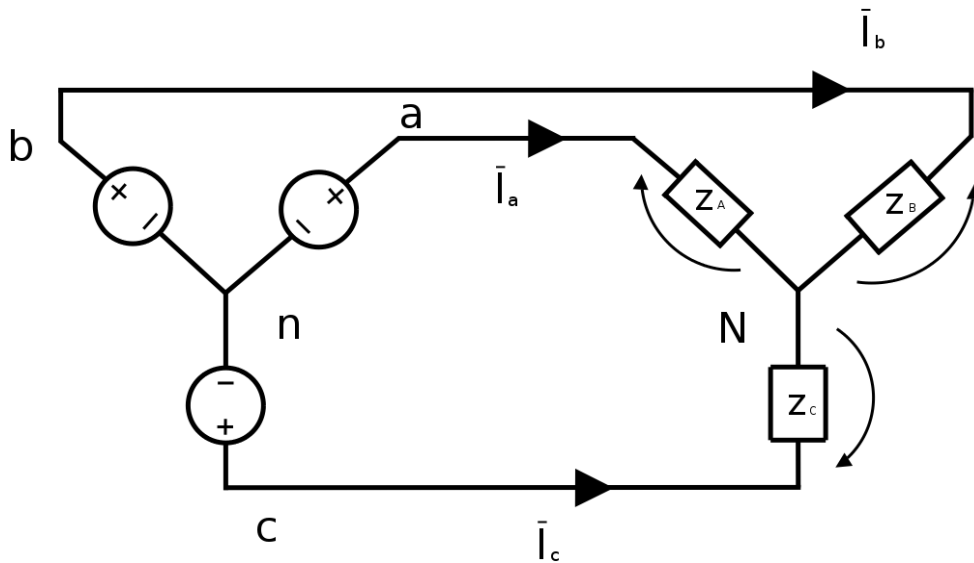


Figura 9. Circuito trifásico con carga desbalanceada conectada en Y a una fuente con conexión tipo Y, sin neutro.

Este sistema no posee circuito equivalente por fase, es por eso que para efectos de análisis se hace necesario transformar las impedancias en estrella a impedancias en delta. Para hacer la transformación se usan las ecuaciones (2,0), (2,1) y (2,2). Después de la transformación se tendrá el siguiente circuito:

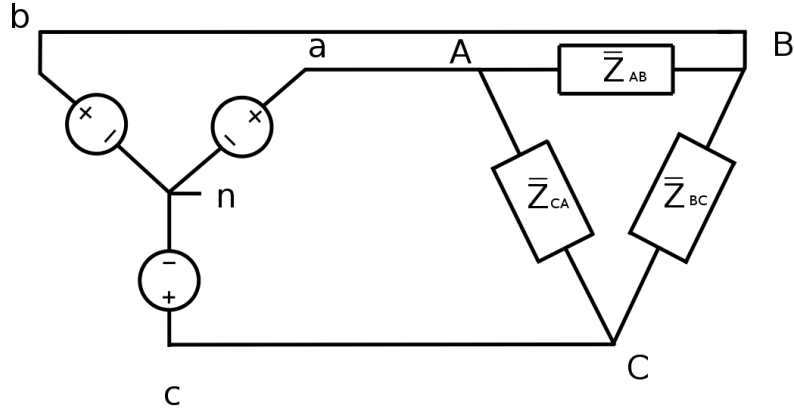


Figura 10. Circuito trifásico con carga desbalanceada conectada en delta a una fuente con conexión tipo Y, sin neutro.

Para calcular las corrientes de fase en la carga se usa la ley de Ohm:

$$\bar{I}_{AB} = \frac{\sqrt{3}V \angle 30^\circ}{Z_{AB} \angle \theta_{AB}} = \frac{V\sqrt{3}}{Z_{AB}} \angle 30^\circ - \theta_{AB} \quad (3,9)$$

$$\bar{I}_{CA} = \frac{\sqrt{3}V \angle 150^\circ}{Z_{CA} \angle \theta_{CA}} = \frac{V\sqrt{3}}{Z_{CA}} \angle 150^\circ - \theta_{CA} \quad (3,10)$$

$$\bar{I}_{BC} = \frac{\sqrt{3}V \angle -90^\circ}{Z_{BC} \angle \theta_{BC}} = \frac{V\sqrt{3}}{Z_{BC}} \angle -90^\circ - \theta_{BC} \quad (3,11)$$

Para determinar las corrientes en la línea se aplica la ley de corriente de Kirchhoff en los nodos A, B y C.

$$\bar{I}_a = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA} \quad (3,12)$$

$$\bar{I}_b = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB} \quad (3,13)$$

$$\bar{I}_c = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC} \quad (3,14)$$

Estas corrientes de línea vendrían siendo las corrientes de fase del circuito trifásico original.

