



REPUBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECHANICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

**TESIS EN OPCION AL TÍTULO DE MASTER EN
ELECTROMECAÁNICA EN PLANTAS METALURGICAS**

**TITULO: EFICIENCIA EN LOS CIRCUITOS DE
ALUMBRADO EXTERIOR**

AUTOR: Ing. ODALYS ROBLES LAURENCIO

TUTOR: Dr. C. Ing. SECUNDINO MARRERO
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

MOA – 2000

Resumen:

En este trabajo se muestran los resultados obtenidos en la Investigación de la Influencia del Carácter No Lineal y el tipo de Conexión de las Lámparas en las Pérdidas Eléctricas de un Circuito de Alumbrado Exterior.

Primeramente se analiza la influencia de la conexión monofásica de las lámparas en circuitos trifásicos, trayendo consigo una potencia diferente a las convencionales y se denomina Potencia por ASIMETRÍA. Luego, se analiza la no - linealidad como un factor importante en la eficiencia de los circuitos de alumbrado, denominando a la potencia producida por las lámparas como DISTORCIÓN.

Se compara el efecto técnico y económico del circuito en estudio, comparando el cálculo de las pérdidas según los métodos convencionales hasta ahora aplicados y el método genérico implementado por los autores donde se toman en cuenta los factores antes mencionados, creando un modelo simplificado de un circuito de alumbrado exterior.

La instalación de dispositivos que compensen el consumo de las potencias REACTIVAS, ASIMÉTRICAS y de DISTORCIÓN, compuesto por bobinas y condensadores, se amortiza en un plazo de alrededor de un año tomando en cuenta el ahorro por pérdidas eléctricas disminuidas.

Tabla de contenido

Introducción.....	1
Análisis Bibliográfico.....	3
Capítulo 1. Potencias en circuitos eléctricos trifásicos de baja tensión con cargas constantes	
1.1. Introducción.....	7
1.2. Circuitos balanceados lineales.....	8
1.3. Compensación de la potencia reactiva.....	11
1.4. Circuitos desequilibrados lineales.....	12
1.5. Compensación del desequilibrio.....	16
1.6. Circuitos balanceados no lineales.....	19
1.7. Compensación de la distorsión armónica.....	21
1.8. Conclusiones.....	23
Capítulo 2. Eficiencia del circuito de Alumbrado Eléctrico de la Avenida Puerto Che Guevara	
2.1. Introducción.....	24
2.2. Expresiones simplificadas para el cálculo de las pérdidas en circuitos de alumbrado exterior.....	25
2.3. Cálculo de las pérdidas en el circuito actual y su compensación.....	40
2.4. Cálculo de las pérdidas en el circuito de diseño y su compensación.....	44
2.5. Conclusiones.....	45
Capítulo 3. Valoración Económica	
3.1. Introducción.....	46
3.2. Análisis del costo de las pérdidas.....	46
3.3. Análisis de la inversión inicial de la propuesta.....	49
3.4. Justificación Económica.....	49

3.5. Conclusiones.....	50
Conclusiones Generales y Recomendaciones.....	51
Bibliografía.....	54
Apéndices.....	58
Apéndices A. Circuito compensador de secuencia cero.....	58
Apéndices B. Circuito compensador de sistemas trifásicos con cargas variables.....	60
Apéndices C. Procesos transitorios durante el encendido de la lámpara.....	61
Anexos	

Introducción

Cuba por sus condiciones naturales no cuenta con ríos caudalosos en los que se puedan instalar grandes centrales hidroeléctricas y hacer aún más barata la generación de la energía eléctrica. Por esta razón en el país se utilizan unidades Termoeléctrica que utilizan como materia prima el petróleo.

Las reservas de petróleo en el país son escasas y por tanto se necesita importarlo por vía marítima desde lejanos mercados, lo que incrementa mucho más el costo para su adquisición.

Tal situación impone el uso racional y económico de la energía eléctrica dado que ésta es la actualmente más utilizada en todas las esferas de la economía nacional, industrias, servicios y la población en general.

En el país existe un programa destinado al ahorro del portador electricidad (PAEC) y a la vez se han creado muchos grupos de trabajo en todos los centros de investigación encargados de realizar estudios para el mejoramiento de la eficiencia en los Sistemas Eléctricos.

Problema:

Es común que los Circuitos Eléctricos de Alumbrado sean despreciados a la hora de ejecutar mejoras de eficiencia, calidad de la energía, etc. esto tiene relación con los bajos consumos que caracterizan a los mismos. Como la potencia de los consumidores (Lámparas) son pequeñas entonces las pérdidas en estos circuitos también tienen poca magnitud y los trabajos relacionados con las mejoras de la eficiencia en los circuitos de alumbrado son escasos.

En todas las entidades, por lo general, existen varios circuitos de alumbrado y la suma de las pérdidas totales, no tiene porque constituir una pequeña magnitud. Estos circuitos están formados por consumidores monofásicos y casi siempre grandes generadores de corrientes armónicas.

En el cálculo de las pérdidas eléctricas en los Sistemas Eléctricos de Potencia muchas veces no se tienen en cuenta la conexión y el carácter no lineal de los consumidores, por tanto estas pérdidas resultan diferentes a las que en realidad existen en el circuito, trayendo consigo el deterioro de su eficiencia.

Hipótesis:

Sí además de la potencia reactiva se tuvieran en cuenta el carácter no lineal y el tipo de conexión de las cargas en el cálculo de las pérdidas eléctricas, se pudiera elevar la eficiencia en los circuitos de alumbrado utilizando medios para su compensación.

Objetivo:

Determinar la influencia del tipo de conexión y el carácter no lineal de las cargas en un circuito de alumbrado con las pérdidas de potencia del mismo.

Metodología de la investigación:

Después de hacer un breve análisis y definir la posible influencia del carácter no lineal y el tipo de conexión de las cargas en las pérdidas eléctricas de un sistema, se escogió como objeto de estudio el "Circuito de Alumbrado Exterior de la Avenida Puerto - Che Guevara" porque está compuesto por potentes lámparas con elementos electrónicos.

Mediante entrevistas realizadas a obreros y técnicos encargados del montaje y el mantenimiento del circuito de alumbrado de la Avenida Puerto Che Guevara, mediciones de potencia, corriente y tensión realizadas tanto al circuito en estudio como a la lámpara, se obtuvo el esquema monolineal del circuito.

En el trabajo se obtuvieron ecuaciones para el cálculo de las pérdidas en circuito de alumbrado que se utilizaron en el análisis de la eficiencia del circuito real y el de diseño. Posteriormente se realizó la compensación del desbalance y la distorsión armónica que no es elevada, proponiendo la instalación de medios pasivos (condensadores y bobinas). Durante toda la investigación se utilizó el método de superposición para el cálculo total de las pérdidas en el circuito como la suma de las pérdidas provocadas por cada lámpara por separado.

Finalmente se valoran económicamente los resultados alcanzados tomando en cuenta el costo de las pérdidas reducidas, con respecto al costo de la inversión necesaria para la creación de los medios de compensación y el tiempo de amortización.

Análisis Bibliográfico:

- Durante la investigación se hizo una revisión de aproximadamente 25 trabajos relacionados con el estudio de la eficiencia en los sistemas eléctricos y en todos ellos, los circuitos de alumbrado no se tienen en cuenta; es decir, que solo se toma la potencia de los transformadores que alimentan a estos circuitos.
- **Montó, Américo; [et..al]. Circuitos trifásicos. En: Fundamentos de los Circuitos Eléctricos II.** ³⁴

Circuitos Eléctricos II. Es abordada la temática parcialmente refiriéndose a que en Circuitos Trifásicos Balanceados, el factor de potencia coincide con el coseno del ángulo de defasaje entre la tensión y la corriente de fase y que en Circuitos Trifásicos Desbalanceados, la potencia aparente modularmente no cumple con la ley de conservación de la energía. Se considera que no se abordan todos los factores mencionados anteriormente y no se especifica que el ángulo de defasaje entre la tensión y la corriente de fase son de secuencia positiva.

- **Eguiluz, L, I; Benito. Un Factor de Potencia que relaciona las Pérdidas en Líneas en Circuitos Trifásicos Distorsionados. Actas de las 4tas Jornadas Luso- Espanholas.** ¹²

Se sugiere la poca eficacia del $\cos\phi$ de los receptores de energía eléctrica como medida de la influencia de estos en el rendimiento de la red cuando la onda de tensión se aparta de la senoide, dejando expresado de forma clara que para redes donde la onda de la tensión es sinusoidal no es válida la sugerencia.

- **Redondo, Quintela, F. Energía Reactiva y Disminución de las Pérdidas en la Distribución de Energía Eléctrica.** ⁴⁰

Abordan parte de la temática haciendo énfasis en la forma de compensar la potencia reactiva, expresando que solo en consumidores monofásicos, disminuir potencia reactiva conectando condensadores en paralelo con la carga inductiva, implica siempre disminución de la corriente y por tanto, disminución de las pérdidas en el sistema eléctrico. Si el consumidor es trifásico, no siempre la mejora del factor de potencia de la carga o lo que es equivalente, la disminución de energía reactiva disminuye la intensidad consumida por el consumidor y por tanto la potencia que se pierde en el sistema eléctrico, pero si se conectan condensadores arbitrariamente

no se asegura que la corriente y las pérdidas disminuyan, sino que pueden aumentar. Una forma de compensación de energía reactiva que garantiza en todos los casos la disminución al mínimo de las pérdidas del sistema, es la corrección del factor de potencia de cada consumidor monofásico o cada consumidor trifásico equilibrado. No se tienen en cuenta el carácter no lineal de la carga y el tipo de conexión, en el análisis de la eficiencia de los sistemas eléctricos.

- **Eguiluz, L, I. Instrumentación para la Facturación y Minimización del Coste de Energía Eléctrica. 3er Congreso nacional de energía. ¹⁰**

Abordan temas relacionados con el rendimiento de redes trifásicas en distintos regímenes de funcionamiento, demostrando que el factor de potencia obtenido a partir de la potencia aparente o potencia promedio de las tensiones y corrientes de la red, es el que relaciona las pérdidas en un determinado régimen de trabajo con el más eficiente, es decir, el régimen equilibrado sinusoidal, pero no se detalla de forma clara porque en otros regímenes de trabajo distinto al anteriormente mencionado no es así.

- **Eguiluz, L, I. Instrumentación para la Facturación y Minimización del Coste de Energía Eléctrica. 3er Congreso nacional de energía. ³⁹**

Estos autores tratan la temática relacionada con la potencia en redes monofásicas balanceadas no lineal, planteando que la potencia aparente tiene dos componentes, una llamada potencia fundamental y otra no fundamental, la primera tiene en cuenta las potencias activa y reactiva que se conocen y la última parte tiene en cuenta las potencias activa y no activa de distorsión. También al concluir tienen en cuenta el factor relacionado con la conexión de los consumidores, resaltando que con una simple redistribución de las cargas y la reducción de la THD de la corriente mediante la conexión de filtros se elevaría el factor de potencia. Al respecto se piensa que no se hace el análisis preciso para saber exactamente en cuanto se puede elevar el factor de potencia y cual es la influencia en la eficiencia de estos sistemas.

- **Grupo de Energía y Automatización. ABC de Accionamientos. Términos relativos a los accionamientos de velocidad variable alimentados por convertidores.** ²³

Estos autores tratan el tema relacionado con la supresión de armónicos inyectados por convertidores en la red a través de filtros compuestos por un condensador y una inductancia conectadas en serie, tratando de que su frecuencia de resonancia coincida con la frecuencia del armónico a suprimir, coincidiendo con lo que se hace en el presente trabajo, hacen además una propuesta para la supresión de armónicos inferiores en el caso de grandes potencias.

- **Reactive Power Compensation with Capacitors. Journal Systems and Users.** ³⁸

Los autores analizan la compensación de potencia reactiva con capacitores y ven los fenómenos de la resonancia y los armónicos cuando estos se conectan en serie y en paralelo y su efecto en el sistema, hablan de la generación de potencia reactiva, de la localización de los condensadores y de la relación existente entre las potencias activa, reactiva y aparente y del factor de potencia, sin tener en cuenta la conexión y el carácter no lineal de los consumidores en esta última parte.

- **Grupo de Energía y Automatización. ABC de Accionamientos. Términos relativos a los accionamientos de velocidad variable alimentados por convertidores.** ⁴⁶

Este autor analiza los factores tratados en el trabajo, refiriéndose a los medios para la compensación de los mismos. Para la simetrización del régimen asimétrico propone usar batería de condensadores donde la combinación de las potencias de a batería no debe ser estable. Para la supresión de armónicos propone el aumento del número de fases rectificadoras en las instalaciones convertidoras de forma que aseguren la atenuación de las curvas de las corrientes primarias y con el uso de los filtros, pero la exposición de forma analítica y gráfica es muy pobre de forma tal que no se puede hacer un análisis profundo de estas cuestiones para su posible aplicación.

- **Casas, L ; A, Padrón. Efecto del Desbalance de las Cargas sobre las Pérdidas en los Circuitos de Distribución Primaria.** ⁵

Los autores abordan el tema del efecto del desbalance de las cargas en los circuitos de distribución primaria refiriéndose a la distribución de las corrientes o de las cargas por las fases, es decir, lograr que estas magnitudes por las fases sean iguales, pero sin tener en cuenta el tipo de conexión de las cargas.

1.1. Introducción

Normalmente cuando se habla de la potencia en los circuitos trifásicos, se refiere a las potencias activa, reactiva y aparente, cuyas expresiones son conocidas por los técnicos en esta rama.

Cuando se analiza la eficiencia en los sistemas eléctricos y se determinan las pérdidas eléctricas en estos, influyen en estas las potencias activa y reactiva solamente, vista a través de la corriente porque así lo toma en cuenta el método convencional.

Estas pérdidas se expresan de la siguiente forma.

$$p = I^2 R$$

$$q = I^2 X$$

$$R = r L.$$

$$X = x L.$$

Donde:

p: Es pérdida de potencia activa dada en watt (W).

q: Es pérdida de potencia reactiva dada en volt-ampere reactivo (VAR).

R: Es la resistencia de la línea dada ohm (Ω).

X: Es la reactancia de la línea dada ohm (Ω).

L: Es la longitud de la línea dada en metros (m).

I: Es la corriente en la línea dada en ampere (A).

Para los circuitos analizados la corriente se expresa como sigue.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} U} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} U}.$$

Donde:

S: Es la potencia aparente dada en volt-Ampere (VA).

U: Es la tensión de línea dada en voltios (V).

P: Es la potencia activa dada en watt (W).

Q: Es la potencia reactiva dada en volt - Ampere reactivo (VAR).

Es objetivo en este capítulo dejar expuesto de que otros factores u otras potencias depende la corriente y de la misma forma que se compensa la potencia reactiva para disminuir las pérdidas eléctricas en un sistema eléctrico, analizar como pudieran compensarse estas otras potencias o factores practicamente no tenidas en cuenta en los estudios de eficiencia eléctrica para lograr el resultado anteriormente mencionado..

En este capítulo se analizarán los circuitos trifásicos balanceados lineales, circuitos trifásicos desequilibrados lineales y los circuitos balanceados no lineales, donde quedará de forma clara como se comportan las potencias eléctricas y la forma de compensar las pérdidas que provocan.

1.2. Pérdidas en Circuitos Trifásicos Balanceados Lineales

En el circuito mostrado en la figura 1.1, se observa el modelo aplicado para los circuitos balanceados lineales, con consumidores monofásicos conectados entre las fases representados componentes de potencia activa (resistencia) y reactiva (Reactancia).

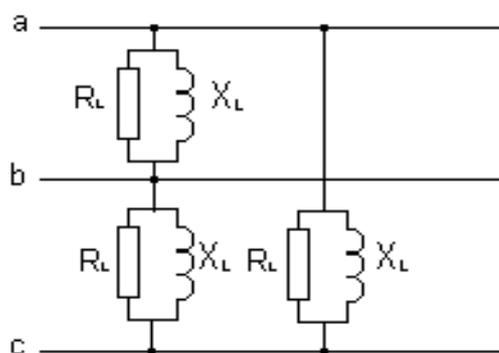


Figura 1.1. Circuito Trifásico lineal

La potencia instantánea en un circuito trifásico balanceado lineal se expresa matemáticamente de la forma en que se muestra en la ecuación 1.1

$$S(t) = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1.1)$$

donde:

u_a, u_b y u_c : Son los valores instantáneos de las tensiones de las fases A, B y C.

i_a, i_b y i_c : Son los valores instantáneos de las corrientes de las fases A, B y C.

$S(t)$: Es la potencia instantánea.

