

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

«ANÁLISIS Y DIMENSIONAMIENTO DE LA COMPENSACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES DE BAJA TENSIÓN»

Alumno/Alumna: <Martínez, Somalo, Carmen>

Director/Directora: <Buigues, Beraza, Garikoitz>

Curso: <2017-2018>

Fecha: <Bilbao, 19,06,2018>

DATOS BÁSICOS PROYECTO FIN DE GRADO

Título trabajo fin de grado:

Análisis y dimensionamiento de la compensación del factor de potencia en instalaciones eléctricas industriales de baja tensión

Resumen trilingüe:

En la actualidad, uno de los principales problemas de la ingeniería eléctrica es el optimizar la transferencia de energía de una fuente de CA a una carga. La solución a esto es mejorar el factor de potencia, para ello se colocan baterías de condensadores entre la fuente y la carga, teniendo en cuenta varios factores normativos sobre la baja tensión. De esta forma, se consigue que los equipos funcionen correctamente, además de un importante ahorro en la factura eléctrica.

Para facilitar estas instalaciones, las empresas distribuidoras de baterías de condensadores ponen una serie de software al servicio del cliente.

Nowadays optimizing energy transfer from an AC source to a load is a classical problem in electrical engineering. The standard approach to improving the power factor is to place a compensator between the source and the load, but to make this compensation you must to take into account several factors and normative about low voltage. In this way you get that there are not harmonics and consequently the electrical equipment work correctly and an important saving in the electric bill.

To facilitate these facilities, the companies distributors of capacitor bank put a series of softwares at the service of the client.

Gaur egun, ingeniarietza elektrikoaren arazo nagusienetarikoa, karga batetara korrante alternoaren (KA) iturri bateko energiaren transferentzia optimizatzea da. Honen konponbidea, potentziaren faktorea hobetzea da. Energia iturriaren eta kargaren artean bateria-kondentsadoreak ipintzen dira horretarako, tentsio-baxuaren hainbat faktore arauemaile kontuan hartzen direlarik. Era honetan, ekipoen funtzio egokia lortzen da eta baita faktura elektrikoaren aurrezpen nabarmen bat ere.

Instalazio hauek errazteko, bateria-kondentsadoreen empresa-banatzailleek software talde bat eskaintzen diete bezeroei.



Palabras clave (trilingüe):

Dimensionamiento, compensación, factor de potencia, energía reactiva, condensadores, software

Dimensioning, compensation, power factor, reactive power, capacitor Banks, software

Neurriak ezarri, orekatu, potentzi faktorea, energia erreaktiboa, kondentsadoreak, software

Tabla de contenido

1. Introducción.....	7
2. Contexto	8
3. Objetivos y alcance	8
4. Conceptos básicos: Potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y factor de potencia.....	9
5. Determinación del factor de potencia.....	12
6. ¿Qué produce un bajo factor de potencia?.....	16
6.1 Consumo de potencia reactiva	16
6.2 Armónicos en la red	16
7. Instrumentos para la compensación del factor de potencia	20
7.1 Alternadores síncronos	20
7.2 Compensadores síncronos.....	20
7.3 Compensadores estáticos.....	22
7.4 Baterías de condensadores estáticos	23
8. Corrección mediante el uso de condensadores	25
8.1 Características a tener en cuenta a la hora de elegir un condensador.	25
8.2 Niveles de instalación	27
8.2.1 Instalación general	28
8.2.2 Instalación por sector.....	29
8.2.3 Instalación individual.....	29
8.3 Sistemas de compensación.....	30
8.3.1 <i>Compensación fija</i>	31
8.3.2 <i>Compensación automática</i>	34
9. Beneficios de compensar el factor de potencia	39
9.1 Ahorro de consumo eléctrico	40
9.2 Disminución de pérdidas	41
9.3 Reducción de caídas de tensión.....	42
9.4 Optimización de las máquinas eléctricas.....	43
9.5 Reducción de gases de efecto invernadero.....	43
10. Armónicos.....	44
10.1 Efectos de los armónicos	45
10.2 Filtros	47
11. Aplicación práctica.....	49

12. Utilización de software	54
13. Metodología del trabajo	69
13.1 Descripción de tareas.....	69
13.2 Diagrama Gantt.....	70
14. Presupuesto	72
15. Conclusiones.....	75
16. Bibliografía.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Valores del factor de potencia.....	7
Ilustración 3. Triángulo de potencias	11
Ilustración 4. Cosfímetro	12
Ilustración 5. Triángulo de potencias con compensación	13
Ilustración 6. Desarrollo de Fourier de una onda cuadrada.....	17
Ilustración 7. Rectificador no controlado trifásico de 6 pulsos.....	18
Ilustración 8. Compensador síncrono en sobreexcitación	21
Ilustración 9. Compensador síncrono en sobreexcitación	21
Ilustración 10. Esquema básico de un TCR-TSC.....	22
Ilustración 11. Componentes de un condensador	23
Ilustración 12. Condensador planos-cilíndricos-esféricos.....	23
Ilustración 13. Batería con 4 condensadores trifásicos.....	25
Ilustración 14. Instalación general.....	28
Ilustración 15. Instalación por sector	29
Ilustración 16. Instalación individual	30
Ilustración 17. Arranque estrella-triángulo con resistencias de descarga	33
Ilustración 18. Arranque estrella-triángulo	33
Ilustración 19. Arranque estrella-triángulo	34
Ilustración 20. Ejemplo (A)	36
Ilustración 21. Ejemplo (B).....	36
Ilustración 22. Equilibrio entre regulación física y eléctrica.....	37
Ilustración 23. Parámetros regulación	38
Ilustración 24. Sanciones dependiendo del factor de potencia	40
Ilustración 25. Armónicos en la red.....	44
Ilustración 26. Comportamiento reactancia en función del orden del armónico.....	46
Ilustración 27. Posicionamiento de los filtros	47
Ilustración 28. Triángulo de potencias	49
Ilustración 29. Datos de la instalación.....	50
Ilustración 30. Representación esquemática de un transformador	50
Ilustración 31. Página principal CIRCUITOR.....	55
Ilustración 32. Datos técnicos a introducir CIRCUITOR.....	56
Ilustración 33. Batería de condensadores básica CIRCUITOR	57
Ilustración 34. Batería de condensadores avanzada CIRCUITOR	57

Ilustración 35. Información detallada CIRCUITOR (1)	58
Ilustración 36. Información detallada CIRCUITOR (2)	58
Ilustración 37. Información detallada CIRCUITOR (3)	59
Ilustración 38. Tipos de proyectos SCHNEIDER	59
Ilustración 39. Datos técnicos a introducir del motor SCHNEIDER	60
Ilustración 40. Datos técnicos de los armónicos a introducir SCHNEIDER.....	60
Ilustración 41. Datos técnicos a introducir del transformador SCHNEIDER.....	61
Ilustración 42. Datos requeridos para cálculo por fórmula general SCHNEIDER.....	62
Ilustración 43. Datos a introducir sobre los armónicos SCHNEIDER.....	63
Ilustración 44. Selección del producto	64
Ilustración 45. Pantalla de inicio AENER.....	64
Ilustración 46. Tipo de equipo y de cálculos AENER.....	65
Ilustración 47. Información AENER.....	66
Ilustración 48. Pantalla de inicio.....	66
Ilustración 49. Datos instalación LEGRAND.....	67
Ilustración 50. Batería integración componentes sistema completo	68
Ilustración 51. Batería sistema completo	68
Ilustración 52. Esquema presupuesto.....	72
Ilustración 53. Gráfica presupuesto.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valor de K tabulado.....	14
Tabla 2. Factor de potencia de diferentes equipos.....	15
Tabla 3. Sanciones por consumo de reactiva	40
Tabla 4. Relación factor de potencia-pérdidas por Joule	41
Tabla 5. Relación factor de potencia-caída de tensión en las líneas.....	42
Tabla 6. Relación potencia del transformador-potencia activa transmitida.....	43
Tabla 7. Datos transformador	49
Tabla 8. Tabla compensación transformadores BT	51
Tabla 9. Coeficiente dependiente de los factores de potencia.....	52
Tabla 10. Datos instalación.....	54
Tabla 11. Tabla comparativa softwares.....	68
Tabla 12. Planificación.....	70
Tabla 13. Diagrama Gantt.....	71
Tabla 14. Datos presupuesto.....	72
Tabla 15. Gastos presupuesto.....	73
Tabla 16. Amortizaciones presupuesto.....	73
Tabla 17. Horas internas presupuesto.....	73
Tabla 18. Otras partidas presupuesto	74
Tabla 19. Resumen global del presupuesto	74

1. Introducción

En este trabajo fin de grado vamos a ver qué es el factor de potencia, qué efectos tiene sobre la industria un bajo factor de potencia y cómo realizar su compensación.

La compensación del factor de potencia por parte de las empresas se realiza principalmente por un motivo económico. A continuación, se va a explicar de una forma sencilla por qué es necesario un factor de potencia elevado para que la eficiencia sea mayor.

Cuando hablamos de la “energía” que suministra la compañía eléctrica, en realidad nos referimos a dos componentes, potencia activa y reactiva.

La potencia activa, también llamada potencia útil, es la potencia que consumen los equipos eléctricos, es decir la realmente utilizada para realizar el trabajo y se mide en Kw. La potencia reactiva por el contrario no produce un trabajo físico directo en los equipos, pero sí que es necesaria para producir el flujo electromagnético que es necesario en motores, transformadores, lámparas fluorescentes, equipos de refrigeración y otros similares. Cuando estos equipos son abundantes en una empresa, la cantidad de potencia de reactiva se hace también significativa, lo que produce una disminución del factor de potencia.

Luego el factor de potencia es un indicador sobre el correcto aprovechamiento de la energía, de forma general es la cantidad de energía que se ha convertido en trabajo. Este puede tomar valores entre 0 y 1, lo que significa:

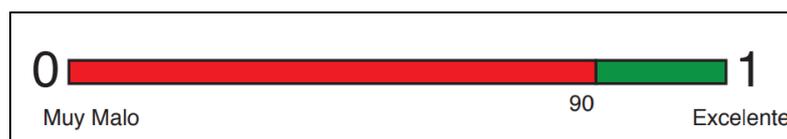


Ilustración 1. Valores del factor de potencia

Cuando el factor de potencia es inferior al 0.9, significa que la empresa está desperdiciando energía y en consecuencia se produce un aumento de la factura eléctrica. Además, hay que tener en cuenta que cuando éste es inferior a 0.95 se producen penalizaciones por parte de las eléctricas.

Entonces las industrias buscan soluciones para reducir la factura eléctrica y las posibles penalizaciones. La solución más usada es la utilización de condensadores en paralelo, aunque más adelante veremos que esta práctica tiene muchos matices y además veremos otras alternativas.

2. Contexto

El factor de potencia (FP) es la relación entre la potencia activa (P) y la potencia aparente (S) y está determinado por el tipo de cargas conectadas a la instalación. La presencia de energía reactiva significa un riesgo para las instalaciones eléctricas, debido a que aparecen armónicos, por lo que se requiere compensarla a través de baterías de condensadores. Además, un exceso de consumo de energía reactiva por parte de las industrias viene penalizado por importantes multas económicas por parte de las eléctricas. Debido a esto, la mayoría de empresas industriales cuentan con un diseño adecuado de baterías de condensadores, contribuyendo de esta forma, a reducir el prematuro envejecimiento de las instalaciones y un ahorro en la factura eléctrica.

3. Objetivos y alcance

El alcance del proyecto se concreta en el diseño y dimensionamiento de la compensación del factor de potencia. Para ello se realizará un estudio de las cargas integradas en la instalación, viendo de qué forma absorben o ceden energía reactiva. También se estudiará la instalación eléctrica de la misma, permitiéndonos así, conocer dónde deberán ser instaladas las baterías. Los objetivos principales que se persiguen con el presente Trabajo Fin de Grado son:

- Analizar los factores que influyen en la compensación del factor de potencia en instalaciones trifásicas de baja tensión.
- Estudiar y evaluar las razones económicas y técnicas existentes en la necesidad de controlarlo.
- Realización de los cálculos necesarios para el correcto dimensionamiento y ajuste del factor de potencia.
- Utilizar y comparar herramientas software de varios fabricantes de nivel internacional en el ámbito de la ingeniería eléctrica.

4. Conceptos básicos: Potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y factor de potencia.

La potencia eléctrica se define como la capacidad que tiene un aparato eléctrico para realizar un trabajo o la cantidad de trabajo que el mismo realiza en una unidad de tiempo. Su unidad es el watio (W).

Sin embargo, en algunos equipos que trabajan en alterna y cuyo funcionamiento está basado en el electromagnetismo (motores y transformadores), coexisten tres tipos diferentes de potencia:

- Potencia activa
- Potencia reactiva
- Potencia aparente

Potencia activa:

La potencia activa o potencia útil, es la energía que realmente se aprovecha cuando ponemos a funcionar un equipo eléctrico y éste realiza un trabajo. Los receptores formados por resistencias puras consumen exclusivamente potencia activa.

A continuación, vamos a ver de una forma más teórica que es la potencia activa:

Llamamos potencia instantánea al producto $p = u(t) i(t)$, donde:

$$p(t) = 2 \cdot U \cdot I \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t - \varphi) = UI \cos(\varphi) - UI \cos(2\omega t - \varphi)$$

Si hacemos el promedio de la potencia instantánea $p(t)$ en un periodo $T = 2\pi/\omega$ obtenemos la potencia activa:

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

Luego la potencia activa es el valor medio de la potencia instantánea. [1]

Potencia reactiva:

La potencia reactiva es la que consumen motores, transformadores y todo tipo de aparato eléctrico que posee algún tipo de bobina para crear un campo electromagnético.

Estos dispositivos consumen tanto potencia activa como reactiva, esta última se produce debido a que estos elementos están formados por un conductor enrollado a un núcleo de material ferromagnético, cuando circula corriente por ella se forma un campo magnético, el cual almacena energía y se opone a los cambios de la intensidad. Es esto lo que va a producir un desfase entre tensión e intensidad y por tanto la existencia de potencia reactiva. Esta potencia no produce ningún tipo de trabajo útil y además perjudica la transmisión de la energía a través de las líneas de distribución.

Esta energía reactiva no hay que producirla, pero sí, hay que transportarla, ya que va y viene de nuestro aparato eléctrico a la red 50 veces por segundo (la frecuencia de la red son 50 Hz), provocando variaciones en la intensidad eléctrica de los circuitos. Esto produce sobrecargas en las líneas transformadoras y generadoras.

Vamos a ver de forma teórica que es la potencia reactiva:

Partimos de la potencia instantánea:

$$p(t) = UI \cos(\varphi) - UI \cos(2\omega t - \varphi)$$

El segundo término es un término fluctuante cuyo valor medio es nulo, esta expresión la podemos reescribir de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} P(t) &= P*(1 - \cos(2\omega t)) - UI*\text{sen}(\varphi)*\text{sen}(2\omega t) = \\ &= P*(1 + \text{sen}(2\omega t - \pi/2)) - Q*\text{sen}(2\omega t) \end{aligned}$$

siendo $Q = UI*\text{sen}(\varphi)$

Luego es cómo si se consumieran dos potencias, una siempre positiva y de valor medio P y otra puramente fluctuante (se almacena y después se cede) de valor medio nulo y valor máximo Q .

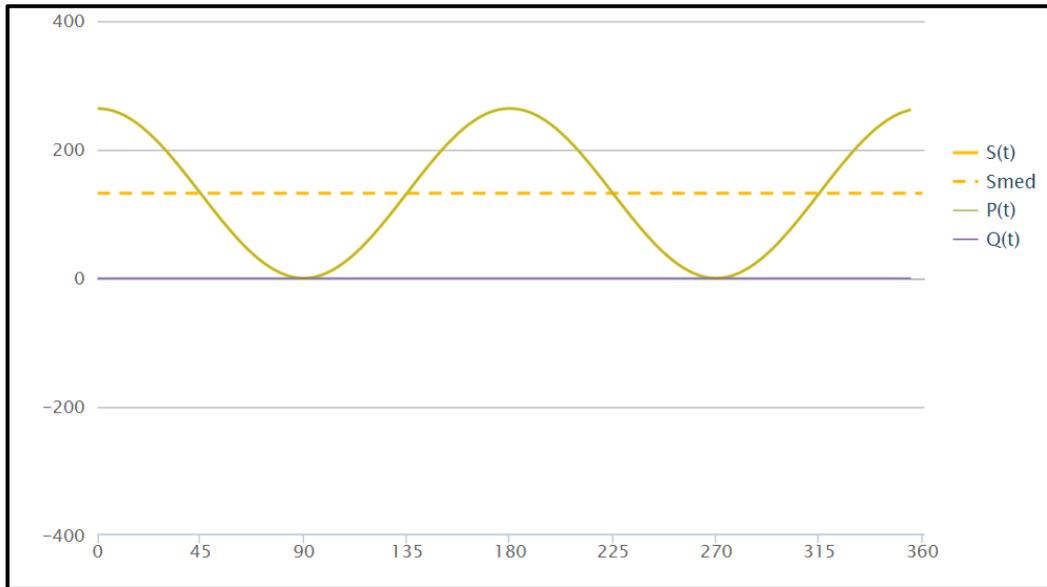
Así que llamamos potencia reactiva al valor máximo de la potencia fluctuante. [1]

Potencia aparente:

La potencia aparente (Kva), designada con la letra "S" es la suma de la potencia activa (Kw) que disipan los equipos en calor y trabajo más la potencia reactiva ($Kvar$) utilizada para la creación de campos magnéticos. Luego se puede decir que es la cantidad total de potencia que consume un equipo eléctrico.