4. Carga balanceada conectada en delta.

El esquemático correspondiente se muestra a continuación:

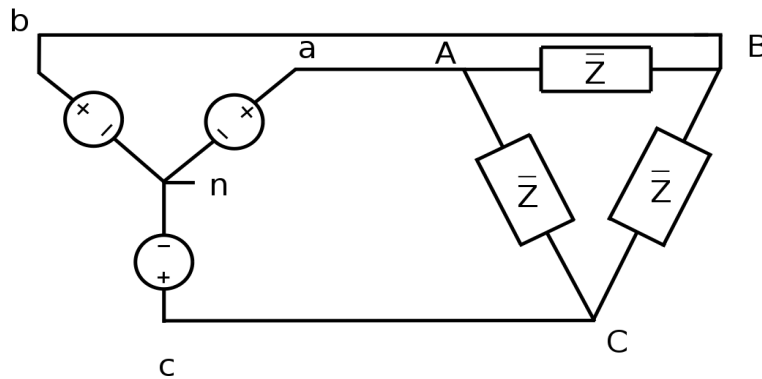


Figura 11. Circuito trifásico con carga balanceada conectado en delta a una fuente con conexión tipo estrella.

Las corrientes de fase en la carga se determinan a través de la ley de Ohm.

$$\bar{I}_{AB} = \frac{V\sqrt{3}}{Z} \angle 30^\circ - \theta \quad (3,15)$$

$$\bar{I}_{CA} = \frac{V\sqrt{3}}{Z} \angle 150^\circ - \theta \quad (3,16)$$

$$\bar{I}_{BC} = \frac{V\sqrt{3}}{Z} \angle -90^\circ - \theta \quad (3,17)$$

Las corrientes de línea se determinan a través de la ecuaciones (3,12), (3,13) y (3,14).

5. Carga desbalanceada conectada en delta.

El esquemático del circuito se muestra en la siguiente figura:

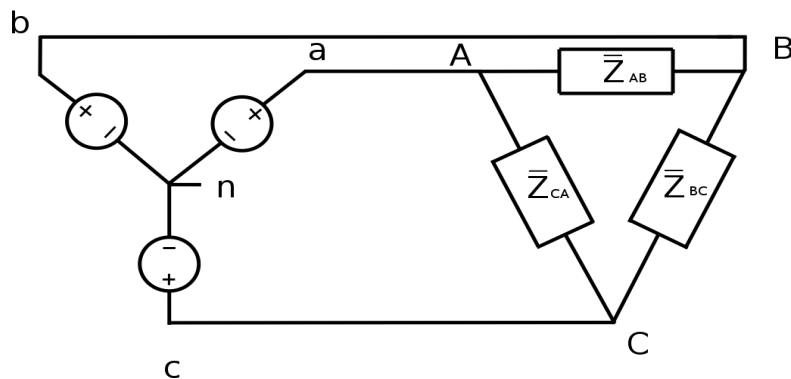


Figura 12. Circuito trifásico con carga desbalanceada conectado en delta a una fuente con conexión tipo estrella.

A partir de la ley de Ohm se calculan las corrientes de fase, estas son las ecuaciones (3,9),(3,10) y (3,11). Y las corrientes de línea, que son el resultado de aplicar la ley de corrientes de Kirchhoff en los nodos A, B y C se calculan con las ecuaciones (3,12), (3,13) y (3,14).

Potencia en circuitos trifásicos

Potencia activa y reactiva

Potencia es la razón de cambio de la energía con respecto al tiempo. En el caso de una carga, la potencia que es absorbida por una carga en cierto instante, es el producto de la caída de voltaje instantáneo a través de la carga y la corriente instantánea que entra a la carga ^[4]. Si se designan las terminales de una carga como A y B, y si el voltaje y la corriente se expresan de la siguiente forma:

$$V_{AB}(t) = V_m \cos(\omega t + \delta) \quad (4,0)$$

$$I_{AB}(t) = I_m \cos(\omega t + \beta) \quad (4,1)$$

La potencia instantánea será:

$$\begin{aligned} P(t) &= V_{AB}(t) I_{AB}(t) \quad (4,2) \\ &= I_m V_m \cos(\omega t + \delta) \cos(\omega t + \beta) \\ &= 1/2 V_m I_m \{ \cos(\delta - \beta) + \cos [2(\omega t + \delta) - (\delta - \beta)] \} \\ &= VI \cos(\delta - \beta) + VI \cos [2(\omega t + \delta) - (\delta - \beta)] \\ &= VI \cos(\delta - \beta) + VI \cos 2(\omega t + \delta) \cdot \cos(\delta - \beta) + VI \operatorname{sen} 2(\omega t + \delta) \cdot \operatorname{sen}(\delta - \beta) \\ &= VI \cos(\delta - \beta) [1 + \cos 2(\omega t + \delta)] + VI \operatorname{sen} 2(\omega t + \delta) \cdot \operatorname{sen}(\delta - \beta) \quad (4,3) \end{aligned}$$

