

Sistemas Trifásicos

Rodriguez Sebastian, Barón Karla, y Cruz Héctor
est.{sebastianc.rod2, karla.baron, y hector.cruz}@unimilitar.edu.co
Profesor: Clavijo Juan

Resumen—Se analizaron varios circuitos trifásicos en configuración de delta y estrella, con el fin de realizar las respectivas mediciones de potencia y factor de potencia correspondientes.

Palabras clave—Circuito trifásico, potencia, factor de potencia, circuito Delta, circuito estrella.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas trifásicos se caracterizan por tener tres líneas de transmisión de corriente alterna, que transmiten y transfieren la energía simultáneamente. Es por esto que, la finalidad de esta práctica es analizar las diferentes maneras en que se pueden dar estos sistemas, como lo en forma delta o estrella. Con estos, se analiza la potencia de cada uno, calculandolo desde diferentes impedancias, tanto reales (resistivas), como complejas (resistivo e inductivo), para este último, se postula la forma de mejorar uno de sus parámetros como el factor de potencia.

A. Marco teórico

Circuito trifásico

Es un circuito que está formado por tres corrientes alternas monofásicas de igual frecuencia y amplitud (y por consiguiente valor eficaz), que presentan una diferencia de fase entre ellas de 120° eléctricos, y están dadas en un orden determinado. Cada una de las corrientes monofásicas que forman el sistema se designa con el nombre de fase [1].

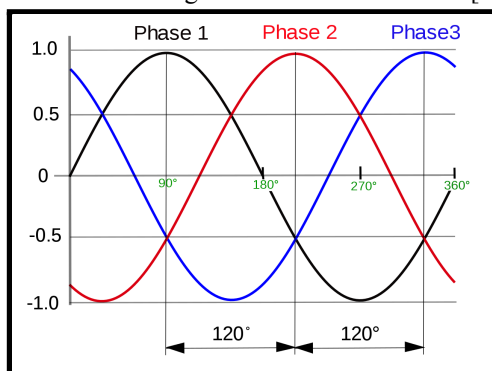


Figura 1: Desfase del sistema trifásico

fuentes y carga trifásica

Las fuentes y las cargas trifásicas se pueden encontrar de dos formas, en delta o estrella.

Estrella: Las fuentes o las cargas tienen un nodo en común, el neutro, y tres salidas una por cada positivo de cada fuente o cada carga como se ve en la figura 2.

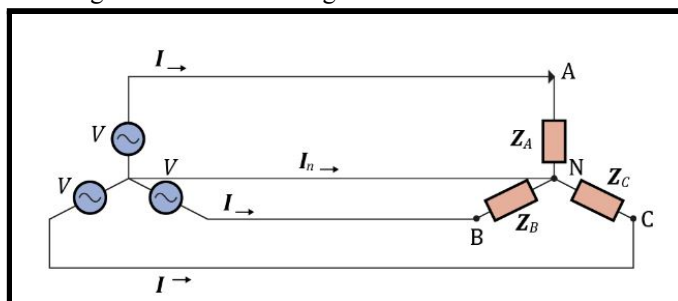


Figura 2: Conexión configuración estrella a la fuente trifásica

Delta: Las fuentes o las cargas están unidas entre sí de forma que se acoplan positivo con negativo entre ellas, creando un círculo cerrado en el que se crean 3 nodos los cuales son las salidas o las conexiones en las fuentes y las cargas respectivamente como se ve en la figura 3.

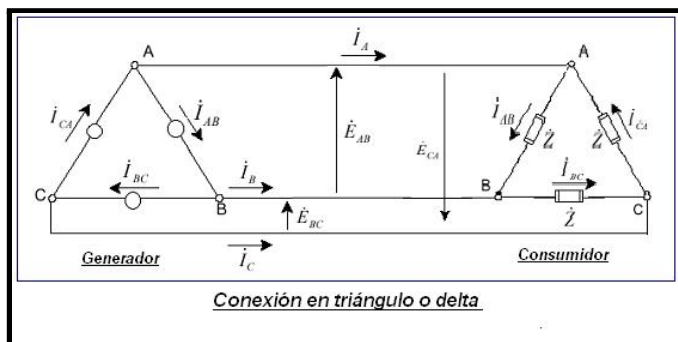


Figura 3: Conexión configuración delta la fuente trifásica

Sin importar si es estrella o delta, las fuentes generan tres líneas de alimentación, con igual voltaje, pero desfasadas 120° entre ellas, por lo que habrá un con fase 0° , otra con $+120^\circ$ y una tercera -120° (ó 240°) generando así la figura 1 ya mencionada.

Cuando las cargas son de igual magnitud, se entiende que están balanceadas. Una carga desbalanceada (cargas desiguales) impediría que las fases estuvieran separadas 120° entre ellas por lo que presenta fallos e impediría su correcto funcionamiento.[2]

A continuación se ve la conexión de una carga trifásica en **triángulo** a una red trifásica de tensión $V_{\text{Línea}}$. Según las definiciones de tensiones de fase y línea se tiene que $V_{\text{línea}} = V_{\text{fase}}$ y por otro lado, la relación entre la corriente de fase y de línea toma el valor de $I_{\text{línea}} = \sqrt{3}I_{\text{fase}}$ [3].