En estos Circuitos Trifásicos Balanceados Lineales, las corrientes y tensiones de fases solo van a tener componentes de secuencia positiva o directa (no existen componentes de secuencia negativa o inversa y cero), por tanto la potencia instantánea va estar expresada en función de las corrientes y tensiones de secuencia positiva.

$$\begin{aligned} i_a &= i_{a1} & u_a &= u_{a1} \\ i_b &= i_{b1} & u_b &= u_{b1} \\ i_c &= i_{c1} & u_c &= u_{c1} \end{aligned}$$

Donde:

u_{a1}, u_{b1} y u_{c1} : Son los valores instantáneos de las tensiones de secuencia positiva de las fases A, B y C.

i_{a1}, i_{b1} y i_{c1} : Son los valores instantáneos de las corrientes de secuencia positiva de las fases A, B y C.

Entonces, sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ec. 1.1 se obtiene:

$$S(t) = u_{a1}i_{a1} + u_{b1}i_{b1} + u_{c1}i_{c1} \quad (1.2)$$

$$u_{a1} = \sqrt{2}U_{a1} \cos wt$$

$$u_{c1} = \sqrt{2}U_{c1} \cos (wt - 240^\circ)$$

$$u_{b1} = \sqrt{2}U_{b1} \cos (wt - 120^\circ)$$

$$i_{a1} = \sqrt{2}I_{a1} \cos wt$$

$$i_{b1} = \sqrt{2}I_{b1} \cos (wt - 120^\circ)$$

$$i_{c1} = \sqrt{2}I_{c1} \cos (wt - 240^\circ)$$

Donde:

U_{a1} , U_{b1} , U_{c1} , I_{a1} , I_{b1} y I_{c1} : Son los valores eficaces de las tensiones y de las corrientes de las fases A, B y C respectivamente.

En estas 6 últimas ecuaciones se muestra el comportamiento de las tensiones y corriente de secuencia positiva. Si se sustituyen en la ec. 1.2, se obtiene:

$$S(t) = 3U_{a1}I_{a1} \cos \varphi_{a1} (1 + \cos 2\omega t) + 3U_{a1}I_{a1} \sin 2\omega t \sin \varphi_{a1} \quad (1.3)$$

La ecuación anterior tiene dos componentes, la primera está relacionada con la potencia activa (P) y la segunda con la potencia reactiva (Q).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) d\omega t = 3U_{a1}I_{a1} \cos \varphi_{a1}$$

$$Q = 3U_{a1}I_{a1} \sin \varphi_{a1}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Donde:

P: Es la potencia activa dada en watt (W).

Q: Es la potencia reactiva dada en VAR.

φ_{a1} : Es el ángulo de defasaje entre la tensión y la corriente de fase de secuencia positiva.

S: Es la potencia aparente dada en VA.

La relación que existe entre la potencia activa y la potencia aparente lo constituye el factor de potencia (F.P) y en estos circuitos coincide con el $\cos \varphi_{a1}$ del consumidor de una fase.

$$F.P = \frac{P}{S} = \cos \varphi_{a1}$$

En estos circuitos se observa que la potencia aparente depende de las potencias activa y reactiva únicamente. De ahí que si se desean disminuir las pérdidas en estos circuitos será necesario actuar sobre las potencias reactivas dado que las potencias activas es empleada en generar trabajo.

Por los cables o ramales que alimentan un circuito, circulará la corriente producto del consumo total del consumidor y por tanto las potencias en éstos, serán proporcionales a las características del mismo y a las potencias del consumidor. Las potencias en los cables son consideradas pérdidas dado que no se utilizan para generar trabajo, y estas tiene también características activas (joule) y reactivas.

Las que interesan en este trabajo son las pérdidas Joule o por calentamiento, porque influyen en la eficiencia del circuito. Las otras pérdidas solo influyen en la calidad de la energía entregada al consumidor.

1.3. Compensación de la potencia reactiva

Anteriormente se hizo referencia a los dos tipos de pérdidas que existen en un circuito trifásico balanceado lineal (pérdidas de potencia activa y reactiva). Las primeras se pueden disminuir por dos vías fundamentales, una relacionada con la disminución de la resistencia de la línea, lográndose con el cambio de la sección de los conductores (por una sección mayor), y la otra disminuyendo la corriente de la línea.

Esta segunda variante se logra actuando sobre la potencia aparente del consumidor, exactamente disminuyéndola a través de la compensación de la potencia reactiva, conectando condensadores en paralelo con la carga que tengan una potencia igual o menor a la potencia reactiva de ésta (Feodorov, 1980¹⁸) en dependencia del valor de factor de potencia que se quiera lograr.

El problema fundamental de este tipo de compensación está en el lugar de ubicación y la potencia reactiva capacitiva óptima a instalar. El aspecto económico es quien define estos inconvenientes. Para seleccionar la potencia óptima a instalar existen métodos como son: la programación lineal y dinámica (Hernández, 2000²⁵; González, 1999²²).

Existen muchos otros métodos empíricos que son comúnmente empleados en la localización de los bancos de condensadores. Se suelen conectar directamente en las barras principales secundarias de las subestaciones, en los nodos de peor factor de potencia o de mayores caídas de tensión, pero por lo general persiguen objetivos diferentes a la disminución de las pérdidas.

En la figura 1.3 se muestra la forma de conexión de un banco de condensadores trifásicos en un circuito balanceado lineal con un suministro de 4 conductores. Es decir, que existirán consumidores monofásicos instalados.

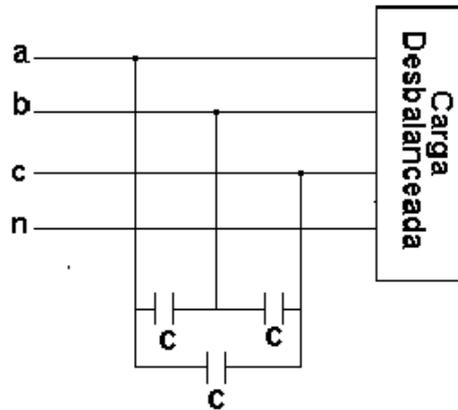


Figura 1.3. Circuito Compensador de potencia reactiva

La utilización de condensadores estáticos es recomendable en circuitos con cargas no muy variables, al menos las componentes de potencia reactiva. Para circuitos con cargas muy dinámicas es imprescindible utilizar otras formas de compensación como motores sincrónicos, bancos de condensadores dinámicos, etc.

1.4. Circuitos Trifásicos Desequilibrados Lineales.

En el epígrafe anterior se trataron circuitos trifásicos balanceados que son los más sencillos y poco comunes de los sistemas eléctricos. En el caso de los circuitos desequilibrados las corrientes por las fases no son las mismas y siempre circulará corriente por el neutro en caso de consumidores monofásicos a tierra.

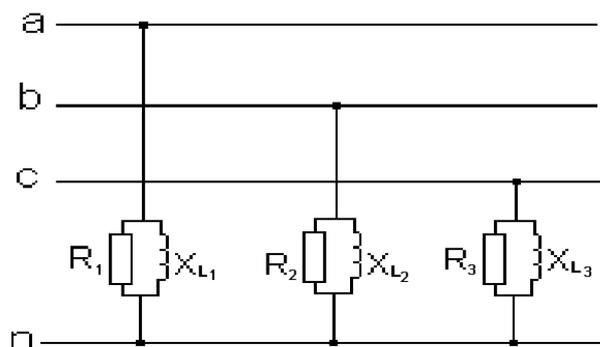


Figura 1.4. Circuito trifásico con cargas monofásicas

Para el análisis de estos circuitos se va a suponer que el desbalance está presente en las corrientes y no en las tensiones, de ahí que las corrientes estén dadas en función de las componentes de secuencia positiva, negativa y cero, y las tensiones en función de las componentes de secuencia positiva.

$$\dot{i}_a = \dot{i}_{a1} + \dot{i}_{a2} + \dot{i}_{a0}$$

$$\dot{i}_b = \dot{i}_{b1} + \dot{i}_{b2} + \dot{i}_{b0}$$

$$\dot{i}_c = \dot{i}_{c1} + \dot{i}_{c2} + \dot{i}_{c0}$$

$$u_a = u_{a1}$$

$$u_b = u_{b1}$$

$$u_c = u_{c1}$$

Donde:

\dot{i}_{a2} y \dot{i}_{a0} : Son los valores instantáneos de las corrientes de secuencia negativa y cero de la fase A, respectivamente.

\dot{i}_{b2} y \dot{i}_{b0} : Son los valores instantáneos de las corrientes de secuencia negativa y cero de la fase B, respectivamente.

\dot{i}_{c2} y \dot{i}_{c0} : Son los valores instantáneos de las corrientes de secuencia negativa y cero de la fase C, respectivamente.

Como φ_{a1} , es el ángulo de defasaje entre la corriente y la tensión de secuencia positiva y tomando a la tensión como referencia, la corriente en esta secuencia va a tener dos componentes, una activa y otra reactiva como se muestra a continuación y se conoce desde el epígrafe anterior.

$$\dot{i}_{a1} = \dot{i}_{a1x} + \dot{i}_{a1y}$$

$$\dot{i}_{b1} = \dot{i}_{b1x} + \dot{i}_{b1y}$$

$$\dot{i}_{c1} = \dot{i}_{c1x} + \dot{i}_{c1y}$$

$$\dot{i}_{a1x} = \dot{i}_{a1} \cos(\omega t + \varphi_{a1})$$

$$\dot{i}_{a1y} = \dot{i}_{a1} \text{sen}(\omega t + \varphi_{a1})$$

Donde:

i_{a1x} , i_{b1x} y i_{c1x} : Son los valores instantáneos de las componentes activas de las corrientes de secuencia positiva en las fases A, B y C, respectivamente.

i_{a1y} , i_{b1y} y i_{c1y} : Son los valores instantáneos de las componentes reactivas de las corrientes de secuencia positiva en las fases A, B y C, respectivamente.

Las expresiones de las corrientes de secuencia positiva activas y reactivas para las fases B y C, son similares a la de la fase A, solo hay que especificar la fase en la que se desea calcular.

Sustituyendo estas ecuaciones en la ecuación de la potencia instantánea se tiene que:

$$S(t) = (u_{a1}i_{a1x} + u_{b1}i_{b1x} + u_{c1}i_{c1x}) + (u_{a1}i_{a1y} + u_{b1}i_{b1y} + u_{c1}i_{c1y}) + (u_{a1}(i_{a2} + i_{a0}) + u_{b1}(i_{b2} + i_{b0}) + u_{c1}(i_{c2} + i_{c0}))$$

Si en la ecuación anterior se sustituyen las expresiones de los valores instantáneos de las corrientes de secuencia positiva activas y reactivas se observará que la potencia aparente tiene además de la potencia activa (P) y reactiva (Q), hay otra componente que está en función de los valores instantáneos de las corrientes de secuencias negativa y cero, que estas existen por el desbalance, por esta razón a esta componente se le llamará **Potencia por Asimetría o por Desbalance** y se denotará por (A).

$$S(t) = P(t) + Q(t) + A(t)$$

En función de los valores eficaces y elevándola al cuadrado se tiene que.

$$S^2 = 3^2 U_{a1}^2 I_{a1x}^2 + 3^2 U_{a1}^2 I_{a1y}^2 + 3^2 U_{a1}^2 (I_{a2}^2 + I_{a0}^2).$$

Si se radicaliza entonces se obtiene:

$$S = 3 U_{a1} I_{a1} \cos \varphi_{a1} + 3 U_{a1} I_{a1} \sin \varphi_{a1} + 3 U_{a1} \sqrt{(I_{a2}^2 + I_{a0}^2)}$$

$$P = 3 U_{a1} I_{a1} \cos \varphi_{a1} \quad Q = 3 U_{a1} I_{a1} \sin \varphi_{a1} \quad A = 3 U_{a1} \sqrt{(I_{a2}^2 + I_{a0}^2)}$$

Como se observa en las ecuaciones anteriores, la potencia total en un circuito desequilibrado y lineal está compuesta por tres términos, el primero conocido del epígrafe

anterior como potencia activa, el segundo la también conocida potencia reactiva y un tercer término denominado en la literatura especializada como Potencia ASIMÉTRICA y que está directamente relacionado con las corrientes de secuencia negativa y cero, por tanto solo aparecerá cuando el circuito está desequilibrado por cualquier razón.

De forma general la potencia aparente también se puede expresar de las siguientes formas:

$$S = P + jQ + A.$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + A^2}.$$

$$S = 3 U_1 \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_0^2}.$$

$$F.P = \frac{P}{S}.$$

Donde:

U_{a1} : Es el valor eficaz de la tensión de secuencia positiva de la fase A..

I_{a1} , I_{a2} y I_{a0} : Son los valores eficaces de las corrientes de secuencias positiva, negativa y cero para la fase A, respectivamente.

I_{b1} , I_{b2} y I_{b0} : Son los valores eficaces de las corrientes de secuencias positiva, negativa y cero para la fase B, respectivamente.

I_{c1} , I_{c2} y I_{c0} : Son los valores eficaces de las corrientes de secuencias positiva, negativa y cero para la fase C, respectivamente.

F.P: Es el factor de potencia.

I_1 , I_2 y I_0 : Son los valores eficaces de las corrientes de secuencias positiva, negativa y cero para la fase A, respectivamente.

U_1 : Es el valor eficaz de la tensión de secuencia positiva.

Esta potencia por desbalance o por asimetría depende de las corrientes de secuencia negativa y cero, y de la tensión de secuencia positiva, la misma aparece por el tipo de

conexión de la carga. El tipo de conexión de la carga hace que la potencia aparente sea mayor para este tipo de circuito que se está analizando porque incluye a la potencia por asimetría (A), de ahí que la corriente que circula por la línea sea mayor y por ende las pérdidas de potencia activa o pérdidas por efecto Joule (calentamiento) como también se le conoce.

1.5. Compensación del desequilibrio

En el epígrafe anterior se hace referencia a que la potencia por asimetría dependía de las corrientes de secuencias negativa y cero, de esto se deduce que para compensar la misma se debe actuar sobre estas dos corrientes.

La corriente de secuencia cero circula solamente por el neutro de los sistemas, si estos se eliminaran o se pudiera conectar al sistema un equipo que inyecte corriente de secuencia cero al mismo, la asimetría o el desbalance disminuiría (Apéndice A).

El científico Steinmetz descubrió un circuito (Figura 1.5) que cuando es alimentado por una tensión de secuencia positiva genera corriente de secuencia inversa, este entonces será capaz de balancear o equilibrar circuitos desequilibrados.

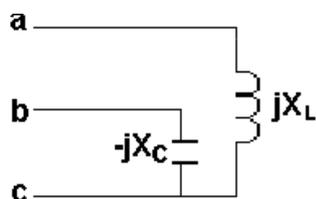


Figura 1.5. Circuito generador de corriente de secuencia negativa alimentado con una tensión de secuencia positiva

Se quiere que el circuito a la vez que genere corriente de secuencia negativa también compense la potencia reactiva, por eso está compuesto por dos condensadores y una inductancia (Figura 1.6). Este circuito como se observa no consume potencia del sistema.

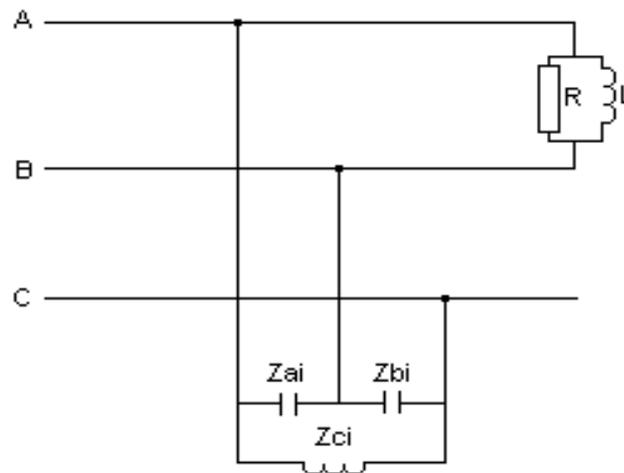


Figura 1.6. Filtro de asimetría compensador de reactivo.

A continuación se observarán para las distintas condiciones que se pueden dar en el sistema, los esquemas y las ecuaciones para la compensación.