Un examen de la ecuación (4,3) muestra que tiene un valor promedio de:

$$P = VI \cos(\delta - \beta) \quad (4,4)$$

Esta potencia es llamada potencia activa, cuya unidad fundamental es el watt (W). El segundo término de la ecuación (4,3) tiene un valor promedio nulo y es alternadamente positivo y negativo, es por eso que expresa el flujo de energía que en forma alternada, va hacia la carga y regresa a ella. El valor máximo de esta potencia es:

$$Q = VI \operatorname{sen}(\delta - \beta) \quad (4,5)$$

A esta cantidad se le denomina potencia reactiva y tiene unidades de voltamperes reactivos (VAR).

Potencia compleja

Si la corriente y el voltaje en cierta carga se expresan de la siguiente forma:

$$\bar{V} = V \angle \delta \quad (4,6)$$

$$\bar{I} = I \angle \beta \quad (4,7)$$

Entonces el producto del voltaje por el conjugado de la corriente es:

$$\bar{V}\bar{I}^* = VI \angle \delta - \beta \quad (4,8)$$

Al aplicar la identidad de euler:

$$\bar{V}\bar{I}^* = VI \cos(\delta - \beta) + jVI \operatorname{sen}(\delta - \beta) \quad (4,9)$$

De las ecuaciones (4,4) y (4,5) se tiene que:

$$\bar{V}\bar{I}^* = P + jQ \quad (4,10)$$

Esta cantidad se denomina potencia compleja ya que incluye la potencia activa y la potencia reactiva en un número complejo. La potencia compleja se denota con la letra S.

$$\bar{S} = \bar{V}\bar{I}^* \quad (4,11)$$

Procedimiento y Resultados

Se armó el circuito trifásico de la figura 5, se midió el voltaje de línea a línea, la corriente de fase y las potencias, para cada uno de los tres valores en la carga. Se obtuvieron los siguiente resultados:

Tabla 1. Carga balanceada conectada en estrella, con neutro. (Experimental)

Caso 1: $Z_{\phi} = 300 + j300 \Omega$			
	Fase an	Fase bn	Fase cn
Voltaje de Fase [V]	118,3	118,1	119,0
Corriente de Fase [I]	0,261	0,257	0,264
Potencia Activa [W]	-22,6	-22,4	-23,2
Potencia Reactiva [VAR]	-21,1	-20,5	-21,2
Potencia Compleja [VA]	30,9	30,3	31,4
Caso 2: $Z_{\phi} = 600 \parallel j300 \Omega$			
Voltaje de Fase [V]	118,7	118,9	119,4
Corriente de Fase [A]	0,458	0,464	0,469
Potencia Activa [W]	-27,7	-29,1	-28,5
Potencia Reactiva [VAR]	-46,6	-46,6	-48,3
Potencia Compleja [VA]	54,3	55,2	55,9
Caso 3: $Z_{\phi} = 600 \parallel -j300 \Omega$			
Voltaje de Fase [V]	118,6	119,0	119,3
Corriente de Fase [A]	0,444	0,447	0,445
Potencia Activa [W]	-23,4	-24,5	-24,1
Potencia Reactiva [VAR]	52,6	53,1	53,1
Potencia Compleja [VA]	52,5	52,8	53,1

Con la finalidad de hacer una comparación teórica-experimental se usaron las ecuaciones (3,3) y (4,11) para determinar la corriente de fase y las potencias, los resultados de esto cálculos juntos con los porcentajes de error se muestran a continuación:

Tabla 2. Comparación teórica-experimental de circuito con carga balanceada conectada en estrella

Caso 1: $Z_{\phi} = 300 + j300 \Omega$			
	Experimental	Teórico	Error (%)
Voltaje de Fase [V]	118,3	120	1,25

Corriente de Fase [I]	0,261	0,282	7,45
Potencia Activa [W]	-22,6	24,0	5,83
Potencia Reactiva [VAR]	-21,1	24,0	12,08
Potencia Compleja [VA]	30,9	33,9	8,85
Caso 2: $Z_{\phi} = 600 \parallel j300 \Omega$			
Voltaje de Fase [V]	118,7	120	1,08
Corriente de Fase [A]	0,458	0,447	2,46
Potencia Activa [W]	-27,7	24,0	15,42
Potencia Reactiva [VAR]	-46,6	48,0	2,92
Potencia Compleja [VA]	54,3	53,66	1,19
Caso 3: $Z_{\phi} = 600 \parallel -j300 \Omega$			
Voltaje de Fase [V]	118,6	120	1,17
Corriente de Fase [A]	0,444	0,447	1,56
Potencia Activa [W]	-23,4	24,0	2,5
Potencia Reactiva [VAR]	52,6	-48,0	7,79
Potencia Compleja [VA]	52,5	53,66	2,1