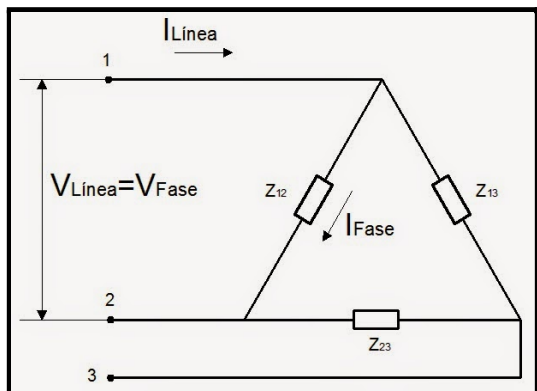


Fig. 4: Relación Voltajes Corrientes de Fase y de Línea en Delta.

A continuación se ve la conexión de una carga trifásica en **estrella** a una red trifásica de tensión $V_{\text{Línea}}$. Según las definiciones de tensiones de fase y línea se tiene que $I_{\text{línea}} = I_{\text{fase}}$ y por otro lado, la relación entre la corriente de fase y de línea toma el valor de $V_{\text{línea}} = \sqrt{3}V_{\text{fase}}$ [3].

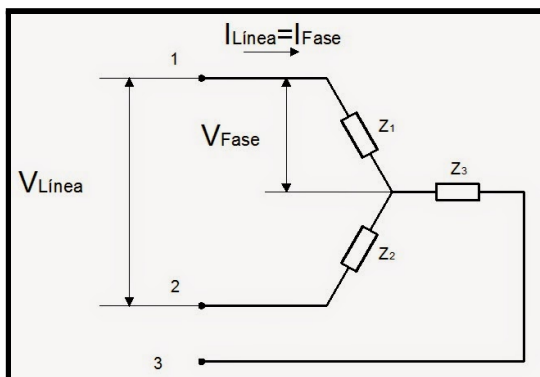


Fig. 5: Relación Voltajes Corrientes de Fase y de Línea en Estrella.

II.COMPETENCIAS A DESARROLLAR

Para recibir, la práctica cada grupo debe presentar primero preinforme, en donde deben aparecer los correspondientes análisis de las mediciones realizadas.

1. Capacidad de desarrollar y llevar a cabo la experimentación adecuada, analizar e interpretar datos, y usar el juicio de Ingeniería para sacar conclusiones.
 - Identifica los parámetros asociados a la problemática, sus variables de entrada y los resultados esperados.

- Formula y ejecuta el protocolo de experimentación.
 - Analiza e interpreta los resultados obtenidos tras la experimentación.
 - Concluye sobre los resultados obtenidos, aplicando juicios de ingeniería.
2. Habilidad para comunicarse efectivamente ante un rango de audiencias.
 - Presenta sus ideas en forma clara y concisa, utilizando un lenguaje apropiado al contexto.
 - Sustenta con dominio la solución planteada.
 - Redactar apropiadamente informes utilizando formatos estandarizados, referenciando, y utilizando reglas gramaticales y ortográficas.

III.DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

1. **Diseñe un circuito trifásico resistivo en triángulo, para $V_L = 220V$, $I_L = 15A$, realice mediciones de corriente y voltaje tanto en la fuente como en la carga.**

SOLUCIÓN :

Para encontrar las impedancias del sistema trifásico balanceado se realiza la ley de ohm con el voltaje y la corriente de línea, entonces :

$$V_l = I_l * Z$$

Si $V_l = 220 V$ y $I_l = 15 A$, se transforma la corriente de línea a corriente de fase :

$$I_f = \frac{I_l}{\sqrt{3}} = \frac{15}{\sqrt{3}} = 8,66$$

Entonces :

$$Z = \frac{220V}{8,66 A} = 25,40 \Omega$$

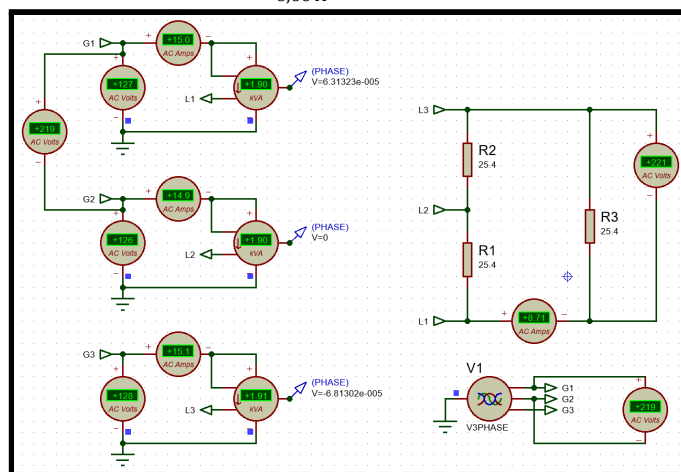


Fig. 6: Resultados de la simulación en delta de impedancia resistiva. (Anexo 1)

Se mantiene la resistencia igual, es decir $R = 25,40 \Omega$, con esto, se determina la corriente del circuito ($I_f = I_l$):

$$I_f = \frac{127,01}{25,40} = 5.0 A$$

2. Evalúe la potencia en el circuito y determine el factor de potencia.

SOLUCIÓN:

Para evaluar la potencia del circuito se evalúa en el tiempo, entonces:

$$V(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v)$$

$$I(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i)$$

Entonces se tiene:

$$P(t) = V(t) I(t)$$

$$P(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v) I_m \cos(\omega t + \theta_i)$$

