

Capítulo 10

Factor de potencia**1. INTRODUCCIÓN**

La corriente generada en un circuito al que se le aplica una tensión alterna, posee similares características (frecuencia, forma, etc.) a la de ésta última (tensión), aunque no siempre están en fase. Conviene entonces decir que toda tensión está relacionada a un ángulo de fase.

- En una carga resistiva la tensión y la corriente están en fase.
- En una carga inductiva pura la corriente adelanta¹ respecto de la tensión un ángulo de 90° .
- En una carga capacitiva pura la corriente atrasa respecto de la tensión un ángulo de 90° .

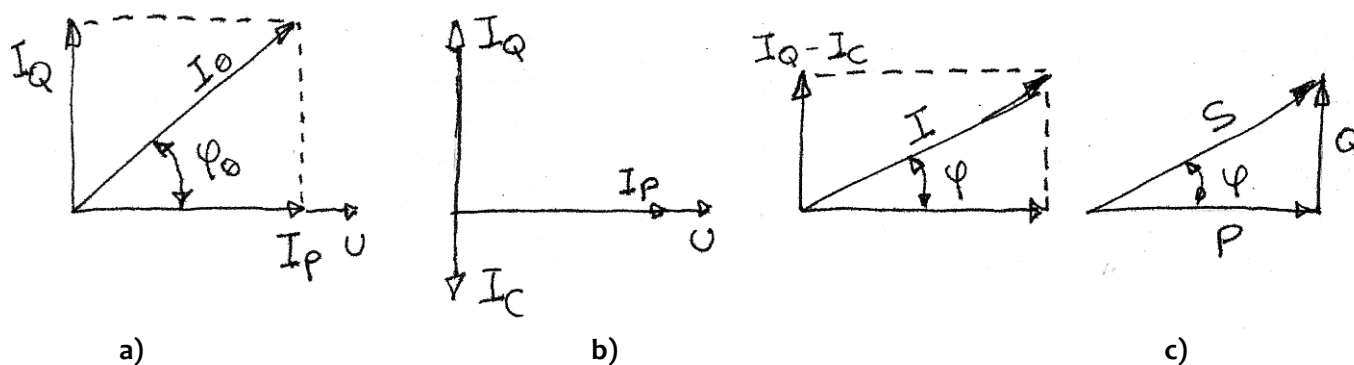


Figura 1-1: Corriente y tensión a) en un circuito RL, b) en un circuito RLC y c) triángulo de potencias.

En un circuito con carga inductiva que posee cierta resistencia, la corriente I adelanta a la tensión un ángulo φ . Esta corriente tiene una *componente activa* I_w (que yo aquí voy a llamar I_P), que está en fase con la tensión, y una *componente reactiva* I_d (que yo llamo I_Q), que adelanta 90° a la tensión, Figura 1-1a. Si a este circuito le conectamos un condensador, lo que produce éste, al estar la corriente que genera en el eje negativo de las ordenadas, es una disminución en el valor de la corriente I_Q y por consiguiente,

¹ Adelanto significa que la corriente siempre pasa por cero (o completa su ciclo) un determinado tiempo antes (ángulo de fase) que la tensión. En un circuito inductivo, como por ejemplo el conformado por motores y/o transformadores, esto se debe a las características de la corriente que requiere estos elementos para crear sus respectivos campos magnéticos.

el valor de φ , [Figura 1-1b](#). Si en el gráfico de la [Figura 1-1a](#), multiplicamos a cada corriente por V , lo que obtenemos es lo que se denomina triángulo de potencia, [Figura 1-1c](#). Dicho triángulo cambia la magnitud de sus lados pero no su forma, es decir, sigue con los mismos ángulos internos. En la tabla siguiente se enlistan los tres lados de este triángulo y sus unidades.

Potencia	Nomenclatura	Fórmula	Unidad
Aparente	S	$V \cdot I$	[VA] Voltampere
Activa	P	$V \cdot I \cdot \cos \varphi$	[W] Vatios
Reactiva	Q	$V \cdot I \cdot \sin \varphi$	[VA _R] Voltampere reactivo

Tabla 1-1: Potencias que conforman el triángulo de potencia con sus respectivas unidades.

A P (potencia activa o real) la podemos obtener multiplicando a S por un factor que no es otro que $\cos \varphi$, es por esto que a este factor lo denominamos también **factor de potencia**.

1.1 – Efectos del factor de potencia

A los efectos del factor de potencia lo podemos encontrar en 4 lugares de la red de energía:

- **Centrales eléctricas:** el desfase entre V e I perjudica a las centrales eléctricas, específicamente disminuye su rendimiento. La corriente I_p debilita el campo magnético de los alternadores, lo cual hace que disminuya la tensión generada, para corregir esto se debe aumentar la corriente de excitación de los generadores. Pero esta corriente está limitada por el número de arrollamientos y por la temperatura. En la [Figura 1-1a](#) si mantenemos constante I y aumentamos φ , disminuye P .
- **Estaciones transformadoras:** mismo efecto anterior, disminuye la potencia útil P .
- **Redes de transmisión y distribución:** aquí la potencia de pérdida es proporcional al cuadrado de la corriente total. En la [Figura 1-1a](#) si empeora (disminuye) el $\cos \varphi$, para mantener la misma I_p necesitamos una mayor corriente aparente I , con el consecuente aumento de las pérdidas y de la caída de tensión.
- **Clientes:** los clientes, al conectar cargas inductivas a la red eléctrica, contribuyen a desmejorar el factor de potencia. Esto limita la potencia de los alternadores, aumenta las pérdidas en las líneas de transmisión y la caída de tensión. Por eso las empresas productoras de energía exigen a las distribuidoras un factor de potencia mínimo de **0,95** y castigan con multas a las que no lo cumplen, las empresas a su vez trasladan esta exigencia a los clientes elevando el $\cos \varphi$ a **0,95** y el precio de la energía.

1.2 – Importancia del factor de potencia

La corriente I_f en una línea que debe transportar una potencia activa P con una tensión U es:

$$I_f = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi}$$

La pérdida por efecto Joule es

$$P_J = r \cdot I_f^2 = r \cdot \left(\frac{P}{U \cdot \cos \varphi} \right)^2 = \frac{r \cdot P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi}$$

Y la caída de tensión en la línea es

$$U_\ell = r \cdot I_f = \frac{r \cdot P}{U \cdot \cos \varphi}$$

Vemos de las ecuaciones que al aumentar el $\cos \varphi$, disminuyen las pérdidas por joule P_J y la caída de tensión U_ℓ en los conductores, pudiendo ser éstos de menor sección y así abaratar costos.