La potencia aparente es el producto de la tensión eficaz por la intensidad eficaz:

$$S = U * I \quad [1]$$



Factor de potencia:

De acuerdo con la definición de potencia activa, potencia reactiva y potencia aparente se puede construir el triángulo de potencia, en el cual se puede comprender que es el factor de potencia.

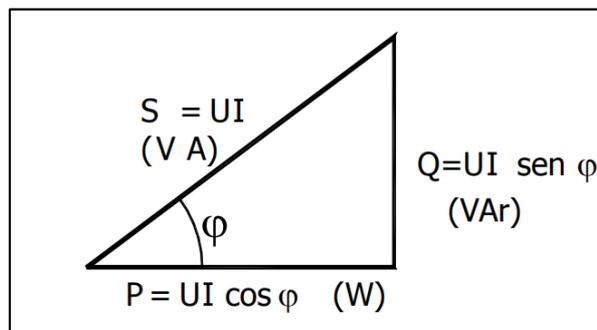


Ilustración 2. Triángulo de potencias

El factor de potencia es el desfase que hay entre la tensión y la intensidad.

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S}$$

5. Determinación del factor de potencia.

Antes de dimensionar la batería de condensadores a instalar para corregir la instalación, hay que determinar de manera precisa el factor de potencia a partir de los consumos o el ciclo de carga de la instalación; así se evita la inyección de excesiva energía reactiva, condición que normalmente no está permitida por las eléctricas.

Para ello es necesario determinar el $\cos(\varphi)$ de la carga o del conjunto de cargas; esto puede llevarse a cabo de dos formas diferentes:

Directamente, mediante medida directa por medio de un cosfímetro.

Indirectamente, a través de la lectura de los contadores de energía activa y reactiva.

El cosfímetro es un instrumento que permite visualizar el factor de potencia con el que la carga está absorbiendo energía. La lectura de este instrumento se realizará en diferentes momentos del ciclo de carga para así extraer un factor de potencia medio.

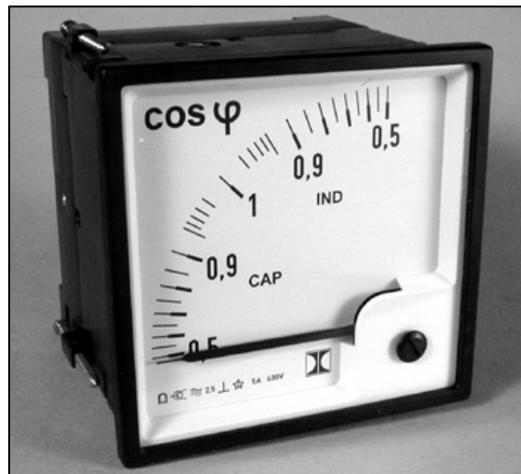


Ilustración 3. Cosfímetro

Si disponemos de las lecturas de la energía activa y la reactiva absorbidas en un ciclo de trabajo por la carga o por el conjunto de cargas que constituyen el reparto, el factor de potencia medio puede ser calculado de la siguiente manera:

$$\cos(\varphi) = \cos(\operatorname{tg}^{-1} * \left(\frac{E_{Qf} - E_{Qi}}{E_{Pf} - E_{Pi}}\right))$$

Donde:

E_{Pi} y E_{Qi} son los valores de la energía activa y reactiva leídos al comienzo del ciclo de trabajo.

E_{Pf} y E_{Qf} son los valores de la energía activa y reactiva leídos al término del ciclo de trabajo.

Si se pretende efectuar una compensación centralizada, el factor de potencia media mensual puede extraerse siguiendo el procedimiento descrito anteriormente o directamente de los recibos de la compañía eléctrica.

Una vez conocido el factor de potencia de la instalación $\cos(\varphi_1)$ y el que se quiere obtener $\cos(\varphi_2)$ es posible determinar la potencia reactiva necesaria de la batería de condensadores para alcanzar la corrección.

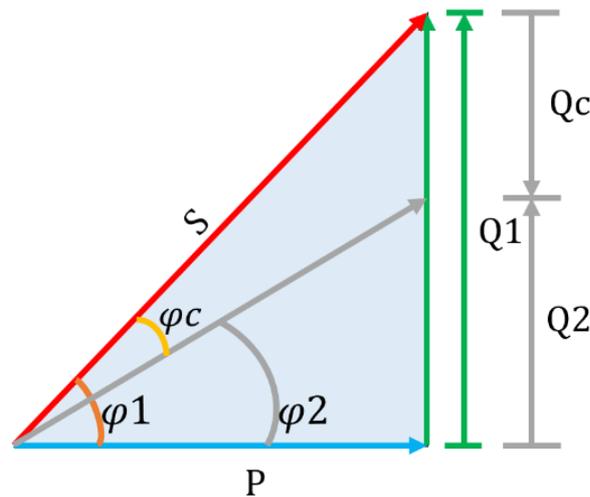


Ilustración 4. Triángulo de potencias con compensación

La potencia de la batería de condensadores Q_c es:

$$Q_c = (\operatorname{tg}(\varphi_1) - \operatorname{tg}(\varphi_2)) * P = K * P$$

Este factor K está tabulado:

Factor K (kvar/kW)

cosφ inicial	cosφ final												
	0.80	0.85	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
0.60	0.583	0.714	0.849	0.878	0.907	0.938	0.970	1.005	1.042	1.083	1.130	1.191	1.333
0.61	0.549	0.679	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.096	1.157	1.299
0.62	0.515	0.646	0.781	0.810	0.839	0.870	0.903	0.937	0.974	1.015	1.062	1.123	1.265
0.63	0.483	0.613	0.748	0.777	0.807	0.837	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.451	0.581	0.716	0.745	0.775	0.805	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.058	1.201
0.65	0.419	0.549	0.685	0.714	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.919	0.966	1.027	1.169
0.66	0.388	0.519	0.654	0.683	0.712	0.743	0.775	0.810	0.847	0.888	0.935	0.996	1.138
0.67	0.358	0.488	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68	0.328	0.459	0.594	0.623	0.652	0.683	0.715	0.750	0.787	0.828	0.875	0.936	1.078
0.69	0.299	0.429	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.907	1.049
0.70	0.270	0.400	0.536	0.565	0.594	0.625	0.657	0.692	0.729	0.770	0.817	0.878	1.020
0.71	0.242	0.372	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.214	0.344	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.186	0.316	0.452	0.481	0.510	0.541	0.573	0.608	0.645	0.686	0.733	0.794	0.936
0.74	0.159	0.289	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.132	0.262	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.105	0.235	0.371	0.400	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.605	0.652	0.713	0.855
0.77	0.079	0.209	0.344	0.373	0.403	0.433	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829
0.78	0.052	0.183	0.318	0.347	0.376	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552	0.599	0.660	0.802
0.79	0.026	0.156	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.634	0.776
0.80		0.130	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.608	0.750
0.81		0.104	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.82		0.078	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.556	0.698
0.83		0.052	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.530	0.672
0.84		0.026	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.85			0.135	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.86			0.109	0.138	0.167	0.198	0.230	0.265	0.302	0.343	0.390	0.451	0.593
0.87			0.082	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.88			0.055	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540
0.89			0.028	0.057	0.086	0.117	0.149	0.184	0.221	0.262	0.309	0.370	0.512
0.90				0.029	0.058	0.089	0.121	0.156	0.193	0.234	0.281	0.342	0.484

Tabla 1. Valor de K tabulado

Dependiendo de cómo se realiza la conexión de los condensadores si en triángulo o en estrella deberá tenerse en cuenta lo siguiente:

$$Q_{CESTRELLA} = Q_{CTRIANGULO} \rightarrow C_{ESTRELLA} = 3 * C_{TRIANGULO}$$

En baja tensión, donde los problemas de aislamiento son menos relevantes, suele preferirse emplear la conexión en triángulo de los condensadores.

La siguiente tabla muestra el factor de potencia de los receptores más usuales. [2]

Factor de potencia de los receptores más usuales			
Aparato	Carga	$\cos \varphi$	$\text{tg } \varphi$
Motor asíncrono ordinario	0 %	0,17	5,8
	25 %	0,55	1,52
	50 %	0,73	0,94
	75 %	0,8	0,75
	100 %	0,85	0,62
Lámparas de incandescencia		1	0
Lámparas de fluorescencia		0,5	1,73
Lámparas de descarga		0,4 a 0,6	2,29 a 1,33
Hornos de resistencia		1	0
Hornos de inducción		0,85	0,62
Hornos de calefacción dieléctrica		0,85	0,62
Máquinas de soldar por resistencia		0,8 a 0,9	0,75 a 0,48
Centros estáticos monofásicos de soldadura al arco		0,5	1,73
Grupos rotativos de soldadura al arco		0,7 a 0,9	1,02
Transformadores-rectificadores de soldadura al arco		0,7 a 0,9	1,02 a 0,75
Hornos de arco		0,8	0,75

Tabla 2. Factor de potencia de diferentes equipos

6. ¿Qué produce un bajo factor de potencia?

Son varios los factores que producen una disminución del factor de potencia, los más significativos son el consumo de potencia reactiva por parte de equipos eléctricos y la introducción de armónicos en la red.

6.1 Consumo de potencia reactiva

- Motores asíncronos
- Transformadores
- Hornos de inducción
- Alumbrado fluorescente
- Electrónica de potencia

6.2 Armónicos en la red

¿Qué son los armónicos?

Se puede demostrar que cualquier forma de onda periódica puede ser representada como una serie de ondas senoidales de diferentes frecuencias y fases, constituyendo el denominado espectro armónico de la onda. La frecuencia de la onda senoidal predominante se denomina fundamental, y las frecuencias del resto de ondas son un múltiplo entero de ésta. El aparato matemático que se utiliza para determinar el contenido de armónicos de una onda se denomina análisis de Fourier.

En un sistema equilibrado la onda está centrada en torno a cero, y los armónicos son múltiplos de la fundamental. En una onda cuadrada la amplitud es inversamente proporcional a su orden, es decir cuanto mayor es la frecuencia, menor es su amplitud.

En la siguiente figura se muestra una onda cuadrada, con el fundamental y los tres armónicos más significativos en los que puede ser descompuesta.

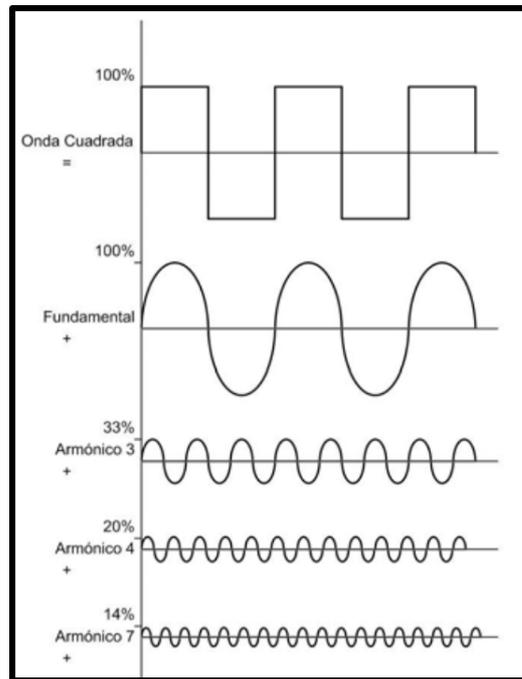


Ilustración 5. Desarrollo de Fourier de una onda cuadrada

En los países más industrializados, la distribución de energía eléctrica se realiza en corriente alterna, siendo las tensiones ondas senoidales trifásicas, es decir, sin presencia de armónicos. Sin embargo, ciertas condiciones de carga pueden provocar una distorsión armónica en las tensiones, provocando efectos desfavorables.

¿Qué produce los armónicos?

Cuando una carga eléctrica se conecta a una fuente alterna de suministro, absorbe corriente. Si la corriente absorbida es también sinusoidal, se denomina carga lineal, pudiendo estar en fase con la tensión (carga resistiva), en adelante (carga capacitiva) o en retraso (carga inductiva).

En otros tipos de carga puede ocurrir que la corriente absorbida por la carga no sea sinusoidal, por lo que tendrá cierto contenido de armónicos, a este tipo de cargas se le denomina cargas no lineales. Algunas de las cargas que producen armónicos son:

MONOFÁSICAS:

- Fuentes de alimentación de funcionamiento conmutado (SMPS).
- Estabilizadores electrónicos de dispositivos de iluminación fluorescente.
- Pequeñas unidades de Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI o UPS).

TRIFÁSICAS:

- Motores de velocidad variable.
- Grandes unidades de UPS.
- Rectificador trifásico no controlado de 6 pulsos.

Vamos a comentar este último ejemplo que es uno de los más comunes. Este rectificador utiliza diodos y/o tiristores para convertir la corriente alterna (AC) en corriente continua (DC). Los rectificadores se encuentran en abundantes dispositivos de potencia como variadores de velocidad para motores de corriente continua y alterna, cargadores de baterías, sistemas de alimentación ininterrumpida... El circuito más utilizado es el rectificador no controlado de 6 pulsos.

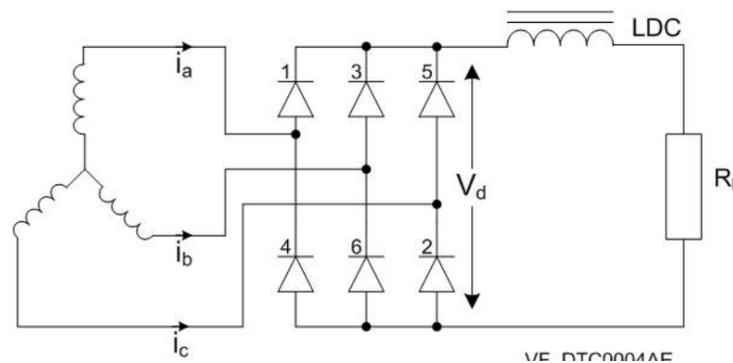


Ilustración 6. Rectificador no controlado trifásico de 6 pulsos

La tasa de distorsión armónica (THD) de una onda puede calcularse como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores RMS de cada armónico individual, dividido por el valor RMS del fundamental. Por ejemplo en la onda semicuadrada del rectificador no controlado de 6 pulsos es:

$$THD = \sqrt{\sum \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$$

Donde: n = orden del armónico I_1 = valor RMS del fundamental

El valor RMS total de una onda distorsionada puede calcularse como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrado de los valores RMS de cada una de las componentes, incluida la fundamental y todos los armónicos.

$$I_{RMS} = I_1 * \sqrt{1 + \sum \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \quad (n \geq 1)$$

El factor de distorsión es el cociente entre el valor RMS del fundamental y el valor RMS total.

$$\text{Factor de distorsión} = \frac{I_1}{I_{RMS}}$$

Existen muchos dispositivos electrónicos que sintetizan tensiones alternas en su salida, las cuales presentan un cierto número de armónicos. La distorsión armónica de la tensión de salida ocasiona a su vez una distorsión de la onda de corriente, lo que va a producir efectos negativos, como veremos más adelante. [3]

7. Instrumentos para la compensación del factor de potencia

En primer lugar, vamos a explicar que significa la compensación en redes de alimentación. Los transformadores, motores... son consumidores inductivos. Esto significa que para la formación de su campo magnético estos toman potencia inductiva o reactiva de la red de alimentación. Esto supone a las eléctricas una carga especial, la cual aumenta cuanto mayor es la potencia y mayor es el desfase.

Esta es la causa por la que se pide a los consumidores mantener un factor de potencia cercano a la unidad. La demanda de potencia reactiva se puede reducir colocando condensadores en paralelo a los consumidores de potencia inductiva. Dependiendo de la potencia reactiva que le aportan los condensadores, la potencia reactiva inductiva se anulará total o parcialmente. A este proceso se le llama **compensación**. Después de una compensación la red suministra en su mayoría potencia activa. Con esto se reduce la potencia reactiva y la intensidad de corriente, es decir se mejora el factor de potencia.

7.1 Alternadores síncronos

Los alternadores síncronos son las principales máquinas eléctricas utilizadas para la generación de energía eléctrica.

Proporcionan potencia eléctrica al usuario final a través de los sistemas de transmisión y de distribución. Por otro lado, se puede actuar sobre la excitación del alternador para variar el valor de la tensión generada y, con ello, regular las aportaciones de potencia reactiva en la red, con objeto de mejorar los perfiles de tensión del sistema y reducir las pérdidas por efecto Joule en las líneas. Normalmente los alternadores síncronos están equipados con reguladores automáticos que controlan de forma continua la tensión en el punto de conexión.

7.2 Compensadores síncronos

Se trata de motores síncronos que funcionan en vacío, puestos en sincronismo con la red, cuya única función es absorber la potencia reactiva excedente (funcionamiento en subexcitación) o bien proporcionar la potencia que falta (funcionamiento en sobreexcitación).

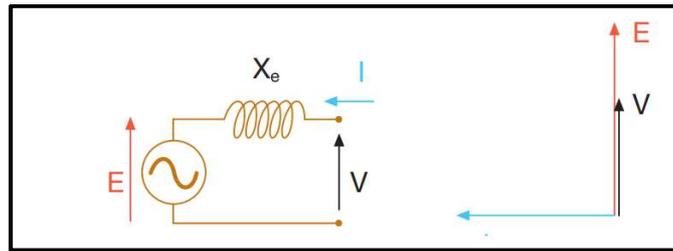


Ilustración 7. Compensador síncrono en sobreexcitación

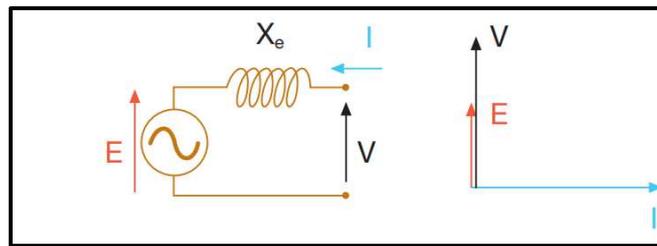


Ilustración 8. Compensador síncrono en sobreexcitación

E = f.e.m inducida en las fases del estator

V = tensión de fase impuesta por la red en los bornes del alternador

I = corriente en el estator

X_e = reactancia del estator

Estos dispositivos son usados en su mayoría en nodos de la transmisión y subtransmisión para la regulación de la tensión y de los flujos de potencia reactiva.