Entonces la potencia instantánea queda:

$$P(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \theta_v) \cos(\omega t + \theta_i)$$

Si se simplifica por identidades trigonométricas queda:

$$P(t) = V_m I_m \frac{1}{2} (\cos(\omega t + \theta_v - \omega t - \theta_i) + \cos(\omega t + \theta_v + \omega t + \theta_i))$$

$$P(t) = \frac{V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i)}{2} + \frac{V_m I_m \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i)}{2}$$

Como la segunda parte de la ecuación es dependiente del tiempo no representa un trabajo útil, a la expresión que queda se le llama Potencia Promedio (Activa), si analizamos esta potencia en una resistencia tenemos:

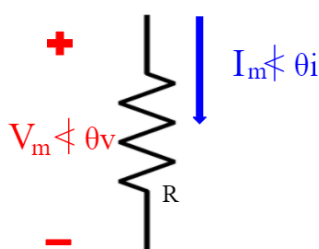


Fig. 7 Ángulo de la tensión y de la corriente en una resistencia

El ángulo de la tensión y de la corriente en una resistencia son iguales:

$$\theta_v = \theta_i$$

Entonces:

$$\cos(\theta_v - \theta_i) = 1$$

Por lo tanto, si el circuito es resistivo entonces el factor de potencia es igual a 1.

3. Cambie el circuito a estrella, manteniendo los mismos valores de R que usó en el punto 1 y realice nuevamente las mediciones correspondientes.

SOLUCIÓN:

Para realizar el circuito en estrella sabemos que $V_f = \frac{V_l}{\sqrt{3}}$ y como el voltaje de línea es 220 entonces:

$$V_f = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127,01V$$

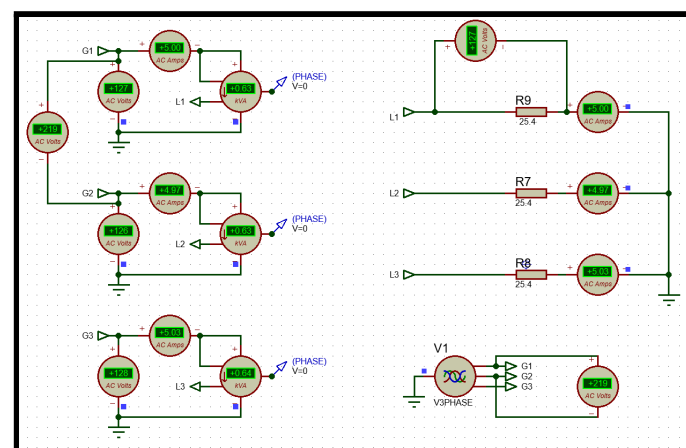


Fig. 8: Resultados de la simulación en estrella de impedancia resistiva. (Anexo 2)

4. Repita los puntos 1 a 3 para carga RL, $V_L = 220V$ $I_L = 12A$, $FP=0.7$

PUNTO 1: Diseñe un circuito trifásico resistivo en triángulo, realice mediciones de corriente y voltaje tanto en la fuente como en la carga.

Para realizar el circuito en delta sabemos que $V_f = V_l$ y para sacar la corriente determinamos:

$$I_f = \frac{I_l}{\sqrt{3}} = \frac{12}{\sqrt{3}} = 6,92A$$

Para sacar la resistencia del circuito se realiza ley de ohm de la siguiente manera:

$$V_f = I_f R$$

Entonces la resistencia necesaria para mantener la corriente y el voltaje del circuito es:

$$R = \frac{V_f}{I_f} = \frac{220}{6,92} = 31,791\Omega$$

Ahora como se pide un circuito de tipo RL, se le coloca el ángulo del factor de potencia a la resistencia ya encontrada, por tanto:

$$\cos(\varphi) = (0.7)$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0.7) = 45,57^\circ$$

Entonces:

$$Z = 31,791 \angle 45,57$$

Pasándolo a polar queda :

$$Z = 22,25 + 22,70i$$

Sabiendo que la inductancia se despeja de $Z_l = j\omega l$ entonces queda :

$$l = \frac{22,70}{2\pi \cdot 60} = 60mH$$

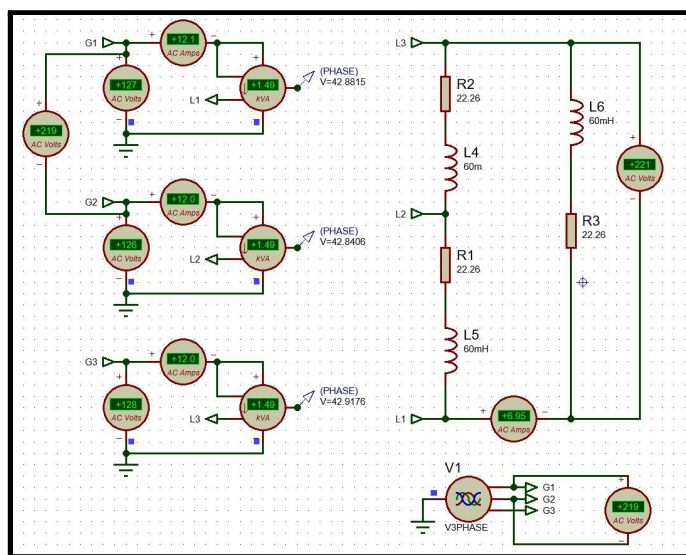


Figura 9: Resultados de la simulación impedancia delta RL.
(Anexo 3)

PUNTO 2: Evalúe la potencia en el circuito y determine el factor de potencia.