1. Sí la carga es resistiva pura como se muestra en la figura 1.7

$$Z_{ai} = \infty.$$

$$Z_{bi} = -j\sqrt{3}R = -j\sqrt{3}R \frac{U_{ab}^2}{P}.$$

$$Z_{ci} = j\sqrt{3}R = j\sqrt{3}R \frac{U_{ab}^2}{P}.$$

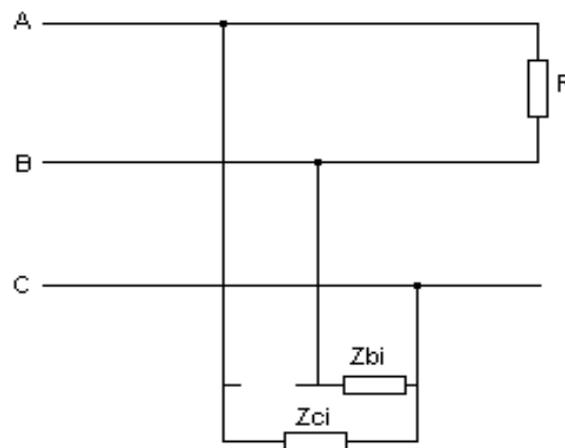


Figura 1.7. Filtros de asimetría para Cargas Resistivas Puras

Si la carga se encuentra conectada en distintas fases del circuito trifásico el filtro cambia de lugar como se muestra en las figuras siguientes. Para cuando la carga está conectada entre las fases A y B, el circuito fue mostrado en la figura 1.6.

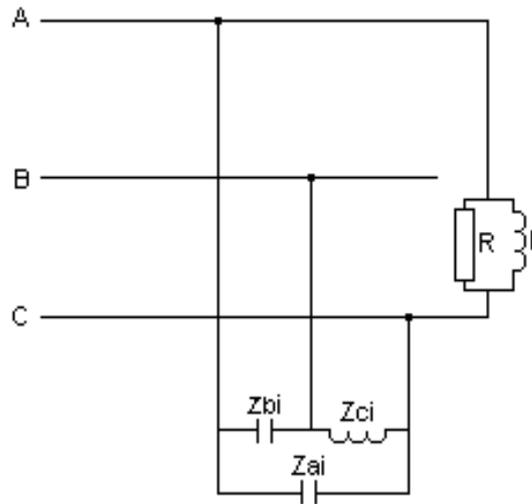


Figura 1.8. Conexión del Filtro de asimetría para una carga conectada entre las fases A y C

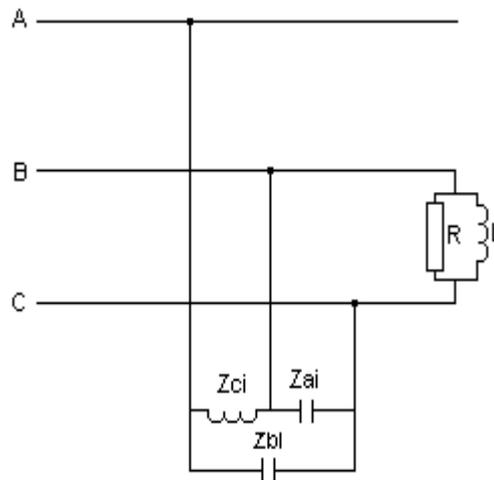


Figura 1.9. Filtro de asimetría para una carga conectada entre las fases B y C

Como se puede notar en las figuras anteriores la conexión del filtro es la misma lo único que rota en dirección a la conexión de la carga. Siempre que la carga sea inductiva y se pretenda mejorar el factor de potencia de la misma, el filtro poseerá dos condensadores y una bobina con una reactancia igual a la suma de las reactancias capacitivas. Si la carga se puede considerar resistiva pura o tiene un factor de potencia elevado que no se pretende mejorar, entonces solo poseerá uno solo condensador de igual reactancia que la bobina (Figura 1.5).

1.6. Circuitos Balanceados no Lineales

Los circuitos que se analizarán tendrán consumidores no lineales, es decir, consumidores que tienen componentes eléctricos no lineales, estos elementos generan armónicos e influyen en la forma de onda de la corriente y de la tensión, distorsionándola.

La presencia de esos armónicos con magnitudes comparables con la frecuencia fundamental (f_1) conlleva a ineficiencias en el sistema eléctrico.

A continuación se relacionarán algunos efectos que estos producen:

- Disminución del factor de potencia.
- Aumento de las pérdidas por efecto joule o por calentamiento de los conductores.
- Aumento de las pérdidas energéticas.
- Disminución del tiempo útil de los aislantes.
- Aumento de las pérdidas eléctricas en el dieléctrico de los condensadores.
- Puede aparecer resonancia en el sistema.

La potencia en estos circuitos se expresan de la forma siguiente.

$$S(t) = \sum_{j=a,b,c} u_j i_j = \sum_{j=a,b,c} u_j \left(\sum_{n=1}^{\infty} i_{jn} \right).$$

$$S(t) = \sum_{j=a,b,c} u_{j1} i_{j1} + \sum_{j=a,b,c} \sum_{n=2}^{\infty} u_{jn} i_{jn}.$$

$$S(t) = \sum_{j=a,b,c} u_{j1} i_{j1X} + \sum_{j=a,b,c} u_{j1} i_{j1Y} + \sum_{j=a,b,c} \sum_{n=2}^{\infty} u_{j1} i_{jn}.$$

Donde:

u_{j1} : Es el valor instantáneo de la tensión para las fases A, B y C.

i_{j1X} : Es el valor instantáneo de la corriente activa para las fases A, B y C.

i_{j1Y} : Es el valor instantáneo de la corriente reactiva para las fases A, B y C.

i_{jn} : Es el valor instantáneo de la corriente para los armónicos apreciables que existan.

Observando la ecuación de la potencia aparente, ésta tiene tres componentes, la potencia activa, la potencia reactiva y otra relacionada con los armónicos, causando distorsión de las ondas de corriente y de tensión, es decir, que esta aparece por ser no lineal la carga, de ahí que a ésta término se le llame **Potencia de Distorsión** y se le denote por la letra (D).

En función de los valores eficaces y elevándola al cuadrado se tiene que.

$$S^2 = 9U_{a1}^2 I_{a1X}^2 + 9U_{a1}^2 I_{a1Y}^2 + 9U_{a1}^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2.$$

Aplicando raíz se obtiene que:

$$S = P + jQ + D$$

Donde:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}.$$

$$P = 3U_{a1} I_{a1X} = 3U_{a1} I_{a1} \cos \varphi_{a1}.$$

$$Q = 3U_{a1} I_{a1Y} = 3U_{a1} I_{a1} \sin \varphi_{a1}.$$

$$D = 3U_{a1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$

Donde:

U_{a1} : Es el valor eficaz de la tensión para la fase A.

I_{a1x} : Es el valor eficaz de la corriente activa para la fase A.

I_{a1y} : Es el valor eficaz de la corriente reactiva para la fase A.

I_n : Es el valor eficaz de los armónicos apreciables de la corriente.

Aquí se puede ver que la corriente que va a existir en la línea va a depender de esta potencia de distorsión y por tanto las pérdidas por efecto joule van a aumentar, de ahí que el carácter no lineal de la carga es otro factor que influye en estas pérdidas.

1.7. Compensación de la Distorsión Armónica

Como se observa en la figura 1.10, la corriente que aporta el armónico influye en la corriente de la red de alimentación y por ende aumentan las pérdidas por efecto Joule o por calentamiento, si esto se pudiera impedir, sería lo idóneo y se logra poniendo un filtro en paralelo con la carga, este filtro consiste en una inductancia y un condensador conectado en serie de forma tal que tenga una frecuencia de resonancia igual a la frecuencia del armónico que se quiere eliminar y logrando que la resistencia del filtro (r_f) sea mucho menor que la impedancia del sistema $\left(\sqrt{r^2 + (\omega l_{cc})^2}\right)$

El condensador hay que elegirlo de forma que compense el reactivo y para lograr el filtro, esto trae consigo un aumento de la corriente en el armónico fundamental en los condensadores.

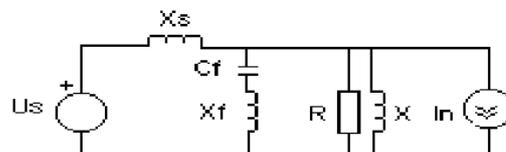


Figura 1.10. Filtro de armónicos

$$C_f = \frac{Q_1}{3 * 2\pi * f * U_n^2 \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right)}$$

Además de este carácter no lineal que pueden tener las lámparas, estas son monofásicas, es decir, que en los circuitos de alumbrado están presentes los elementos nuevos tratados en el trabajo.

1.8. Conclusiones

En este capítulo se obtienen dos nuevas potencias que solo aparecen en los circuitos desequilibrados y no lineales y están relacionados con la asimetría del circuito y las componentes armónicas que puedan consumir los consumidores.

En ambos casos, se diseñaron dos variantes de filtros para eliminar la asimetría y los armónicos. El primero se construye con elementos pasivos (condensadores y bobinas) al igual que el segundo. Pero su conexión está en dependencia de la conexión de los elementos monofásicos y en el caso de los filtros de armónicos, sus parámetros están en dependencia de las componentes reactivas y de los niveles de armónicos que consuma la lámpara.

En el próximo capítulo se describirán algunas relaciones matemáticas que permitan modelar las redes de alumbrado exterior tanto para las componentes de frecuencia fundamental y las armónicas de tercer orden.

2.1. Introducción.

Los estudios que se realizan de eficiencia en los sistemas eléctricos casi siempre están relacionados con el cálculo de las pérdidas eléctricas, determinándose las mismas aplicando la ley por efecto joule.

En este capítulo se pretende analizar la eficiencia del circuito de alumbrado exterior de la avenida Puerto – Che Guevara, este análisis comúnmente se realiza determinando las pérdidas eléctricas en los tramos de los conductores de fases comprendidos entre la fuente de alimentación y la primera lámpara del circuito.

En la figura 2.1 se muestra el una sección circuito trifásico real de alumbrado, observándose que en los tramos de cables que existen entre lámparas tienen resistencias (R) y reactancias (X_L) y circula una corriente por lo tanto hay pérdidas que en la mayoría de los estudios relacionados con la temática no se tienen en cuenta.

De la misma forma se hace notar que en los conductores neutros también existen estos parámetros tratados anteriormente y tampoco se tienen en cuenta en el cálculo de las pérdidas eléctricas de los circuitos.

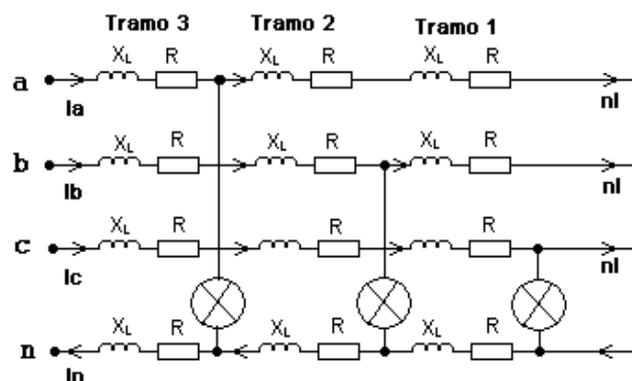


Figura 2.1: Sección de un circuito trifásico de alumbrado exterior.

2.2. Modelos simplificados para el cálculo de las pérdidas en circuitos de alumbrado exterior.

Observando la figura 2.1, se analizará el comportamiento de un circuito de tres lámparas una por cada fase. Las pérdidas eléctricas van a ser igual a la suma de las

pérdidas en los tres tramos, como la distancia entre las lámparas y la sección de los conductores son iguales en las tres fases en las ecuaciones aparece R, observándose en las siguientes ecuaciones y dando como resultado a la ecuación general 2.1.

$$p_1 = R(I_a^2 + I_b^2 + (I + I_c)^2) + R_n \left(\left| \underline{I'_c} + \underline{I_n} \right| \right)^2$$

$$p_2 = R \left(I_a^2 + (I + I_b)^2 + (I + I_c)^2 \right) + R_n \left(\left| \underline{I'_b} + \underline{I'_c} + \underline{I_n} \right| \right)^2$$

$$p_3 = R \left((I + I_a)^2 + (I + I_b)^2 + (I + I_c)^2 \right) + R_n \left(\left| \underline{I'_a} + \underline{I'_b} + \underline{I'_c} + \underline{I_n} \right| \right)^2.$$

$$p_t = p_1 + p_2 + p_3$$

$$p_t = R \left(2I_a^2 + I_b^2 + 3(I + I_c)^2 + 2(I + I_b)^2 + (I + I_a)^2 \right) + R_n \left(\left(\left| \underline{I'_c} + \underline{I_n} \right| \right)^2 + \left(\left| \underline{I'_b} + \underline{I'_c} + \underline{I_n} \right| \right)^2 + I_n^2 \right) \quad (2.1)$$

Donde:

P_1, P_2, P_3 y P_t : Son los valores de las pérdidas de potencia en los tramos 1, 2, 3 y total respectivamente.

R y R_n : Son los valores de resistencias de los conductores de fase y de tierra respectivamente.

I_a, I_b e I_c : Son los valores eficaces de las corrientes de las fases A, B y C respectivamente.

Esta ecuación general, con determinadas condiciones se tendrán ecuaciones particulares o específicas para un grupo cualquiera de tres lámparas una por cada fase, de esta ecuación resultan cuatros casos particulares que se mostraran a continuación.

Si $I_a = I_b = I_c = nI$ y $I_n = 0$, como se muestra en la figura 2.2 y siguiendo el procedimiento anterior se obtiene.

$$p_t = R \left(6((n+1)I)^2 + 3(nI)^2 \right) + 2R_n I^2 \quad (2.2)$$

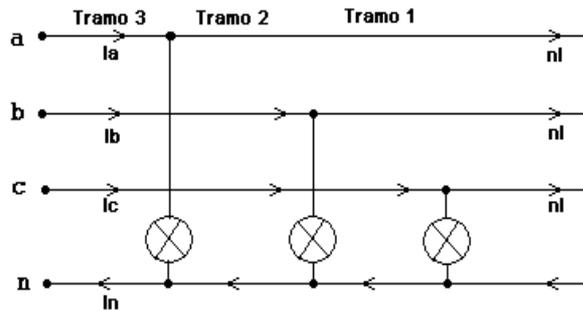


Figura: 2.2: Sección de un circuito trifásico de alumbrado exterior compuesto por grupos de tres lámparas por fase y que no haya lámparas al final.

Donde:

I: Es el valor eficaz de la corriente de cada lámpara teniendo en cuenta los armónicos.

n: Es la cantidad de grupos de tres lámparas que existan y va desde 0 hasta el número real que existan realmente.

Si la corriente en el neutro es distinta de cero es porque hay lámparas conectadas después de las tres lámparas analizadas anteriormente, se va a suponer que hay una lámpara más conectada, de ahí que esta puede estar en cualquiera de las fases, veamos que ocurre.

- Si $I_a = (n+1)I$, $I_b = I_c = nI$ y $I_n = I_a$, como se muestra en la figura 2.3.

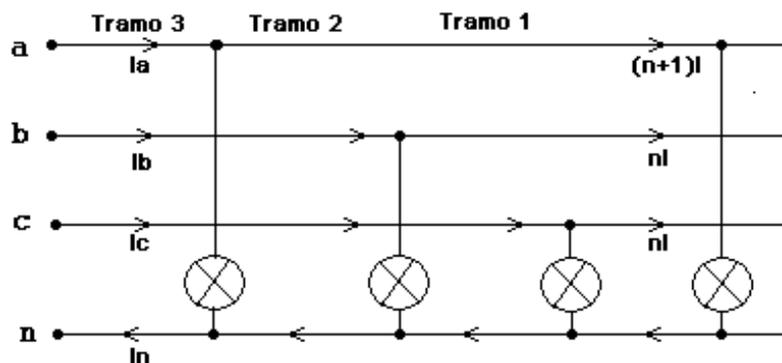


Figura 2.3: Sección de un circuito trifásico de alumbrado exterior compuesto por grupos de tres lámparas por fase y que haya una lámpara al final en la fase A.

Siguiendo el mismo procedimiento se obtiene la ecuación 2.3.

$$p_1 = R\left(\left((n+1)I\right)^2 + (nI)^2 + \left((n+1)I\right)^2\right) + R_n\left(\left|I'_c + I'_a\right|\right)^2$$

$$p_2 = R\left(\left((n+1)I\right)^2 + \left((n+1)I\right)^2 + \left((n+1)I\right)^2\right) + R_n\left(\left|I'_b + I'_c + I'_a\right|\right)^2$$

$$p_3 = R\left(\left((n+2)I\right)^2 + \left((n+1)I\right)^2 + \left((n+1)I\right)^2\right) + R_n\left(\left|I'_a\right|\right)^2.$$

$$p_t = p_1 + p_2 + p_3$$

$$p_t = R\left(\left((n+2)I\right)^2 + \left((n+1)I\right)^2 + (nI)^2\right) + 2R_n I^2 \tag{2.3}$$

En el caso anterior se conectó una lámpara en la fase A, sí se conectara en la fase B o en la fase C, la ecuación de las pérdidas variará, estas ecuaciones se obtendrán de forma similar a las anteriores, es decir, primeramente se determinan las pérdidas por los tramos, luego se suman y obtenemos el resultado final.

A continuación se mostrará como quedarían las pérdidas para la conexión de la lámpara en la fase B y C, mostrado en las ecuaciones 2.4 y 2.5, respectivamente.