Luego se armó el circuito de la figura 7, que corresponde a un generador conectado a una carga desbalanceada en estrella y sin neutro. Se realizaron las mismas mediciones y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3. Carga desbalanceada conectada en estrella, con neutro.
(Experimental)

Caso 1: $Z_A = 300 + j600 \Omega$, $Z_B = 600 + j600 \Omega$, $Z_C = 600 - j300 \Omega$			
	Fase an	Fase bn	Fase cn
Voltaje de Fase [V]	118,7	118,7	119,2
Corriente de Fase [I]	0,173	0,134	0,179
Potencia Activa [W]	9,6	-16,4	19,0
Potencia Reactiva [VAR]	19,2	4,4	-9,5
Potencia Compleja [VA]	21,4	16,9	21,33
Caso 2: $Z_A = 300 \Omega$, $Z_B = 300 - j600 \Omega$, $Z_C = 300 - j600 \Omega$			
Voltaje de Fase [V]	118,5	118,8	119,2
Corriente de Fase [A]	0,402	0,177	0,178
Potencia Activa [W]	-47,6	9,4	9,5
Potencia Reactiva [VAR]	0	-18,8	-18,9
Potencia Compleja [VA]	47,6	21,0	21,1

Estos datos determinados experimentalmente, también se obtuvieron usando las ecuaciones (3,7), (3,8), (3,9) y (4,11), estos resultados se muestran a continuación:

Tabla 4. Carga desbalanceada conectada en estrella, con neutro. (Teórica)

Caso 1: $Z_A = 300 + j600 \Omega$, $Z_B = 600 + j600 \Omega$, $Z_C = 600 - j300 \Omega$			
	Fase an	Fase bn	Fase cn
Voltaje de Fase [V]	120	120	120
Corriente de Fase [I]	0,179	0,141	0,179
Potencia Activa [W]	9,6	12,0	19,2
Potencia Reactiva [VAR]	19,2	12,0	-9,6
Potencia Compleja [VA]	21,5	16,9	21,5
Caso 2: $Z_A = 300 \Omega$, $Z_B = 300 - j600 \Omega$, $Z_C = 300 - j600 \Omega$			
Voltaje de Fase [V]	120	120	120
Corriente de Fase [A]	0,400	0,179	0,179
Potencia Activa [W]	48,0	9,6	9,6
Potencia Reactiva [VAR]	0	-19,2	-19,2
Potencia Compleja [VA]	48,0	21,5	21,5

Se calcularon los porcentajes de error para cada una de la mediciones

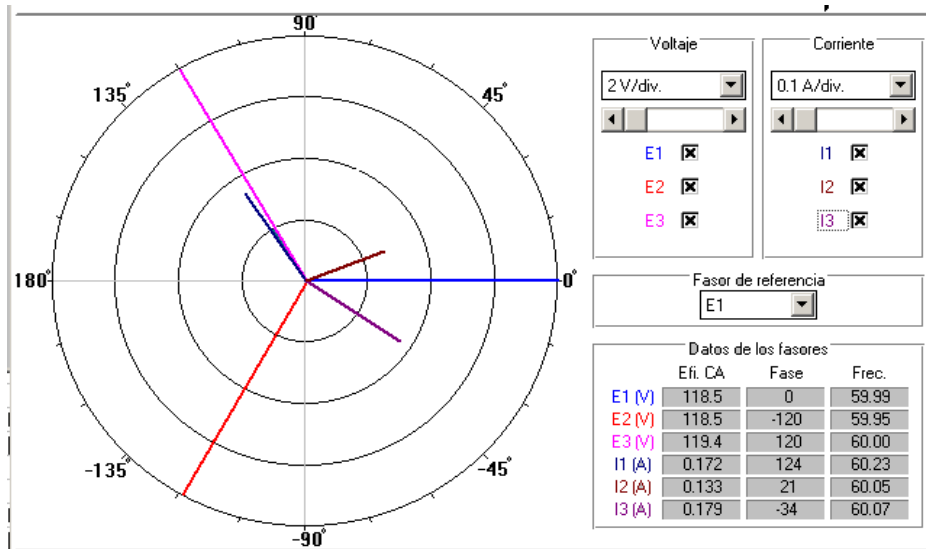
Tabla 5. Carga desbalanceada conectada en estrella, con neutro.
(Porcentajes de error)