El factor de potencia ya es dado en el anuncio, $FP = 0.7$, si se quiere evaluar la potencia del circuito entonces tenemos :

En el caso de la potencia activa como se demostró en el punto dos para una resistencia es 1, sin embargo para una inductancia esto cambia pues el voltaje está adelantado a la corriente 90° , entonces :

$$\theta_v - \theta_i = 90$$

$$\cos(\theta_v - \theta_i) = 0$$

Para la potencia reactiva se evalúa con la función seno, entonces para una resistencia la potencia reactiva queda :

$$\theta_v - \theta_i = 0$$

$$\sin(\theta_v - \theta_i) = 0$$

Pero para la inductancia se tiene :

$$\theta_v - \theta_i = 90$$

$$\sin(\theta_v - \theta_i) = 1$$

Al usar las ecuaciones de las potencias para el circuito queda :

$$S = V_f I_f$$

$$S = (220)(6,92) = 1522,4 V_A$$

$$P = S \cos(\varphi)$$

$$P = (1522,4)(0,7) = 1065,68 W$$

$$Q = S \sin(\varphi)$$

$$Q = (1522,4) \sin(45,57^\circ) = 1087,15 V_{Ar}$$

PUNTO 3: Cambie el circuito a estrella, manteniendo los mismos valores de R que usó en el punto 1 y realice nuevamente las mediciones correspondientes.

Para realizar el circuito en estrella sabemos que $V_f = \frac{V_l}{\sqrt{3}}$ y como el voltaje de línea es 220 entonces :

$$V_f = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127,01V$$

Al mantener la impedancia igual ($Z = 22,25 + 22,70i$) entonces para sacar la corriente primero se hace realiza la magnitud de la impedancia, entonces :

$$R = \sqrt{22,25^2 + 22,70^2} = 31,78 \Omega$$

Ahora se determina la corriente del circuito ($I_f = I_l$):

$$I_f = \frac{127,01}{31,78} = 3,99 A$$

Las potencias del circuito quedan :

$$S = V_f I_f$$

$$S = (127,01)(3,99) = 506,76 V_A$$

$$P = S \cos(\varphi)$$

$$P = (506,76)(0,7) = 354,73 W$$

$$Q = S \sin(\varphi)$$

$$Q = (506,76) \sin(45,57^\circ) = 361,88 V_{Ar}$$

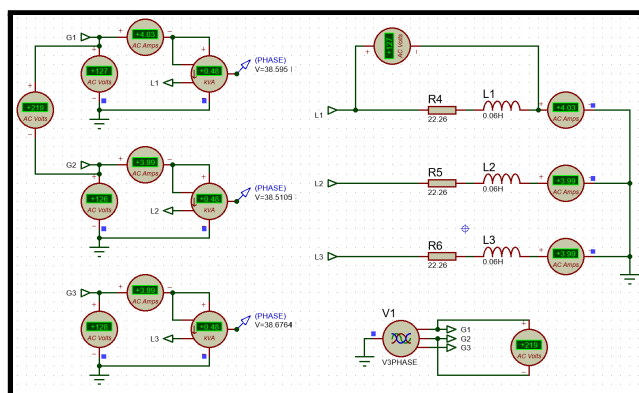


Fig. 10: Resultado simulación circuito en estrella para RL.
(Anexo 4)

5. Utilice condensadores para mejorar el FP a 0.9, analice sus resultados.

Para mejorar el factor de potencia primero debemos analizar la potencia reactiva que se tiene, como ya se analizó anteriormente tenemos :

PARA DELTA :

$$Q = S \text{ Sen}(\varphi)$$

$$Q = (1522,4) \text{ Sen}(45,57^\circ) = 1087,15V_{Ar}$$

$$Q_T = Q * 3 = 1087,15V_{Ar} * 3 = 3261,45V_{Ar}$$

Ahora determinamos la potencia reactiva con el factor de potencia que necesitamos, es decir $FP = 0.9$, entonces:

$$\theta = \cos^{-1}(0.9)$$

$$\theta = 25,84^\circ$$

La potencia reactiva la podemos encontrar como:

$$\text{Tng}(\varphi) = \frac{Q_{FP=0.9}}{P}$$

para la potencia activa, la podemos encontrar con los datos anteriores:

$$FP_{0.7} = \frac{P}{S}$$

$$(6,92)(220)(0.7) = P = 1065,68 W$$

$$P_T = P * 3 = 3197,04 W$$

Entonces:

$$Q_{FP=0.9} = 3197,04 W * \text{Tng}(25,84^\circ) = 1548,26V_{Ar}$$

Ya teniendo la potencia que queremos podemos decir que:

$$Q_{Total} - Q_{capacitor} = Q_{factor\ de\ 0.9}$$

Entonces:

$$3261,45V_{Ar} - Q_c = 1548,26V_{Ar}$$

$$Q_c = 1713,19V_{Ar}$$

Ahora sabiendo que $Q_c = \frac{V_f^2}{X_c}$ y que $X_c = \frac{1}{\omega C}$ entonces:

$$\omega = 60(2\pi) = 376,99 \text{ rad/s}$$

$$X_c = \frac{1}{376,99 C}$$

$$Q_c = \frac{V_f^2}{\frac{1}{376,99 C}} = 376,99 C V_f^2$$

$$C = \frac{Q_c}{376,99 V_f^2} = \frac{1713,19}{376,99 (220^2)} = 31,29 \mu F$$

Como el condensador no es comercial se escoge el condensador de $33 \mu F$ que si es comercial.