La tabla siguiente muestra las consecuencias de tener un $\cos \varphi$ bajo.

Para la empresa	Para el cliente	
	En una instalación a proyectar	En una instalación ya realizada
<ul style="list-style-type: none"> Deficiente uso de las líneas de transmisión. Deficiente uso de los generadores y transformadores. Deficiente uso de fuentes primarias de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> Sección de los conductores grande. Transformadores de alimentación de mayor potencia. Aumento de la potencia comprada. 	<ul style="list-style-type: none"> Aumenta pérdidas en los conductores. Aumenta la caída de tensión y baja el rendimiento de la instalación. Baja en la tensión en los aparatos eléctricos. Aumenta el costo de la energía.

Tabla 1-2: Desventajas de un $\cos \varphi$ bajo.

Por otro lado, las ventajas de tener un $\cos \varphi$ alto se pueden enumerar como sigue:

- Mejora del suministro de la tensión nominal
- Mejora la regulación de tensión en los transformadores y generadores.
- Permite la obtención de la tensión nominal los mismos.
- Libera potencia en los mismos, permitiéndonos soportar sobrecargas adicionales.
- Abarata la factura de la empresa distribuidora.

2. MEDICIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

El problema para hallar el $\cos \varphi$ se reduce a la obtención de la potencia activa (en vatios) y la potencia aparente (medida en voltampere) y realizar su cociente. Las mediciones que siguen son en cargas monofásicas y trifásicas, éstas últimas pueden ser sistemas de distribución en triángulo o en estrella.

1.2 – 1: Medición en cargas monofásicas

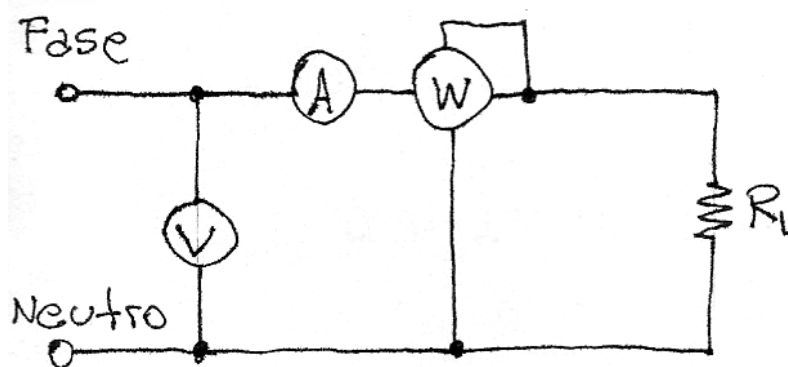


Figura 2-1: Esquema de conexión para la medición del $\cos \varphi$ en un circuito con carga monofásica.

Se entiende por carga monofásica a la que se conecta entre fase y neutro, o entre dos fases cualesquiera, de una red de distribución. En la figura, **V** es el valor del voltaje medido por el voltímetro (en voltios), **A** el valor del amperímetro (en amperes) y **W** el valor del vatímetro (en vatios). Para obtener el $\cos \varphi$ hacemos

$$\cos \varphi = \frac{W}{V \cdot A}$$

1.2 – 2: Medición en cargas trifásicas²

En los **sistemas de distribución en triángulo** usamos el método de los dos vatímetros (Figura 2-2a), siempre y cuando la carga sea equilibrada, entonces se cumple que $\cos \varphi = 1$, entonces $W_1 = W_2$. Se puede demostrar que

$$\tan \varphi = \frac{1,73 \cdot (W_1 - W_2)}{W_1 + W_2}$$

Donde $W_1 + W_2$ es la potencia activa total P absorbida, de la última ecuación obtenemos

$$\tan \varphi (W_1 + W_2) = \tan \varphi \cdot P = Q = 1,73 \cdot (W_1 - W_2)$$

En los sistemas de distribución en estrella (Figura 2-2b), la fórmula para hallar $\cos \varphi$ es

$$\cos \varphi = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{3 \cdot V \cdot A}$$

Siendo $V = (V_1 + V_2 + V_3)/3$ y $A = (A_1 + A_2 + A_3)/3$. No hace falta el uso de nueve instrumentos, basta con tres (un amperímetro, un voltímetro y vatímetro), tampoco hace falta saber la rotación de fases.

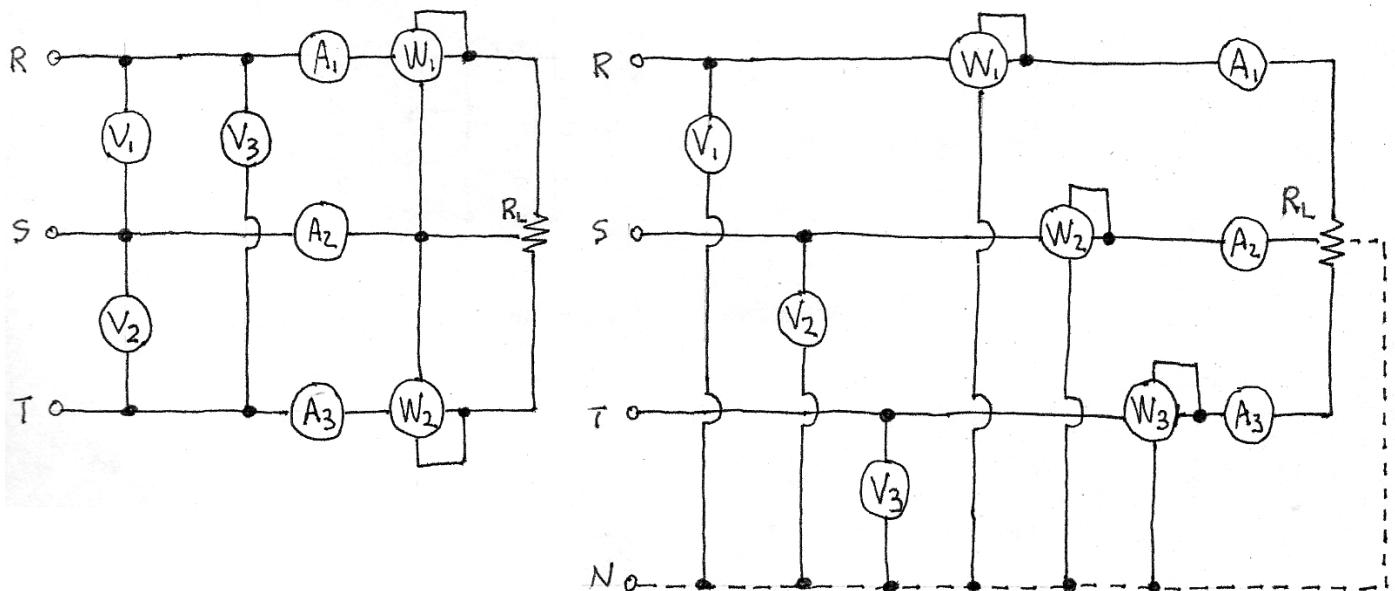


Figura 2-2: Esquema de conexión para la medición del factor de potencia con cargas trifásicas en sistemas de distribución en **a)** estrella y **b)** triángulo.