- Si $I_a = I_c = nI$, $I_b = (n+1)I$ y $I_n = I'_c$, como se muestra en la figura 2.4.

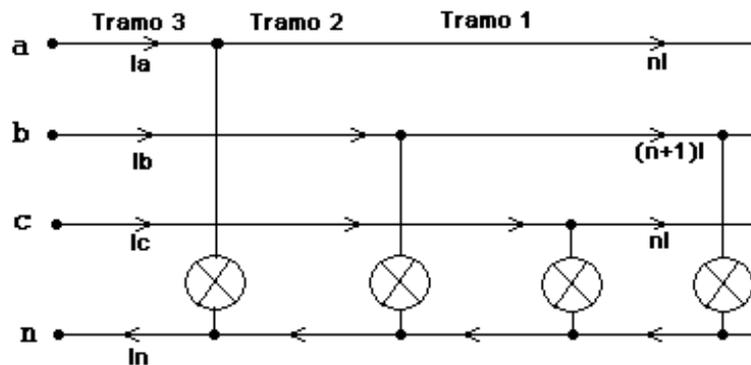


Figura 2.4: Sección de un circuito trifásico de alumbrado exterior compuesto por grupos de tres lámpara por fase y que haya una lámpara al final en la fase B.

$$p_t = R\left(2\left((n+2)I\right)^2 + 5\left((n+1)I\right)^2 + 2(nI)^2\right) + 5R_n I^2 \tag{2.4}$$

- Si $I_a = I_b = nI$, $I_c = (n+1)I$ y $I_n = I'_c$, como se muestra en la figura 2.5.

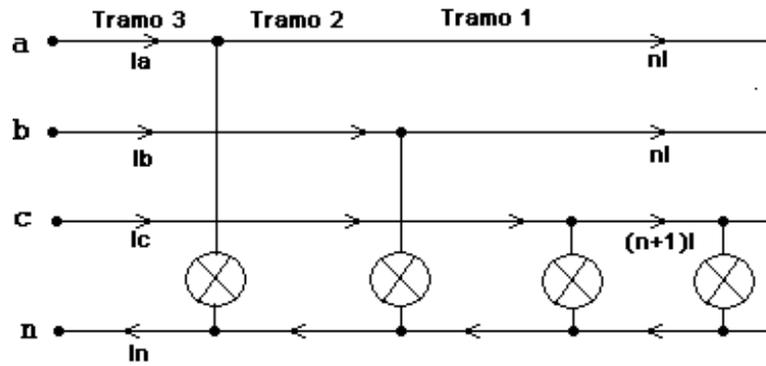


Figura 2.5: Sección de un circuito trifásico de alumbrado exterior compuesto por grupos de tres lámpara por fase y que haya una lámpara al final en la fase C.

$$p_t = R(3((n+2)I)^2 + 3((n+1)I)^2) + 8R_n I^2 \quad (2.5)$$

Como se puede observar las pérdidas de energía eléctrica en circuitos que presentan la misma cantidad de lámparas por fase, y se le conecta otra lámpara después de estas, no se comportan de la misma forma si ésta se conecta en cualquier fase.

Sí la secuencia en la conexión de las lámparas es A, B y C, y se deseara seguir la misma, la próxima lámpara debería conectarse por lógica en la fase A, sí se conectara en la fase B en lugar de la fase A, las pérdidas aumentarían con respecto a estas últimas y sí se conectaran en la fase C en lugar de la fase A, las pérdidas aumentarían aún más.

➤ A continuación se hará la demostración de estas ecuaciones.

Observando la figura 2.3, la última lámpara se conecta en la fase A, para este mismo circuito las pérdidas eléctricas se comportan como sigue.

$$p_1 = R(I_a^2 + I_c^2) + R_n \left(|I'_a + I'_c| \right)^2$$

$$p_2 = R(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) + R_n \left(|I'_a + I'_b + I'_c| \right)^2$$

$$p_3 = R((2I_a)^2 + I_b^2 + I_c^2) + R_n \left(|I'_a| \right)^2$$

$$p_t = p_1 + p_2 + p_3$$

$$p_t = 11RI^2 + 2R_n I^2$$

$$p_t = I^2(11R + 2R_n).$$

Comprobando por la ecuación (2.3) para $n=0$, tenemos.

$$p_t = I^2(11R + 2R_n).$$

Sí se conectara la lámpara en la fase B, según la figura 2.4, entonces las pérdidas se comportan de la forma que sigue:

$$p_1 = R(I_b^2 + I_c^2) + R_n \left(|I_b' + I_c'| \right)^2$$

$$p_2 = R \left((2I_b^2) + I_c^2 \right) + R_n \left(|2I_b' + I_c'| \right)^2$$

$$p_3 = R \left((2I_b)^2 + I_a^2 + I_c^2 \right) + R_n \left(|I_b'| \right)^2$$

$$p_t = p_1 + p_2 + p_3$$

$$p_t = 13RI^2 + 5R_n I^2$$

$$p_t = I^2(13R + 5R_n).$$

Sí se conectara la lámpara en la fase C, según la figura 2.5, entonces las pérdidas se comportan de la forma que sigue:

$$p_1 = R \left((2I_c^2) \right) + R_n \left(|2I_c'| \right)^2$$

$$p_3 = R \left((2I_c)^2 + I_a^2 + I_b^2 \right) + R_n \left(|I_c'| \right)^2$$

$$p_t = p_1 + p_2 + p_3$$

$$p_t = I^2(15R + 8R_n).$$

Comprobando por la ecuación (2.5) para $n=0$, se tiene que.

$$p_t = I^2(15R + 8R_n).$$

En la realidad se da el caso que en lugar de la conexión de una lámpara al final de un grupo cualquiera de tres lámparas se conectan dos lámparas, estas se pueden conectar en las fases A y B, en las fases B y C, y en las fases C y A, para cualquiera de

las tres combinaciones las pérdidas de potencia se comportan de diferentes formas, que se demostrará a continuación, puede darse el caso que las combinaciones sean en las fases B y A, en las fases C y B, y en las fases A y C, en estos casos quedó demostrado que el resultado era el mismo que en las combinaciones anteriores. Para desarrollar este punto y expresarlo de forma general se va a suponer que existen dos grupos cualquiera uno de tres y otro de dos lámparas, para los grupos n y k, respectivamente.

Cuando a un grupo n cualquiera de tres lámparas se le conecta un grupo k de dos lámparas al final en las fases A y B las pérdidas se expresan de la forma que sigue:

- Sí $I_a = I_b = (n+k)I$, $I_c = nI$, $I_n = k(I_a + I_b) = kI_a^{-60^\circ}$, como se muestra en la figura 2.6.

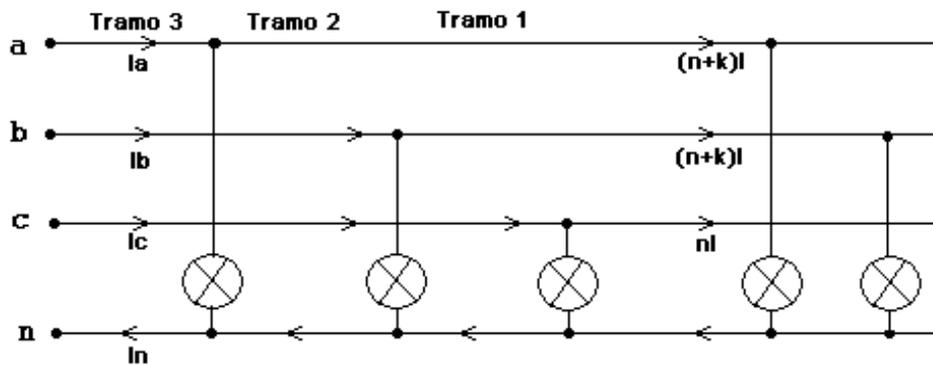


Figura 2.6: Sección de un circuito trifásico de alumbrado exterior compuesto por grupos de tres lámpara por fase y que haya dos lámparas al final en las fases A y B.

Siguiendo el procedimiento se obtiene la ecuación.

$$\begin{aligned}
 p_t &= R\left(2((n+k)I)^2 + ((n+k)I)^2 + 3((n+1)I)^2\right) + 2((n+k+1)I)^2 + ((n+k+1)I)^2 + \\
 &R_n \left(\left(\underline{I_c} + k\underline{I_a}^{-60^\circ} \right)^2 + \left(\underline{I_b} + \underline{I_c} + k\underline{I_a}^{-60^\circ} \right)^2 + \left(k\underline{I_a}^{-60^\circ} \right)^2 \right). \\
 p_t &= R\left(3((n+k+1)I)^2 + 3((n+k)I)^2 + 3((n+1)I)^2\right) + R_n \left(((k-1)I)^2 + (k^2 - k + 1)I^2 + (kI)^2 \right). \\
 p_t &= R\left(3((n+k+1)I)^2 + 3((n+k)I)^2 + 3((n+1)I)^2\right) + R_n \left(3k^2 - 3k + 2 \right) I^2 \tag{2.6}
 \end{aligned}$$

Cuando a un grupo n cualquiera de tres lámparas se le conecta un grupo k de dos lámparas al final en las fases B y C las pérdidas se expresan de la forma que sigue:

- Sí $I_b = I_c = (n+k)I$, $I_a = nI$, $I_n = k(I_b + I_c) = kI_a^{180^\circ}$, como se muestra en la figura 2.7.

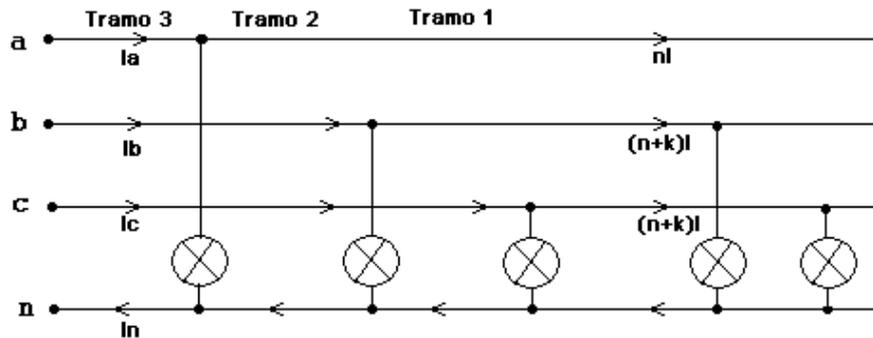


Figura 2.7: Sección de un circuito trifásico de alumbrado exterior compuesto por grupos de tres lámpara por fase y que haya dos lámpara al final en las fases B y C.

$$\begin{aligned}
 p_1 &= R \left((nI)^2 + ((n+k)I)^2 + ((n+k+1)I)^2 \right) + R_n \left(|I_n + I_c| \right)^2 \\
 p_2 &= R \left((nI)^2 + ((n+k+1)I)^2 + ((n+k+1)I)^2 \right) + R_n \left(|I_n + I_c + I_b| \right)^2 \\
 p_3 &= R \left(((n+1)I)^2 + ((n+k+1)I)^2 + ((n+k+1)I)^2 \right) + R_n \left(|I_n + I_c + I_b + I_a| \right)^2 \\
 p_t &= R \left(5((n+k+1)I)^2 + ((n+k)I)^2 + ((n+1)I)^2 \right) + R_n \left(\left| kI_a^{180^\circ} + I_c \right| \right)^2 + \left(\left| I_a^{180^\circ} (k+1) \right| \right)^2 + \left(\left| kI_a^{180^\circ} \right| \right)^2 \\
 p_t &= R \left(5((n+k+1)I)^2 + ((n+k)I)^2 + ((n+1)I)^2 \right) + R_n \left((k^2 + k + 1)I^2 + ((k+1)I)^2 + (kI)^2 \right) \\
 p_t &= R \left(5((n+k+1)I)^2 + ((n+k)I)^2 + ((n+1)I)^2 \right) + R_n I^2 (3k^2 + 3k + 2). \tag{2.7}
 \end{aligned}$$

Cuando a un grupo n cualquiera de tres lámparas se le conecta un grupo k cualquiera de dos lámparas al final en las fases C y A, las pérdidas se expresan de la forma que sigue:

- Sí $I_a = I_c = (n+k)I$, $I_b = nI$, $I_n = k(I_a + I_c) = kI_a^{60^\circ}$, como se observa en la figura 2.8.

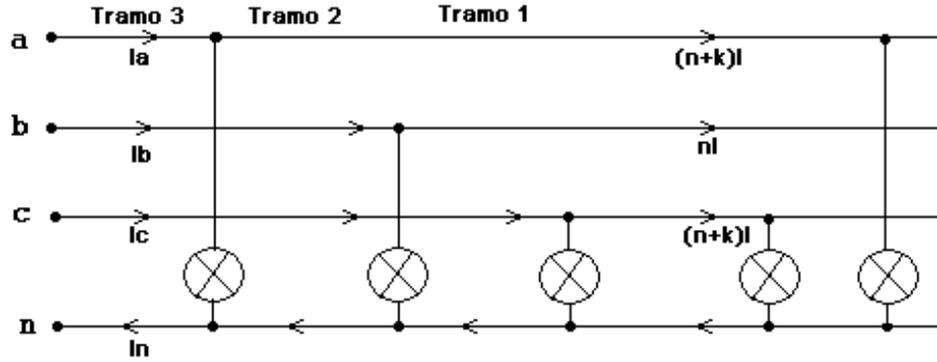


Figura 2.8: Sección de un circuito trifásico de alumbrado exterior compuesto por grupos de tres lámpara por fase y que haya dos lámpara al final en las fases C y A.

$$p_1 = R\left(\left((n+k)I\right)^2 + (nI)^2 + \left((n+k+1)I\right)^2\right) + R_n\left(\left|I_n + I_c'\right|\right)^2$$

$$p_2 = R\left(\left((n+k)I\right)^2 + \left((n+1)I\right)^2 + \left((n+k+1)I\right)^2\right) + R_n\left(\left|I_n + I_c' + I_b'\right|\right)^2$$

$$p_3 = R\left(\left((n+k+1)I\right)^2 + \left((n+1)I\right)^2 + \left((n+k+1)I\right)^2\right) + R_n\left(\left|I_n + I_c' + I_b' + I_a'\right|\right)^2$$

$$p_t = R\left(4\left((n+k+1)I\right)^2 + 2\left((n+k)I\right)^2 + 2\left((n+1)I\right)^2 + (nI)^2\right) + R_n\left(\left|kI_a^{60^\circ} + I_c'\right|\right)^2 + \left(\left|kI_a^{60^\circ} + I_a^{180^\circ}\right|\right)^2 + \left(\left|kI_a^{60^\circ}\right|\right)^2$$

$$p_t = R\left(4\left((n+k+1)I\right)^2 + 2\left((n+k)I\right)^2 + 2\left((n+1)I\right)^2 + (nI)^2\right) + R_n I^2 (k^2 - k + 1 + k^2 + k + 1 + k^2)$$

$$p_t = R\left(4\left((n+k+1)I\right)^2 + 2\left((n+k)I\right)^2 + 2\left((n+1)I\right)^2 + (nI)^2\right) + R_n I^2 (3k^2 + 2) \quad (2.8)$$

➤ Comprobación para la ecuación (2.6).

Si se tiene un circuito con un grupo de tres lámparas y un grupo de dos lámparas como muestra la figura 2.6.

$$p_1 = R\left(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2\right) + R_n\left(\left|I_a' + I_b' + I_c'\right|\right)^2$$

$$p_2 = R\left(I_a^2 + \left(2I_b\right)^2 + I_c^2\right) + R_n\left(\left|I_b'\right|\right)^2$$

$$p_3 = R\left(\left(2I_a\right)^2 + \left(2I_b\right)^2 + \left(2I_c\right)^2\right) + R_n\left(\left|I_b' + I_c'\right|\right)^2$$

$$p_t = p_1 + p_2 + p_3 = R\left[6I^2 + 3\left(2I\right)^2\right] + R_n\left(2I^2\right)$$

$$p_t = R18I^2 + 2R_n I^2$$

Por la formula general (2.6) se tieneque:

$$k = 1 \text{ y } n = 0$$

$$p_t = R(3(2I)^2 + 3I^2 + 3I^2) + 2R_n I^2 = 18RI^2 + 2R_n I^2$$

Cuando en un circuito hay 6 lámparas o dos grupos de tres lámparas con dos lamparas al final en fase A y B, figura 2.9.