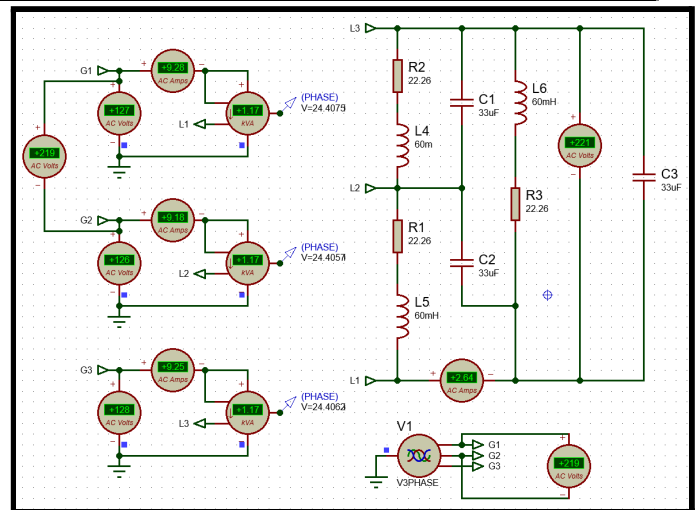


Fig. 11: Resultado simulación circuito en delta para RL con corrección de potencia. (Anexo 5)

PARA ESTRELLA:

Se utiliza el mismo capacitor que para delta, es decir $33 \mu F$.

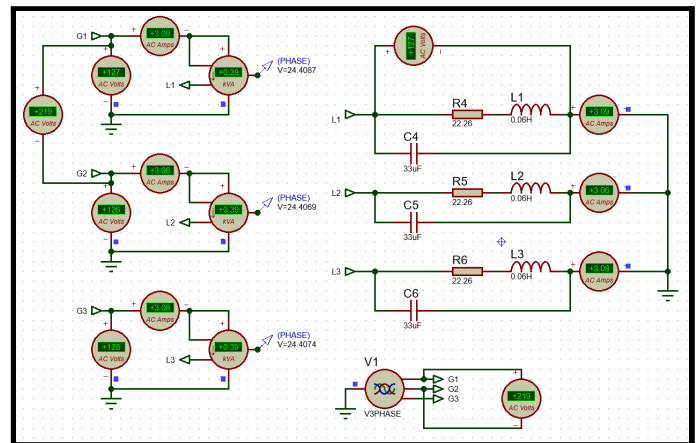


Fig. 12: Resultado simulación circuito en estrella para RL con corrección de potencia. (Anexo 6)

Con esto se puede entender la importancia de un factor de potencia cercano a 1 ya que lo ideal de los circuitos trifásicos es tener un $FP = 1$ y así tener el máximo trabajo posible.

También podemos concluir que la corrección del factor de potencia permite aumentar la eficiencia y la calidad de energía del mismo.

I. CONCLUSIONES

- Para una configuración de fuente en estrella y carga en delta el voltaje de línea es igual al voltaje de fase, y de igual forma para la misma fuente, pero la carga en estrella la corriente de línea es igual a la corriente de fase.
- Cuando se conecta el capacitor en paralelo a la impedancia, se corrige el factor de potencia, esto debe a la relación fasorial de las impedancias entre



capacitancia e inductancia, pudiendo así con la capacitancia contrarrestar fasorialmente los efectos de la potencia reactiva en el sistema trifásico equilibrado.

- El análisis de potencia para corregir el factor de potencia se debe realizar con la potencia total.
- Al momento de analizar los circuitos en delta y en estrella se concluye que la configuración de la fuente es irrelevante para el cálculo del circuito.

[14] P.W. Sauer, "A Power Systems Experiment in an Electric Machinery Laboratory Course", University of Illinois at Urbana-Champaign, IEEE, 2014.

[15] E. Muljadi, D. Yildirim, T. Batan, and C. P. Butterfield, "Understanding the unbalanced-voltage problem in wind turbine generation," in Industry

[16] Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE, vol. 2, pp. 1359–1365 vol.2.

REFERENCIAS

[1] Angarita, P., 2021. [online] Selectromecanicosu.wixsite.com. Available at: <<https://selectromecanicosu.wixsite.com/seuv/sistemas-trifasicos>> [Accessed 9 February 2021].

[2] Naveda, A., 2021. *Circuitos trifasicos equilibrados*. [online] Es.slideshare.net. Available at: <<https://es.slideshare.net/anasaregna/circuitos-trifasicos-equilibrados>> [Accessed 12 February 2021].

[3] Blogger.com, blog de fravedsa. <https://ingenieriaelectricafravedsa.blogspot.com/2014/11/tensiones-corrientes-fase-linea.html#:~:text=La%20tensi%C3%B3n%20de%20fase%2C%20V,los%20conductores%20de%20la%20instalaci%C3%B3n>. [Accessed 12 February 2021].