3. PROCEDIMIENTOS PARA MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA

Podemos dividir a los procedimientos en dos grupos: **directos**, que son los que actúan directamente sobre las causas que generan el bajo factor de potencia; e **indirectos**, que compensan la energía reactiva con la instalación de elementos productores de esa energía.

A los dispositivos usados para compensar –llamados compensadores– también podemos dividirlos en dos grupos: **giratorios** (o síncronos), que son máquinas síncronas giratorias con un régimen de funcionamiento especial; y **estáticos**, conformados por batería de condensadores. La Tabla 3-1, muestra una comparación entre ambos dispositivos.

² No sé por qué en el gráfico se usan amperímetros y voltímetros si después las mediciones de los mismos no aparecen en la ecuación.

	Compensador síncrono	Compensador estático
Descripción	Máquinas síncronas giratorias.	Baterías de condensadores.
Precio por KVA	Disminuye cuanto mayor es la potencia instalada.	Constante, independiente de la potencia instalada.
Regulación de la potencia Q	Fácil y progresiva.	No es ni fácil ni progresiva.
Absorción de P respecto de S	Apreciable (en vacío).	Pequeña.
Instalación y mantenimiento	Costosos ambos.	Fácil. Barato.

Tabla 3-1: Características de los compensadores síncronos y estáticos.

3.1 – Métodos de compensación

Son seis los dispositivos de los que podemos echar mano para compensar el factor de potencia. Podemos hacerlo mediante la instalación de:

- Compensadores síncronos;
- Condensadores de potencia en paralelo;
- Compensadores estáticos de energía reactiva o transductor;
- Condensadores estáticos conectados en serie;
- Compensadores electrónicos de potencia reactiva en media tensión.

3.1 – 1: Compensadores síncronos

Se trata de un motor síncrono cuyo eje no se encuentra unido a ninguna carga, o sea que funciona en vacío; la corriente en su devanado de campo se controla a través de un regulador de tensión, de forma que la máquina genera o consume potencia reactiva según lo requiera el sistema al que está conectada. Cuando están sobreexcitados, o sea, cuando la tensión en sus bornes es mayor que la de la red, estos motores absorben energía activa de la misma y proporcionan energía reactiva, caso contrario (subexcitación) la entregan.

Algunas de sus ventajas, en comparación con otros dispositivos de compensación, son:

- Regula la tensión de forma continua, sin los transitorios electromagnéticos asociados a los cambios de tomas de otros tipos de dispositivos.
- No introduce armónicos en la red, ni se ve afectado por ellos.
- No causa problemas por resonancia eléctrica.
- En caso de caída de tensión por un fallo en la red son capaces de proporcionar corriente de cortocircuito durante un tiempo limitado, facilitando el ajuste de las protecciones de sobrecorriente.

La potencia nominal está comprendida por lo general entre **15 y 60 [MVA_R]**. Usados para la *compensación*³ y *regulación*.⁴

3.1 – 2: Capacitores de potencia en paralelo

Se los usa en baja, media y alta tensión. Se los conecta en forma rígida o se los comanda en forma automática. Usados para la *compensación* y *disminución*.⁵

Cuando deseamos que la energía reactiva generada por los condensadores se adapte a una carga variable, es normal encontrar baterías de condensadores divididas en varios escalones de generación gobernados elementos mecánicos como interruptores (Figura 3-1). Sin embargo, y a pesar de su sencillez, la división en escalones tiene fundamentalmente los siguientes inconvenientes:

³ Con *compensación*, y solo en este capítulo, me refiero a la compensación o reducción del factor de potencia.

⁴ Con *regulación* me refiero a la regulación de la tensión.

⁵ Con *disminución* me refiero a la de las pérdidas en una línea de transmisión o en los conductores.

- La capacidad de adaptación al comportamiento de la carga depende del número de escalones disponibles, los cuales no suelen ser numerosos por razones tecnológicas y económicas.
- La corriente de conexión de una batería de condensadores puede alcanzar valores considerables.
- La utilización de elementos mecánicos para la conexión de las capacidades significa una limitación en cuanto a la velocidad de actuación y vida útil.

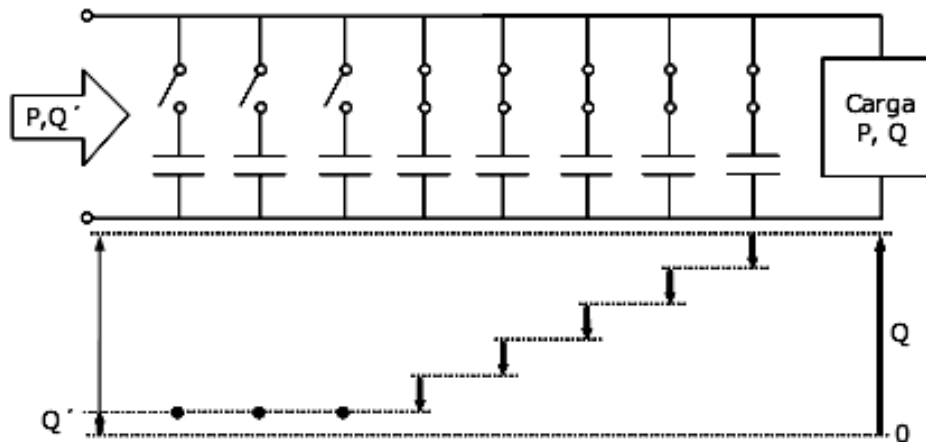


Figura 3-1: Compensación de energía reactiva mediante una batería automática de condensadores. Donde P representa a la potencia activa y Q a la reactiva. La flecha hacia arriba indica energía inductiva y hacia abajo, capacitiva.