Caso 1: $Z_A = 300 + j600 \Omega$, $Z_B = 600 + j600 \Omega$, $Z_C = 600 - j300 \Omega$			
	Error en fase an (%)	Error en fase bn (%)	Error en fase cn (%)
Voltaje de Fase [V]	1,08	1,08	0,67
Corriente de Fase [I]	3,35	4,96	0,00
Potencia Activa [W]	0,00	36,7	1,04
Potencia Reactiva [VAR]	0,00	36,67	1,04
Potencia Compleja [VA]	0,46	0,00	0,79
Caso 2: $Z_A = 300 \Omega$, $Z_B = 300 - j600 \Omega$, $Z_C = 300 - j600 \Omega$			
Voltaje de Fase [V]	1,25	1,00	0,67
Corriente de Fase [A]	0,5	1,11	0,56
Potencia Activa [W]	0,83	2,08	1,04

Potencia Reactiva [VAR]	0,00	2,08	1,56
Potencia Compleja [VA]	0,83	2,32	1,86

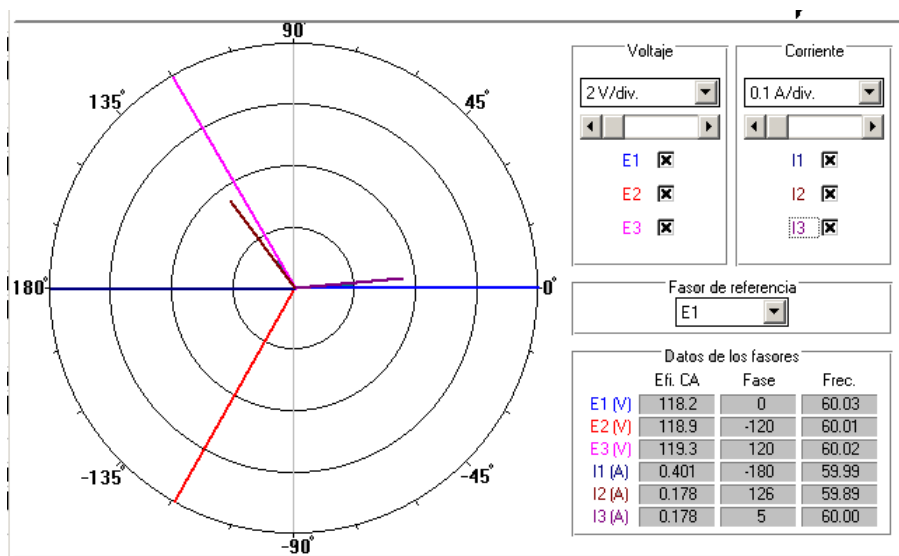
El siguiente diagrama fasorial muestra los voltaje de fase y las corrientes de fase para el caso 1:

Figura 13. Diagrama fasorial para carga desbalanceada conectada en estrella.



El siguiente diagrama fasorial corresponde al caso 2:

Figura 14. Diagrama fasorial para carga desbalanceada conectada en estrella.



Luego se procedió a alambrear un circuito trifásico con carga conectada en estrella, desbalanceada y sin neutro, el esquemático del circuito corresponde a la figura 9. Las mediciones realizadas se muestran en la siguiente figura:

Tabla 6. Carga desbalanceada conectada en estrella, sin neutro.
(Experimental)

Caso 1: $Z_A = 300 + j600 \Omega$, $Z_B = 600 + j600 \Omega$, $Z_C = 600 - j300 \Omega$			
	Fase an	Fase bn	Fase cn
Voltaje de Fase [V]	163,6	59,15	153,1
Corriente de Fase [I]	0,245	0,065	0,229
Potencia Activa [W]	-20,6	-20,6	-30,6
Potencia Reactiva [VAR]	-34,2	-34,2	16,9
Potencia Compleja [VA]	39,9	3,8	34,9
Caso 2: $Z_A = 300 \Omega$, $Z_B = 300 - j600 \Omega$, $Z_C = 300 - j600 \Omega$			
Voltaje de Fase [V]	97,1	107,8	185,1
Corriente de Fase [A]	0,331	0,16	0,275
Potencia Activa [W]	-32,1	-7,71	-23,0
Potencia Reactiva [VAR]	0	15,5	45,3
Potencia Compleja [VA]	32,3	17,4	50,8

Luego se hicieron los cálculos siguiendo el procedimiento que se explica en la nota teórica, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 7. Carga desbalanceada conectada en estrella, sin neutro. (Teórico)