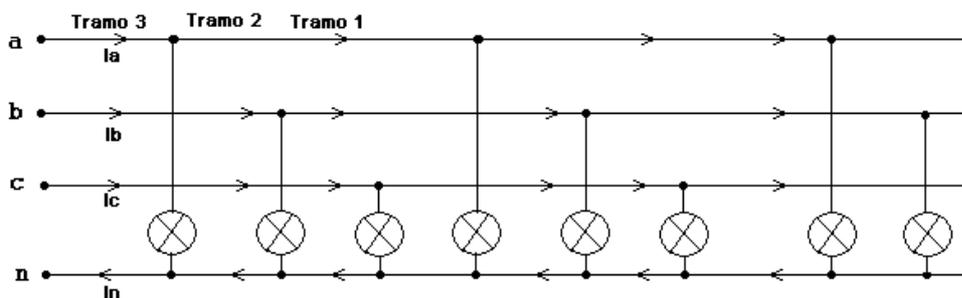


Figura 2.9: Sección de un circuito trifásico de alumbrado exterior compuesto por grupos de tres lámpara por fase y que haya dos lámpara al final en las fases A y B.

$$p_1 = R((2I_a)^2 + (2I_b)^2 + (2I_c)^2) + R_n \left(\underline{I'_a} + \underline{I'_b} + \underline{I'_c} \right)^2$$

$$p_2 = R((2I_a)^2 + (3I_b)^2 + (2I_c)^2) + R_n \left(\underline{I'_b} \right)^2$$

$$p_3 = R((3I_a)^2 + (3I_b)^2 + (2I_c)^2) + R_n \left(\underline{I'_b} + \underline{I'_c} \right)^2$$

$$p_t = p_1 + p_2 + p_3 = R[3(3I)^2 + 6(2I)^2] + R_n (2I^2)$$

$$p_t = R51I^2 + 2R_n I^2$$

Por la fórmula general 2.6:

$$k = 1 \text{ y } n = 0$$

$$p_t = R(3(3I)^2 + 3(2I)^2 + 3(2I)^2) + 2R_n I^2$$

$$p_t = 51RI^2 + 2R_n I^2$$

Cuando en un circuito hay 6 lámparas o dos grupos de tres lámparas con dos grupos de 2 lamparas al final en fase A y B.

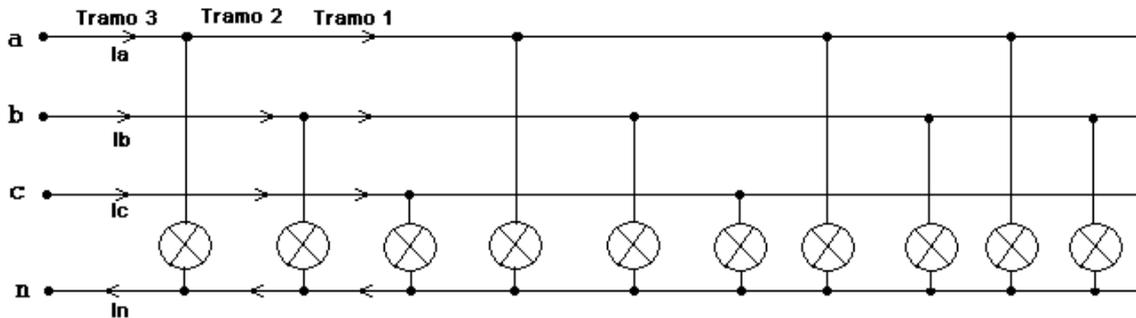


Figura 2.10: Sección de un circuito trifásico de alumbrado exterior compuesto por grupos de tres lámpara por fase y que haya dos lámpara al final en las fases A y B.

$$p_1 = R((3I_a)^2 + (3I_b)^2 + (2I_c)^2) + R_n \left(\underline{I'_a} + \underline{I'_b} \right)^2$$

$$p_2 = R((3I_a)^2 + (4I_b)^2 + (2I_c)^2) + R_n \left(\underline{I'_a} + \underline{2I'_b} \right)^2$$

$$p_3 = R((4I_a)^2 + (4I_b)^2 + (2I_c)^2) + R_n \left(\underline{2(I'_a + I'_b)} \right)^2$$

$$p_t = R \left[3(4I)^2 + 3(3I)^2 + 3(2I)^2 \right] + R_n \left(I^2 + (\sqrt{3}I)^2 + (2I)^2 \right)$$

$$p_t = 87RI^2 + 8R_nI^2$$

Por la fórmula general (2.6):

$$k = 1 \text{ y } n = 1$$

$$p_t = 87RI^2 + 8R_nI^2$$

➤ Comprobando la ecuación (2.7)

Cuando se tiene tres lámparas o un grupo de tres lámparas balanceadas con dos lámparas al final en fases B y C, como se observa en la figura 2.7.

$$p_1 = R(I_b^2 + (2I_c)^2) + R_n \left(\underline{2I'_c} + \underline{I'_b} \right)^2$$

$$p_2 = R((2I_b)^2 + (2I_c)^2) + R_n \left(\underline{2I'_c} + \underline{2I'_b} \right)^2$$

$$p_3 = R((I_a)^2 + (2I_b)^2 + (2I_c)^2) + R_n \left(\underline{I'_c} + \underline{I'_b} \right)^2$$

$$p_t = R \left[5(2I)^2 + (2I)^2 \right] + R_n \left(I^2 + (\sqrt{3}I)^2 + (2I)^2 \right)$$

$$p_t = R(22I^2) + 8R_n I^2$$

Por la fórmula general (2.7):

$$k = 1 \text{ y } n = 0$$

$$p_t = R(20I^2 + 2I^2) + 8R_n I^2$$

$$p_t = 22RI^2 + 8R_n I^2$$

Cuando en un circuito hay 6 lámparas o dos grupos de tres lámparas balanceadas con dos lamparas al final en fase B y C.

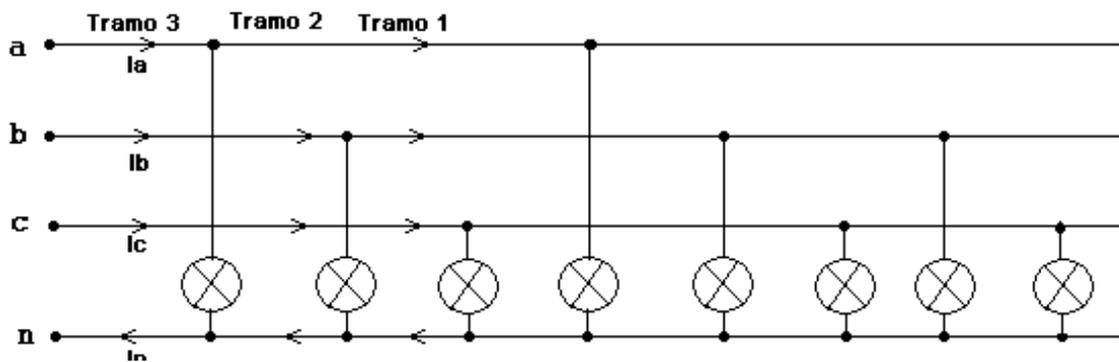


Figura 2.11: Sección de un circuito trifásico de alumbrado exterior compuesto por grupos de tres lámpara por fase y que haya dos lámpara al final en las fases B y C.

$$p_1 = R((I_a)^2 + (2I_b)^2 + (3I_c)^2) + R_n \left(\underline{2I'_c} + \underline{I'_b} \right)^2$$

$$p_2 = R((I_a)^2 + (3I_b)^2 + (3I_c)^2) + R_n \left(\underline{2I'_c} + \underline{2I'_b} \right)^2$$

$$p_3 = R((2I_a)^2 + (3I_b)^2 + (3I_c)^2) + R_n \left(\underline{I'_c} + \underline{I'_b} \right)^2$$

$$p_t = R \left[5(3I)^2 + 2(2I)^2 + (2I)^2 \right] + R_n \left(\left(I_a^{180^\circ} \right)^2 + (\sqrt{3}I)^2 + \left(2I_a^{180^\circ} \right)^2 \right)$$

$$p_t = 55RI^2 + 8R_n I^2$$

Por la fórmula general:

$$k = 1 \text{ y } n = 1$$

$$p_t = R(45I^2 + 10I^2) + 8R_n I^2$$

$$p_t = 55RI^2 + 8R_n I^2$$

En un circuito con dos grupos de tres lámparas y dos grupos de dos lámparas estas últimas en las fases B y C, como se muestra en la figura 2.12, las pérdidas se comportan de la siguiente forma.

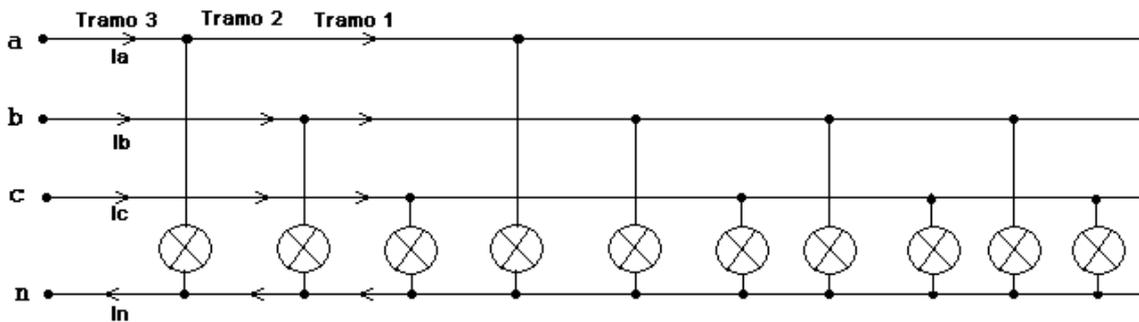


Figura 2.12: Sección de un circuito trifásico de alumbrado exterior compuesto por grupos de tres lámpara por fase y que haya dos grupos de dos lámparas al final en las fases B y C.

$$p_1 = R(I_a^2 + (3I_b)^2 + (4I_c)^2) + R_n \left(\left| 3\underline{I_a}^{180^\circ} + \underline{I'_a} + \underline{I'_c} \right| \right)^2$$

$$p_2 = R(I_a^2 + (4I_b)^2 + (4I_c)^2) + R_n \left(\left| 2\underline{I_a}^{180^\circ} + \underline{I'_c} + \underline{I'_b} \right| \right)^2$$

$$p_3 = R \left(\left(2I_a \right)^2 + (4I_b)^2 + (4I_c)^2 \right) + R_n \left(\left| 3\underline{I_a}^{180^\circ} + I_a \right| \right)^2$$

$$p_t = p_1 + p_2 + p_3 = R(5(4I)^2 + (3I)^2 + (2I)^2 + 2I^2) + R_n \left(\left(\left| 2\underline{I_a}^{180^\circ} + \underline{I'_c} \right| \right)^2 + \left(\left| 3\underline{I_a}^{180^\circ} \right| \right)^2 + \left(\left| 2\underline{I_a}^{180^\circ} \right| \right)^2 \right)$$

$$p_t = I^2(95R + 20R_n)$$

Comprobando por la ecuación 2.7 para n=1 y k=2.

$$p_t = R(80I^2 + 9I^2 + 4I^2 + 2I^2) + 20R_n I^2.$$

$$p_t = I^2(95R + 20R_n)$$

➤ Comprobando la ecuación 2.8.

Comportamiento de las pérdidas de energía eléctrica en un circuito con un grupo de tres lámparas y un grupo de dos lámparas conectadas en las fases C y A, como se muestra en la figura 2.8.

$$p_1 = R(I_a^2 + (2I_c)^2) + R_n \left(|2\underline{I'_c} + \underline{I'_a}| \right)^2.$$

$$p_2 = R(I_a^2 + I_b^2 + (2I_c)^2) + R_n \left(|2\underline{I'_c} + \underline{I'_a} + \underline{I'_b}| \right)^2.$$

$$p_3 = R \left((2I_a)^2 + I_b^2 + (2I_c)^2 \right) + R_n \left(|\underline{I'_c} + \underline{I'_a}| \right)^2.$$

$$p_t = I^2 (20R + 5R_n).$$

Comprobando por la ecuación 2.7 y para n=0 y k=1.

$$p_t = R(16I^2 + 2I^2 + 2I^2) + 5R_n I^2.$$

$$p_t = I^2 (20R + 5R_n).$$

Comportamiento de las pérdidas de energía eléctrica en un circuito con un grupo de tres lámparas y dos grupos de dos lámparas conectadas en las fases C y A, como se muestra en la figura 2.13.

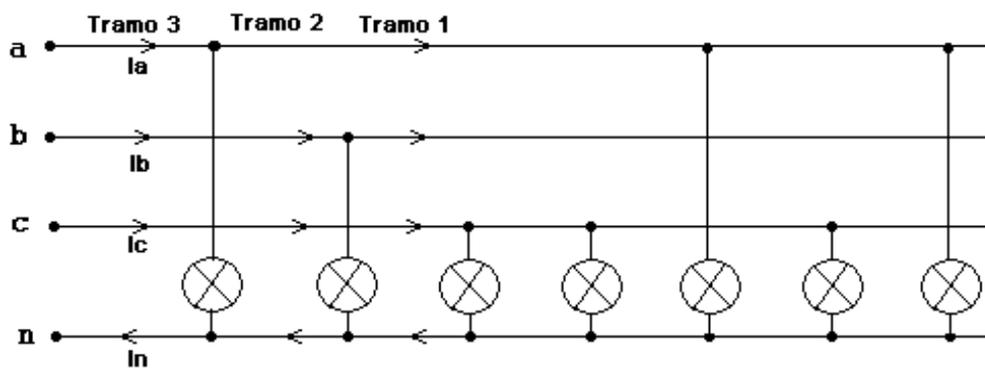


Figura 2.13: Sección de un circuito trifásico de alumbrado exterior compuesto por grupos de tres lámpara por fase y que haya dos grupos de dos lámparas al final en las fases C y A.

$$p_2 = R \left((2I_a)^2 + I_b^2 + (3I_c)^2 \right) + R_n \left(|2(\underline{I'_c} + \underline{I'_a}) + \underline{I'_c} + \underline{I'_b}| \right)^2.$$

$$p_3 = R\left((3I_a)^2 + I_b^2 + (3I_c)^2\right) + R_n\left(2\left(\underline{I'_c} + \underline{I'_a}\right)\right)^2.$$

$$p_t = R\left(4(3I)^2 + 2(2I)^2 + 2I^2\right) + R_n\left(\left(2\underline{I'_a}^{60^\circ} + \underline{I'_c}\right)^2 + \left(2\underline{I'_c} + \underline{I'_a}\right)^2 + \left(2\underline{I'_a}^{60^\circ}\right)^2\right)$$

$$p_t = 46I^2R + R_n\left((\sqrt{7}I)^2 + (\sqrt{3}I)^2 + (2I)^2\right)$$

$$p_t = 46I^2R + 14I^2R_n.$$

Comprobando por la ecuación (2.8) para n=0 y k=2.

$$p_t = R(36I^2 + 8I^2 + 2I^2) + 14I^2R_n.$$

$$p_t = 46I^2R + 14I^2R_n.$$

Comportamiento de las pérdidas eléctricas en un circuito con dos grupos de tres lámparas y de dos lámparas.

$$p_1 = R\left((3I_a)^2 + I_b^2 + (4I_c)^2\right) + R_n\left(2\left(\underline{I'_c} + \underline{I'_a}\right) + \underline{I'_c}\right)^2$$

$$p_2 = R\left((3I_a)^2 + (2I_b)^2 + (4I_c)^2\right) + R_n\left(2\left(\underline{I'_c} + \underline{I'_a}\right) + \underline{I'_c} + \underline{I'_b}\right)^2$$

$$p_3 = R\left((4I_a)^2 + (2I_b)^2 + (4I_c)^2\right) + R_n\left(2\left(\underline{I'_c} + \underline{I'_a}\right)\right)^2$$

$$p_t = R\left(4(4I)^2 + 2(3I)^2 + 2(2I)^2 + I^2\right) + R_n\left(\left(2\underline{I'_a}^{60^\circ} + \underline{I'_c}\right)^2 + \left(2\underline{I'_c} + \underline{I'_a}\right)^2 + \left(2\underline{I'_a}^{60^\circ}\right)^2\right)$$

$$p_t = 91I^2R + R_n\left((\sqrt{7}I)^2 + (\sqrt{3}I)^2 + (2I)^2\right)$$

$$p_t = 91I^2R + 14I^2R_n.$$

Comprobando por la ecuación (2.8) para n=1 y k=2.

$$p_t = R(64I^2 + 18I^2 + 8I^2 + I^2) + 14R_nI^2.$$

$$p_t = 91I^2R + 14I^2R_n.$$

Comportamiento de las pérdidas eléctricas para un grupo k de dos lámparas conectadas en las fases A y B.