En las redes de distribución no resulta económica conveniente el uso de compensadores síncronos debido a sus altos costes de instalación y mantenimiento.

7.3 Compensadores estáticos

El desarrollo de la electrónica de potencia está favoreciendo la sustitución de los compensadores sincrónicos por sistemas estáticos para el control de la potencia reactiva como por ejemplo los TSC (thyristor switched capacitors) y los TCR (thyristor controlled reactors), una nueva versión de los sistemas de compensación de energía reactiva basados en componentes electromecánicos en los que, la inserción de los distintos condensadores no viene dada por la apertura y cierre de los contactores, sino por medio del control ofrecido por parejas de tiristores en antiparalelo.

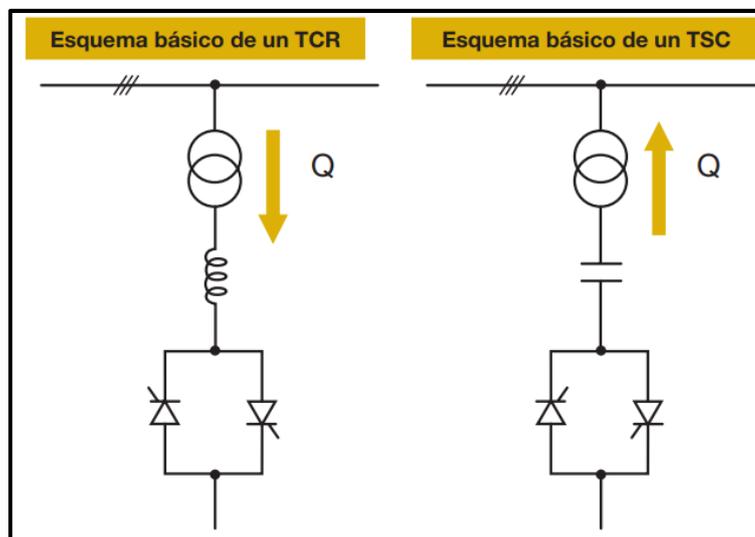


Ilustración 9. Esquema básico de un TCR-TSC

LOS TSC permiten un control escalonado de la potencia reactiva suministrada por grupos de condensadores, mientras que con los TCR se puede controlar con continuidad la potencia reactiva absorbida por las inductancias.

Con la instalación de un TSC y un TCR es posible llevar a cabo una regulación modulada con continuidad de la potencia reactiva producida/absorbida.

Pero estos dispositivos se emplean mayormente en redes de alta y muy alta tensión.

7.4 Baterías de condensadores estáticos

El condensador es un bipolo pasivo constituido por dos superficies conductoras, llamadas armaduras, entre las cuales se interpone un material dieléctrico.

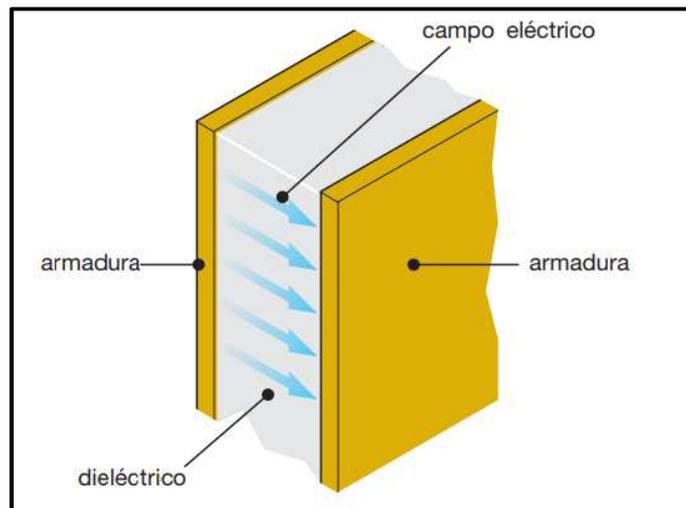


Ilustración 10. Componentes de un condensador

Este material queda impregnado con una sustancia que impide la penetración de humedad o que se formen burbujas, lo que podría provocar descargas eléctricas.

Los condensadores más avanzados se fabrican en seco, los cuales son sometidos a un tratamiento específico que mejora sus propiedades eléctricas, además de que no presentan peligro de contaminación debido a la sustancia impregnante.

En función de la geometría de las armaduras metálicas, pueden ser:

- Condensadores planos
- Condensadores cilíndricos
- Condensadores esféricos



Ilustración 11. Condensador planos-cilíndricos-esféricos

Las principales magnitudes que caracterizan a un condensador son:

Capacidad nominal C_n : el valor de la capacidad obtenido de los valores nominales de potencia, de la tensión y la frecuencia del condensador.

Potencia nominal Q_n : la potencia reactiva para la que el condensador ha sido diseñado

Tensión nominal U_n : el valor eficaz de la tensión alterna para la que el condensador ha sido diseñado

Frecuencia nominal f_n : la frecuencia para la cual el condensador ha sido diseñado

Aplicando una tensión alterna entre las armaduras, el condensador está sometido a ciclos de carga y descarga durante los cuales acumula energía reactiva (carga del condensador) para luego inyectarla al circuito al que va conectado (descarga del condensador).

La energía reactiva que acumula se puede expresar como:

$$E_C = \frac{1}{2} * C * U^2$$

Donde:

C: capacidad del condensador

U: tensión aplicada en los extremos del condensador

Debido a su capacidad de acumular y suministrar energía, el condensador se utiliza como elemento base para la realización de las baterías de corrección del factor de potencia (para todos los niveles de tensión) y de los dispositivos estáticos de regulación de la potencia reactiva. [4]

8. Corrección mediante el uso de condensadores

8.1 Características a tener en cuenta a la hora de elegir un condensador.

Para la elección correcta de los condensadores con los que vamos a compensar, tenemos que tener en cuenta una serie de parámetros y características de ellos:

1. Q: CAPACIDAD

Es la máxima potencia reactiva que una batería de condensadores es capaz de compensar. Este parámetro debe ser siempre algo mayor que la máxima potencia que hemos calculado para la instalación.

2. NÚMERO DE ESCALONES

Como podemos ver en la imagen de la batería, que se muestra más abajo, hay cuatro prismas en su parte inferior, esto son los condensadores, cada uno de ellos es un condensador trifásico de diferente potencia. Dependiendo de la potencia reactiva que se quiera compensar se conectará uno, otro o la combinación de varios a la vez.



Ilustración 12. Batería con 4 condensadores trifásicos

3. REGULADOR

El regulador interpreta las señales que le envían los equipos auxiliares y determina la potencia reactiva que se debe compensar en cada instante, en función de este dato ordenará conectar o desconectar los escalones. Cuanto más preciso sea el regulador mejor y más rápida será la respuesta.

4. TENSIÓN DE FUNCIONAMIENTO

La tensión soportada por la batería de condensadores puede ser variable. Tenemos tendencia a pensar que cuanto mayor sea la tensión mejor, pero esto no es así.

La potencia, ya sea activa o reactiva, depende de la tensión, la intensidad y el ángulo φ . Tanto la tensión como el ángulo φ no son variables, son constantes que dependen de la instalación. Para demostrarlo vamos a comparar dos baterías, la primera 10 kVAr a 440 V y la segunda 10 kVAr a 400 V.

$$Q = V \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\varphi)$$

$$10 \text{ kVAr} = 400 \cdot I_1 \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\varphi)$$

$$10 \text{ kVAr} = 440 \cdot I_2 \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\varphi)$$

Igualando las expresiones:

$$400 \cdot I_1 \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\varphi) = 440 \cdot I_2 \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\varphi)$$

$$I_1 = 1.1 \cdot I_2$$

Este resultado quiere decir que en la misma instalación, con la batería de 400 V vamos a compensar un 10% más de reactiva que con la de 440 V.

5. SISTEMA DE MANIOBRA

Existen dos sistemas de maniobra:

- Contadores electromecánicos
 - Es el sistema más común y económico.
 - El regulador hace de relé y manda la señal a los contactores, que ejecutan la acción.
 - La acción tarda en ejecutarse aproximadamente 2 segundos.

- Tiristores
 - Es un sistema más caro.
 - Basados en la electrónica de potencia.
 - Son muy silenciosos.
 - La conexión o desconexión es instantánea.
 - Mayor ciclo de vida, ya que no están sometidos al desgaste mecánico.

- Usos: comercios u hogares (por lo silenciosos que son) y ascensores (donde la ejecución debe ser instantánea).

4. ARMARIO

Es una estructura de chapa, dónde se localizan las baterías de condensadores. Es recomendable que sea grande, por si en un futuro se necesita ampliar la batería de condensadores

5. ARMÓNICOS

Si en la instalación hay armónicos, hay que instalar algún tipo de filtro, como estudiaremos más adelante. [5]

8.2 Niveles de instalación

La elección de dónde instalar un sistema de condensadores, dependerá principalmente del tipo de instalación. Esta, es una decisión importante ya que esto nos dará diferentes tipos de ventajas. [2]

Los principales criterios que se tendrán en cuenta a la hora de elegir la ubicación serán los siguientes:

TAMAÑO DE LA INSTALACIÓN

Puede darse dos casos, el primero es que haya un cuadro general principal y cuadros secundarios más pequeños y que no estén alejados entre sí, en este caso realizaremos una compensación global, esta se realizará aguas abajo del interruptor general.

El segundo es aquel en el que hay instalaciones grandes y descentralizadas, compuestos por un cuadro general y varios subcuadros, todos de gran tamaño y alejados entre sí. En este caso hay que realizar una compensación por cada subcuadro o carga. En este caso usaremos una compensación por grupos o individual

EXISTENCIA DE GRANDES CARGAS CONSUMIDORAS

Cuando existen cargas de este tipo es conveniente estudiar la compensación directa de energía reactiva. Esto se puede dar en motores y transformadores.

8.2.1 Instalación general

La batería de condensadores está conectada al embarrado del cuadro de distribución principal de baja tensión y permanece en servicio durante el periodo de carga normal.

Características:

1. Suprime las penalizaciones por un consumo excesivo de energía reactiva
2. Ajusta la potencia aparente (kVA) a la necesidad real de la instalación
3. Descarga el centro de transformación (potencia disponible en Kw)
4. La corriente reactiva está presente en toda la instalación
5. Las pérdidas por efecto Joule no disminuyen, así que no se puede reducir la sección de los conductores
6. Generalmente, se utiliza esta solución para fábricas con una red eléctrica importante
7. Este tipo de instalación, es la más económica
8. Obtenemos la mejor solución prestaciones-precio

Esquema:

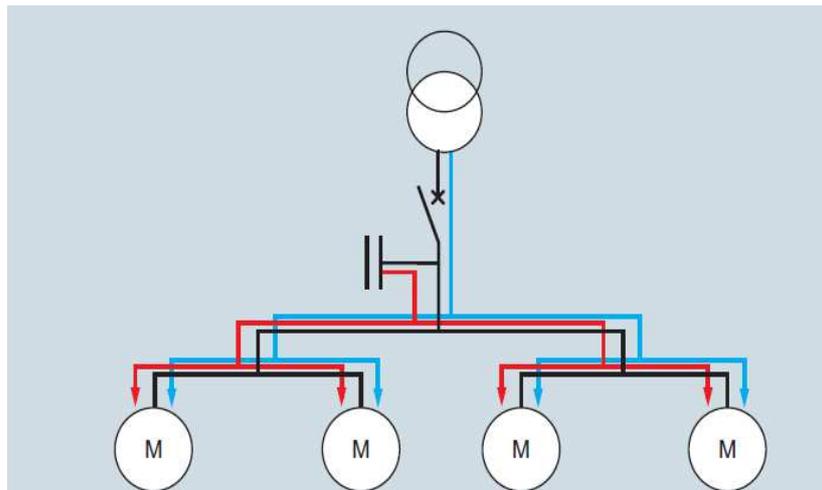


Ilustración 13. Instalación genera

8.2.2 Instalación por sector

Los equipos de instalación se encuentran en el embarrado de cada subcuadro de distribución. La mayor parte de la instalación se ve beneficiada por este tipo de compensación, sobre todo los cables de alimentación y los subcuadros.

Características:

1. Se suprimen las penalizaciones por consumo excesivo de potencia reactiva
2. Se optimiza la parte de la instalación por la que no circula corriente reactiva, que son los niveles 1 y 2
3. Descarga el centro de transformación (potencia disponible en Kw)
4. La energía reactiva se produce en el mismo lugar en el que se consume, por tanto las pérdidas por Joule se reducen en todas las líneas, permitiendo la reducción de la sección de cables aguas arriba
5. Riesgo de sobrecompensación si hay grandes variaciones de carga
6. Solución más costosa debido al alto número de instalaciones
7. Se recomienda esta compensación cuando la instalación es amplia y cuando los patrones de carga/tiempo difieren entre una parte de la instalación y otra

Esquema:

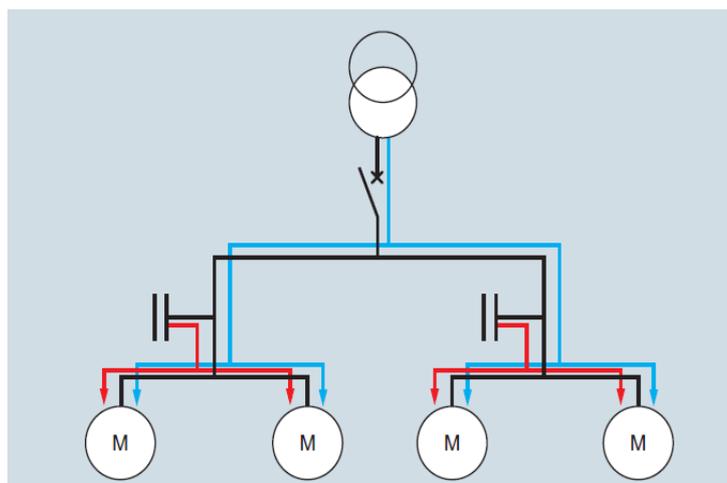


Ilustración 14. Instalación por sector

8.2.3 Instalación individual

Los condensadores se conectan directamente en bornes de los receptores. Es recomendable utilizar la compensación individual cuando la potencia del motor es significativa con respecto al conjunto de la potencia total demandada por la instalación.

Características:

1. Se suprimen las penalizaciones por consumo excesivo de potencia reactiva
2. Optimiza toda la instalación eléctrica. La corriente reactiva se abastece en el mismo lugar de su consumo, por lo que no está presente en los cables de la instalación
3. Descarga el centro de transformación (potencia disponible en Kw)
4. Las pérdidas por efecto Joule se suprimen totalmente
5. Representa la solución más económica, ya que toda la potencia se concentra en un punto
6. Se debe realizar esta compensación cuando la potencia del motor es significativa con respecto a la de la instalación

Esquema:

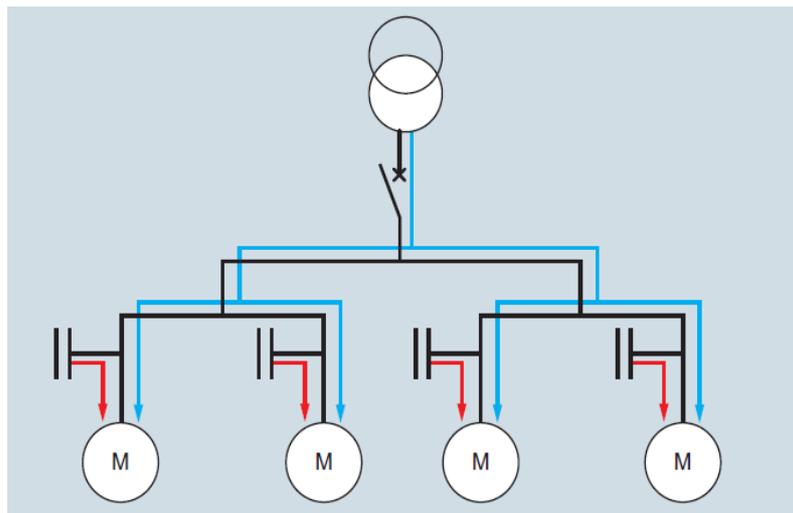


Ilustración 15. Instalación individual

8.3 Sistemas de compensación

A continuación, vamos a ver dos tipos de compensación, en primer lugar, trataremos la compensación fija y en segundo lugar la compensación automática.

8.3.1 Compensación fija

La compensación fija tiene un Reglamento de BT (REBT en la MIBT 031-Apartado 1.8.) que nos indica en qué casos podemos utilizarla.

Se podrá realizar la compensación fija para uno o varios receptores siempre que funcionen por medio de un único interruptor, es decir simultáneamente

Para compensar la totalidad de la instalación se deberá instalar un equipo automático

En la práctica se realiza la compensación fija de motores y transformadores

8.3.1.1 Compensación de motores asíncronos

El principal problema que se va a producir en estos casos es la autoexcitación.

Esto se produce cuando tenemos conectada una carga de gran inercia a un motor. Este motor va a seguir girando después de cortarle la alimentación debido a la inercia de la carga.

Cuando se realiza la compensación directa en bornes del motor, se genera un flujo de corrientes capacitivas a través del estator que producen un campo magnético rotatorio en el rotor que actúa a lo largo del mismo eje y en la misma dirección que el campo magnético decreciente, como consecuencia el flujo del rotor aumenta, las corrientes del estator aumentan y la tensión en los terminales del motor aumenta, pasando por lo tanto a funcionar como un generador asíncrono, es a esto a lo que se le conoce como autoexcitación

La principal forma de limitar la autoexcitación es limitar la potencia de compensación, limitando la potencia de los condensadores fijos conectados al motor, de modo que la intensidad reactiva suministrada sea menor a la necesaria para provocarla, así el valor de la intensidad de los condensadores es menor al valor de la intensidad de vacío del motor.