Caso 1: $Z_A = 300 + j600 \Omega$, $Z_B = 600 + j600 \Omega$, $Z_C = 600 - j300 \Omega$			
	Fase an	Fase bn	Fase cn
Voltaje de Fase [V]	172,2	50,0	161,95
Corriente de Fase [I]	0,257	0,059	0,241
Potencia Activa [W]	19,7	2,1	34,9
Potencia Reactiva [VAR]	39,5	2,1	-17,5
Potencia Compleja [VA]	44,2	2,95	39,1
Caso 2: $Z_A = 300 \Omega$, $Z_B = 300 - j600 \Omega$, $Z_C = 300 - j600 \Omega$			
Voltaje de Fase [V]	99,8	108,4	186,5
Corriente de Fase [A]	0,332	0,161	0,278
Potencia Activa [W]	33,2	7,83	23,2
Potencia Reactiva [VAR]	0	-15,7	-46,4
Potencia Compleja [VA]	33,2	17,51	51,8

Se determinaron y tabularon los porcentajes de error:

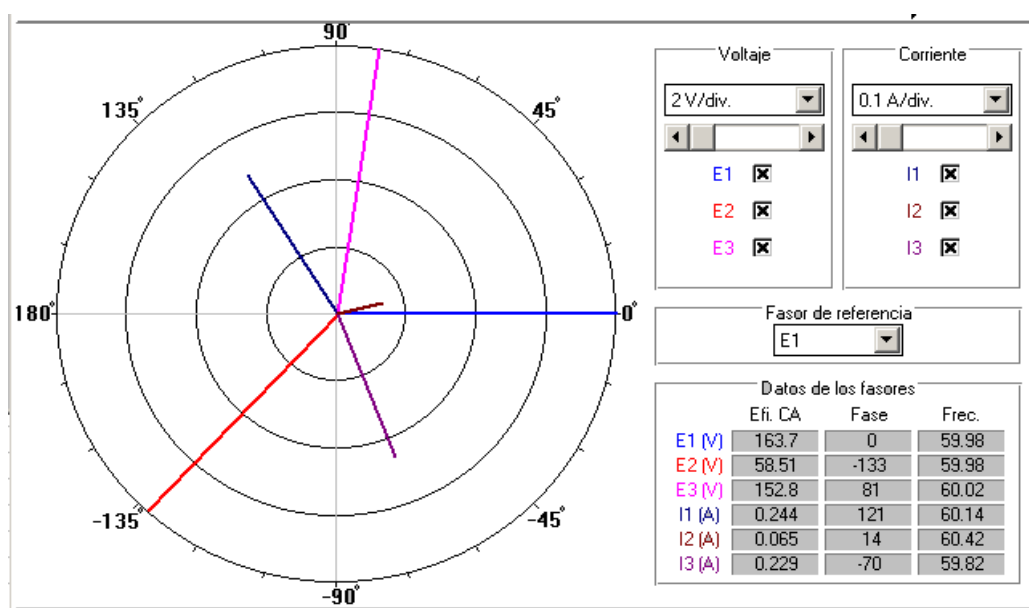
Tabla 8. Carga desbalanceada conectada en estrella, sin neutro.

(Porcentaje de Error)

Caso 1: $Z_A = 300 + j600 \Omega$, $Z_B = 600 + j600 \Omega$, $Z_C = 600 - j300 \Omega$			
	Error en Fase an (%)	Error en Fase an (%)	Error en Fase an (%)
Voltaje de Fase [V]	4,99	18,3	5,46
Corriente de Fase [I]	4,67	10,17	4,98
Potencia Activa [W]	4,57	880,95	12,32
Potencia Reactiva [VAR]	13,41	80,95	3,42
Potencia Compleja [VA]	9,73	22,37	10,74
Caso 2: $Z_A = 300 \Omega$, $Z_B = 300 - j600 \Omega$, $Z_C = 300 - j600 \Omega$			
Voltaje de Fase [V]	2,70	0,55	0,75
Corriente de Fase [A]	0,30	0,62	1,08
Potencia Activa [W]	3,31	1,53	0,86
Potencia Reactiva [VAR]	0,00	1,27	2,37
Potencia Compleja [VA]	2,71	0,63	1,93