- Si $I_a = I_b = kI$. Y siguiendo el mismo procedimiento anterior se obtiene la ecuación 2.9

$$p_1 = R((kI)^2 + ((k+1)I)^2) + R_n \left(\left| \underline{I_n} + \underline{I'_b} \right| \right)^2.$$

$$p_2 = R(2((k+1)I)^2) + R_n \left(\left| \underline{I_n} + \underline{I'_b} + \underline{I'_a} \right| \right)^2.$$

$$I_n = k(\underline{I'_b} + \underline{I'_a})$$

$$p_1 = R((kI)^2 + ((k+1)I)^2) + R_n \left(\left| k(\underline{I'_b} + \underline{I'_a}) + \underline{I'_b} \right| \right)^2.$$

$$p_2 = R(2((k+1)I)^2) + R_n \left(\left| k(\underline{I'_b} + \underline{I'_a}) + \underline{I'_b} + \underline{I'_a} \right| \right)^2.$$

$$p_1 = R((kI)^2 + ((k+1)I)^2) + R_n \left(\left| k\underline{I'_a}^{-60^\circ} + \underline{I'_b} \right| \right)^2.$$

$$p_2 = R(2((k+1)I)^2) + R_n ((k+1)I)^2.$$

$$p_i = R(3((k+1)I)^2 + (kI)^2) + R_n ((k^2 + k + 1)I^2 + (k^2 + 2k + 1)I^2).$$

$$p_i = R(3((k+1)I)^2 + (kI)^2) + R_n (2k^2 + 3k + 2)I^2. \quad (2.9)$$

Analizando el comportamiento de las pérdidas eléctricas un grupo k de dos lámparas conectadas en las fases B y C y un grupo k de dos lámparas conectadas en las fases C y A se obtienen ecuaciones idénticas a la ecuación 2.9.

2.3 Cálculo de las pérdidas en el circuito real y su compensación.

Primeramente se hizo la identificación del circuito actual que consistió en:

- Entrevista a compañeros que participaron en el montaje y mantenimiento del circuito.
- Mediciones de potencia activa, corriente y tensión en determinadas partes del circuito.

- Mediciones de potencia activa, corriente y tensión incluyendo los armónicos de tensión y de corriente a la lámpara en estudio obteniéndose los siguientes resultados.

Potencia activa : 420 W

Potencia reactiva: 85.28 VAR

Factor de potencia: 0.98

Corriente: 1.98 A

THDi: 20 %

Tensión: 220 V

Después de confeccionar el diagrama monolineal se comenzó a calcular las pérdidas de potencia utilizándose las expresiones resultantes en el trabajo y la ecuación ($p = I^2 R$), para calcular estas pérdidas en los tramos de líneas.

El circuito que se estudia se observa en el anexo 1 y se describirán a continuación, está formado por.

- Un circuito formado por 9 lámparas, que no es más que un circuito con tres grupos n de tres lámparas una por cada fase, donde se usó la ecuación.

$$p(t) = R(6((n+1)I)^2 + 3(nI)^2) + 2R_n I^2$$

- Un circuito formado por 10 lámparas, que corresponde a un circuito igual que el anterior, pero con una lámparas más conectada a la fase A , donde se usó la ecuación.

$$p(t) = R((n+2)I)^2 7(n+1)I^2 + (nI)^2 + 2R_n I^2$$

- Un circuito formado por 33 lámparas conectadas todas a las fases A y B, usando para la ecuación.

$$p(t) = R(3((n+1)I)^2 + (nI)^2) + R_n I^2 (2n^2 + 3n + 2)$$

Las lámparas que tiene el circuito generan armónico tercero y este como es de secuencia monopolar circula solo por el neutro del sistema, este armónico no es de la misma naturaleza de la corriente fundamental de la lámpara, por lo que estas ecuaciones no son válidas para esta, es necesario aclarar que para los otros

armónicos si se cumplen estas ecuaciones. En el trabajo se deducen las ecuaciones para calcular las pérdidas producto a esta corriente con frecuencia de tres veces la frecuencia fundamental.

- Para el circuito de 9 lámparas la ecuación utilizada es:

$$p(t) = R(6((n+1)I_3)^2 + 3(nI_3)^2) + R_n I_3^2 (27n^2 + 36n + 14) \quad (2.3.1)$$

- Para el circuito de 10 lámparas la ecuación utilizada es:

$$p(t) = R((n+2)I_3)^2 + 7((n+1)I_3)^2 + (nI_3)^2 + R_n I_3^2 (27n^2 + 54n + 29) \quad (2.3.2)$$

- Para el circuito de 33 lámparas la ecuación utilizada es

$$p(t) = R(3((k+1)I_3)^2 + (kI_3)^2) + R_n I_3^2 (8n^2 + 12n + 5) \quad (2.3.3)$$

Donde:

I_3 : Es la corriente de tercer armónico.

n : Es el grupo de 3 lámparas, una por cada fase, para los dos primeros casos o de 2 lámparas para el último caso.

Además de hacer el análisis para la situación real existente, se realizó el mismo con otra variante que consiste en que el circuito de 33 lámparas conectadas a dos fases convertirla en un circuito donde las lámparas se alimenten de las tres fases, es decir, que ahora sería un circuito formado por 11 grupos de 3 lámparas conectadas una por cada fase.

Luego se procedió al cálculo del circuito usando los métodos descritos para compensar el desbalance y la distorsión, de forma tal que los lámparas monofásicas, se comportan como trifásicas y se elimina el conductor neutro a la carga, con el objetivo de eliminar la componente de secuencia cero y disminuir el desbalance, es decir, el desbalance que queda en el circuito es producto a la corriente de secuencia negativa, entonces se propone conectarle a cada lámpara un circuito compensador, como fue tratado en el capítulo 1.

Al eliminar el neutro, el tercer armónico desaparece debido a que esta corriente y sus múltiplos, circula solo por este.

Método de cálculo del circuito compensador

Los pasos a seguir se describen a continuación.

- Con el valor de la tensión se determina la resistencia y la reactancia por las siguientes ecuaciones.

$$R = \frac{U_{ab}^2}{P} \quad \text{y} \quad X = \frac{U_{ab}^2}{Q}$$

Donde:

U_{ab} : Es la tensión de alimentación dada en voltios (V).

P y Q: Son las potencias activa y reactiva de la lámpara.

La tensión de alimentación es 360 V, debido a que la lámpara tiene un autotransformador con tres niveles de tensión (120/277/360) V y el transformador que alimenta este circuito de alumbrado es de 380/220 V por el secundario.

- Cálculo de las corrientes de líneas y de secuencia negativa por las ecuaciones que se muestran.

$$\underline{I}_a = \underline{U}_{ab} \underline{Y} \quad \underline{Y} = \frac{1}{R} + j \frac{1}{X} \quad \underline{I}_b = -\underline{I}_a \quad \underline{I}_c = 0$$

$$\underline{I}_2 = \frac{1}{3} (\underline{I}_a + a^2 (-\underline{I}_a)) = \frac{\sqrt{3}}{3} \underline{I}_a e^{j30^\circ}$$

- Cálculo de los parámetros del circuito compensador según lo tratado en el epígrafe relacionado con los circuitos trifásicos desbalanceados del capítulo 1 este circuito va estar compuesto por una inductancia y un capacitor y sus reactancias son modularmente iguales, al conectarle este circuito a la lámpara, esta se convierte en un consumidor trifásico circulando la misma corriente por las fases y de una magnitud menor que la que existía anteriormente.

Como aplicación de este método se obtuvo los siguientes resultados que se expresan en la tabla 2.3.1, detallándose las magnitudes necesarias en el cálculo del circuito compensador y de las impedancias de este, además de los valores de los condensadores y las inductancias de estos.

Tabla 2.3.1: Parámetros del circuito compensador.

Parámetros	Circuito Real
Corriente I_1 (A)	1.948
Corriente I_2 (A)	0.649
$Z_{ai} / Z_{bi} / Z_{ci}$ (Ω)	$\infty / -j554 / j554$
Cap.del cond. (μ f)	4.78
Inductancia (H)	1.47

Los resultados obtenidos del cálculo de las pérdidas en el circuito actual se expresan en la tabla 2.3.2.

Tabla 2.3.2: Resultados de las pérdidas eléctricas en el circuito actual.

Variantes	Corriente	Pérd. Tramos circuitos de lámparas (W) (% P. Act.)	Pérd. Tramos de líneas (W) (% P. Act.)	Pérd. Totales (W) (% P. Act.)
V1	1.989	664 3.04	1060 4.85	1724 8
V2	1.989	344.5 1.6	898.3 4.11	1242.8 5.6
V3	0.68	366.3 1.65	519.8 2.38	886 4
V4	1.948	-	630 2.88	630 2.88

Los resultados mostrados en la tabla 2.3.2 reflejan como las pérdidas eléctricas en el circuito actual representan un 8% de la potencia activa total y cuando se realiza la compensación disminuyen a un 4%, con solo instalar el conductor averiado estas disminuyen un 2.4% de la potencia activa total y teniendo en cuenta el método convencional se deja de tener en cuenta un 5.22% de la potencia activa total como pérdidas.

2.4 Cálculo de las pérdidas en el circuito de diseño y su compensación.

El cálculo en este epígrafe se hará teniendo en cuenta que las lámparas a instalar tienen las siguientes características.

Potencia activa : 250 W

Factor de potencia: 0.9

Corriente: 1.33 A

THDi: 33 % (Tercer armónico)

Tensión: 220 V

Se aplicarán los mismos procedimientos tratados en el cálculo de las pérdidas en el circuito real de diseño, usando las mismas ecuaciones. El resultado del cálculo del circuito compensador se refleja en la tabla 2.4.1.

Tabla 2.4.1: Parámetros del circuito compensador del circuito de diseño.

Parámetros	Circuito Real
Corriente I_a (A)	1.26
Corriente I_2 (A)	0.42
$Z_{ai} / Z_{bi} / Z_{ci}$ (Ω)	$\infty / -j856 / j856$
Cap.del cond. (μ f)	3.1
Inductancia (H)	2.27

El resultado de las pérdidas eléctricas en el circuito de diseño se muestra en la tabla 2.4.2.

Tabla 2.4.2: Resultados de las pérdidas eléctricas en el circuito de diseño.

Variantes	Corriente	Pérd. Tramos circuitos de lámparas (W) (% P. Act.)	Pérd. Tramos de líneas (W) (% P. Act.)	Pérd. Totales (W) (% P. Act.)
V1	1.33	284.8 2.2	688.33 4.9	973.13 7.5
V2	1.33	154 1.18	456 3.5	610 4.7
V3	0.44	153.3 1.18	217.6 1.67	370.98 2.85
V4	1.26	-	290 2.25	290 2.25

2.5: Conclusiones.

En el capítulo se logran los siguientes resultados: modelos matemáticos simplificados para el análisis de las pérdidas en los circuitos de alumbrado, adaptables fundamentalmente a los circuitos de alumbrado exterior, el cual permite el análisis general e integral del conjunto de pérdidas de un circuito tomando en cuenta la asimetría y la distorsión armónica de los consumidores.

Con estos modelos o expresiones de pérdidas se calcularon las pérdidas eléctricas en el sistema de alumbrado de la Avenida del Puerto - Che Guevara, obteniéndose como resultado que la conexión monofásica de las lámparas y la generación de terceros armónicos no muy elevados, provoca unas pérdidas de 14.89 MW/año para un 8% de la potencia activa instalada, que disminuyen el 4% aproximadamente con respecto a estas. Con la conexión de los consumidores entre las fases, se eliminaron las componentes de distorsión y no fue necesario añadir un filtro adicional.

En el cálculo de las pérdidas del circuito de diseño se obtuvieron resultados similares, su gran diferencia radica en que las lámparas escogida para este circuito son de menor potencia y la componente armónica representa un por ciento ligeramente más elevado que en el circuito actual.

3.1. Introducción

En el análisis de la eficiencia del circuito de alumbrado eléctrico de la Avenida Puerto - Che Guevara corresponde comprobar si es factible o no la propuesta para disminuir las pérdidas de potencia eléctrica.

Se analizarán cuatro casos tanto para el circuito real como para el de diseño que se basa en lo siguiente:

- Cálculo de las pérdidas en el circuito en el estado actual (V1).
- Cálculo de las pérdidas en el circuito balanceado convencionalmente (V2).
- Cálculo de las pérdidas en el circuito compensado con las nuevas técnicas (V3).
- Cálculo de las pérdidas en el circuito utilizando los métodos convencionales (V4).

Primeramente se analizará el costo de las pérdidas eléctricas totales en el circuito tomando una tarifa promedio del día para luego compararlas, tomando en cuenta todas las variantes propuestas. Seguidamente se mostrará el costo de los elementos utilizados en los circuitos compensadores y finalmente se comprobará la factibilidad económica de la instalación tomando como criterio el tiempo de amortización.

3.2. Análisis del costo de las pérdidas

El paso de las corrientes consumidas por las lámparas provoca pérdidas por calentamiento en los conductores, de naturaleza activa, y que por tanto influirán y aumentarán el costo de la energía eléctrica en la empresa.

Si se está estudiando una empresa con cogeneración, las tarifas del costo de las pérdidas son muy diferentes para las unidades generadoras que para las consumidas a través del SEN, por tanto pudiera pensarse que esto necesitaba un análisis diferenciado.

La generación de la energía eléctrica a través de las unidades generadoras de las empresas es mucho más barata que la efectuada a través del SEN y esto se muestra en las tarifas que para este último son más elevadas. Por tanto, si se efectúa algún ahorro energético en los circuitos, los operarios tratarán de disminuir el consumo a través del SEN añadiendo más carga a las unidades generadoras, de ahí que para asumir el costo de las pérdidas se tomará la tarifa impuesta por el mismo.

Para el Sistema Eléctrico Nacional las tarifas no son fijas durante todo el día, dado que no siempre están trabajando las mismas unidades de generación y muchas veces, el costo de la generación en un horario (pico), es mucho más caro que en otro (madrugada). En estos casos se utiliza, para analizar la factibilidad económica, una tarifa promedio del día de alrededor de 0.056 \$/kW. De hecho las tarifas varían por año en dependencia del costo del barril de petróleo, aunque se añaden coeficientes de adaptación para las fluctuaciones normales del mercado.

Circuito actualmente instalado

En la tabla 3.1 se muestra el cálculo de los costos para cada una de las variantes del circuito instalado actualmente en la empresa con lámparas de 420 W, factor de potencia 0.98 y $IHD_3 = 19.44\%$.

Tabla 3.1. Resultados del cálculo de las pérdidas para todas las variantes del circuito actualmente instalado en la empresa.

Variantes	kW	%Pn	kW/año	\$/kW año
Variante 1	1.72	7.89	14895.36	834.14
Variante 2	1.24	5.69	10730.88	600.93
Variante 3	0.89	4.06	7655.04	428.68
Variante 4	0.63	2.88	5425.92	303.85

Las pérdidas calculadas para el circuito tal y como está actualmente instalado, alcanzan los 1.72 kW/h para alrededor de un 8% de la potencia activa total instalada en el circuito, que es de 21.84 kW. Esto provoca un consumo de alrededor de 15 MW por cada año para un costo de más de 800 USD.

Con solo añadir el cable que está actualmente deteriorado (Variante 2) y con esto simetrizar convencionalmente las lámparas, las pérdidas en el año disminuyen a los 11 MW para una disminución de 200 USD con respecto al actual.

Si aplicamos los medios de compensación (variante 3) explicados en el capítulo 1, de tal forma que las lámparas simulen en la línea una carga trifásica balanceada sin conexión con el neutro, entonces las pérdidas disminuyen casi a la mitad, para alrededor de 7.6 MW al año para un gasto de casi 400 USD menos que los gastos en el estado actual.

La variante 4 representa el cálculo convencional que se realiza a menudo por mucho especialistas, asumiendo que las pérdidas en los tramos donde están situadas las

lámparas es cero y que por tanto solo se perderá en el cable que está desde la subestación hasta la primera lámpara. En este caso, las pérdidas se piensan que son de 630 W y que al año esto representaría 5.4 MW. De este análisis se puede decir que si se utiliza este método para seleccionar la capacidad de los bancos de transformadores que alimentan el circuito de alumbrado, se corre el riesgo de calentamiento por sobrecargas permanentes o la total destrucción del mismo.

Circuito de diseño

En el circuito de diseño conformado por lámparas de 250 W, con factor de potencia 0.9 y para $IHD_3 = 33\%$ los cálculos se realizaron de forma similar al anterior y los resultados se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados del cálculo de las pérdidas para todas las variantes del circuito de diseño.

Variantes	kW	%Pn	kW/año	\$/kW año
Variante 1	0.97	7.48	8406.72	470.78
Variante 2	0.61	4.69	5270.40	295.14
Variante 3	0.37	2.85	3196.80	179.02
Variante 4	0.29	2.25	2522.88	141.28

Al igual que en el caso anterior la variante inicial; es decir, que en las lámparas existiera un cable deteriorado y que por tanto muchas de ellas estén conectadas a la fase A y B, las pérdidas al año serán de 8.4 MW para alrededor de 470 USD perdidos.