3.1 – 3: Compensadores estáticos de energía reactiva a transductor

Cuando la carga es variable podemos, mediante llaves mecánicas, regular la compensación de una batería de condensadores para adaptarla a la carga. Sin embargo, con la introducción de la electrónica de potencia surgió el concepto del **Compensador estático de potencia reactiva** (o *Static var compensation SVC*), cuyo funcionamiento se basa en la utilización de tiristores conjuntamente con condensadores y bobinas para absorber o entregar potencia reactiva. El adjetivo estático hace referencia a que no poseen ninguna parte móvil, al contrario de los compensadores síncronos.

Desde el punto de vista de la operación del sistema eléctrico, un sistema de compensación estático consiste en un paralelo conformado por un condensador conmutado por tiristores (TSC) y una bobina conmutada (TSR) o controlada (TCR) por tiristores, cuya capacidad e inductancia puede ajustarse para controlar la tensión y el intercambio de reactiva en sus terminales. Idealmente, este sistema, podría absorber y entregar energía infinita, con una tensión siempre constante en sus terminales, es decir, su característica tensión-corriente sería una línea recta horizontal. Además, no tendría pérdidas y respondería de forma instantánea. La [Figura 3-2](#) muestra un esquema simplificado de un SVC.

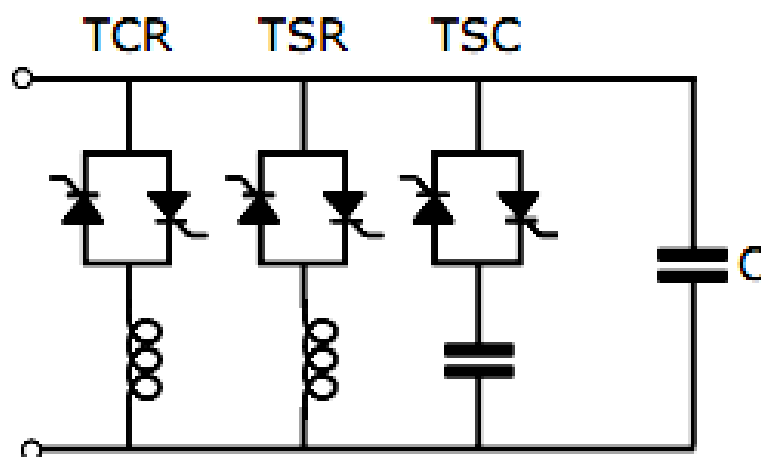


Figura 3-2: Esquema simplificado de un SVC.

Según el apunte, estos compensadores permite resolver simultáneamente los siguientes aspectos:

- Se puede lograr que $\cos \varphi = 1$.
- Filtrado de corrientes.
- Generación de una potencia reactiva variable necesaria para una carga también variable.

3.1 – 4: Capacitores estáticos conectados en serie

Usados para la *regulación* en baja, media, alta y muy alta tensión. Sus propiedades son:

- Su regulación es automática y continua y su respuesta a las variaciones de la red es instantánea.
- Aumentan la potencia transportable en las líneas de transmisión, es una buena solución técnico-económica en media tensión.
- En cargas intermitentes consiguen reducir el efecto flicker o parpadeo.

Aunque el apunte no dice nada sobre cómo conectarlos, tampoco hay figura alguna.

3.1 – 5: Compensadores electrónicos de potencia reactiva en media tensión

Usa tiristores para el control continuo de la corriente que circula por la reactancia en paralelo con los condensadores. El conjunto reactancia//condensadores//carga puede suministrar potencia reactiva. Usados para la compensación en instalaciones industriales, reducción del flicker, *regulación* en líneas de gran longitud, etc. La potencia disponible es de **5 [MVA_R]** con enfriamiento con aire y de **10 a 120 [MVA_R]** con enfriamiento reactivo.

Nota: pese a que se parecen a los Compensadores estáticos de energía reactiva a transductor, no queda bien claro en el libro la diferencia con respecto a este. Pues Ubal solo menciona un elemento constitutivo: el regulador electrónico. Se limita solamente a mencionar sus ventajas y aplicaciones. Así que lo descrito en 3.1 – 3: *Compensadores estáticos de energía reactiva a transductor* bien podría ir aquí también.

3.2 – El condensador como compensador

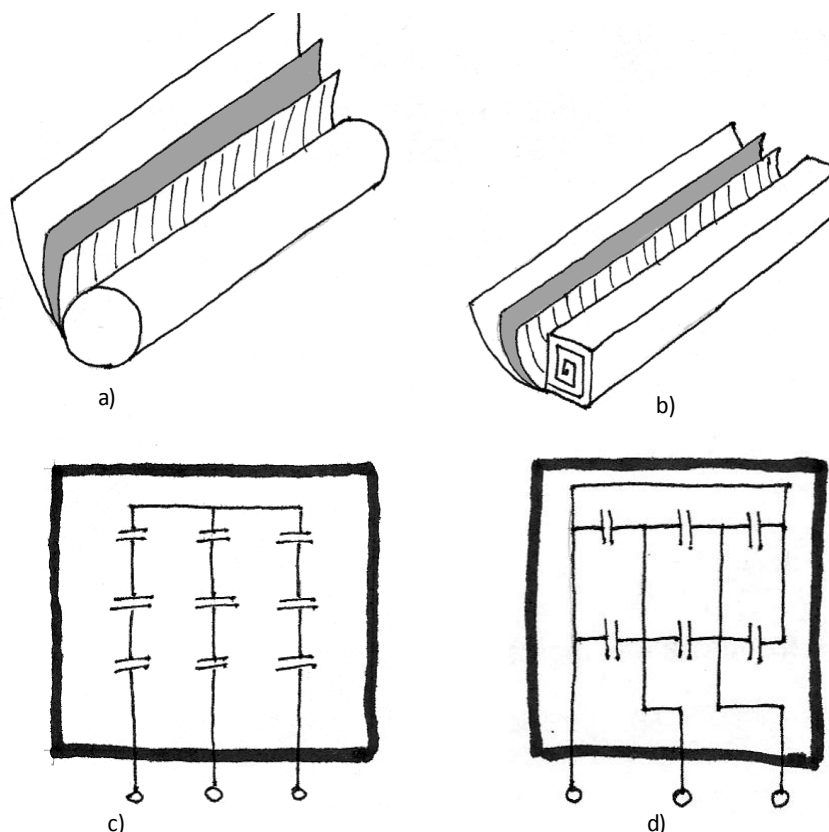


Figura 3-3: Condensadores colocados **b)** en serie y **c)** en paralelo. Cada condensador se enrolla **(a)** y se colocan juntos en una cuba con aceite mineral, cada conjunto constituye una unidad.