El valor máximo se calcula de la siguiente forma:

$$Q_M \leq 0.9 * I_0 * U_n * \frac{\sqrt{3}}{Q_M} \leq 2 * P_o * (1 - \cos\phi_i)$$

Donde:

Q_M = potencia fija máxima a instalar (VAR)

I_0 = intensidad en vacío del motor

U_n = tensión nominal (V)

P = potencia nominal del motor (Kw)

$\cos\phi_i$ = coseno inicial

Otro de los problemas que aparece después de la compensación fija, es que es necesario regular las protecciones, debido a que la intensidad eficaz consumida por el conjunto motor-condensador es más baja que antes.

A continuación, vamos a mostrar algunos ejemplos que requieren de alguna precaución a la hora de compensar.

Motor con funcionamiento intermitente

En este caso no se da el tiempo suficiente para la descarga completa de los condensadores, si se produce la reconexión antes de que se haya descargado el condensador, se pueden producir tensiones de pico de tensión de hasta $2\sqrt{2}$ veces la tensión de servicio. Para ello, se recomienda realizar la descarga mediante inductancias.

Motores de grúas

En este tipo de motores, puede producirse autoexcitación, así el motor estará funcionando a más revoluciones de las de sincronismo (hipersincronismo).

También hay que tener precaución en el arranque, debido a que el proceso de descarga del condensador tiene un efecto retardante en la actuación de frenos electromagnéticos.

En este tipo de instalaciones es conveniente conectar el condensador a través de un contactor y no directamente a bornes del motor.

Inversores

Cuando la inversión de la marcha se produce con un tiempo de inversión muy corto, es necesario conectar los condensadores a través de un contactor.

Arranque estrella-triángulo

Caben diversas alternativas.

- A) El condensador está conectado a bornes del motor en el lado del contactor de línea. El condensador sigue bajo tensión en la transición de estrella a triángulo. No se produce la descarga sobre el motor, por lo que deberá haber resistencia de descarga. En el caso de arrancadores con conmutadores manuales, esta opción debe descartarse pues el arrancador de estrella a triángulo supone dejar sin tensión al motor. La conexión en el lado del triángulo debe descartarse por el problema de conmutación de fases en el condensador.

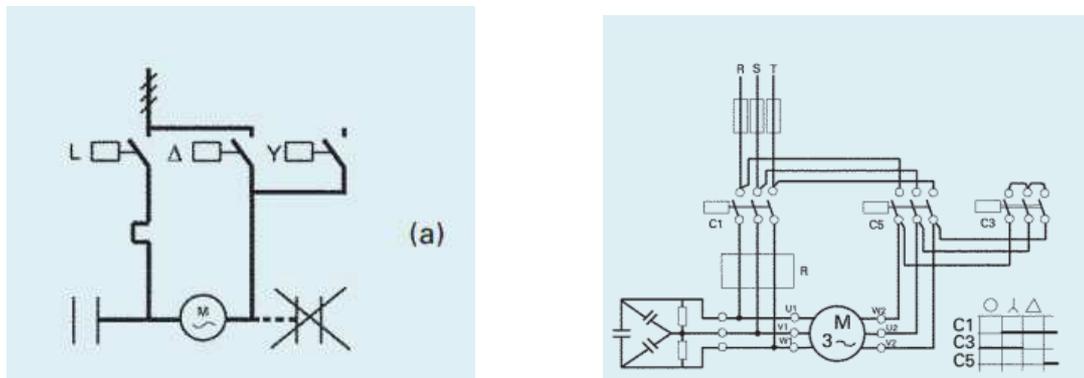


Ilustración 16. Arranque estrella-triángulo con resistencias de descarga

- B) En este caso no es necesario el cambio del ajuste del relé térmico. El contactor del condensador puede ser excitado simultáneamente con el contactor de línea o triángulo, debiendo prever resistencias de descarga en el condensador.

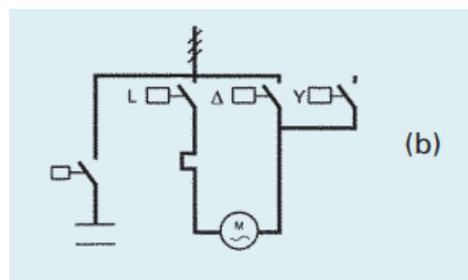


Ilustración 17. Arranque estrella-triángulo

- C) Otra solución es la compensación con un condensador conectado en bornes del motor, esta solución es poco utilizada debido a que se producen corrientes de conexión relativamente elevadas y es necesario ajustar la regulación del relé térmico.

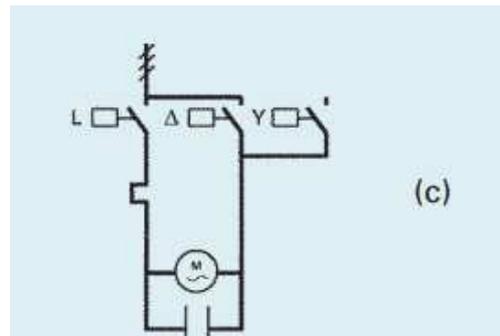


Ilustración 18. Arranque estrella-triángulo

Arranadores estáticos

En este caso no es recomendable conectar el condensador a bornes del motor ya que la punta de corriente del transitorio de conexión del condensador, puede dañar los semiconductores del arrancador.

8.3.1.2 Compensación de transformadores

Los transformadores de potencia absorben potencia reactiva para crear su campo magnético.

En **vacío** la potencia reactiva que necesitan será:

$$Q_0 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_0$$

Con carga en el secundario y debido a la reactancia de dispersión, hay que tener en cuenta otro consumo de potencia reactiva:

$$Q'_S = \frac{U_K}{100} \cdot \left(\frac{S}{S_N}\right)^2 \cdot S_N$$

Así la potencia reactiva demandada es: $Q_0 + Q'_S$ [2]

8.3.2 Compensación automática

Según el **reglamento** de BT, se podrá usar una compensación automática para compensar la totalidad de una instalación o partes de la misma que no funcionen simultáneamente.

La instalación del equipo de compensación automática deberá asegurar que la variación del factor de potencia en la instalación no sea mayor de un +/- 10% del valor medio obtenido en un prolongado período de funcionamiento.

Estas baterías automáticas están diseñadas para compensar la energía reactiva en redes donde los niveles de carga son fluctuantes y las variaciones de potencia se producen cada breves períodos de tiempo, con lo cual es necesario realizar la maniobra mediante contactores.

Una batería automática está formada por los siguientes **elementos**:

INTERNOS

- **Regulador**: Su función es medir el $\cos(\phi)$ de la instalación y dar las órdenes a los contactores para intentar aproximarse al factor de potencia deseado, conectando para ello los diferentes escalones de potencia reactiva
- **Contactores**: Son los encargados de conectar los distintos condensadores que figuran en la batería. El número de escalones que es posible disponer depende de las salidas del regulador
- **Condensadores**: Los encargados de suministrar la energía reactiva a la instalación.

EXTERNOS

- **Lector de intensidad**
- **Lector de tensión**

CONCEPTO DE REGULACIÓN

Los 3 datos que definen una batería automática de condensadores son: la potencia (kVAr) que depende del $\cos(\phi)$ que se quiere obtener, la tensión nominal y la regulación de la batería.

Existen dos tipos de regulaciones, la regulación física y la eléctrica.

La **regulación física** o escalonamiento indica la composición y el número de los conjuntos condensador-contactador que lo integran.

La **regulación eléctrica** es el dato que marca la diferencia a la hora de elegir una batería u otra.

Con los dos siguientes ejemplos, vamos a comprender bien este concepto.

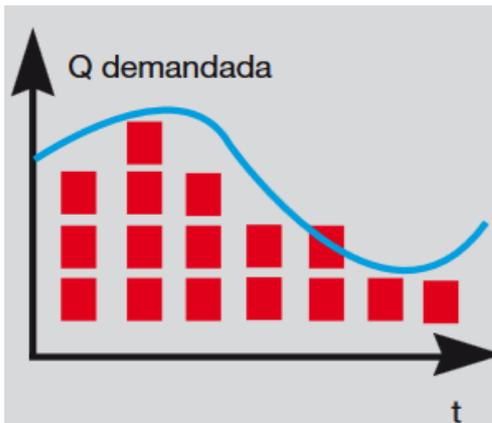


Ilustración 19. Ejemplo (A)

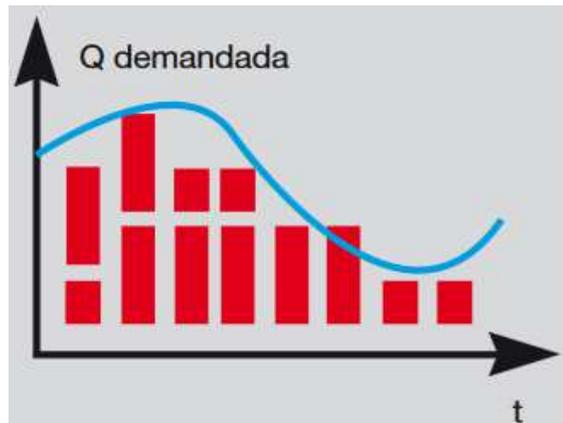


Ilustración 20. Ejemplo (B)

En el ejemplo A se muestra una batería de 70 kVAr formada por los siguientes escalones $10+10+10+10+10+10+10$.

En el ejemplo B podemos ver una batería de 70 kVAr, formada por los siguientes escalones $10+20+20+20$, ya que el primer escalón tiene la mitad de potencia que el resto.

Así podemos ver que aunque ambos ejemplos tienen una regulación física diferente, la adaptación a la demanda reactiva va a ser la misma en ambos casos.

En ambos casos la regulación eléctrica es la misma (7×10), esto indica que ambas van a actuar con una regulación mínima de 10 kVAr.

A la hora de elegir la batería hay que tener en cuenta el número de escalones, ya que cuantos más escalones hay, más contactores habrá y más elevado es el precio y el volumen de la infraestructura.

Cuanto menor sea la regulación eléctrica más fácil será adaptarse a las variaciones de demanda reactiva de la instalación.

Por lo que deberá haber un equilibrio entre la regulación eléctrica y física.

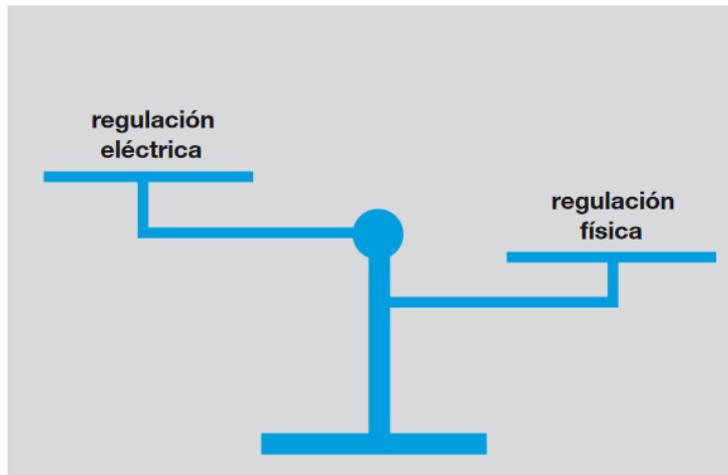


Ilustración 21. Equilibrio entre regulación física y eléctrica

PROGRAMACIÓN DE UN REGULADOR

Los datos que debemos programar en un regulador para que funcione de manera deseada son el $\cos(\phi)$ deseado y la relación C/K.

La relación C/K es una banda de funcionamiento estable del regulador en la cual, aunque el $\cos(\phi)$ no sea exactamente el deseado, no va a conectar ni desconectar más escalones. Si estamos por encima del valor de la banda C/K va a conectar escalones, y si está por debajo va a desconectarlos.

El cálculo de la relación C/K se calcula con la siguiente fórmula:

$$C/K = \frac{Q/(\sqrt{3} * U)}{R_{TI}}$$

Q= potencia reactiva del primer escalón (Var)

U= tensión FF

R_{TI} = relación TI (X/5)

De aquí podemos deducir, que la batería no podrá ajustar el $\cos(\phi)$ al deseado, excepto que la demanda reactiva de la instalación sea igual o múltiplo de la potencia reactiva del primer escalón. [2]

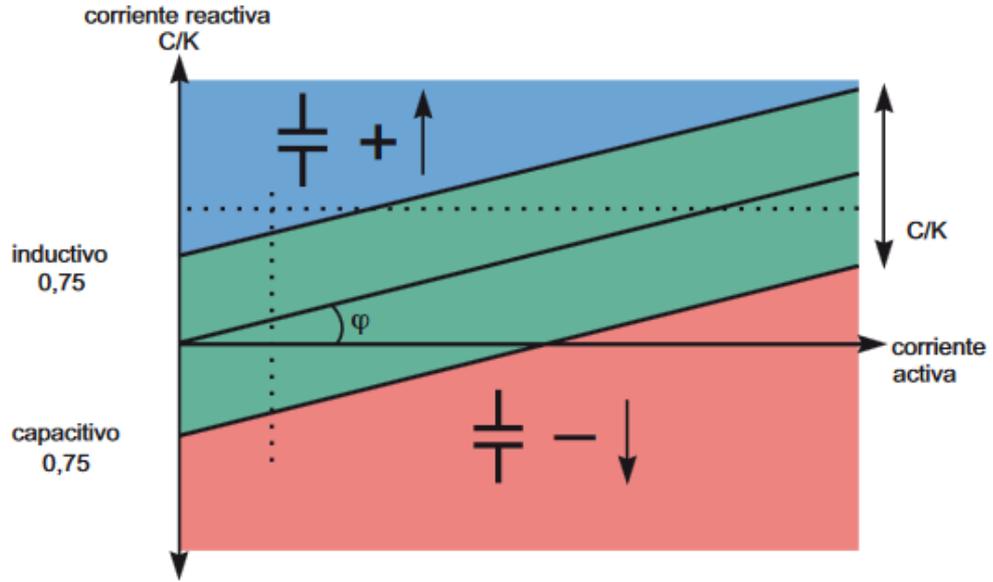


Ilustración 22. Parámetros regulación

9. Beneficios de compensar el factor de potencia

A continuación, vamos a ver las principales diferencias entre una instalación compensada y otra sin compensar. [4]

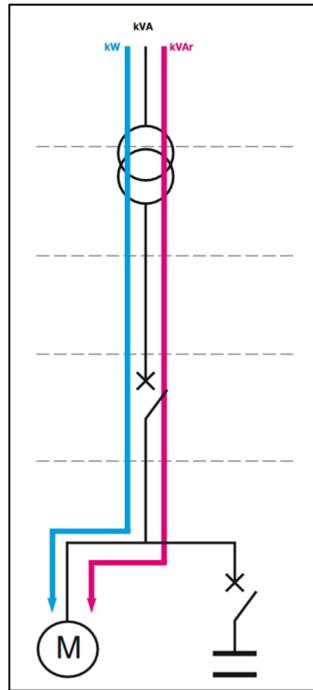


Ilustración 24. Instalación sin compensar

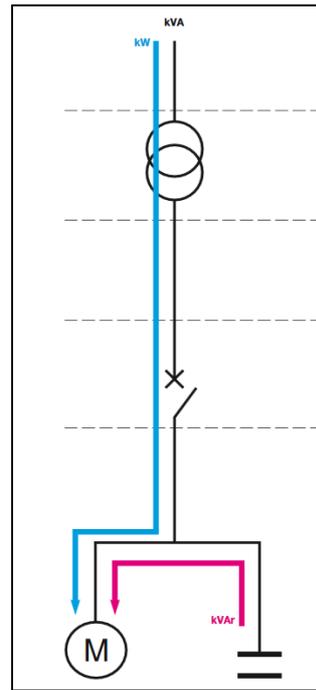


Ilustración 25. Instalación compensada

INSTALACIÓN SIN COMPENSAR:

- Existe un consumo de kVAr
- La potencia en KVA es superior a las necesidades en KW
- El consumo de kWh es mayor por las pérdidas
- Los transformadores trabajarán con sobrecarga
- El interruptor general de protección y los conductores deberán estar dimensionados para poder soportar el total de la intensidad
- La energía reactiva atraviesa el total de la instalación desde la fuente hasta el receptor
- Existen penalizaciones en la factura de la luz

INSTALACIÓN COMPENSADA:

Vamos a considerar que conseguimos compensar hasta $\cos(\phi) = 1$.

- El consumo de kVAr se hace cero
- La potencia en KVA se ajusta a la demanda en Kw
- Al aumentar el $\cos(\phi)$, disminuye la intensidad, de esta forma las pérdidas en los conductores disminuyen y el interruptor general de protección podrá tener un calibre inferior
- La energía reactiva fluye entre el condensador y la carga, descargando el resto de la instalación aguas arriba del punto de la conexión de la batería
- Existen bonificaciones en el recibo de la electricidad

9.1 Ahorro de consumo eléctrico

La compensación de energía reactiva aporta ventajas económicas. El 31 de diciembre de 2009 se produjo un cambio en el BOE, el cual busca impulsar la eficiencia energética a través de un uso responsable de la energía. Aquellas empresas con un contrato superior a 15 Kw, lo cual atañe casi a cualquier negocio, pueden verse afectadas con un incremento notable de su factura.