Se puede notar que con la inclusión de los circuitos compensadores, las pérdidas disminuyen en un 38% de las que se obtienen en la variante 1, para 291.76 USD ahorrados por cada año después de aplicada la mejora.

Igualmente el método de cálculo convencional de las pérdidas ofrece resultados inferiores a los reales y por consiguiente no debe ser utilizado en ningún otro caso por otros especialistas.

3.3. Análisis de la inversión inicial de la propuesta:

Del epígrafe anterior se extrae que si se desea disminuir las pérdidas eléctricas en los circuitos de alumbrado, se deben instalar un sistema de filtros formado por bobinas y condensadores que simetricen las lámparas conectadas ahora entre las fases del sistema trifásico.

En la tabla 3.3 se muestra el costo de los elementos componentes del filtro. Estos costos fueron tomados de un catálogo canadiense del año 2000, que muestra la fabricación de la firma NEWARK hasta el 2001 (CANADA, 2000[]).

Tabla 3.3. Listado de costo de los elementos componentes del filtro.

Variante del circuito	Condensador \$/u	Bobina \$/u	Cantidad	Costo Total USD
Real	5	4.23	52	480
Diseño	5	4.23	52	480

Como se observa el costo de los condensadores y de las bobinas es de 5 y 4.23 USD respectivamente, obteniéndose un costo total de 480 USD, resulta igual para el circuito real y de diseño porque los valores de los condensadores y de las inductancias son casi iguales y son para un mismo valor de tensión.

3.4. Justificación económica

Basado en los epígrafes 3.2 y 3.3 corresponde analizar si la mejora introducida (La compensación) es factible económicamente. Teniendo en cuenta que el costo de las pérdidas en el circuito actualmente instalado disminuyeron en 405.52 USD al año y que el costo de la inversión es de 480 USD y que en el circuito de diseño disminuyeron en 291.76 USD al año y el costo de la inversión es de 480 USD, se obtiene como resultado que el tiempo de amortización es de 14 meses para el circuito actualmente instalado y de 17 meses para el circuito de diseño como se observa en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Justificación económica de la mejora propuesta.

Variante del circuito	Costo de la energía ahorrada \$/Año	Costo Total USD	Tiempo de amortización Meses
Real	405.52	480	14
Diseño	291.76	480	17

3.5. Conclusiones

Analizando los resultados descritos en los epígrafes de este capítulo se concluye en el cálculo de las pérdidas en el circuito de alumbrado de la Avenida del Puerto - Che

Guevara, teniendo en cuenta que las lámparas son monofásicas y que generan un porcentaje no muy elevado de corrientes armónicas de tercer orden, las pérdidas de 14.89 MW/año (8% de la potencia activa instalada) disminuyeron casi la mitad (7.65 MW/año) cuando se realizó la compensación del desequilibrio. Con la conexión de los consumidores entre las fases, se eliminaron las componentes de distorsión y no fue necesario añadir un filtro adicional.

El costo de las pérdidas eliminadas como promedio asciende a 405.52 USD y el de los filtros pasivos diseñados, solo es de 480 USD para un tiempo de amortización de 14 meses.

Este mismo análisis se realizó para el circuito de diseño, resultando que las pérdidas, tomando en cuenta la conexión y el carácter no lineal de las lámparas asciende a 8.4 MW/año para un 7.5% del total de la potencia activa instalada. Este crecimiento del porcentaje de pérdidas se efectúa porque las componentes de distorsión armónica de tercer orden son mayores que las lámparas utilizadas actualmente.

Al realizar los cálculos de los filtros compensadores y el análisis de las pérdidas, se determinó que éstas disminuyen hasta un 2.85% para una ganancia de 291.7 USD que se amortiza en un año y 5 meses, dado que el costo de los filtros es similar al anterior.

Conclusiones:

Luego de finalizado esta etapa de la investigación, el autor obtiene las siguientes conclusiones:

El carácter no lineal y la conexión monofásica de las lámparas presuponen dos nuevas potencias (ASIMETRÍA y DISTORSIÓN) que fluirán en los sistemas eléctricos de potencia trifásicos.

La conexión monofásica al neutro de los consumidores, provoca la aparición de desequilibrios que finalmente repercutirán en las pérdidas del sistema, además permite la circulación de las componentes armónicas de tercer orden o sus múltiplos.

Se pueden construir con la utilización de medios pasivos (Condensadores y Bobinas) determinados filtros que compensen ambas componentes y por tanto, convertir las cargas monofásicas y no - lineales en consumidores trifásicos balanceados lineales.

Añadiendo elementos semiconductores se pueden crear filtros que compensen la asimetría de los sistemas desequilibrados con cargas no constante, pero en ocasiones estos mismo filtros incorporan componentes armónicas.

Se crearon varios modelos matemáticos simplificados para el análisis de las pérdidas en los circuitos de alumbrado, adaptables fundamentalmente a los circuitos de alumbrado exterior, el cual permite el análisis general e integral del conjunto de pérdidas de un circuito tomando en cuenta la asimetría y la distorsión armónica de los consumidores.

Estas expresiones de pérdidas se ejecutaron en el sistema de alumbrado de la Avenida del Puerto - Che Guevara, obteniéndose como resultado que la conexión monofásica de las lámparas y la generación de terceros armónicos no muy elevados, provoca unas pérdidas de 14.89 MW/año para un 8% de la potencia activa instalada, resultando casi el doble de las pérdidas que pudieran obtenerse si el circuito se compensara con filtros (7.65 MW/año). Con la conexión de los consumidores entre las fases, se eliminaron las componentes de distorsión y no fue necesario añadir un filtro adicional.

El costo de las pérdidas eliminadas como promedio asciende a 405.52 USD y el de los filtros pasivos diseñados, solo es de 480 USD para un tiempo de amortización de 14 meses.

Este mismo análisis se realizó para el circuito de diseño producto a que se piensa sustituir el tipo de lámparas por una lámpara de menor potencia, resultando que las pérdidas, tomando en cuenta la conexión y el carácter no lineal de las lámparas asciende a 8.4 MW/año para un 7.5% del total de la potencia activa instalada. Este crecimiento del porcentaje de pérdidas se efectúa porque las componentes de distorsión armónica de tercer orden son 1.7 veces mayores que las lámparas utilizadas actualmente.

Al realizar los cálculos de los filtros compensadores y el análisis de las pérdidas, se determinó que éstas disminuyen hasta un 2.85% para una ganancia de 291.7 USD que se amortiza en un año y 5 meses, dado que el costo de los filtros es similar al anterior.

Se comparó el cálculo de las pérdidas tomando en cuenta todos los factores que representan a las lámparas como consumidor: POTENCIA ACTIVA, REACTIVA, ASIMETRIA, DISTORSION; con el cálculo convencionalmente aplicado, resultando que con su utilización sólo se considera alrededor del 40% del total de pérdidas reales del circuito de alumbrado.

Recomendaciones:

Una vez concluida esta etapa de la investigación y aplicada en la Avenida del Puerto - Che Guevara, se recomiendan los siguientes aspectos:

1. Con solo reparar la línea averiada y equilibrar, de forma convencional, el circuito actualmente instalado, se ahorran alrededor de 172.9 USD/año porque las pérdidas disminuyen a 10.7 MW/año de 14.89 MW/año que existían anteriormente.
2. Si se pretende instalar un nuevo tipo de lámpara se debe asegurar que las componentes armónicas generadas por las mismas sean pequeñas, producto a que éstas incrementarán las pérdidas del circuito y será necesario adicionar filtros. Además considerar la posibilidad de conectarlas entre fases y no a tierra, para eliminar las componentes de tercer armónico y las pérdidas por el neutro del circuito.
3. En caso de utilizada la recomendación anterior, se puede emplear el conductor de neutro sobrante para la reparación de la línea que actualmente se encuentra averiada. Todo esto haciendo un análisis de la capacidad de corriente del mismo.
4. En caso de que sea imposible la conexión entre fases de las lámparas se sugiere utilizar el conductor de neutro de igual capacidad que los conductores de las fases. Por lo general estos terminan averiados y los niveles de tensión en las lámparas del circuito aumentan, peligrando su tiempo de vida útil.
5. Aplicar esta metodología de análisis de pérdidas a otros circuitos de alumbrado con el objetivo de crear conclusiones generalizadas que pudieran emplearse como normativas a nivel nacional, que permitan realizar estimados de ahorro por pérdidas.
6. Generalizar la metodología aquí descrita para el estudio o selección de la capacidad de la fuente de alimentación en circuitos desequilibrados y no lineales, de tal forma que no exista peligro de sobre calentamiento por sobrecargas desconocidas.
7. Se conoce que las pérdidas en los sistemas eléctricos afectan la calidad del mismo y por tanto se sugiere analizar los índices de calidad relacionado con la desviación de la tensión para generalizar los resultados de esta investigación.

Bibliografía

1. Alonso, Santana; D,V; A, Sajenkov. Formación de los Modelos Técnicos Económicos en una Red de Distribución. Revista Ingeniería Energética. ISPJAE. 1992.
2. Alonso, Santana; Danilo, F. Elaboración de Métodos de Optimización de los Sistemas de Suministro Eléctrico con Bajas Densidades de Cargas. Tesis para la Obtención del Grado Científico de Candidato a Doctor en Ciencias Técnicas, Moscú, 1989.
3. Brian, Prokuda. Power Quality Site Surveys for Industrial and Commercial Buildings, IEEE A&CPS Conference 1994, pp. 97-103.
4. Casas, Fernández, L. Sistema Electroenergético. Editorial Pueblo y Educación. 1982.
5. Casas, L ; A, Padrón. Efecto del Desbalance de las Cargas sobre las Pérdidas en los Circuitos de Distribución Primaria. Revista Energética. 1992.
6. Casas, L; M, Bravo; H, Altuve. Análisis Integral de las Redes de Distribución Primaria por Computadoras. Revista Control, Cibernética y Automatización, Ciudad de la Habana. 1989.
7. Catálogo general. Filtrado de Armónico. Circuitos 1997
8. Comisión Nacional de Energía. Comisión ejecutivo del consejo de ministros. La Habana. 1992.
9. De Quesada, Martínez, A. Optimización de Reactivo en Circuitos Eléctricos Industriales. Ingeniería Electroenergética. 1998.
10. Eguiluz, L, I. Instrumentación para la Facturación y Minimización del Coste de Energía Eléctrica. 3er Congreso nacional de energía. 1996
11. Eguiluz, L, I. Un parámetro más adecuado que el $\cos\phi$. Revista Automatización e Instrumentación. Nº 257. 1995.
12. Eguiluz, L, I; Benito. Un Factor de Potencia que relaciona las Pérdidas en la Líneas en Circuitos Trifásicos Distorcionados. Actas de las 4tas Jornadas Luso-Espanholas. 1995.
13. Electric Distribution Systems Engineering. Third Edition. 1994.

14. Electronic components catalogue. Electronics Canada. 2000.
15. Energy Efficiency: Some Lighting Basics. Verio Southem California.2000.
16. Espinosa,G. Redes Eléctricas. 1982.
17. F, Z, Peng; H, Akagi; A. Nabaee. A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems - A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 26, No. 6, Nov./Dec. 1990.
18. Feodorov, A.A; Rodriguez, L. E. Suministro Eléctrico en Empresa Industriales. Editorial Pueblo y Educación. 1980.
19. García, Barreto, J. Potencia Reactiva en los Sistemas Eléctricos. Editorial Ciencias Técnicas. 1988.
20. García, Barreto, J. Suministro Eléctrico de la Instalación de Automática y Telemecánica. Editorial Ciencias Técnicas. 1988.
21. García, G. Metodo Integral para la Mejora de la Eficiencia en las Instalaciones Eléctricas. Jornadas Hispano- Lucas de Ingeniería Eléctrica. 1997.
22. González, Palau, I. Estudio de los Portadores Energéticos de la Planta Hornos de Reducción de la Empresa "Ernesto Che Guevara". Tesis de Maestría. ISMM. 1999.
23. Grupo de Energía y Automatización. ABC de Accionamientos. Términos relativos a los accionamientos de velocidad variable alimentados por convertidores. Edición 1997.
24. Haug, Ramírez, C. Redes y Sistemas Eléctricos. Editorial Pueblo y Educación. 1986.
25. Hernández, Ramírez, G. Eficiencia en los Suministros Eléctricos Industriales de Baja Tensión. Tesis de Maestría. ISMM. 2000.
26. Illuminazione Catalogue "Disano". 1994/1995.
27. LLE; R.E.& R.H. Analysis of time veying distribution circuit current and loss characteristics. IEEE on Power Delivery, October, 1987.
28. Mahesh, M; Swamy; Steven Rossiter. Case Studies on Mitigating Harmonics in ASD Systems to meet IEEE 519-1992 Standards, IEEE IAS Annual meeting. 1994
29. Maldonado, J; F Instalación de Capacitores en Circuitos Eléctricos. Revista

- Tecnología. 1968.
30. Maliuk, Petrovna, S. Factor de potencia en la Industria. Editorial Oriente. 1980. Maliuk, Petrovna, S; Pérez, Barreto, R. Sobre el Ahorro de Energía mediante la Racionalización del Servicio Energético de Empresas de Producción. Revista Geología y Minería. 1985.
 31. Masorra, Soto, J. Metodología para la Minimización Técnico Económica de las Pérdidas de Energía en los Sistemas Eléctricos Industriales. Revista Energía. N° 1, 1986.
 32. Mazorra, Soto, Jorge. Metodología para la Minimización Técnico Económica de las Pérdidas de Energía en los Sistemas Eléctricos Industriales. Energía 2(1). 1986.
 33. Montó, Américo ; [et . al]. Circuitos trifásicos. En: Fundamentos de los Circuitos Eléctricos II. __ La Habana: Ed. Pueblo y Educación, 1987. _ p. 80 - 97.
 34. Paice, Derek, A. Power Electronic Converter Harmonic. IEEE Press. 1996.
 35. Peláez, González, Alberto. Fallas Asimétricas en Sistemas de Energía Eléctrica La Habana. Pueblo y Educación. 1986_114p.
 36. Pérez, Abril, Ignacio. Compensación de Potencia Reactiva en Sistemas Industriales mediante Bancos de Condensadores. Resumen de Tesis de Doctorado. Santa Clara. 1994.
 37. Reactive Power Compensation with Capacitors. Journal Systems and Users. 1999.
 38. Redondo, Quintela, F. Energía Reactiva y Disminución de las Pérdidas en la Distribución de Energía Eléctrica. Revista Energía. Julio- Agosto. 1998.
 39. Redondo, Quintela, F. Redes con Excitación Sinusoidal. Revista Energía. 1997.
 40. Richardson, Michael. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE Std.1992.
 41. Richardson, Michael; Steven Rossiter. Case Studies on Mitigating Harmonics in ASD Systems to meet IEEE 519-1992 Standards. IEEE Industry Application Society. Proceedings October. 1998.
 42. Roig, X. Power Conditioning Issues. Powergy. 1999.
 43. Rokotian, S,S. Manual para la Proyección de Sistemas Eléctricos. Editorial Moscú. 1971.

44. Shrel, K; Roig, X. Compensador Activo de Armónicos SINEWARE. Revista Metalurgia y Electricidad. Nº 707. 1998.
45. Soldákina, L, A. Redes y Sistemas Eléctricos. Editorial Pueblo y Educación. 1986.
46. Soriano, Aniuska; Proyecto de Alumbrado Avenida Puerto - Che Guevara,1998.
47. Stevenson, William. Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia. La Habana. Edición Revolucionaria. 1986_ 391p.
48. Swamy, Mahesh.,M., PhD. Harmonic Reduction Using Broad Band Harmonic Filters. IEEE Press.1996.
49. Tzerasov, A,L; A,P,Vasilieva; Parte Eléctrica de las Centrales Termoeléctricas. Edición Moscú. 1986.
50. Urguijo, Pedroso, J. Ahorro de Energía en Redes de Distribución. Revista de energía. Nº 6. 1986.
51. Zaborszky, J. Electric Power Transmition. Instituto cubano del libro. 1969.

Apéndice A. Circuito compensador de sistemas trifásicos de secuencia cero

Compensar la secuencia negativa que aparece durante la asimetría o el desequilibrio de los consumidores es posible con la utilización de filtros con componentes pasivos (condensadores y bobinas) tal y como se explica en el trabajo. De la misma forma se pudiera realizar un filtro que genere la corriente de secuencia cero necesaria para la carga, de tal forma que ésta no circule por la fuente de generación.

En la figura A.1 se muestra una forma general del filtro que pudiera diseñarse para la compensación de la secuencia cero y seguidamente las ecuaciones que permitirán calcular las componentes de cada una de las impedancias.