Los condensadores, después de fabricarlos con aceite mineral (dejados de fabricar por ser éste inflamable) y con PCB (prohibidos por ser éste tóxicos), fueron fabricados usando la tecnología del «dieléctrico mixto», así nacieron los capacitores de polipropileno metalizado (la parte activa está formada por una sola hoja de dicho material sobre la cual se deposita, en una de sus caras y por evaporación bajo vacío, una delgada capa metálica de 0,2 micrones de espesor, la cual conforma su armadura). Actualmente se fabrican con «Resina exposi» cuyo envase es de un material «Noryl».

Los sistemas de compensación más comunes para la instalación de condensadores como compensadores son:

- Compensación centralizada.
- Compensación por grupos.
- Compensación individual.
- Compensación automática.

3.2 – 1: Sistemas de instalación de los condensadores

Compensación centralizada⁶

El comportamiento diario de las cargas tiene una importancia fundamental para la elección del tipo de corrección más conveniente. En instalaciones con muchas cargas, en las que todos sus elementos funcionan de forma simultánea y/o algunos están conectados sólo unas pocas horas al día, es evidente que la solución de la corrección distribuida resulta demasiado costosa, quedando durante largos periodos inutilizados muchos de los condensadores instalados. El uso de una batería conectada permanentemente sólo es posible si la absorción de energía reactiva es lo suficientemente regular durante todo el día. Por tanto, el uso de un único sistema de corrección en el punto inicial de la instalación permite reducir notablemente la suma de potencias de los condensadores instalados.

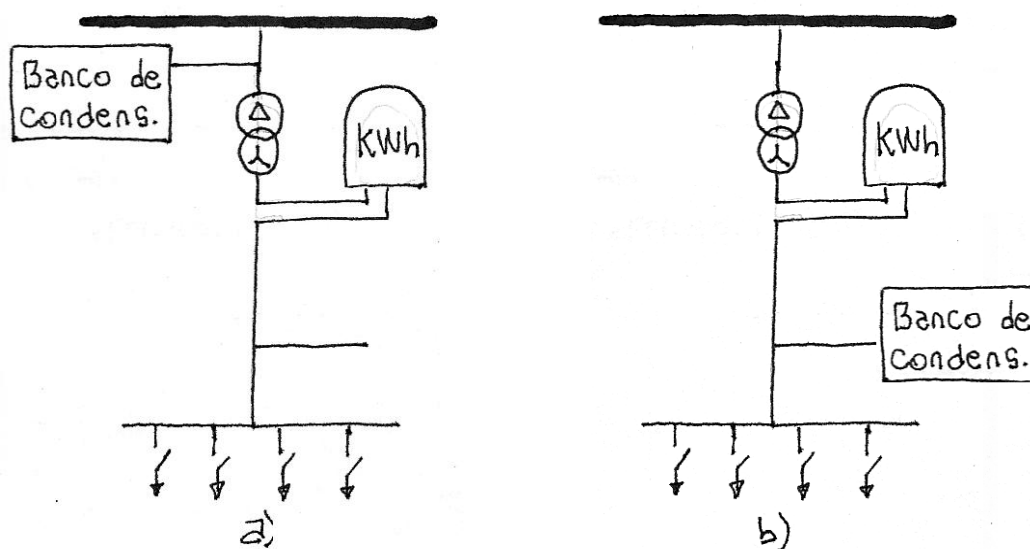


Figura 3-4: Compensación centralizada: baterías de condensadores en a) el primario y b) el secundario del transformador reductor.

Se la usa en instalaciones de pequeñas potencias y en líneas de baja tensión. También se la usa en las grandes estaciones transformadoras y de distribución. La batería de condensadores puede colocarse en el primario (Figura 3-4a) o en el secundario (Figura 3-4b) del transformador reductor.

⁶ El adjetivo centralizado significa que la instalación se hace en la central de distribución.