Así, actualmente las empresas, especialmente las industrias, tendrán que pagar por el consumo de energía reactiva. [6]

Precios de la Energía Reactiva			
$\cos\phi$	€/kVArh 2009	€/kVArh 2010	Incremento 2009-2010
$\cos\phi \geq 0,95$	0	0	-
$0,9 \leq \cos\phi < 0,95$	0,000013	0,041554	319,546%
$0,85 \leq \cos\phi < 0,9$	0,017018	0,041554	144,18 %
$0,8 \leq \cos\phi < 0,85$	0,034037	0,041554	22,08 %
$\cos\phi < 0,8$	0,051056	0,062332	22,08 %

Tabla 3. Sanciones por consumo de reactiva

En esta tabla aparecen los precios de la energía reactiva en función del factor de potencia.

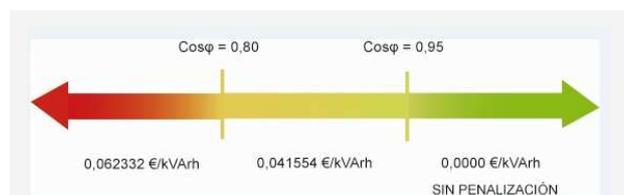


Ilustración 23. Sanciones dependiendo del factor de potencia

9.2 Disminución de pérdidas

Las principales pérdidas que se producen, son las debidas al efecto Joule. Estas dependen proporcionalmente de la resistencia del conductor y de la intensidad de corriente al cuadrado. Estas pérdidas por Joule provocan el calentamiento de los conductores que a su vez produce el deterioro de los conductores, pudiéndose llegar a producir cortocircuitos y disparo de las protecciones sin causa aparente. También se produce una disminución de la capacidad de la Red Eléctrica de España, que debe producir energía extra para compensar las pérdidas.

A continuación, vamos a mostrar cómo se disminuyen las pérdidas corrigiendo el factor de potencia. [2]

$$\frac{Pérdidas_i}{Pérdidas_f} = \left(\frac{\cos\phi_i}{\cos\phi_f}\right)^2$$

$Pérdidas_i$ = pérdidas iniciales

$Pérdidas_f$ = pérdidas finales

$\cos\phi_i$ = factor de potencia inicial

$\cos\phi_f$ = factor de potencia final

Disminución de pérdidas por efecto Joule				
$\cos\phi_{inicial}$	$\cos\phi_{final}$			
	0,85	0,90	0,95	1,00
0,50	65,40%	69,14%	72,30%	75,00%
0,55	58,13%	62,65%	66,48%	69,75%
0,60	50,17%	55,56%	60,11%	64,00%
0,65	41,52%	47,84%	53,19%	57,75%
0,70	32,18%	39,51%	45,71%	51,00%
0,75	22,15%	30,56%	37,67%	43,75%
0,80	11,42%	20,99%	29,09%	36,00%
0,85	-	10,80%	19,94%	27,75%
0,90	-	-	10,25%	19,00%
0,95	-	-	-	9,75%

Tabla 4. Relación factor de potencia-pérdidas por Joule

9.3 Reducción de caídas de tensión

En el transporte de la energía, la corriente debe vencer la impedancia del conductor (Z), por esta razón se producen caídas de tensión.

Un bajo factor de potencia bajo producirá una mayor caída de tensión, apareciendo una alimentación de potencia insuficiente en las cargas.

A continuación, vamos a demostrar cómo se disminuye la caída de tensión corrigiendo el factor de potencia. [6]

La caída de tensión se determina mediante la ley de Ohm:

$$\Delta U = \frac{P_{\text{activa}} * Z}{\sqrt{3} * U * \cos\phi} \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta U_i}{\Delta U_f} = \frac{\cos\phi_i}{\cos\phi_f}$$

ΔU = caída de tensión de la línea

U = tensión de distribución

Z= impedancia de la línea

Disminución de la caída de tensión en las líneas				
COS ϕ_{inicial}	COS ϕ_{final}			
	0,85	0,90	0,95	1,00
0,50	41,18%	44,44%	47,37%	50,00%
0,55	35,29%	38,89%	42,11%	45,00%
0,60	29,41%	33,33%	36,84%	40,00%
0,65	23,53%	27,78%	31,58%	35,00%
0,70	17,65%	22,22%	26,32%	30,00%
0,75	11,76%	16,67%	21,05%	25,00%
0,80	5,88%	11,11%	15,79%	20,00%
0,85	-	5,56%	10,53%	15,00%
0,90	-	-	5,26%	10,00%
0,95	-	-	-	5,00%

Tabla 5. Relación factor de potencia-caída de tensión en las líneas

9.4 Optimización de las máquinas eléctricas

Los generadores y transformadores son dimensionados a partir de la potencia aparente S . Ésta, a igual potencia activa P , es más pequeña cuanto menor es la potencia reactiva suministrada Q . Por lo tanto, compensando la instalación, las máquinas pueden ser dimensionadas en relación con una potencia aparente inferior, aún proporcionando la misma potencia activa.

A continuación, vamos a ver un ejemplo.

Potencia del transformador [kVA]	Potencia activa transmitida [kW]					
	$\cos\phi$					
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
63	32	38	44	50	57	63
100	50	60	70	80	90	100
125	63	75	88	100	113	125
160	80	96	112	128	144	160
200	100	120	140	160	180	200
250	125	150	175	200	225	250
315	158	189	221	252	284	315
400	200	240	280	320	360	400
630	315	378	441	504	567	630
800	400	480	560	640	720	800
1000	500	600	700	800	900	1000
1250	625	750	875	1000	1125	1250

Tabla 6. Relación potencia del transformador-potencia activa transmitida

Según esta tabla, si se quiere alimentar unas cargas con una potencia de por ejemplo 170 kVA con $\cos\phi = 0.7$, hace falta un transformador de 250 kVA. Si para esta misma carga el $\cos\phi = 0.9$ bastaría con utilizar un transformador de 200 kVA.

9.5 Reducción de gases de efecto invernadero

Si consideramos que las pérdidas diarias en la distribución eléctrica de la Red Eléctrica de España son 8850 kWh y que las emisiones de CO_2 en la producción son de aproximadamente 400 g/kWh, esto supone una emisión a la atmósfera de 3.5 toneladas de CO_2 diarias a nivel nacional. La compensación de energía eléctrica supondría la reducción a la mitad de las emisiones de CO_2 . [7]

10. Armónicos

En el ámbito industrial y doméstico hay ciertos aparatos electrónicos que, debido a su principio de funcionamiento, absorben una corriente no sinusoidal (cargas lineales). Dicha corriente provoca aguas arriba de la red, una caída de tensión también no sinusoidal y como consecuencia las cargas lineales se encuentran también alimentadas por una tensión distorsionada.

Los armónicos son los componentes de una onda distorsionada y su utilización permite analizar cualquier forma de onda periódica no sinusoidal, descomponiéndola en diferentes componentes sinusoidales.

Según el teorema de Fourier, cualquier función periódica de periodo T generalmente continua y limitada, puede representarse por la suma de infinitos términos sinusoidales, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de la función original.

El armónico cuya frecuencia corresponde al periodo de la forma de onda original se llama armónico fundamental y el armónico con frecuencia igual a n veces la fundamental se llama armónico de orden n .

La presencia de armónicos en un sistema eléctrico indica por tanto una deformación de la forma de onda de la tensión o la corriente, lo que conlleva una distribución de energía eléctrica que podría provocar el funcionamiento deficiente de los equipos. [3]

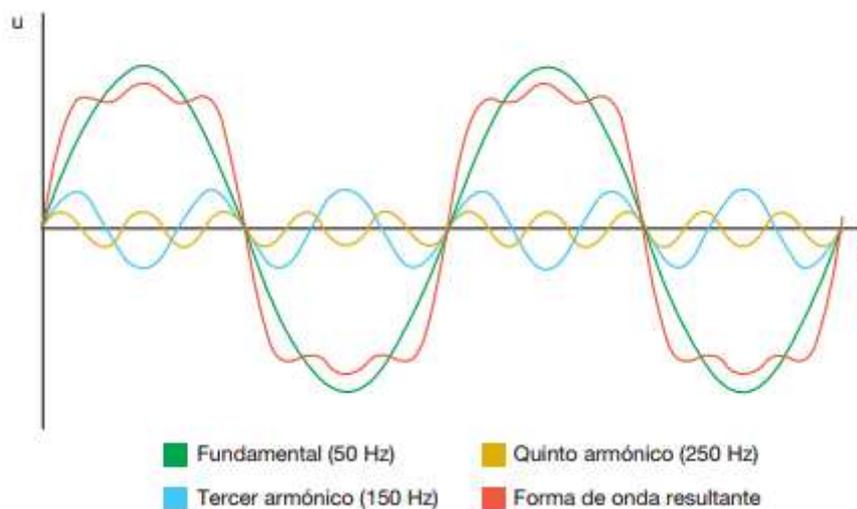


Ilustración 24. Armónicos en la red

Los principales **aparatos que generan armónicos** son:

- Ordenadores
- Lámparas fluorescentes y de descarga en gas
- Convertidores estáticos
- Grupos de continuidad
- Accionamientos de velocidad variable
- Soldadoras
- Hornos de arco e inducción

Generalmente, esta distorsión de la forma de la onda se debe a la presencia de impedancias no lineales o puentes rectificadores cuyos dispositivos semiconductores conducen solo durante una fracción de todo el periodo, creando comportamientos discontinuos, con la consecuente introducción de armónicos.

10.1 Efectos de los armónicos

SOBRECARGAS

La presencia de armónicos en la red puede provocar un funcionamiento anómalo de los aparatos, como sobrecargas en el conductor neutro, aumento de las pérdidas en los transformadores, daños en el par de los motores...

En concreto los armónicos son el fenómeno que más daños causa a los condensadores de compensación.

De hecho, se sabe que la reactancia capacitiva es inversamente proporcional a la frecuencia; por lo tanto, la impedancia producida en los armónicos de tensión disminuye al aumentar el orden de los armónicos. Esto provoca que los condensadores sean dañados al estar alimentados por una tensión deformada.

RESONANCIAS

Un problema aún más grave se produce cuando la distorsión en línea alcanza valores elevados, existiendo peligro de resonancia entre el sistema de corrección (capacidad equivalente a los condensadores) y la inductancia equivalente de la red.

La resonancia se presenta cuando la reactancia inductiva y capacitiva se igualan. Se le llamará circuito resonante en serie, cuando la inductancia y la capacidad estén conectadas en serie, o circuito resonante en paralelo si la inductancia y la capacidad se encuentran conectadas en paralelo.

En una misma red se pueden dar ambas resonancias, y tienen lugar a la frecuencia de resonancia.

Si un circuito resonante serie recibe alimentación de tensión alterna con una frecuencia cercana a la frecuencia de resonancia, puede tener lugar una amplificación de la corriente absorbida que puede provocar perturbaciones, sobrecorrientes e incluso daños en los componentes de la red. Por el contrario, si un circuito resonante paralelo recibe alimentación de armónicos de corriente de cargas de distorsión, podría tener lugar una sobretensión en el armónico de resonancia.

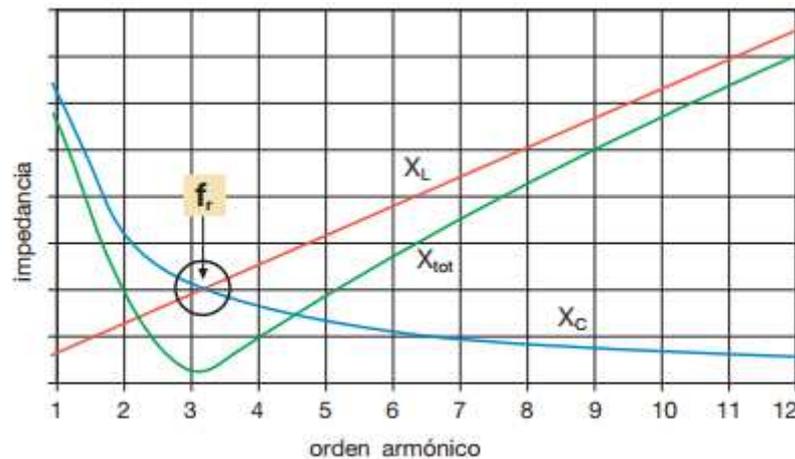


Ilustración 25. Comportamiento reactancia en función del orden del armónico

En este gráfico podemos ver el comportamiento de la reactancia capacitiva (decreciente con el orden de armónicos), la reactancia inductiva (creciente con el orden de armónicos) y la reactancia total en serie, que como podemos ver alcanza su valor mínimo a la frecuencia de resonancia (cuando la reactancia capacitiva es igual a la inductiva).

Para evitar este fenómeno de resonancia, y por tanto para que la vida del conductor no se vea reducida, es preciso que la red tenga una frecuencia de resonancia lo más diferente posible de la de los armónicos presentes.

La solución más común consiste en conectar una reactancia inductiva en serie al condensador (reactancia de bloqueo), esta debe estar dimensionada con una frecuencia de resonancia inferior a la frecuencia armónica más baja de la tensión presente en el circuito.

10.2 Filtros

Se denomina filtro a la combinación de un condensador y un conductor.

Anteriormente, se ha visto que colocando un condensador con una inductancia en serie se pueden evitar los efectos negativos de la resonancia.

Siguiendo esa misma lógica, se puede insertar en un punto específico de la red una combinación de un inductor y un condensador oportunamente dimensionados con una frecuencia de resonancia igual al orden del armónico de corriente que se quiere eliminar. De esta forma, el bipolo inductor-condensador presenta una reactancia muy baja en el armónico que se desea eliminar, la cual permanecerá en el bipolo sin afectar al resto de la red. [4]

Existen dos **tipos de filtros**:

FILTROS PASIVOS

La función de este filtro es igualar la frecuencia de resonancia total a la frecuencia del armónico que se desea eliminar. Este filtro, se debe determinar en cada caso, dependiendo del armónico que sea necesario filtrar.

Es un filtro económico y de fácil funcionamiento.

FILTROS ACTIVOS

Estos filtros son capaces de eliminar de forma automática los armónicos de la red con una amplia gama de frecuencias. Debido a la tecnología electrónica que tiene integrado, le permite generar un sistema de armónicos capaz de anular los armónicos presentes en la red.

La ventaja de estos filtros es que pueden filtrar simultáneamente decenas de armónicos, sin comportar costes de planificación para el dimensionamiento.

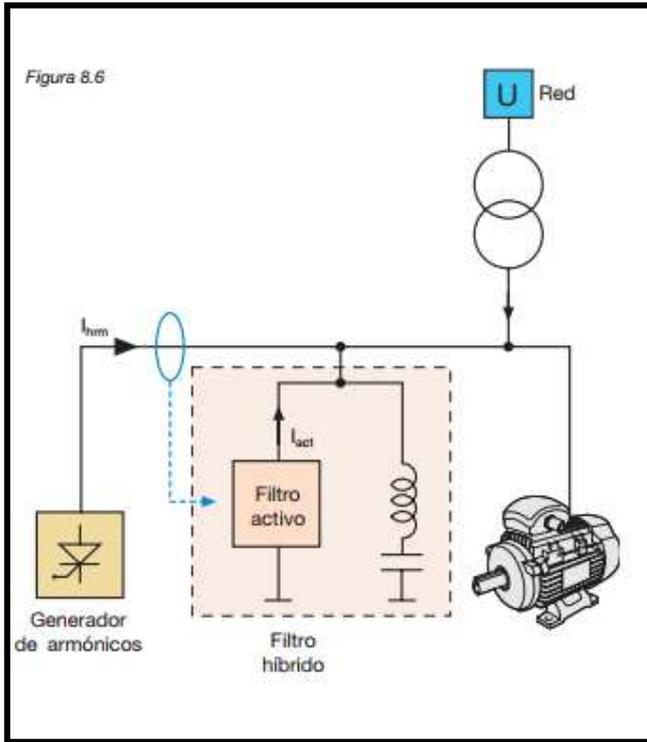


Ilustración 27. Posicionamiento filtros

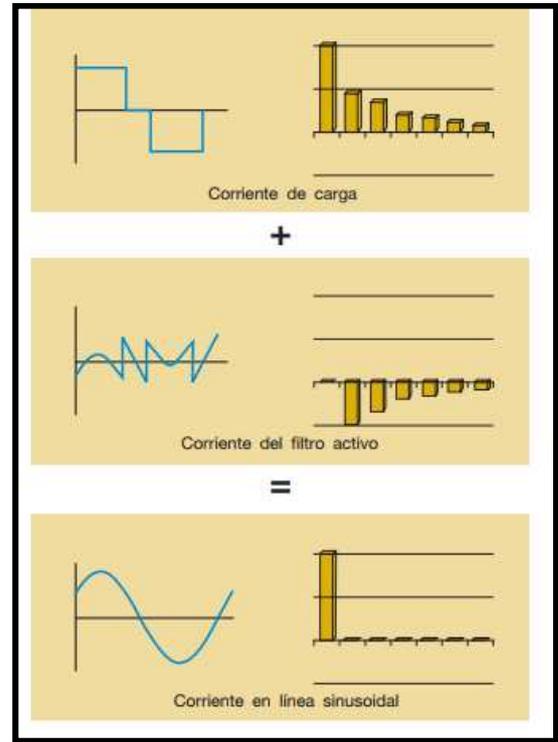


Ilustración 28. Corrección armónicos con filtros

11. Aplicación práctica

En este apartado vamos a realizar cálculos, para conocer qué características deben tener las baterías de condensadores que vamos a instalar a partir de los datos de nuestra instalación.

La instalación eléctrica de baja tensión está conectada a la red (50Hz, 400V).

Se dispone de un transformador con las características que se muestran en la siguiente tabla:

Potencia aparente (kVA)	400
U_{CC} (%)	4
Material aislante	Aceite
Índice de carga	0.79

Tabla 7. Datos transformador

A partir de los datos suministrados por los fabricantes de las diferentes cargas, tales como potencia activa, índice de carga, factor de potencia y factor de simultaneidad se pueden determinar los valores de la potencia activa y reactiva consumida por el total de la instalación, a excepción del transformador.