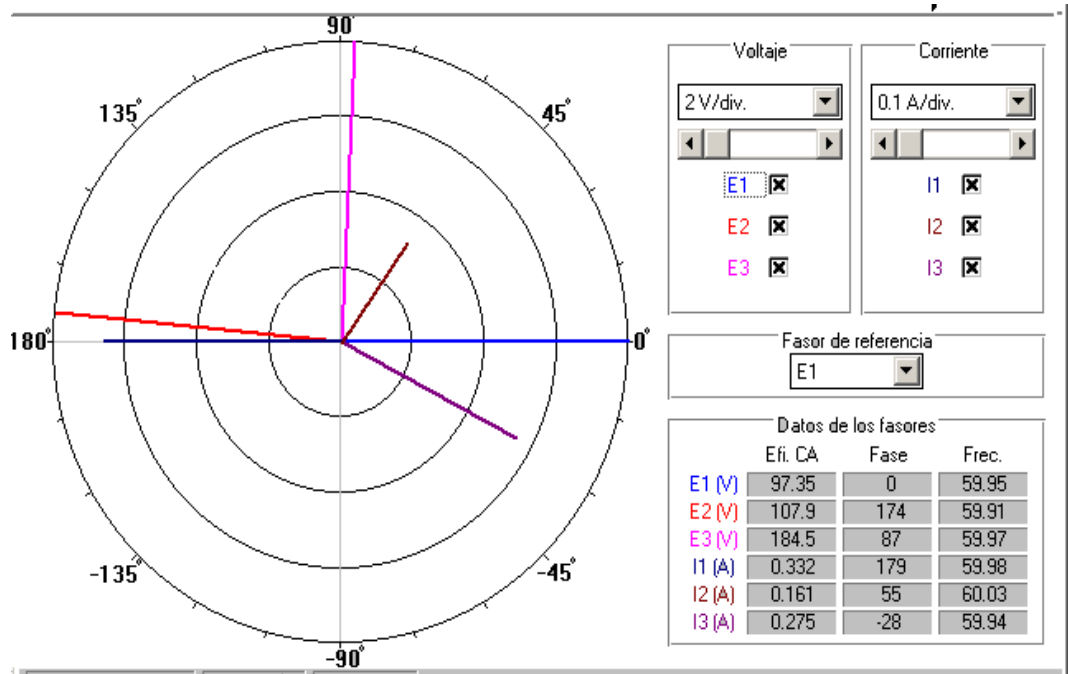
El diagrama fasorial del caso 1 es:

Figura 15. Diagrama fasorial de un circuito trifásico con carga conectada en desbalanceada estrella y sin neutro. Caso 1.



El diagrama fasorial del caso 2:

Figura 16. Diagrama fasorial de un circuito trifásico con carga desbalanceada conectada en estrella y sin neutro. Caso 2.



Las mediciones que se muestran a continuación corresponden a un circuito con una carga balanceada, conexión tipo delta.

Tabla 9. Carga balanceada conectada en delta.

$Z_{\phi} = 300 + j300 \Omega$			
	Fase an	Fase bn	Fase cn
Voltaje de Fase [V]	203,6	204,4	204,4
Corriente de Fase [I]	0,815	0,808	0,811
Potencia Activa [W]	51,7	109	-163
Potencia Reactiva [VAR]	158	-123	-33,2
Potencia Compleja [VA]	166	165	166

Estos mismos datos se determinaron teóricamente, usando la ecuaciones (3,15), (3,16), (3,17) y (4,11).

Tabla 10. Carga balanceada conectada en delta. (Teórico)

$Z_{\phi} = 300 + j300 \Omega$			
	Fase an	Fase bn	Fase cn
Voltaje de Línea [V]	208	208	208
Corriente de Línea [I]	0,848	0,848	0,848
Potencia Activa [W]	72,0	-98,4	-26,4
Potencia Reactiva [VAR]	72,0	26,4	-98,4
Potencia Compleja [VA]	101,9	101,9	101,9

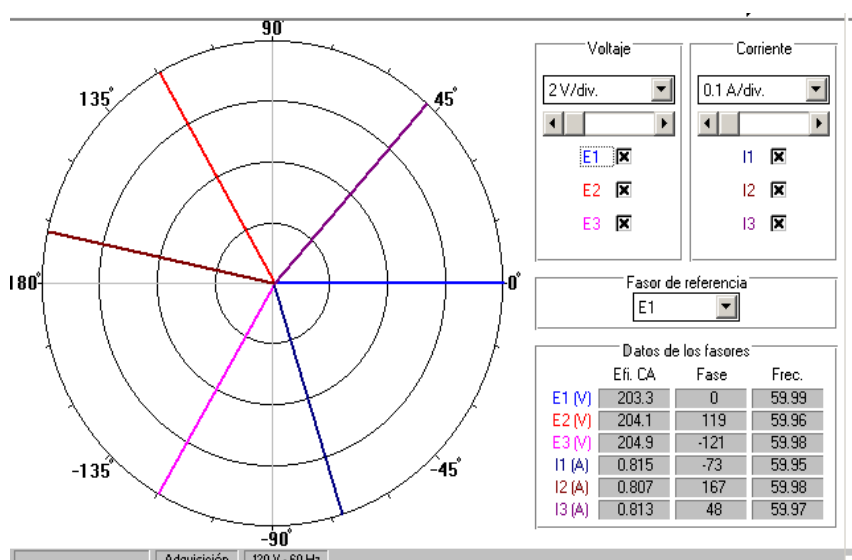
Los porcentajes de error se tabularon en la siguiente tabla:

Tabla 11. Carga balanceada conectada en delta. (Porcentaje de Error)

$Z_{\phi} = 300 + j300 \Omega$			
	Error en Fase an (%)	Error en Fase bn (%)	Error en Fase bn (%)
Voltaje de Fase [V]	2,11	1,73	1,73
Corriente de Fase [I]	3,89	4,72	4,36
Potencia Activa [W]	28,19	10,77	517,42
Potencia Reactiva [VAR]	119,44	365,90	66,26
Potencia Compleja [VA]	62,90	61,92	62,90

El diagrama fasorial del circuito trifásico es el siguiente:

Figura 17. Diagrama fasorial de un circuito trifásico con carga balanceada conectado en delta.



Análisis de Resultados

Para el circuito trifásico con conexión en estrella, carga balanceada y con neutro se elaboró la tabla 2, esta tabla muestra los porcentajes de error, las mediciones experimentales y los cálculos teóricos. Se pudo observar que en esta configuración las corrientes de fase tienen la misma magnitud, tal y como se analizó en la nota teórica.

Para el circuito trifásico con conexión tipo estrella, carga desbalanceada, y con neutro, se usó el analizador de fasores, con este se obtuvieron impresiones de los fasores voltaje y corriente, la figuras son la 13 y la 14, en estas figuras se observa claramente la naturaleza de un generador trifásico, un voltaje de línea a neutro de igual magnitud y una diferencia de 120° entre una y otra fase. Algo muy distinto sucede con los fasores de corriente en los que el distanciamiento entre uno y otro no es uniforme, esto se debe a que el circuito trifásico está desbalanceado, esto se puede ver también en las ecuaciones (3,6), (3,7) y (3,8); en estas ecuaciones se puede observar que la diferencia entre un ángulo y otro, no es necesariamente la misma, por otro lado si la carga estuviese balanceada el distanciamiento de estos fasores sería el mismo, esto se puede ver en las ecuaciones (3,0), (3,1) y (3,2) que corresponden a una carga trifásica balanceada con conexión tipo estrella provista de neutro.

En los diagramas fasoriales de las figuras 15 y 16, correspondientes al circuito trifásico con carga desbalanceada, conexión tipo estrella y sin neutro, se nota que la distancia angular entre los fasores de voltajes es totalmente desigual, estos fasores son el voltaje de fase en la carga, y no el voltaje de fase en el generador, estos últimos siguen teniendo la misma magnitud y la misma diferencia de fase entre sí. Esto se debe a la eliminación del neutro, ya que el neutro hace posible un equivalente monofásico, que acopla el voltaje de cada fuente con el voltaje de fase de la carga.

El diagrama fasorial de la figura 17 corresponde a un circuito trifásico con una carga balanceada conectada en delta, eso justifica el hecho de que los fasores estén equidistantes, pues si se observa las ecuaciones (3,15), (3,16) y (3,17) se puede ver que los tres fasores de corriente se encuentran desfasados, una misma cantidad, de los fasores de voltaje.

Conclusiones

- Se pudo comprobar experimentalmente la naturaleza de un generador trifásico a través de un analizador de fasores.
- Se analizó un circuito trifásico con una carga conectada en estrella, balanceada y con neutro. Se pudo comprobar experimentalmente las ecuaciones de la nota teórica, ya que se utilizaron para hacer los cálculos teóricos.
- En un circuito con una carga desbalanceada conectada en estrella, y sin neutro, los fasores voltaje de fase y corriente de fase en la carga no son equidistantes uno del otro. En cambio para la misma configuración, pero con neutro los fasores de voltaje de fase si poseen dicha simetría.
- En un circuito trifásico con carga balanceada y conexión tipo delta se observó que el desfase entre dos fasores de voltaje o corriente consecutivos es de 120° , esto concuerda con la parte teórica.

Bibliografía

- [1] Chapman, Stephen J. Máquinas Eléctricas. McGraw-Hill. 2005. Página 681.
- [2] Chapman, Stephen J. Máquinas Eléctricas. McGraw-Hill, 2005. Página 625.
- [3] Fitzgerald, A.E. Fundamentos de Ingeniería Eléctrica. McGraw-Hill, 1965. Página 126.
- [4] Grainger John J. Análisis de Sistemas de Potencia. McGraw-Hill, 1996. Página 5.