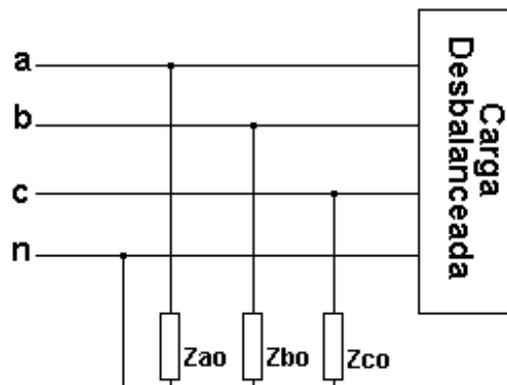


Figura A.1. Circuito compensador de componentes de secuencia cero.

$$\underline{Z}_{ao} = \frac{\underline{U}_{an}}{-I_{ao}} = \frac{\underline{U}_{ab}}{-\sqrt{3}I_o} e^{j(\alpha_o - 210^\circ)}$$

$$\underline{Z}_{bo} = \frac{\underline{U}_{bn}}{-I_{bo}} = \frac{\underline{U}_{bc}}{-\sqrt{3}I_o} e^{j(\alpha_o - 330^\circ)}$$

$$\underline{Z}_{co} = \frac{\underline{U}_{cn}}{-I_{co}} = \frac{\underline{U}_{ca}}{-\sqrt{3}I_o} e^{j(\alpha_o - 90^\circ)}$$

Como se observa en las ecuaciones anteriores es imposible que los ángulos de estas ecuaciones sean -90° ó 90° grados; es decir, que no pueden ser Inductancias y Capacitancia puras, sino que poseen resistencias y por tanto el compensador

consumirá potencia activa y para su aplicación hay que entrar a valorar si resulta beneficiosa la misma.

Además, en muchos casos, las resistencias calculadas poseen signo negativo, lo que significa que en la realidad no sea un resistor sino un generador de potencia activa, que haría más costosa la creación del filtro. Actualmente se está trabajando en la creación de estos filtros, pero aún los resultados no resultan factibles desde el punto de vista económico y los técnicos optan por otras formas de compensación.

Se conoce que en los consumidores sin neutro no puede circular la secuencia cero (la estrella sin aterrarse y la delta, aunque en estas últimas se considera circulando en su interior) y por tanto la eliminación del conductor neutro pudiera ser una variante para eliminar dichas componentes.

El conductor neutro se utiliza por lo general en los sistemas de baja tensión unido al punto de equipotencialidad de la malla de tierra, por tanto las tensiones referentes entre fase y este conductor son mucho menores que las existentes entre fases. Este detalle resulta en ocasiones el más importante a la hora de conectar los consumidores a la tensión de línea porque el aislamiento de los mismos puede verse afectado.

Es importante aclarar que no se está hablando del cable protector utilizado en las carcasas de los equipos para la protección del personal de servicio contra fallas a masa. Este es imprescindible además de normado en todo equipamiento eléctrico.

Conectar los consumidores entre las fases no presupone eliminar la conexión neutro aterrado en los transformadores alimentadores, dado que esta tiene importancia relevante para evitar sobretensiones transitorias producto a fallas a tierra, oscilaciones de la generación y descargas atmosféricas y estáticas. Además eliminar esta conexión provocaría la insensibilidad de todas las protecciones para las fallas a tierra que son las más comunes en los conductores soterrados.

Apéndice B. Circuito compensador en sistemas trifásicos con cargas variables.

Hasta ahora se ha hablado de cargas de potencia constante y los valores de los elementos componentes del filtro también resultan constantes. En casi ningún consumidor las potencias de las fases permanecen constantes, mucho menos cuando se pretende equilibrar las corrientes en un nodo del sistema donde están conectados varios consumidores, por tanto la idea de utilizar un filtro con elementos pasivos es imposible.

En la figura A.2 se muestra la propuesta de utilización de un filtro compuesto por los elementos pasivos conocidos anteriormente y elementos activos (tiristores).

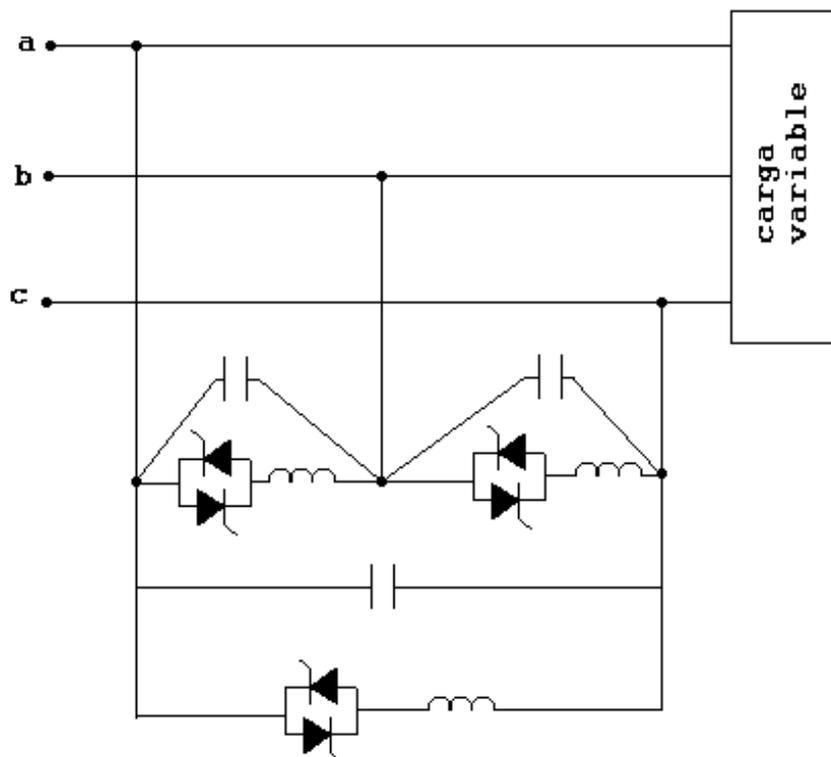


Figura A.2. Circuito compensador con cargas variables

En este circuito gobernando el ángulo de disparo de los tiristores se puede lograr que el efecto de la inductancia sea mayor que el efecto del condensador o viceversa, para cada una de las fases. Esto además de encarece la instalación, genera armónicos y por tanto sería necesario instalar filtros.

Apéndice C: Proceso Transitorio en el encendido en las lámparas

En este trabajo se han abordado las condiciones de operación en régimen normal y por tanto no se ha tomado en cuenta que durante el encendido o el apagado de dichas lámparas ocurren fenómenos transitorios que pudieran afectar al filtro diseñado.

En este caso solo se analizará la condición de encendido de la lámpara dado que luego de apagada no afecta a las pérdidas, ni a la eficiencia de la instalación eléctrica. En este sentido la aplicación de los simuladores digitales brinda variadas opciones que permiten realizar los estudios de estos fenómenos.

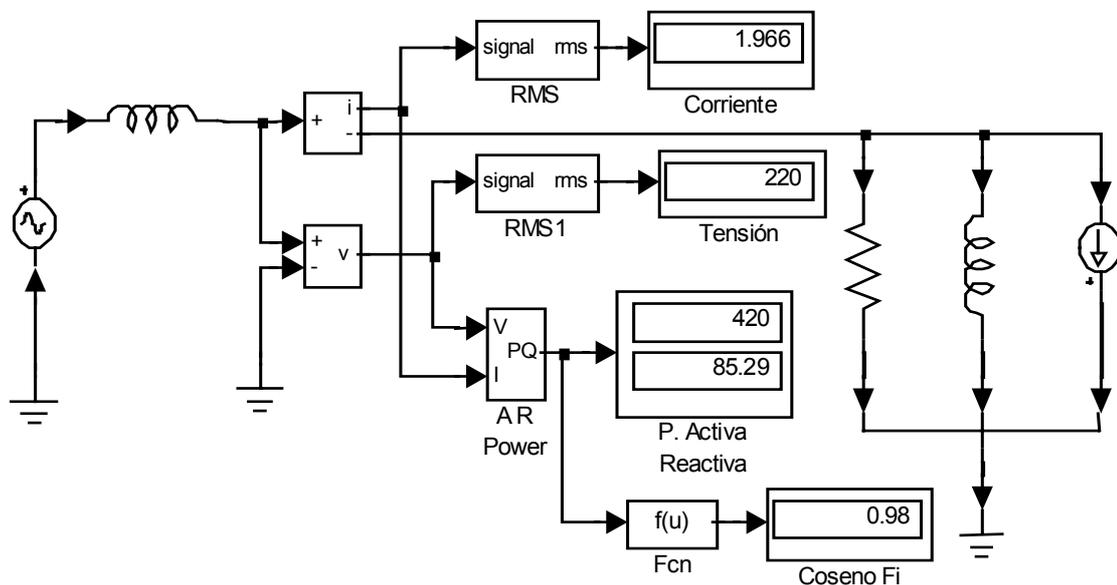


Fig. C.1. Esquema de simulación del encendido de la lámpara en estudio.

En la figura C.1 se muestra el modelo utilizado en el simulador Matlab 5.3 con su herramienta gráfica Simulink 3.1. En este modelo se simuló las componentes armónicas con la utilización de una fuente ideal de corriente alterna trabajando a 180Hz con una magnitud de alrededor de 0.1944 In de la lámpara.

Las componentes activas y reactivas se simularon con resistores y bobinas conectados en paralelo, además de una fuente ideal de tensión que simulara la generación. Los demás componentes utilizan el tratamiento matemático de fourier para la medición de las componentes activas y reactivas de la potencia. Los instrumentos utilizados simulan osciloscopios electrónicos autoadaptables.

En las siguientes figuras se muestra el comportamiento de las diferentes magnitudes eléctricas tales como: Corriente, potencia activa y reactiva, factor de potencia y tensión durante la simulación del encendido de la lámpara.

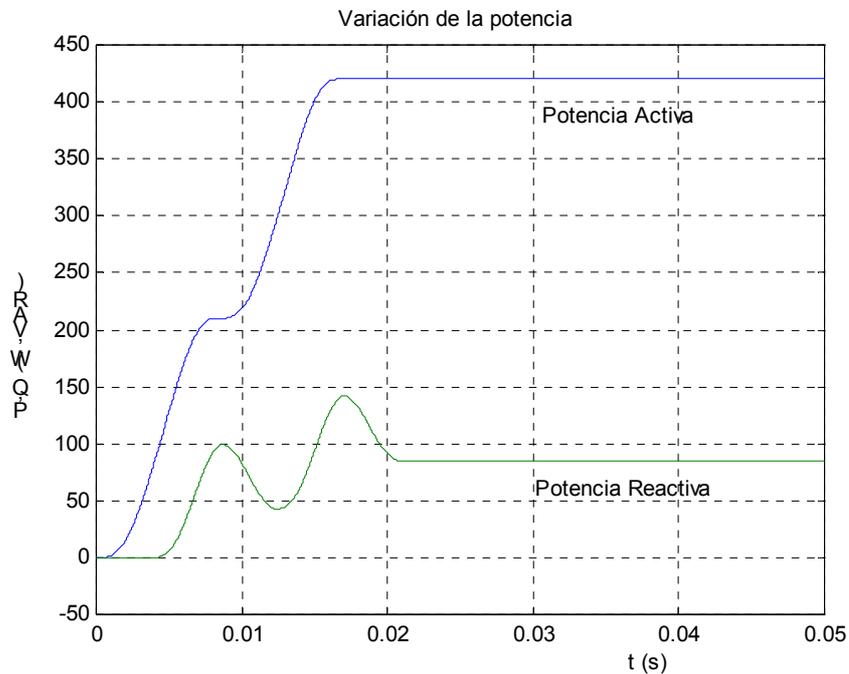


Fig.C.2. Comportamiento de las potencias activa y reactiva en la lámpara.

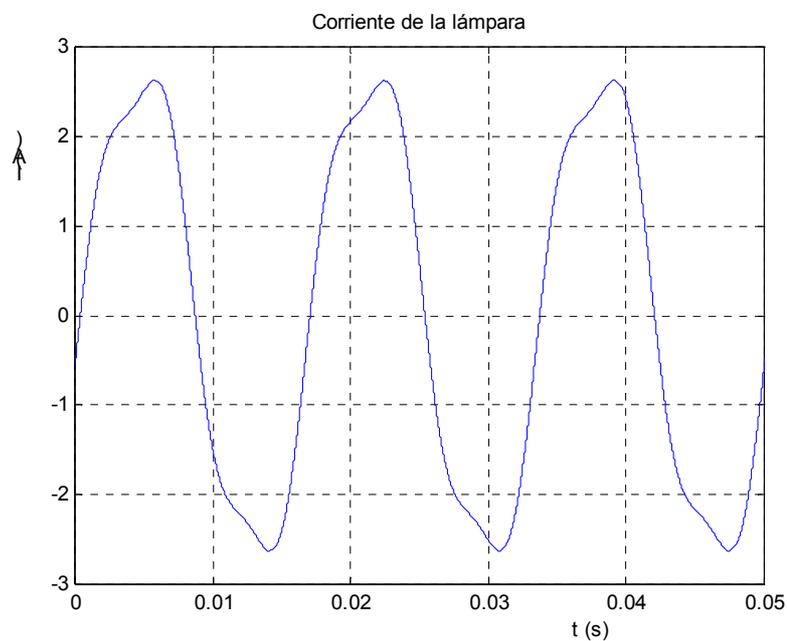


Fig.C.3. Comportamiento de la corriente en la lámpara.

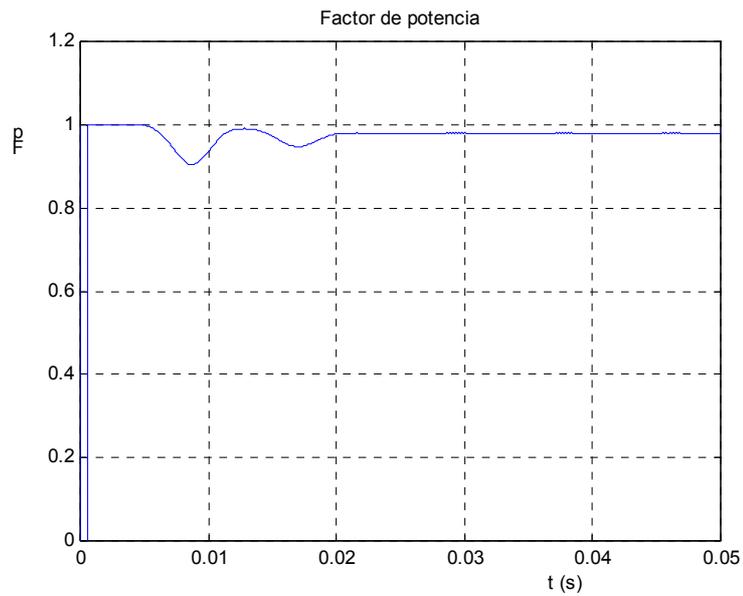


Fig.C.4. Comportamiento del factor de potencia en la lámpara.

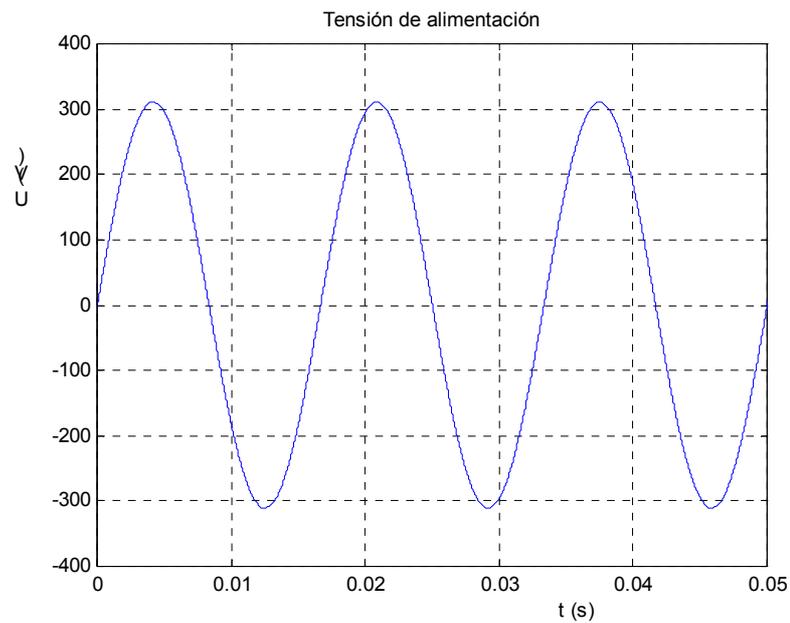


Fig.C.5. Comportamiento de la tensión en la lámpara.

En ninguno de los casos se observan oscilaciones extremas de los parámetros eléctricos. Solo la potencia reactiva muestra una pequeña oscilación superior a la nominal, pero de poca magnitud y duración. Por tanto, no existirá peligro alguno con respecto a la colocación del filtro.