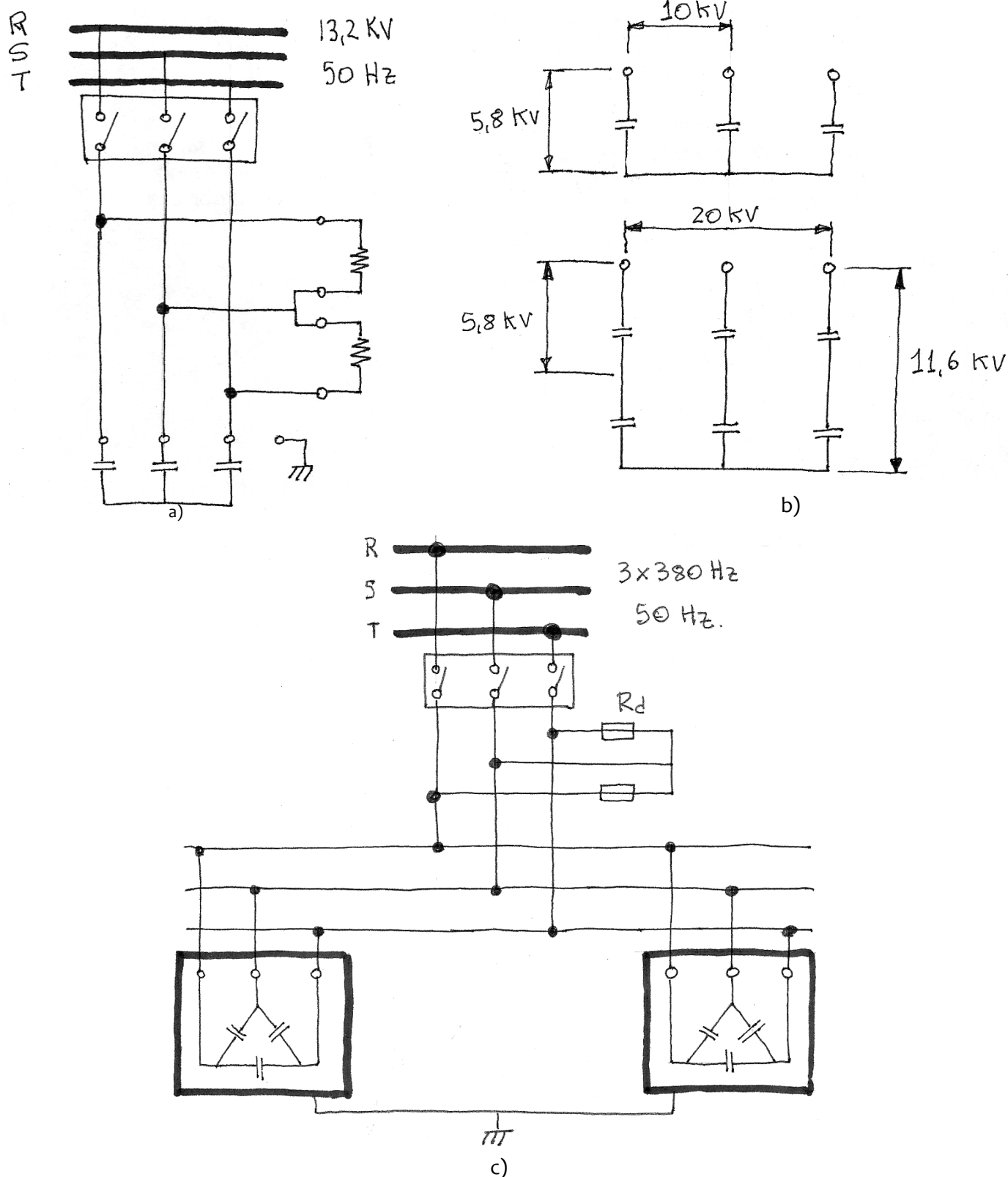


Figura 3-5: Instalación en una compensación centralizada **a)** en el lado de alta tensión (estrella), **b)** banco de condensadores conectados en serie y en paralelo y **c)** en el lado de baja tensión (triángulo).

- En el primario: es decir, en el lado de alta tensión. Se los coloca en **estrella** (Figura 3-5a) y con una instalación con varios elementos en serie o individuales según la tensión instalada supere o no respectivamente los 6 [KV] (Figura 3-5b). Se los instala en una celda propia o a la intemperie, y en algunos casos se los conecta a las barras colectoras de alta tensión.
- En el secundario: es decir, en el lado de baja tensión. La colocación del banco es en **triángulo** (Figura 3-5c) y sujeta a las barras colectoras de baja tensión.

En ambos casos se usa protección contra corto circuitos, fusibles de acción retardada y calibrados a 1,5 veces la corriente del condensador. Los recipientes de éstos deben estar conectados a tierra, se pueden usar para esto los devanados del propio transformador, resistencias de descarga y reactivas de descarga, siendo éstas últimas recomendadas siempre.

La principal desventaja es que las líneas de distribución de la instalación después del dispositivo de corrección deben estar dimensionadas teniendo en cuenta la totalidad de la potencia reactiva absorbida por las cargas.

Compensación por grupos

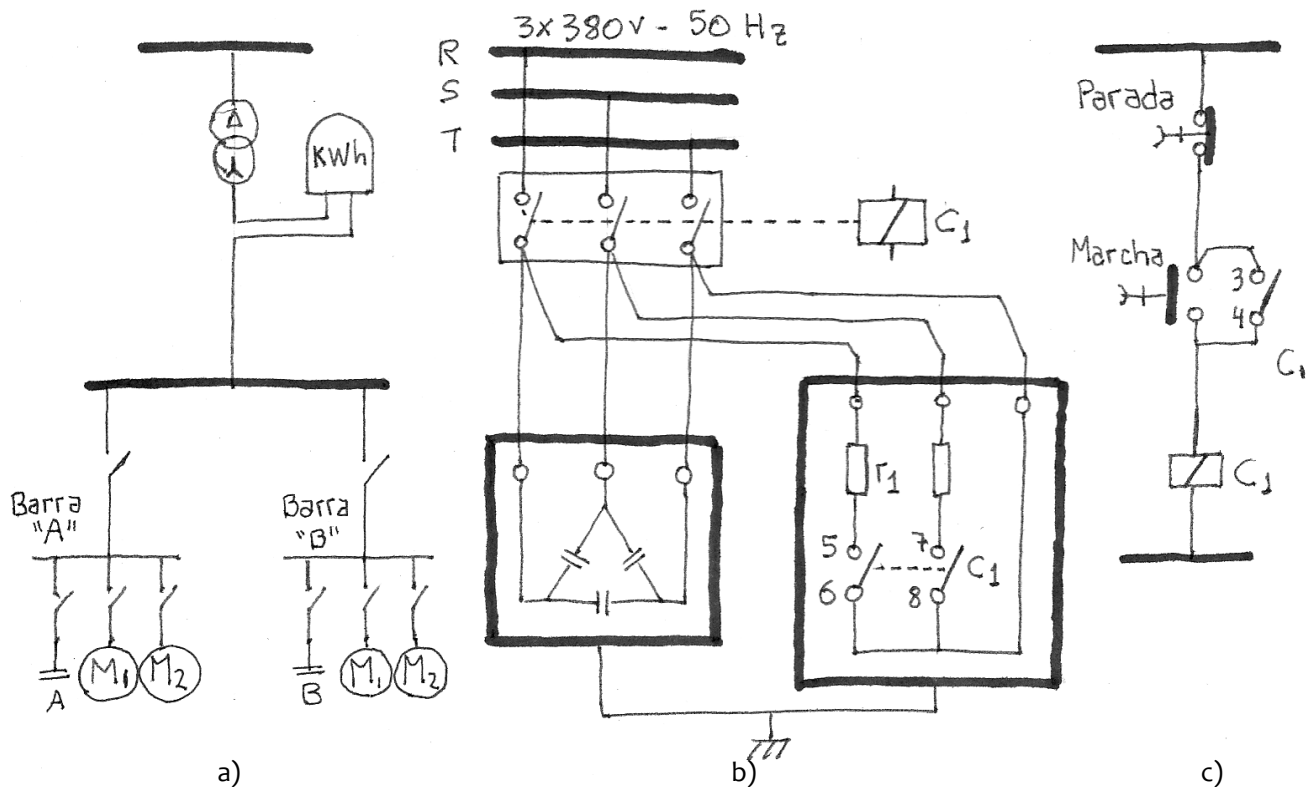


Figura 3-6: Instalación en una compensación por grupo: **a)** forma unifilar, **b)** sistema sin resistencia de arranque y **c)** mando por impulsos para comandar el sistema de b).

Consiste en corregir localmente grupos de cargas con características de funcionamiento similares mediante la instalación de una batería de condensadores. El método se encuentra a medio camino entre la solución económica y el correcto servicio de la instalación, ya que los beneficios de la corrección afectan sólo a las líneas que están antes del punto en el que se encuentra instalada la batería de condensadores. Se usa mejor el tiempo de funcionamiento de los condensadores que con el caso anterior.