[4] J.R. Villaseñor, *Circuitos electricos y aplicaciones digitales*, Segundo edición, México, PEARSON EDUCATION, 2013.

[5] C.K. Alexander, *Fundamentos de circuitos eléctricos*, Sexta edición, México, McGraw-Hill Interamericana, 2018.

[6] M.A. Toledo *Análisis de circuitos en ingeniería*, Octava edición, México D.F, Editorial Mc Graw Hill, 2012.

[7] Muhammad H. Rashid, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*, Pearson Educación, Mexico, 2004.

[8] P.D. Joaquin, *Circuitos monofásicos y trifásicos*, Edicions UPC, Cataluña, 1999.

[9] Guru, Bhag S; Enriquez Brito, Javier; Hizioglu, Hüseyin R., *Máquinas eléctricas y transformadores*, México : Oxford University Press, 2003.

[10] Chapman, Stephen J., *Electric Machinery and Power System Fundamentals*, New York : McGraw-Hill, 2002.

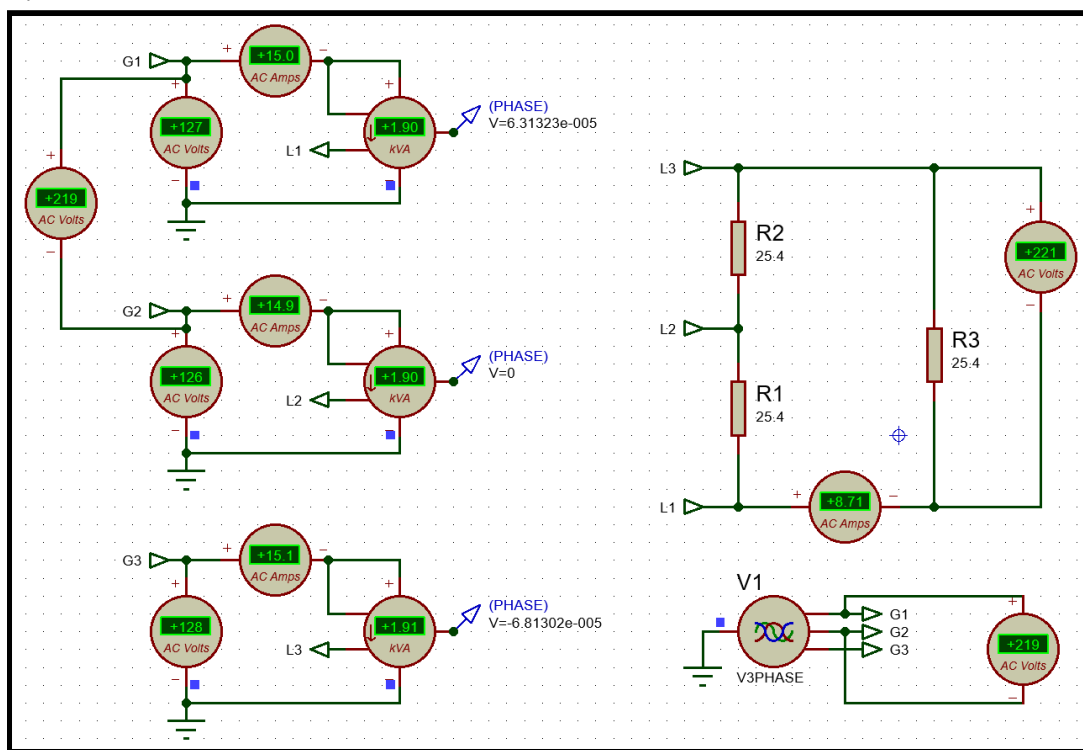
[11] Enriquez Harper, Gilberto. *Accionamientos eléctricos*. Editorial Limusa. México 2009.

[12] Boldea, Ion. *Electric machines: steady state, transients, and design with MATLAB*. Boca Raton. CRC Press; Taylor Francis Gropu, 2009.

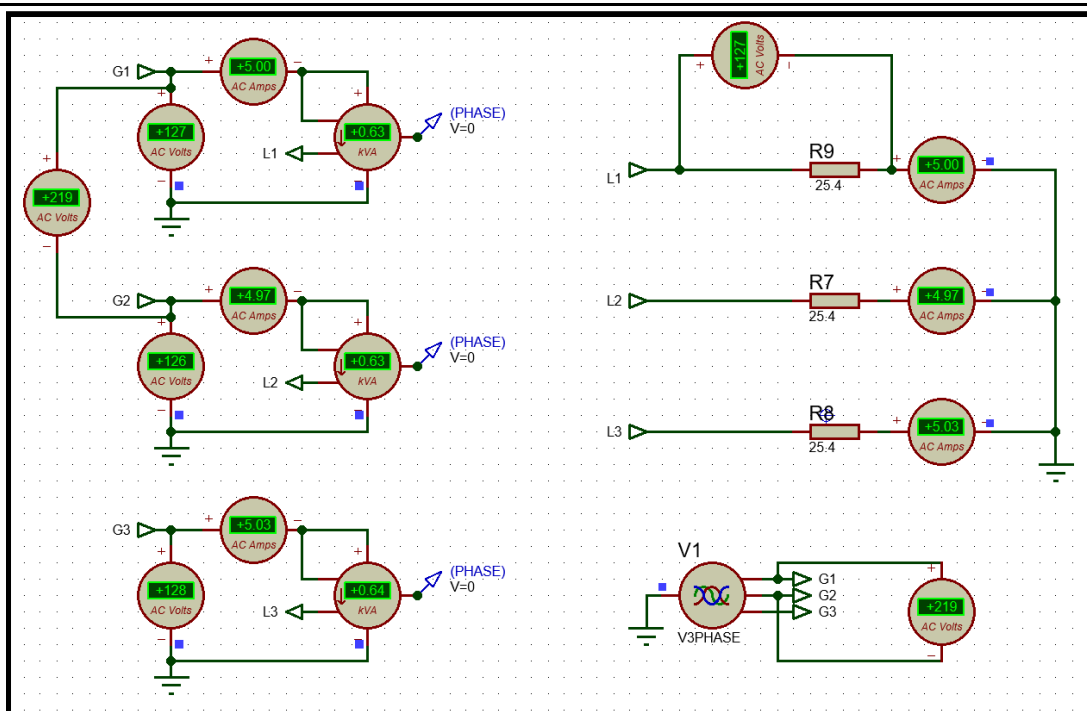
[13] Guía de diseño de instalaciones eléctricas según normas internacionales IEC. Schneider Electric España, S.A Segunda Edición. ISBN 84-609-8658-6