La instalación cuenta con un horno de inducción, una máquina de soldar por resistencia y lámparas de fluorescencia. Estas consumen una potencia activa de 250 kW y una potencia reactiva de 194 kVAr. A partir de estos datos hemos obtenido que el $\cos(\varphi)=0.79$.

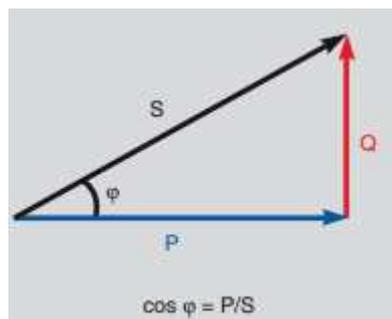


Ilustración 27. Triángulo de potencias

Queremos que el $\cos(\varphi)=0.95$. Las cargas no lineales de la instalación (introducen armónicos en la red) consumen una potencia reactiva de 40 kVAr.

Resumen de los datos de la instalación:

POTENCIA (KW)	250
$\text{Cos } (\varphi_i)$	0.79
$\text{Cos } (\varphi_f)$	0.95
FACTOR SIMULTANEIDAD (%)	0.9
POTENCIA CONSUMIDA CARGAS NO LINEALES (KVA _r)	40
VOLTAJE RED (V)	400
FRECUENCIA RED (Hz)	50
POTENCIA TRANSFORMADOR (KVA)	400
ÍNDICE DE CARGA TRANSFORMADOR	0.79
U_{CC} (%)	4
MATERIAL AISLANTE TRANSFORMADOR	aceite

Ilustración 28. Datos de la instalación

Para realizar los cálculos de la potencia reactiva que necesitamos, tenemos que tener en cuenta el consumo total de los receptores de la instalación más las pérdidas inductivas del transformador en baja tensión.

1. COMPENSACIÓN FIJA DEL TRANSFORMADOR

La corriente magnetizante tiene un valor aproximadamente constante (en torno al 1.8 % de la intensidad a plena carga) desde que el transformador trabaja en vacío hasta que está a plena carga. Este valor lo obtenemos realizando la compensación en vacío del transformador.

Sin embargo, también hay un consumo variable de reactiva, que depende de la carga del transformador, la cual está representada por una reactancia en serie que dará las pérdidas por el flujo de fugas.

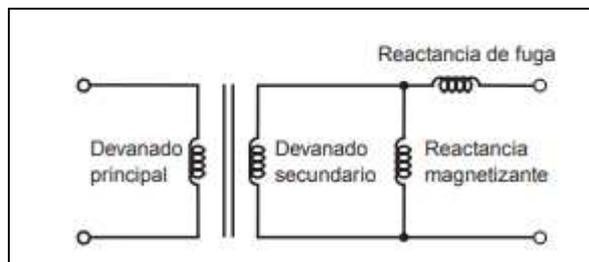


Ilustración 29. Representación esquemática de un transformador

- Vamos a calcular las pérdidas a plena carga

$$400 \cdot 0.04 = 16 \text{ kVAr}$$

- Añadimos las pérdidas en vacío que representan un 1.8% de la potencia del transformador

- $1.8 \cdot \frac{400}{100} = 7.2 \text{ kVAr}$

- Las pérdidas totales a plena carga serán:

$$\text{Pérdidas (vacío)} + \text{pérdidas (plena carga)} = 7.2 + 16 = 23.2 \text{ kVAr}$$

Viendo la tabla 8, vemos que el consumo de energía reactiva del transformador es de 22.9 kVAr.

Tabla compensación transformadores BT					
Transformador		En aceite		Secos	
S (kVA)	Ucc (%)	Vacío	Carga	Vacío	Carga
100	4	2,5	5,9	2,5	8,2
160	4	3,7	9,6	3,7	12,9
250	4	5,3	14,7	5,0	19,5
315	4	6,3	18,3	5,7	24
400	4	7,6	22,9	6,0	29,4
500	4	9,5	28,7	7,5	36,8
630	4	11,3	35,7	8,2	45,2
800	4	20,0	66,8	10,4	57,5
1.000	6	24,0	82,6	12	71
1.250	5,5	27,5	100,8	15	88,8
1.600	6	32	126	19,2	113,9
2.000	7	38	155,3	22	140,6
2.500	7	45	191,5	30	178,2

Tabla 8. Tabla compensación transformadores BT

2. COMPENSACIÓN DE LAS CARGAS LINEALES

Conociendo el factor de potencia inicial y final de la carga, obtenemos en la siguiente tabla un coeficiente por el que deberemos multiplicar la potencia activa, para encontrar la potencia de la batería de condensadores a instalar.

Antes de la compensación		Especificación de kVAR de una batería de condensadores que se van a instalar por kW de carga para mejorar $\cos \varphi$ (el factor de potencia) o $\tan \varphi$ con un valor determinado													
$\tan \varphi$	$\cos \varphi$	$\tan \varphi$	0,75	0,59	0,48	0,46	0,43	0,40	0,36	0,33	0,29	0,25	0,20	0,14	0,0
		$\cos \varphi$	0,80	0,86	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1
2,29	0,40	1,557	1,691	1,805	1,832	1,861	1,895	1,924	1,959	1,998	2,037	2,085	2,146	2,288	
2,22	0,41	1,474	1,625	1,742	1,769	1,798	1,831	1,840	1,896	1,935	1,973	2,021	2,082	2,225	
2,16	0,42	1,413	1,561	1,681	1,709	1,738	1,771	1,800	1,836	1,874	1,913	1,961	2,022	2,164	
2,10	0,43	1,356	1,499	1,624	1,651	1,680	1,713	1,742	1,778	1,816	1,855	1,903	1,964	2,107	
2,04	0,44	1,290	1,441	1,558	1,585	1,614	1,647	1,677	1,712	1,751	1,790	1,837	1,899	2,041	
1,98	0,45	1,230	1,384	1,501	1,532	1,561	1,592	1,628	1,659	1,695	1,737	1,784	1,846	1,988	
1,93	0,46	1,179	1,330	1,446	1,473	1,502	1,533	1,567	1,600	1,636	1,677	1,725	1,786	1,929	
1,88	0,47	1,130	1,278	1,397	1,425	1,454	1,485	1,519	1,532	1,588	1,629	1,677	1,758	1,881	
1,83	0,48	1,076	1,228	1,343	1,370	1,400	1,430	1,464	1,497	1,534	1,575	1,623	1,684	1,826	
1,78	0,49	1,030	1,179	1,297	1,326	1,355	1,386	1,420	1,453	1,489	1,530	1,578	1,639	1,782	
1,73	0,50	0,982	1,232	1,248	1,276	1,303	1,337	1,369	1,403	1,441	1,481	1,529	1,590	1,732	
1,69	0,51	0,936	1,087	1,202	1,230	1,257	1,291	1,323	1,357	1,395	1,435	1,483	1,544	1,686	
1,64	0,52	0,894	1,043	1,160	1,188	1,215	1,249	1,281	1,315	1,353	1,393	1,441	1,502	1,644	
1,60	0,53	0,850	1,000	1,116	1,144	1,171	1,205	1,237	1,271	1,309	1,349	1,397	1,458	1,600	
1,56	0,54	0,809	0,959	1,075	1,103	1,130	1,164	1,196	1,230	1,268	1,308	1,356	1,417	1,559	
1,52	0,55	0,769	0,918	1,035	1,063	1,090	1,124	1,156	1,190	1,228	1,268	1,316	1,377	1,519	
1,48	0,56	0,730	0,879	0,996	1,024	1,051	1,085	1,117	1,151	1,189	1,229	1,277	1,338	1,480	
1,44	0,57	0,692	0,841	0,958	0,986	1,013	1,047	1,079	1,113	1,151	1,191	1,239	1,300	1,442	
1,40	0,58	0,665	0,805	0,921	0,949	0,976	1,010	1,042	1,076	1,114	1,154	1,202	1,263	1,405	
1,37	0,59	0,618	0,768	0,884	0,912	0,939	0,973	1,005	1,039	1,077	1,117	1,165	1,226	1,368	
1,33	0,60	0,584	0,733	0,849	0,878	0,905	0,939	0,971	1,005	1,043	1,083	1,131	1,192	1,334	
1,30	0,61	0,549	0,699	0,815	0,843	0,870	0,904	0,936	0,970	1,008	1,048	1,096	1,157	1,299	
1,27	0,62	0,515	0,665	0,781	0,809	0,836	0,870	0,902	0,936	0,974	1,014	1,062	1,123	1,265	
1,23	0,63	0,483	0,633	0,749	0,777	0,804	0,838	0,870	0,904	0,942	0,982	1,030	1,091	1,233	
1,20	0,64	0,450	0,601	0,716	0,744	0,771	0,805	0,837	0,871	0,909	0,949	0,997	1,058	1,200	
1,17	0,65	0,419	0,569	0,685	0,713	0,740	0,774	0,806	0,840	0,878	0,918	0,966	1,007	1,169	
1,14	0,66	0,388	0,538	0,654	0,682	0,709	0,743	0,775	0,809	0,847	0,887	0,935	0,996	1,138	
1,11	0,67	0,358	0,508	0,624	0,652	0,679	0,713	0,745	0,779	0,817	0,857	0,905	0,966	1,108	
1,08	0,68	0,329	0,478	0,595	0,623	0,650	0,684	0,716	0,750	0,788	0,828	0,876	0,937	1,079	
1,05	0,69	0,299	0,449	0,565	0,593	0,620	0,654	0,686	0,720	0,758	0,798	0,840	0,907	1,049	
1,02	0,70	0,270	0,420	0,536	0,564	0,591	0,625	0,657	0,691	0,729	0,769	0,811	0,878	1,020	
0,99	0,71	0,242	0,392	0,508	0,536	0,563	0,597	0,629	0,663	0,701	0,741	0,783	0,850	0,992	
0,96	0,72	0,213	0,364	0,479	0,507	0,534	0,568	0,600	0,634	0,672	0,712	0,754	0,821	0,963	
0,94	0,73	0,186	0,336	0,452	0,480	0,507	0,541	0,573	0,607	0,645	0,685	0,727	0,794	0,936	
0,91	0,74	0,159	0,309	0,425	0,453	0,480	0,514	0,546	0,580	0,618	0,658	0,700	0,767	0,909	
0,88	0,75	0,132	0,282	0,398	0,426	0,453	0,487	0,519	0,553	0,591	0,631	0,673	0,740	0,882	
0,86	0,76	0,105	0,255	0,371	0,399	0,426	0,460	0,492	0,526	0,564	0,604	0,652	0,713	0,855	
0,83	0,77	0,079	0,229	0,345	0,373	0,400	0,434	0,466	0,500	0,538	0,578	0,620	0,687	0,829	
0,80	0,78	0,053	0,202	0,319	0,347	0,374	0,408	0,440	0,474	0,512	0,552	0,594	0,661	0,803	
0,78	0,79	0,026	0,176	0,292	0,320	0,347	0,381	0,413	0,447	0,485	0,525	0,567	0,634	0,776	

Tabla 9. Coeficiente dependiente de los factores de potencia

Para nuestros factores de potencia, vemos como el valor del coeficiente es de 0.447.

$$Q = 250 * 0.447 = 111.75 \text{ kVAR}$$

Así, la batería a instalar tendrá que compensar 111.75 kVAR.

Se va a realizar una compensación global, ya que es la que mejores efectos tiene calidad-precio, permitiéndonos así suprimir las penalizaciones por consumo excesivo de energía reactiva, ajustar la potencia aparente a la necesidad de la instalación y descarga del centro de transformación.

3. PRESENCIA DE ARMÓNICOS

La presencia de baterías de condensadores no va a generar armónicos, pero si pueden amplificar los ya existentes.

En redes contaminadas con armónicos, como es nuestro, una compensación de energía reactiva puede suponer una amplificación de los armónicos. Para este tipo de redes una solución es introducir baterías con filtros de rechazo (conjuntos L-C) sintonizados a 215 Hz (frecuencia de resonancia serie), con esto se provoca un desplazamiento de la frecuencia de resonancia paralelo fuera del espectro armónico evitando de esta manera la amplificación.

12. Utilización de software

En este apartado vamos a realizar el estudio de cuatro tipos de software de diferentes empresas fabricantes de baterías de condensadores. Estos softwares ayudan a los clientes a elegir qué equipo deben instalar en función de las características de sus instalaciones.

Vamos a realizar estos cálculos suponiendo que tenemos unas instalaciones con las siguientes características:

POTENCIA (Kw)	250
$\cos(\varphi_i)$	0.79
$\cos(\varphi_f)$	0.95
FACTOR SIMULTANEIDAD (%)	100
POTENCIA CONSUMIDA CARGAS NO LINEALES (KVAr)	40
VOLTAJE RED (V)	400
FRECUENCIA RED (Hz)	50
POTENCIA TRANSFORMADOR (KVA)	400
ÍNDICE DE CARGA TRANSFORMADOR	0.79
U_{CC} (%)	4
MATERIAL AISLANTE TRANSFORMADOR	aceite

Tabla 10. Datos instalación

CIRCUTOR

La empresa Circutor pone a la disposición del cliente el software Circutor Reactive Project, que permite a los usuarios calcular que tipo de equipo necesita su instalación para compensar la energía reactiva.



Ilustración 30. Página principal CIRCUTOR

Como se puede observar, en la página principal nos permite realizar los cálculos de 3 formas diferentes: por facturas por consumo, por facturas por exceso y por potencia.

Vamos a realizar los cálculos por potencia introduciendo los datos de nuestra instalación. Estamos suponiendo que el factor de simultaneidad es del 100% al igual que en el desarrollo teórico, así la batería de condensadores podría cubrir la demanda en la situación más desfavorable, es decir que todas las cargas estén conectadas de forma simultánea. (Véase ilustración 32).

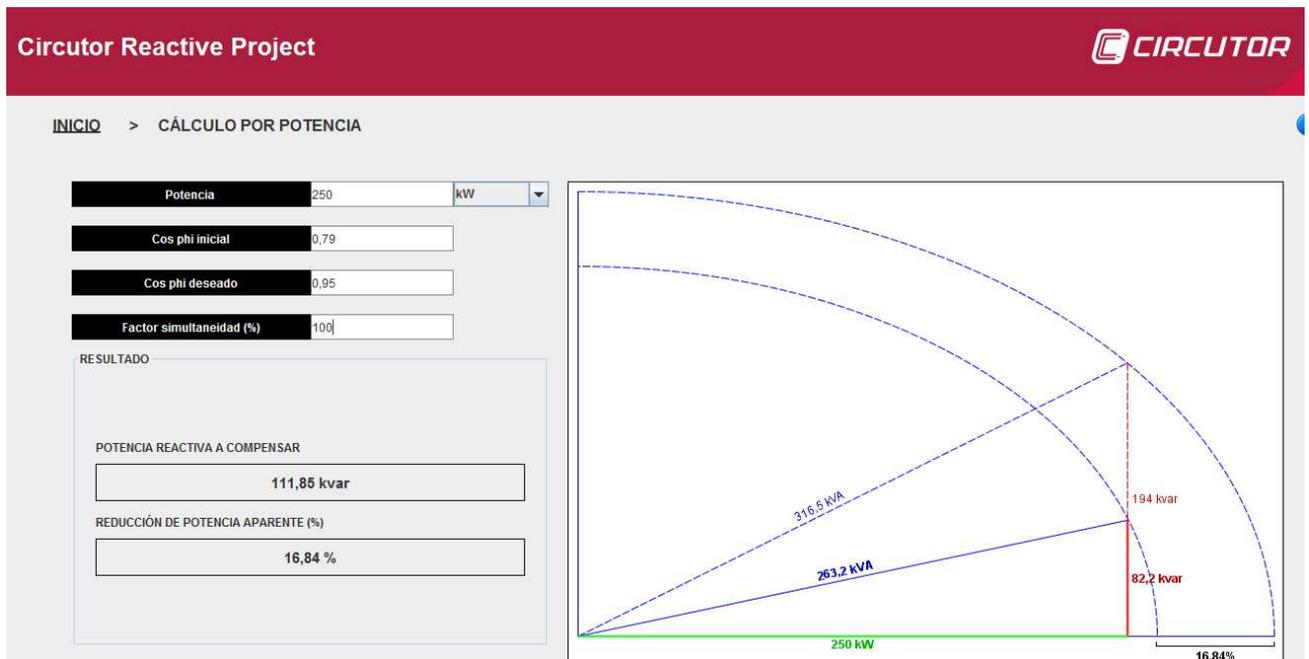


Ilustración 31. Datos técnicos a introducir CIRCUTOR

En la ilustración 32, podemos ver como la potencia reactiva a compensar es de 111,85 KVAR, esta diferencia con el valor teórico se debe al redondeo de decimales en la tabla (tabla 9) usada en el caso teórico.

En el diagrama de la ilustración 32 podemos ver los valores de antes y después de realizar la compensación, así como el porcentaje de potencia aparente que se ha disminuido (16.84 %). Para un coseno de phi de 0.79 teníamos una potencia aparente de 316.5 KVA y una potencia reactiva de 194 KVAR, tras realizar la compensación de 111.85 KVAR el nuevo coseno de phi alcanza el valor de 0.95, la potencia aparente pasa a valer 263.2 KVA y la potencia reactiva 82.2 KVAR.

A la hora de seleccionar el tipo de batería de condensadores el software nos da dos opciones.