La [Figura 3-6a](#) muestra una instalación en forma unifilar, donde la función de la batería de condensadores **A** es la de compensar al grupo de motores conectados a la barra 1, **B** hace lo propio con la barra 2. Se instala con una resistencia de descarga fijamente conectada a los condensadores; para asegurar la descarga a tensiones menor de 50 V en 60 segundos, aunque también existen casos de instalaciones especiales que requieren resistencias de descarga rápida, que aseguran la misma en menos de 0,2 segundos. La instalación puede ser con o sin resistencia de arranque.

- Sin resistencia de arranque: la [Figura 3-6b](#) muestra este tipo. El pulsador de marcha acciona C_1 y los condensadores quedan realimentados por los contactos auxiliares 3-4 de C_1 . El pulsador de parada abre C_1 y cierra los contactos auxiliares 5-6 y 7-8, conectando las resistencias de descarga r_1 a los condensadores.
- Con resistencia de arranque: la [Figura 3-7b](#) muestra este caso. El pulsador de marcha excita C_1 y C_2 poniendo a los condensadores a plena carga con las resistencias de arranque r_2 en corto circuito. El pulsador de parada abre C_1 y C_2 y cierra los contactos auxiliares 5-6 y 7-8 de C_1 y C_2 , dejando a los condensadores conectados a las resistencias de descarga r_1 .

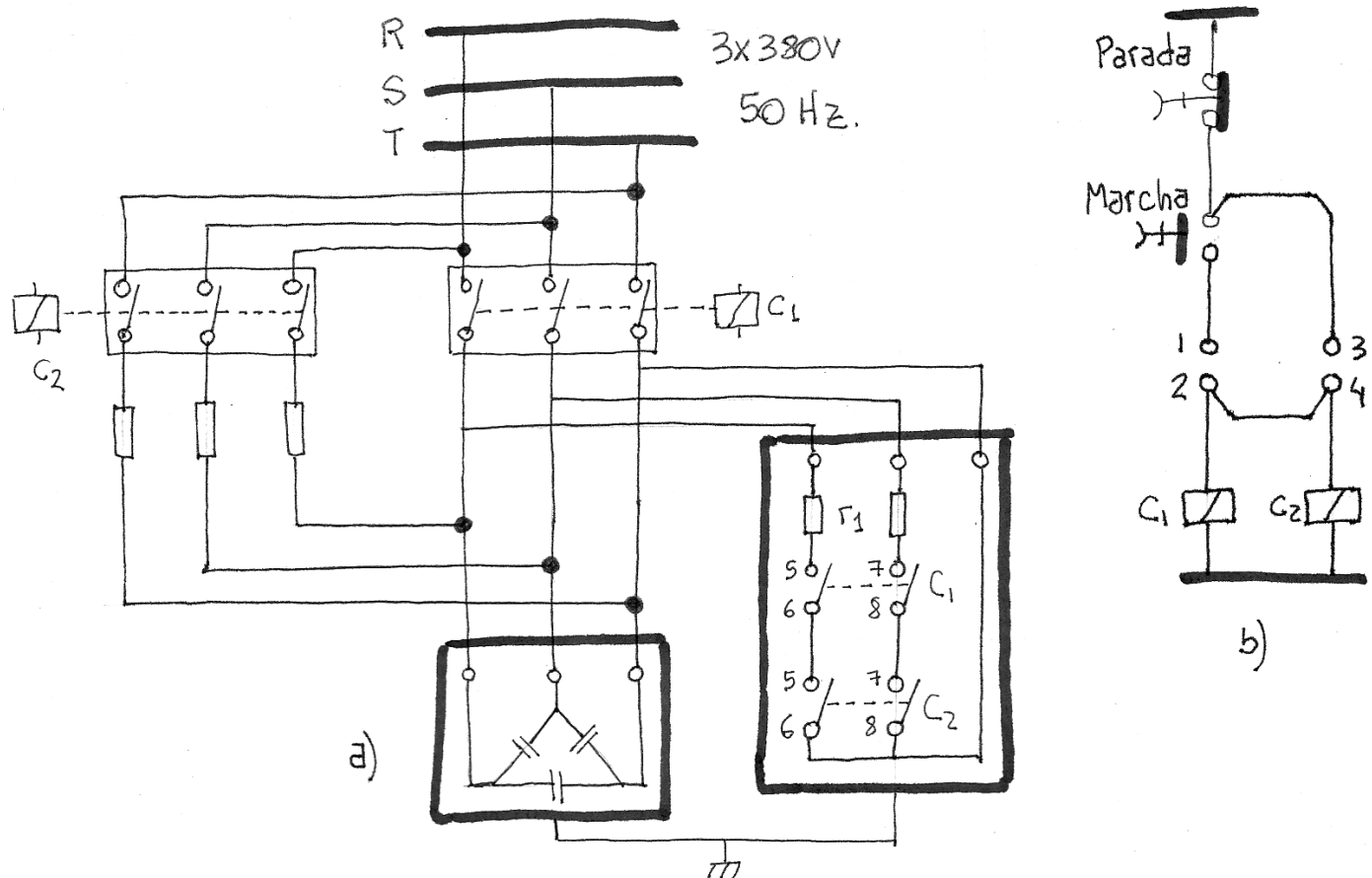


Figura 3-7: Instalación en una compensación por grupo: **a)** sistema con resistencia de arranque y **b)** mando por impulsos para comandar el sistema de a).

Compensación individual

Esta corrección se realiza conectando una batería de condensadores en debidamente dimensionada directamente y en paralelo al dispositivo que necesita la compensación. La instalación es sencilla y, teniendo en cuenta solo el dispositivo a corregir, poco costosa: el condensador y la carga pueden beneficiarse de las mismas protecciones contra sobrecorrientes y se insertan o desconectan a la vez.