ANEXOS

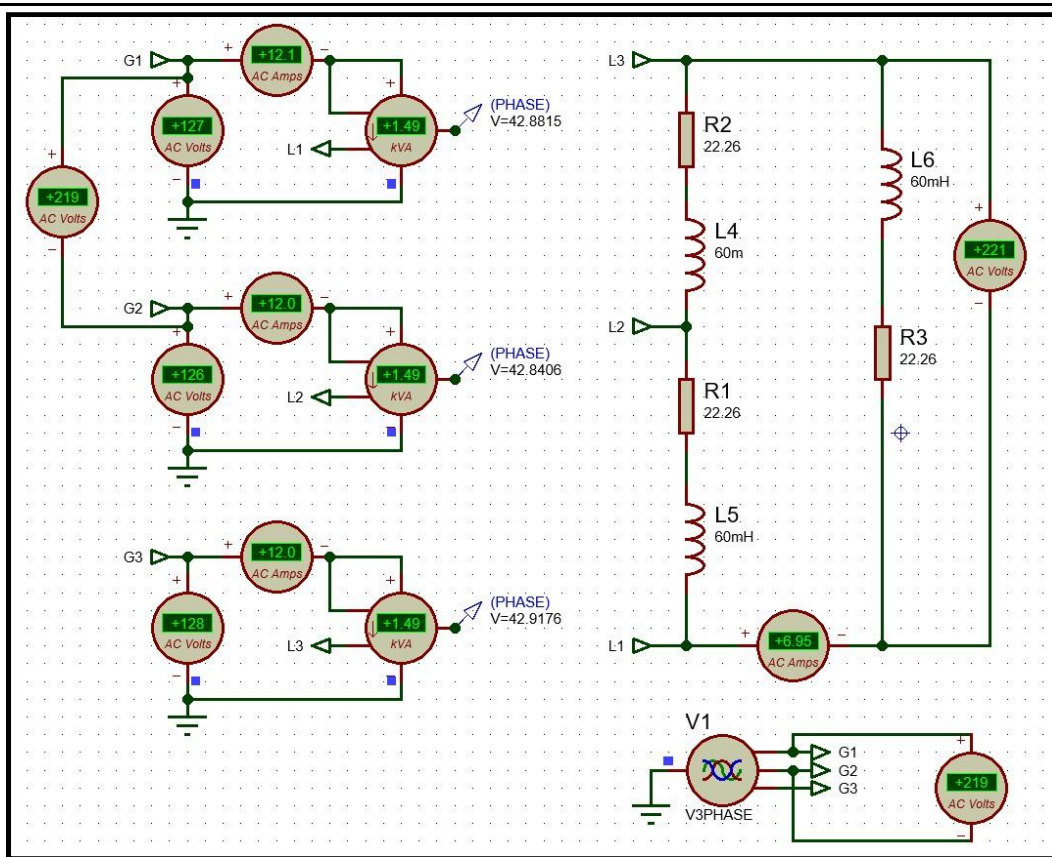
ANEXO 1:



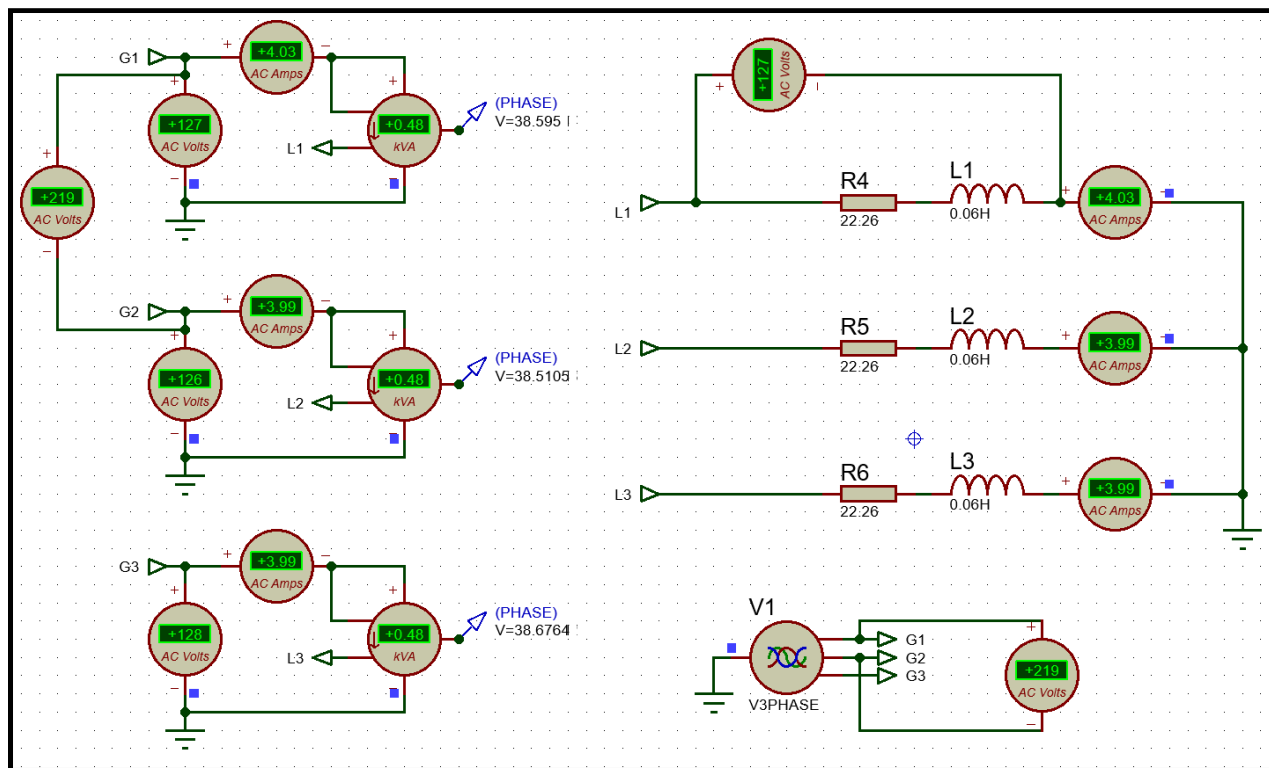
ANEXO 2:



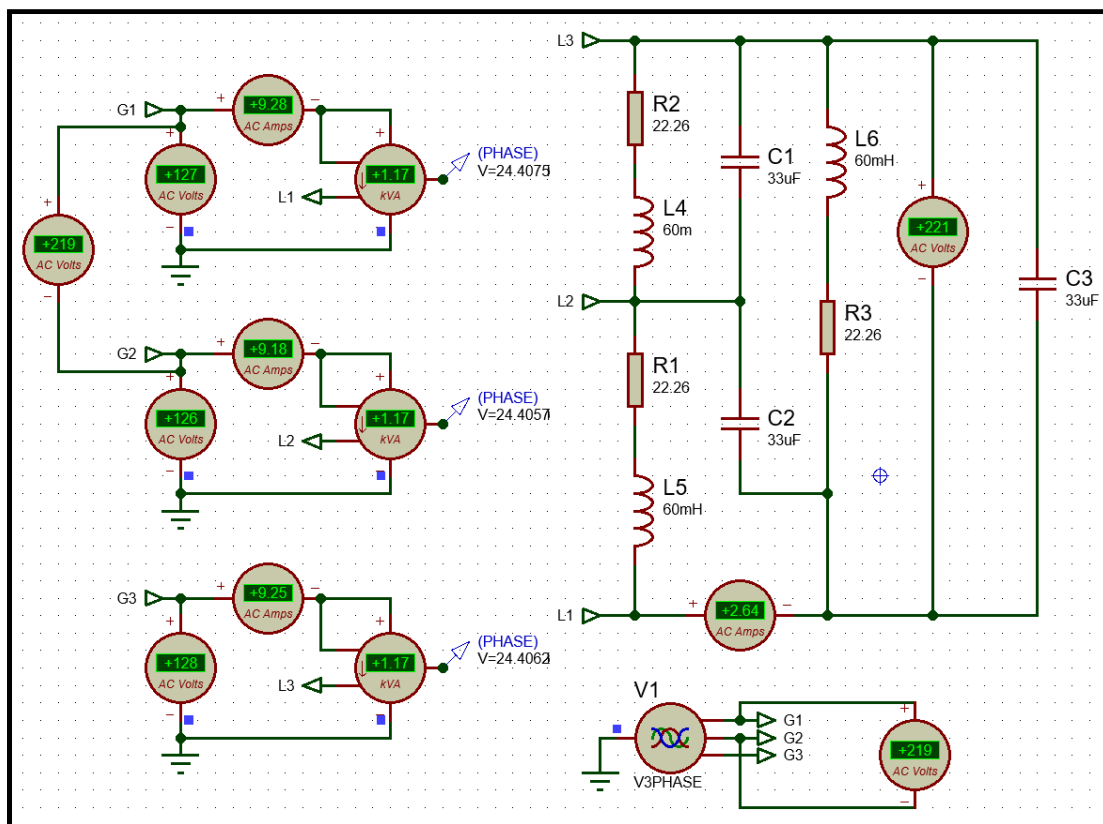
ANEXO 3:



ANEXO 4 :



ANEXO 5 :



ANEXO 6 :