La primera de ella es la selección de una batería básica. Esta batería tiene una potencia a tensión nominal de 112 KVAR, la cual se asemeja al valor deseado. (Véase ilustración 33)

Circutor Reactive Project



INICIO > SELECCIÓN DE BATERÍAS DE CONDENSADORES i

Selecciona batería
 BÁSICA

POTENCIA REACTIVA A COMPENSAR

AVANZADA

Potencia (kvar)
 Maniobra
 Opciones

Regulador
 Interruptor
 Calibre
 Filtro

Características
 Importe (€)
 Penalización (%)

BATERIA SERIE OPTIM

Potencia a tensión nominal	112 kvar
Tensión nominal	440 V
Composición	15+4x30

Consultar
 Comentarios:

Ilustración 32. Batería de condensadores básica CIRCUTOR

La segunda opción, es elegir una batería de condensadores avanzada, la cual nos deja elegir características como el tipo de maniobra (con contactor o estática), el tipo de regulador, el tipo de interruptor, los materiales que lo componen y si se quiere añadir filtros para armónicos. (Véase ilustración 34)

AVANZADA

Potencia (kvar)
 Maniobra
 Opciones

Regulador
 Interruptor
 Calibre
 Filtro

Características
 Importe (€)
 Penalización (%)

BATERIA SERIE OPTIM

Potencia a tensión nominal	112 kvar
Tensión nominal	440 V
Composición	15+4x30

Consultar
 Comentarios:

Ilustración 33. Batería de condensadores avanzada CIRCUTOR

Después de la elección de la batería de condensadores que mejor se ajuste a las necesidades de la instalación, el software CIRCUTOR ofrece una información muy detallada sobre la batería de condensadores escogida. (Véase ilustración 35,36,37)



Ref. Cálculo: 03254345

Fecha: 21/06/2018

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	
MODELO:	OPTIM 2-7,5-440
CÓDIGO:	R3Q761
Potencia nominal:	7.5 kvar
Potencia a tensión de servicio:	6.2 kvar
Tensión nominal:	440.0 V
Tensión de servicio:	400 V
Frecuencia:	50.0 Hz
Nivel de aislamiento:	690 V
Rigidez dieléctrica:	2,5 kV/1 min
Tolerancia de capacidad:	-5/+10 %
Sobrecarga:	1,3xIn
Sobretensión:	1,1xUn (8h sobre 24h)
	1,15xUn (15 min sobre 24h)
	1,2xUn (5 min sobre 24h)
	1,3xUn (1 min sobre 24h)
Temperatura ambiente:	-25 °C/+45 °C
Temperatura funcionamiento:	+ 25 °C (recomendado)
Humedad relativa:	< 80%
Altitud:	< 2000 msnm
Normas:	IEC 60831; IEC 61921; IEC 60439; IEC 61921; IEC 60439

Ilustración 34. Información detallada CIRCUTOR (1)

COMPOSICIÓN	
Composición:	2,5+5
Escalones físicos:	2
Escalones eléctricos:	3
Regulación:	1.2.
Condensador/es:	Tubular CLZ
Regulador:	Incluido
Opciones:	Estándar
Interruptor:	Incluido

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	
Envolvente:	Termoplástica
Dimensiones:	362x500x166 mm (ANxALxF)
Peso:	7.0 kg
Instalación:	Interior
Montaje:	Mural
Grado de protección:	IP 20
Color:	RAL 7035

Ilustración 35. Información detallada CIRCUTOR (2)

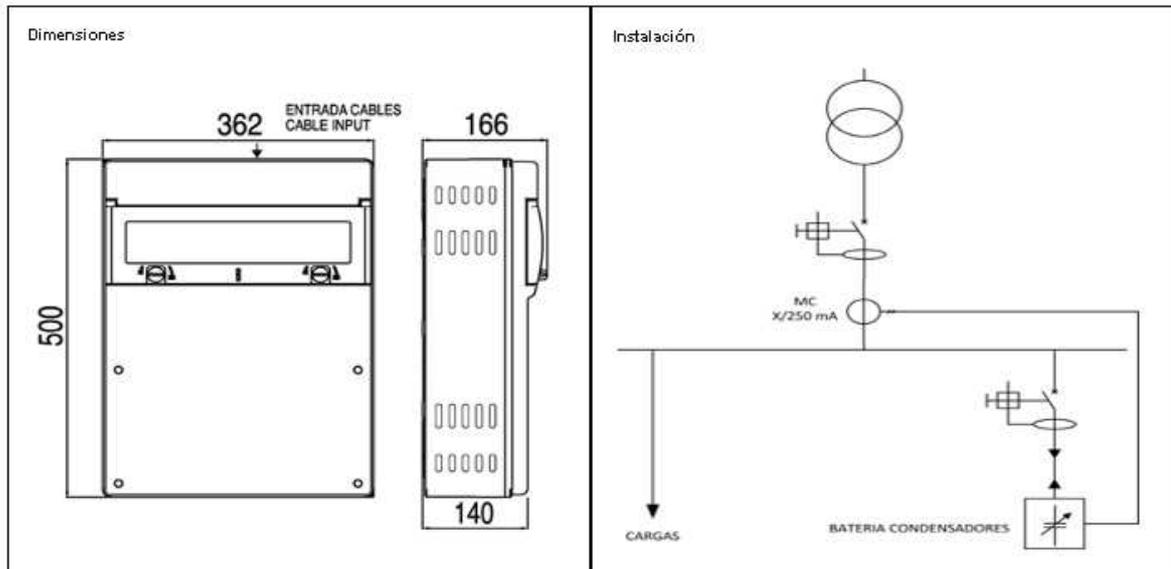


Ilustración 36. Información detallada CIRCUITOR (3)

SCHNEIDER ELECTRIC

SISvar 2.0 es una aplicación ofrecida por Schneider Electric a sus clientes. En la página de inicio se permite crear un nuevo proyecto y nos da opción a elegir dependiendo del tipo de proyecto que queramos incluir. También permite ver desde la propia aplicación el catálogo de productos que ofrece Schneider Electric.

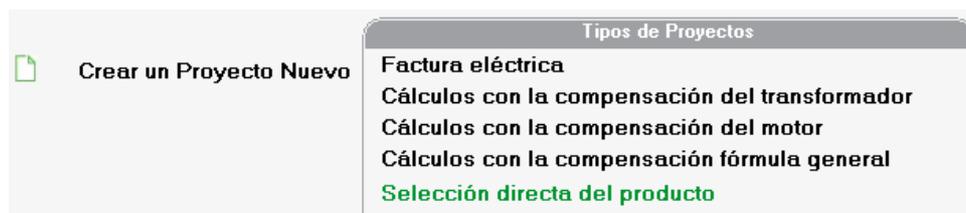


Ilustración 37. Tipos de proyectos SCHNEIDER

Si el tipo de proyecto es Selección directa del producto, implica que el cliente ha realizado un estudio previo de la potencia que debe compensar. Así, le permite seleccionar directamente el producto dependiendo de si quiere hacer una compensación fija o automática y la potencia reactiva a instalar. En la parte derecha de la pantalla aparece el producto necesario y su precio. También aparece la oferta comercial y datos generales y oferta técnica.

También se permite realizar la compensación exclusiva de un transformador o motor para ello están las opciones Cálculos con la compensación del transformador y Cálculos con la compensación del motor. (Véase ilustración 38)

Para la compensación del motor sabiendo las revoluciones por minuto y su potencia nominal, se conoce la potencia necesaria que se debe conectar a través de condensadores. (Véase ilustración 39)

Módulo de compensación a motores

Seleccionar entre BT, MT o selección directa por fórmula

Baja Tensión Media Tensión Por Fórmula

Seleccionar el número de r.p.m.

3000 r.p.m. 1500 r.p.m. 1000 r.p.m. 750 r.p.m.

Tabla de Valores

Seleccionar de la siguiente tabla el valor deseado

Potencia nominal	Potencia Reactiva
KW	KVAr
11	2,5
18	5
30	7,5
45	11
55	13
75	17
90	20
110	24
132	31

Potencia del condensador: KVAr

Ilustración 38. Datos técnicos a introducir del motor SCHNEIDER

También se da la opción de tener en cuenta los posibles armónicos producidos por onduladores, rectificadores, máquinas de soldadura...

Para ello es necesario conocer la potencia activa o aparente consumida por estas instalaciones. Una vez realizado esto se recomienda el equipo a instalar, así como su precio, oferta comercial, datos generales y oferta técnica. (Véase ilustración 40)

Tener en cuenta Armónicos

Introducción de datos

1. Introducir la potencia de los posibles generadores de armónicos (Onduladores, Rectificadores, Máquinas de soldadura, Variadores, Hornos de arco, Lámparas fluorescentes, ...)

(Elegir solo una opción)

En KW En KVA

2. Potencia Transformador: KVA

3. Potencia batería de condensadores: KVAr

4. Equipo recomendado:

Ilustración 39. Datos técnicos de los armónicos a introducir SCHNEIDER

Para la compensación de transformadores, la dinámica de la aplicación es la misma, primero se requiere de datos acerca del transformador, como si la compensación se va a realizar en carga o en vacío, así como su clase, en aceite o en seco y la potencia aparente del transformador. Con estos datos, el programa nos calcula el valor de la potencia reactiva a compensar, que en este caso nos da el mismo valor que el calculado teóricamente. (Véase ilustración 41)

Seleccionar entre BT o MT

Baja Tensión

Media Tensión

Seleccionar la compensación en vacío o en carga

Vacío

Carga

Seleccionar la clase del transformador

En Aceite

En Seco

Tabla de Valores

Seleccionar de la siguiente tabla el valor deseado

S (kVA)	U _{cc} (%)	Potencia Reactiva Necesaria (kVAr)
100	4	5,9
160	4	9,6
250	4	14,7
315	4	18,3
400	4	22,9
500	4	28,7
630	4	35,7
800	4	66,8
1000	6	82,6
1250	5,5	100,8

22,9

kVAr

Ilustración 40. Datos técnicos a introducir del transformador SCHNEIDER

Al igual que en la compensación de motores, se da la opción de introducir los armónicos existentes. Una vez recopilados todos estos datos, se ofrece el producto necesario a instalar.

Este proyecto vamos a centrarnos en el estudio de Cálculos con la compensación con la fórmula general.

Cómo se ha visto anteriormente, la instalación en baja tensión cuenta con una potencia activa media de 250 kW, un $\cos(\varphi_i) = 0,79$ y $\cos(\varphi_f) = 0,95$. Así se puede calcular mediante la fórmula que aparece en la ilustración 5, que la potencia reactiva requerida con el nuevo φ deseado es de 111,85 KVar. Este resultado difiere ligeramente con el obtenido teóricamente. Esto es debido a que cuando se hace

teóricamente, el valor escogido de la tabla 9, está redondeado de 0.4474 a 0.447, lo que produce una ligera variación del resultado.

Cálculo por Fórmula General

Baja Tensión Media Tensión

Potencia activa media de la instalación kW

Cos phi inicial

Cos phi deseado

Potencia reactiva necesaria para cos phi deseado, según fórmula :

$$Q = P \times (tg \varphi_1 - tg \varphi_2)$$

Q necesaria KVAR

Ilustración 41. Datos requeridos para cálculo por fórmula general SCHNEIDER

En el caso de la aplicación CIRCUITOR, no se daba la opción de tener en cuenta los armónicos pero en este caso sí, luego es necesario conocer la potencia activa o aparente que consumen las cargas generadoras de armónicos, en el caso de nuestro proyecto la instalación cuenta con una serie de cargas que consumen energía reactiva, y la potencia activa total que consumen entre todas ellas es de 40 Kvar, estas cargas introducen armónicos a la red, por ello Schneider recomienda un equipo TIPO SAH, que contiene filtros para reducir el efecto de estos armónicos (véase ilustración 43).

Tener en cuenta Armónicos

Introducción de datos

- Introducir la potencia de los posibles generadores de armónicos (Onduladores, Rectificadores, Máquinas de soldadura, Variadores, Hornos de arco, Lámparas fluorescentes, ...)

(Elegir solo una opción)
 En kW
 En kVA
- Potencia Transformador kVA
- Potencia batería de condensadores kVAr
- Equipo recomendado

Ilustración 42. Datos a introducir sobre los armónicos SCHNEIDER

Finalmente, se ofrecen una serie de productos en función de la potencia. En nuestro caso seleccionamos 250 KW.

En la parte derecha de la pantalla aparece el producto recomendado y su precio. Después de pulsar la opción añadir aparece un catálogo muy completo con los datos técnicos de la batería de condensadores:

- Características eléctricas de la batería
- Características mecánicas de la batería
- Características de los condensadores
- Condiciones de diseño
- Regulador para funciones comunes
- Contactores
- Inductancias
- Cableado

Selección de Producto

Compensación <input checked="" type="radio"/> Automática	Modelo <input checked="" type="radio"/> VarSet SAH <input type="radio"/> VarSet SAH con NS	Clase <input checked="" type="radio"/> Clase SAH
Tensión <input checked="" type="radio"/> 400	Potencia <input type="radio"/> 100 <input type="radio"/> 125 <input type="radio"/> 137,5 <input type="radio"/> 150 <input type="radio"/> 175 <input type="radio"/> 200 <input type="radio"/> 225 <input checked="" type="radio"/> 250	Nombre Producto <input checked="" type="radio"/> VarSet SAH 250 kvar 400V 50-2x100

Referencias seleccionadas:



PVP : 12.940.-Euros

Precio Neto €

Ilustración 43. Selección del producto

AENER ENERGÍA

Aener energía utiliza un software llamado Calbat 6.0. En la pantalla principal (véase ilustración 1), nos da a elegir el tipo de equipo que se desea (filtro economizador de energía o baterías de condensadores) y los cálculos que vamos a realizar para elegir el equipo correcto (en función del consumo o en función de la potencia contratada)

Tipo de equipo a seleccionar <input checked="" type="radio"/> Filtro Economizador de Energía ECONELEC <input type="radio"/> Baterías de Condensadores	Tipo de cálculo <input checked="" type="radio"/> En función del consumo <input type="radio"/> Por potencia contratada o máxímetro	Temperatura de la instalación <input checked="" type="radio"/> Menor de 35 °C <input type="radio"/> Mayor de 35 °C
Voltios (para otros voltajes consultar) <input checked="" type="radio"/> 400 volt <input type="radio"/> 230 volt <input type="radio"/> 480 volt	Frecuencia <input checked="" type="radio"/> 50 Hz <input type="radio"/> 60 Hz	<input checked="" type="radio"/> Sin armónicos de corriente <input type="radio"/> Con armónicos de corriente

Horas de trabajo mensuales:
 Factor de potencia deseado:
 Tipo de Lectura: Mensual Bimestral

Mes de Lectura	Año	kW.h Totales	kvar.h	Máxima demanda (kW)	Transformador de entrada (kVA)
----------------	-----	--------------	--------	---------------------	--------------------------------

Ilustración 44. Pantalla de inicio AENER

En nuestro caso vamos a elegir baterías de condensadores. Si elegimos realizar los cálculos en función del consumo, debe introducir datos como horas de trabajo mensuales y tipo de lectura (véase ilustración 45).

Vamos a realizar los cálculos a través de la potencia contratada, para ello introduciremos los datos de nuestra instalación, los definidos previamente.

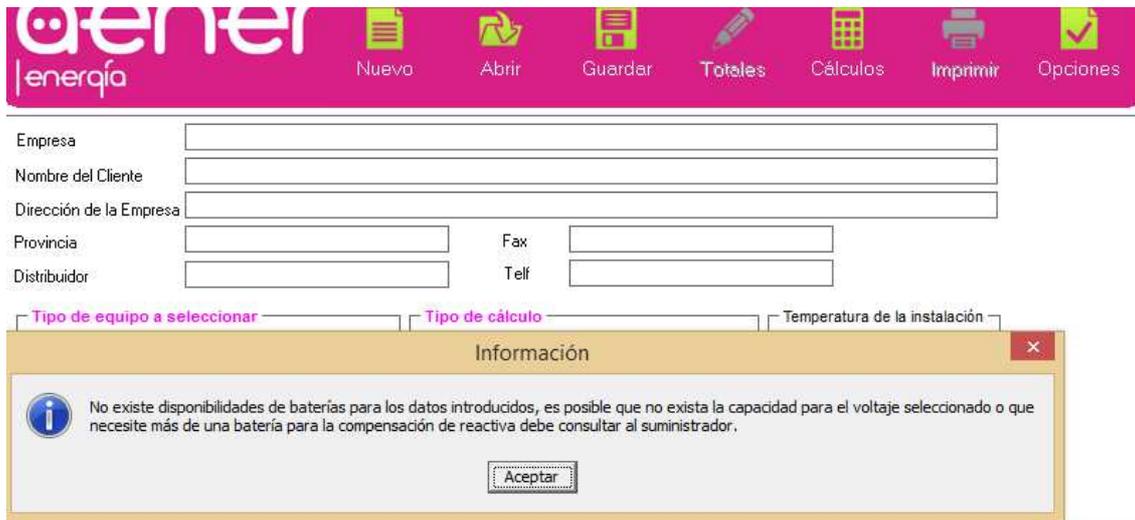
Tipo de equipo a seleccionar <input type="radio"/> Filtro Economizador de Energía ECONELEC <input checked="" type="radio"/> Baterías de Condensadores	Tipo de cálculo <input type="radio"/> En función del consumo <input checked="" type="radio"/> Por potencia contratada o maxímetro	Temperatura de la instalación <input checked="" type="radio"/> Menor de 35 °C <input type="radio"/> Mayor de 35 °C
Voltios [para otros voltajes consultar] <input checked="" type="radio"/> 400 volt <input type="radio"/> 230 volt <input type="radio"/> 480 volt	Frecuencia <input checked="" type="radio"/> 50 Hz <input type="radio"/> 60 Hz	<input type="radio"/> Sin armónicos de corriente <input checked="" type="radio"/> Con armónicos de corriente

Potencia contratada o maxímetro (kW)	<input type="text" value="250"/>
Dispone de transformador de entrada propio	<input checked="" type="checkbox"/>
Transformador de entrada (kVA)	<input type="text" value="400"/>

Ilustración 45. Tipo de equipo y de cálculos AENER

Al igual que el software de Schneider Electric, es posible tener en cuenta el efecto de los armónicos de corriente.