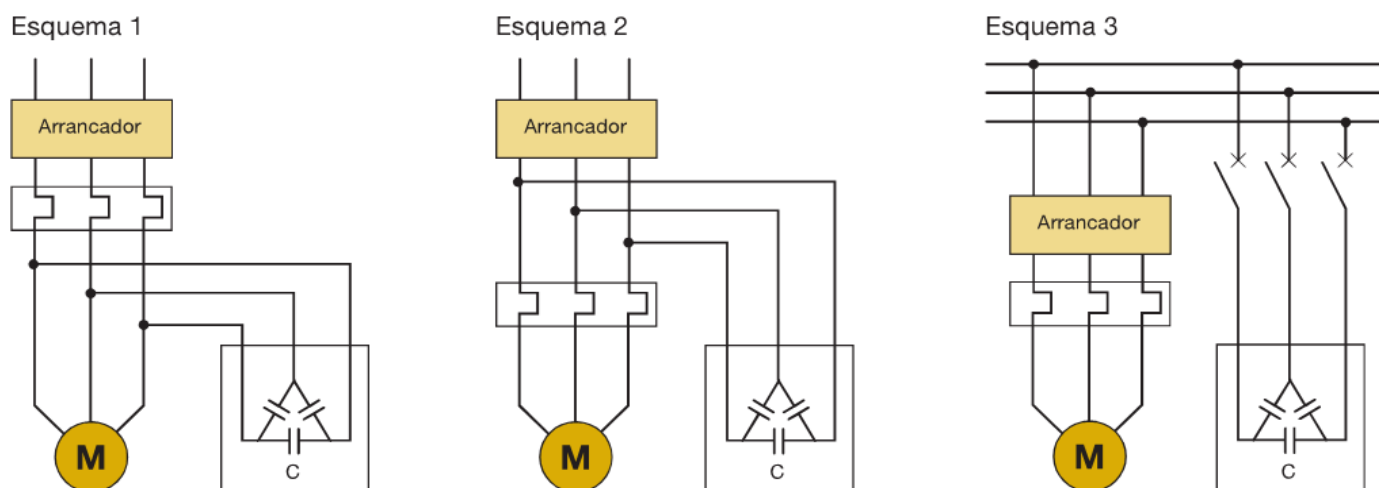


Figura 3-8: Instalación en una compensación individual: **a)** sistema con resistencia de arranque y **b)** mando por impulsos para comandar el sistema de a).

La Figura 3-8 presenta los esquemas usuales de conexión para este método. En caso de conexión directa (esquemas 1 y 2) se corre el riesgo de que, tras el corte de la alimentación, el motor, al continuar rotando (energía cinética residual) y autoexcitándose con la energía reactiva suministrada por la batería de condensadores, se transforme en un generador asíncrono. Si esto sucede, la tensión se mantiene en el lado de carga del dispositivo de maniobra y control, con riesgo de peligrosas sobretensiones (hasta el

doble de la tensión nominal). Por medio del esquema 3, la batería de compensación se conecta al motor sólo cuando éste está en marcha y se desconecta del mismo antes de que se produzca el corte de la alimentación del motor.

Toda la red antes del punto de corrección, trabaja con un factor de potencia elevado. Lo que hace caro a este sistema es no solamente el costo e instalación se debe realizar a cada dispositivo que posea un factor de potencia elevado sino que también, para tener la misma compensación, es necesaria una potencia reactiva mayor. Conveniente solo cuando la potencia sea inferior a **150 [KVA]**.

Compensación automática de energía reactiva

En la mayor parte de las instalaciones no tiene lugar una absorción constante de potencia reactiva, esto puede ocasionar inconvenientes; por ejemplo, un banco de condensadores conectados a una carga que por x motivos varía repentinamente, provocando sobre compensación y una sobretensión en la carga, lo cual puede ser peligroso. Por eso es aconsejable realizar de forma automática la compensación a fin de lograr una tensión de red constante.

Para ello se emplean sistemas de corrección automáticos que, por medio de un sistema de detección de tipo varimétrico y de un regulador del factor de potencia, permiten la conexión o desconexión automática de las diferentes baterías de condensadores, siguiendo de esta forma las variaciones de la potencia reactiva absorbida y manteniendo constante el factor de potencia de la instalación. Con objeto de proporcionar una potencia lo más cercana posible a la requerida, la inserción de los condensadores tiene lugar de forma escalonada; la precisión de control será mayor cuanto más escalones haya y cuanto más pequeña sea la diferencia entre ellos.

En la [Figura 3-9](#) se muestra el circuito para entender el principio de funcionamiento. El relé inductivo R_1 conecta los condensadores cuando la carga aumenta y el relé capacitivo R_2 los saca de servicio cuando la carga disminuye. Los relés temporizados (1) evitan que se conecten los condensadores debido a cambios abruptos y pasajeros de la carga, es decir, que la variación de la misma se debe mantener durante un determinado tiempo. Los relés R_1 y R_2 transmiten órdenes a los relés temporizadores (1) que a su vez actúan sobre contactores que conectan o desconectan a los grupos de condensadores **A**, **B** y **C**, quedando garantizado el orden de conexión o desconexión de los mismos.

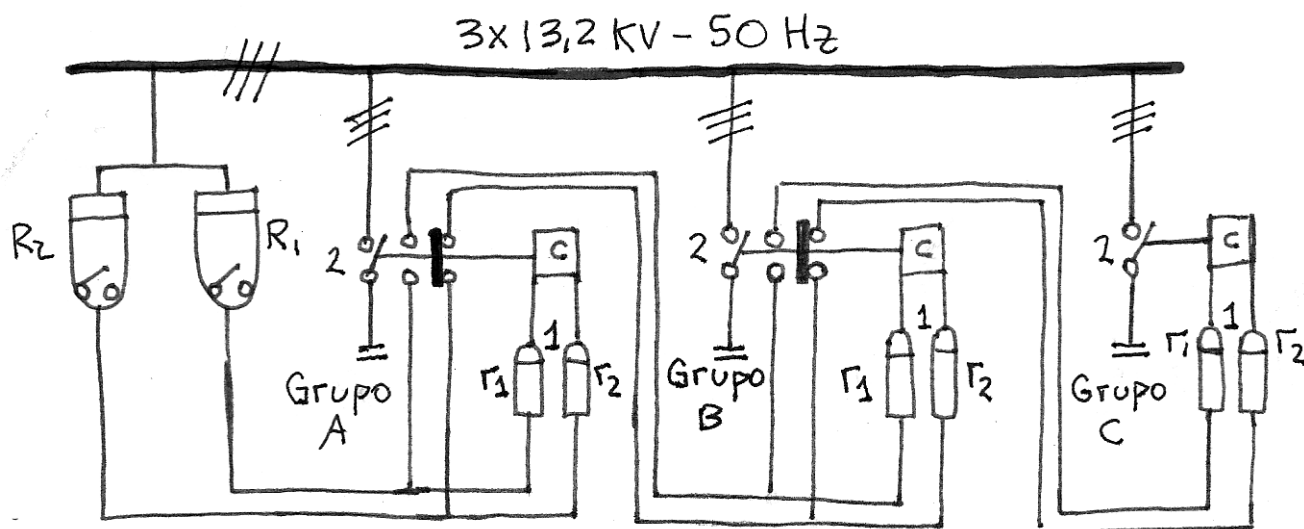


Figura 3-9: Compensación automática de energía reactiva.