Para los datos de la instalación sobre la cual se han hecho los cálculos teóricos, el software AENER ENERGÍA, no ofrece ninguna alternativa. De esta forma se muestra en la pantalla un mensaje que informa de la no disponibilidad de baterías por parte del fabricante para los datos introducidos, esto se puede deber a que no existan baterías de condensadores para el voltaje seleccionado o que sea necesario la instalación de más de una batería de condensadores. AENER aconseja ponerse en contacto con el suministrador para resolver este inconveniente. (Véase ilustración 46).



AENER
 energía

Nuevo Abrir Guardar Totales Cálculos Imprimir Opciones

Empresa:
 Nombre del Cliente:
 Dirección de la Empresa:
 Provincia: Fax:
 Distribuidor: Telf:

Tipo de equipo a seleccionar: Tipo de cálculo: Temperatura de la instalación:

Información


 No existe disponibilidad de baterías para los datos introducidos, es posible que no exista la capacidad para el voltaje seleccionado o que necesite más de una batería para la compensación de reactiva debe consultar al suministrador.

Potencia contratada o máximo (kW):

Dispone de transformador de entrada propio:

Transformador de entrada (kVA):

Ilustración 46. Información AENER

LEGRAND

El grupo francés Legrand, tiene a disposición del usuario un software llamado Alpes Technologies que permite el cálculo de baterías de condensadores.



LogiAlpes

ALPES TECHNOLOGIES
 Une marque du Groupe **legrand**

Français Español
 English Pyccckий

Software para el cálculo de baterías de condensadores

Retorno de inversión

(considerar moneda local)

Coste del banco de compensación instalado:

Recargo en Factura por energía reactiva (menos favorable):

Retorno de inversión (en meses):

Ilustración 47. Pantalla de inicio

Como podemos ver en la pantalla de inicio, este software nos permite el calcular en cuanto tiempo vamos a recuperar la inversión realizada al instalar las baterías de condensadores, algo que los anteriores softwares no nos daban opción.

También tenemos acceso a documentación, esta carpeta nos da información general acerca de las baterías de condensadores y los armónicos.

A continuación, vamos a elegir la opción nuevo proyecto.

CALCULO DE LA POTENCIA Y TIPO DE BATERIA DE CONDENSADORES		
Informacion instalacion electrica	Potencia bateria de cond. (conocida)	Solucion propuesta
<i>Calculo bateria de condensadores : $Q = P_x(tg \Phi_1 - tg \Phi_2)$</i>		
Potencia activa de la instalacion :	<input type="text" value="250"/>	kW
Cos phi actual :	<input type="text" value="0,79"/>	Tg Phi actual : <input type="text" value="0,78"/>
Cos Phi objetivo :	<input type="text" value="0,95"/>	Tg Phi objetivo : <input type="text" value="0,33"/>
Potencia bateria de condensadores :	<input type="text" value="112"/>	kVar

Ilustración 48. Datos instalación LEGRAND

Después de introducir los datos de nuestra instalación nos da como resultado que la potencia de condensadores que necesitamos es de 112 kVar. Este resultado varía debido al redondeo por parte del software a la hora de realizar la tangente de phi actual y objetivo. Pese a esta variación de valores, el resultado a la hora de elegir la capacidad de la batería de condensadores es la misma para ambos valores, una batería de 125 Kw y a su vez nos da la posibilidad de elegir el sistema completo o la integración por componentes. (Véase ilustración 48)

También nos da la opción de considerar los armónicos y si queremos un interruptor automático.



Ilustración 49. Batería integración componentes



Ilustración 50. Batería sistema completo

Si se elige la opción de con interruptor automático la batería es la misma, pero con incorporación del interruptor.

TABLA COMPARATIVA

	CIRCUITOR	SCHNEIDER	AENER	LEGRAND
Cálculo por factura consumo	x	x	x	
Cálculo por factura exceso	x			
Cálculo por potencia	x	x	x	x
Cálculo por compensación trafo		x		
Cálculo por compensación motor		x		
Cálculo rentabilidad				x
Consideración armónicos		x	x	x
Compensación automática		x		x
Catálogo informativo	x	x		x
Características muy detalladas del equipo elegido	x	x	x	

Tabla 11. Tabla comparativa softwares

13. Metodología del trabajo

13.1 Descripción de tareas

P.T.1 Tareas de preparación. El trabajo fin de grado comienza el 21/11/2017.

T.1.1 Lectura y comprensión de la información aportada por el tutor.

T.1.2 Búsqueda de información extra que sea de utilidad para la comprensión del tema abordado en el TFG.

P.T.2 Estructuración del trabajo.

T.2.1 Creación de un índice que facilite la organización de las ideas y su futura escritura.

P.T.3 Redacción de la parte teórica.

T.3.1 Recopilación de más información. Utilizado para realizar un enfoque más profundo de cada apartado incluido en el índice.

T.3.2 Descripción escrita. Redacción de todos los apartados teóricos a tratar.

H.3.3 Entregable 1. Revisión y corrección con el tutor.

P.T.4 Cálculos. En este paquete de trabajo se realiza un ejemplo práctico sobre el cálculo de la potencia reactiva.

T.4.1 Aplicación del caso práctico con diferentes softwares. En esta tarea se usan diversos softwares facilitados por las empresas fabricantes de condensadores, para el cálculo de la potencia reactiva a compensar.

T.4.2 Conclusiones. Esta tarea consiste en la redacción de conclusiones a las que se ha llegado tras la realización del trabajo.

H.4.3 Entregable 2. Revisión y corrección con el tutor.

P.T.5 Revisión final. Este paquete de trabajo consiste en corregir y revisar los últimos detalles.

H.6 Entregable final TFG. Este hito define la fecha de entrega del Trabajo de Fin de Grado el 19/06/2018.

13.2 Diagrama Gantt

En la siguiente tabla se pueden observar los paquetes de trabajo, tareas e hitos en los que se ha descompuesto el trabajo fin de grado.

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
TRABAJO FIN DE GRADO	210 días	lun 9/11/17	vie 6/29/18
P.T.1	34 días	lun 9/11/17	jue 10/26/17
T.1.1	18 días	lun 9/11/17	mié 10/4/17
T.1.2	16 días	jue 10/5/17	jue 10/26/17
P.T.2	17 días	vie 10/27/17	lun 11/20/17
T.2.1	17 días	vie 10/27/17	lun 11/20/17
P.T.3	104 días	mar 11/21/17	vie 4/13/18
T.3.1	34 días	mar 11/21/17	vie 1/5/18
T.3.2	70 días	lun 1/8/18	vie 4/13/18
H.3.3	0 días	vie 4/13/18	vie 4/13/18
P.T.4	45 días	lun 4/16/18	vie 6/15/18
T.4.1	30 días	lun 4/16/18	vie 5/25/18
T.4.2	15 días	lun 5/28/18	vie 6/15/18
H.4.3	0 días	vie 6/15/18	vie 6/15/18
P.T.5	10 días	lun 6/18/18	vie 6/29/18
H.6	0 días	vie 6/29/18	vie 6/29/18

Tabla 12. Planificación.

En esta tabla se ve el diagrama Gantt, en el cual se ve la sucesión de tareas y la fecha en la que finaliza cada una de ellas.

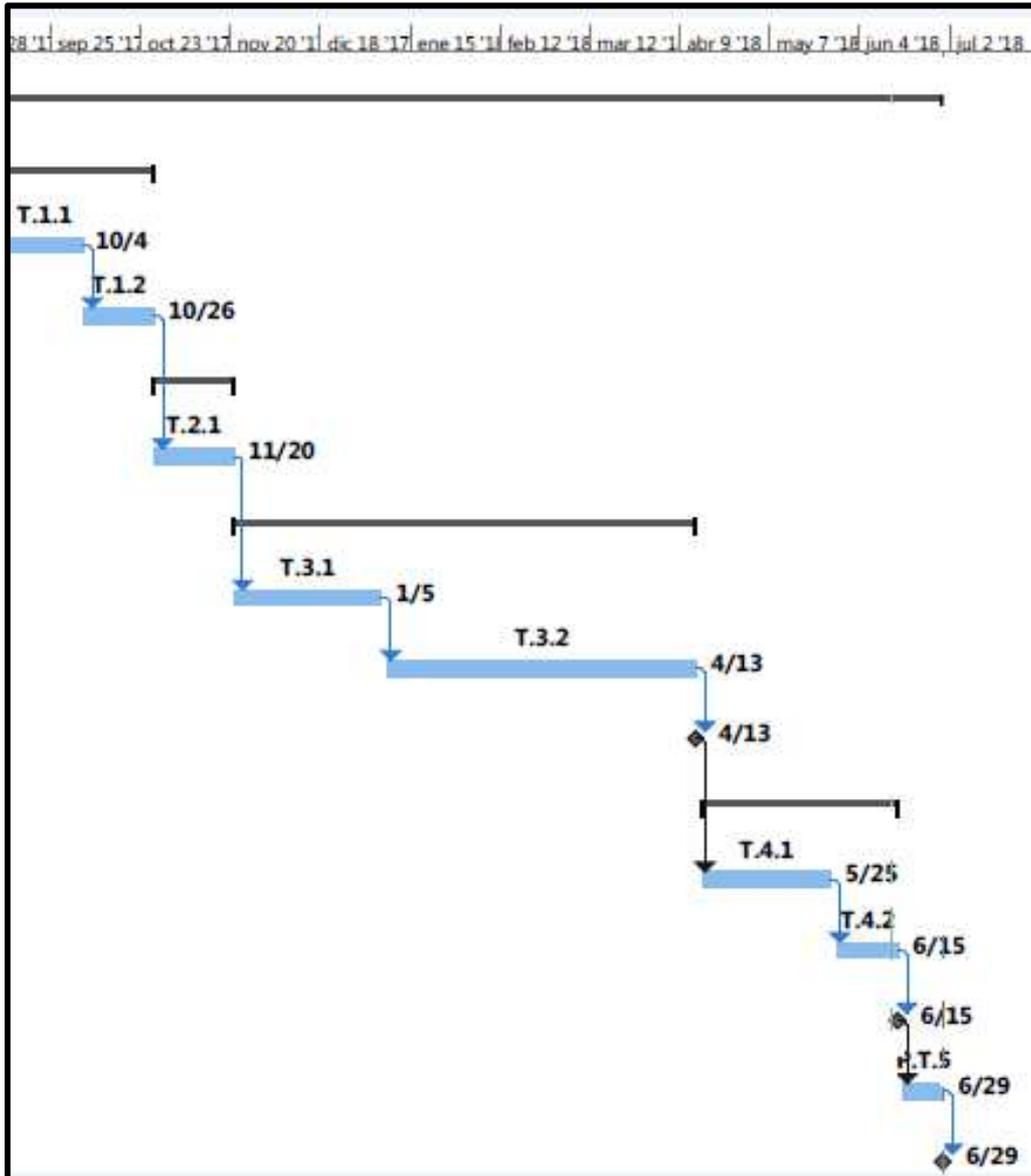


Tabla 13. Diagrama Gantt.

14. Presupuesto

En este apartado se realiza una evaluación económica del proyecto. En el siguiente esquema se muestra un análisis global de los gastos, los cuales vamos a ver más en profundidad a continuación.



Ilustración 51. Esquema presupuesto.

En la siguiente tabla se recogen algunos datos acerca del proyecto, como horas de uso de ciertos materiales o horas laborables:

horas totales del proyecto:	210
horas usadas en el ordenador:	170
horas usadas en el office:	120
horas/mes laborables en la oficina:	320

Tabla 14. Datos presupuesto

GASTOS

En este apartado se tienen en cuenta los gastos directos imputables al proyecto.

Concepto	Coste unitario	Unidades	Total
Alquiler local	700 euros/mes	1	700 euros
Factura internet	55 euros/mes	1	55 euros
Impresión proyecto	10 euros/copia	3	30 euros
Subtotal			785 euros

Tabla 15. Gastos presupuesto.

AMORTIZACIONES

Son las pérdidas de valor de los activos fijos debido a su utilización en este trabajo.

Concepto	Precio	Vida útil	Horas	Total
Ordenador	1100 euros	15000 horas	170 horas	12.46 euros
Licencia Office	300 euros	2880 horas	120 horas	12.5 euros
subtotal				24.96 euros

Tabla 16. Amortizaciones presupuesto

HORAS INTERNAS

Las horas internas son los costes de los recursos humanos empleados para llevar a cabo este trabajo.

Concepto	Tasa horaria	Horas	Total
Ingeniero	18 euros	210	3780 euros
Director proyecto	30 euros	27	810 euros
Subtotal			4590 euros

Tabla 17. Horas internas presupuesto

OTRAS PARTIDAS

Son los gastos indirectos imputables al proyecto.

Concepto	Coste unitario	Unidades	Total
Facturas varias	0.4687 euros/hora	210 horas	98.43 euros
Gastos fiscales	0.55 euros/hora	210 horas	115.5 euros
Subtotal			213.93 euros

Tabla 18. Otras partidas presupuesto

RESUMEN GLOBAL DEL PRESUPUESTO

Concepto	Coste (euros)
Gastos	518,576
Horas internas	4590
Amortizaciones	24.96
Otras partidas	213.93
SUBTOTAL	5347.46
COSTES INDIRECTOS(5%)	267.37
TOTAL	5614.83

Tabla 19. Resumen global del presupuesto

En el siguiente gráfico se muestra una relación entre los diferentes gastos del proyecto, como podemos ver el gasto mayoritario sería el referido a horas internas, siendo el resto apenas insignificantes en comparación con este.



Ilustración 52. Gráfica presupuesto.

15. Conclusiones

El aumento de la competitividad entre empresas e industrias hace que todas ellas busquen la manera de ahorrar en sus costes de producción. Una forma de conseguirlo es con la reducción de la factura eléctrica o realizando un buen uso de las instalaciones, consiguiendo así una disminución de los costes de mantenimiento. Una forma de conseguir ambos resultados es compensando el factor de potencia de las instalaciones. En este proyecto se va a analizar teóricamente con qué, cómo y dónde se debe realizar la compensación para diferentes casos, así como un ejemplo práctico resuelto con diferentes softwares proporcionados por los vendedores de baterías de condensadores.

En primer lugar, se ha explicado que es la energía reactiva y como es demandada por ciertas instalaciones como bobinas, motores o transformadores para crear campos magnéticos y eléctricos que les permitan funcionar.

A continuación, se han propuesto varios instrumentos para realizar la compensación como pueden ser alternadores síncronos, compensadores síncronos y estáticos. Pero el método más usado, por ser el más eficaz, adaptable y económico, es el uso de baterías de condensadores.

La elección de las características de las baterías de condensadores, así como su nivel de compensación es uno de los pasos más importantes, ya que esta se debe ajustar a las características de la instalación en baja tensión. Otro factor a tener en cuenta es si la compensación se va a realizar de forma fija o automática, para ello deberá estudiarse en profundidad las características de la instalación a compensar, así como seguir el reglamento de BT que lo regula.

Tras la realización de este proyecto, podemos concluir que la inversión realizada al instalar baterías de condensadores, aporta numerosos beneficios como:

- Ahorro del consumo energético ↔ Disminución de las pérdidas
- Reducción de caídas de tensión ↔ Mejora del uso de las instalaciones
- Optimización de las máquinas
- Reducción de los gases de efecto invernadero

Para ello los fabricantes de baterías de condensadores ponen a disposición del cliente softwares los cuales facilitan el cálculo de las necesidades de cada instalación a partir de unos datos básicos acerca de la instalación que va a ser compensada.

16. Bibliografía

Recursos

A continuación, se van a numerar los softwares utilizados para realizar la comparación:

- Software de configuración compensación energía reactiva: SISVAR
- Software de cálculo de baterías de condensadores CRP
- software Compensación de potencia LOGIALPES
- Software de Gestión y Cálculo CALBAT

Referencias

[1] Teoría potencia activa, reactiva y aparente. Disponible en: http://www.trifasica.net/pdf/TEMA_7._POTENCIA_EN_CIRCUITOS_MONOFASICOS.pdf

[2] Schneider Electric, «Manual Teórico-Práctico Instalaciones en baja tensión» Primer volumen.

[3] Armónicos efectos y soluciones. Disponible en: <https://blog.gesternova.com/los-armonicos-causas-consecuencias-y-soluciones/>

[4] Theodor Schmeicher y Jorge Guillén J. «Manual de baja tensión.Indicaciones para la selección de aparatos de maniobra, instalaciones y distribuciones » Munich, 1982

[5] Características baterías de condensadores: <http://quintoarmonico.es/2010/10/13/baterias-de-condensadores-caracteristicas-mas-importantes/>

[6] Ahorrar compensando reactiva. Disponible en: <http://www.cfe.gob.mx/industria/ahorroenergia/lists/ahorro%20de%20energia/attachments/3/factordepotencia1.pdf>

[7] Sanciones compensación reactiva. Disponible en: <https://blog.gesternova.com/energia-reactiva-en-la-factura-de-la-luz-de-tu-empresa-algunos-consejos-y-como-calcularla/>

[8] Problemas no compensación energía reactiva. Disponible en: http://www.rtrenergia.es/downloads/reactiva_2012.pdf

[9] Mazón, J.; Miñambres, J.F.; Zorrozuza, M.A.; Buigues, G.; Valverde, V. <> Pearson-Prentice Hall, 2008.

[10] Schneider Electric. Disponible en: <http://www.schneiderelectric.es/documents/local/productos->

servicios/distribucion_electrica/tarifas/lista-precios-compensacion-er-filtraje-dic-2008.pdf

[11] Instrucciones Técnicas Complementarias del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión. Actualización de 2002.