

Energía y Telecomunicaciones

Tema 2.1. Circuitos de corriente alterna



Alberto Arroyo Gutiérrez
Mario Mañana Canteli
Raquel Martínez Torre
Jesús Mirapeix Serrano
Cándido Capellán Villacián

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Índice general

NOMENCLATURA Y SIMBOLOGÍA.	vii
CAPÍTULO 1. CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA	1
1.1. Introducción	1
1.2. Representación instantánea de señales sinusoidales	1
1.3. Representación fasorial	2
1.4. Potencias en corriente alterna sinusoidal monofásica	4
1.5. Teorema de Boucherot	6
1.6. Factor de potencia	7
1.7. Mejora del factor de potencia	8
1.8. Energía	9
1.9. Introducción a las tarifas	9
1.10. Ejercicios	15
1.11. Actividades	16
1.12. Soluciones a los ejercicios	16

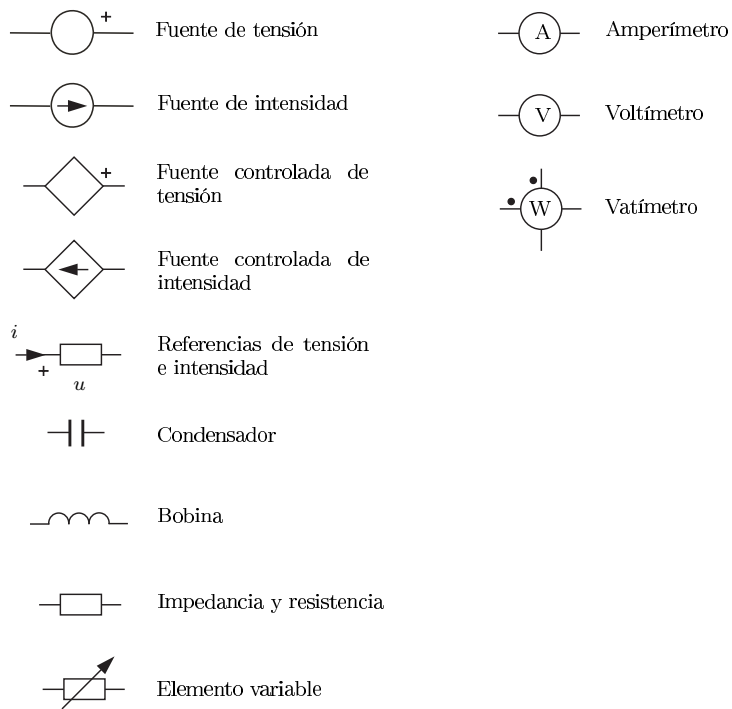
NOMENCLATURA Y SIMBOLOGÍA

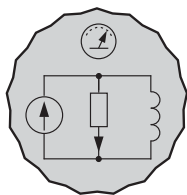
Normas generales

Letra mayúscula: Valor eficaz del parámetro.

Letra minúscula: Valor instantáneo del parámetro.

SIMBOLO	MAGNITUD	UNIDAD
a	Operador trifásico	$a = 1_{\angle 120^\circ}$
B	Susceptancia	Siemens (S)
C	Capacidad	Faradio (F)
f	Frecuencia	Hertzio (Hz)
G	Conductancia	Siemens (S)
i	Intensidad instantánea	Amperio (A)
I	Intensidad eficaz	Amperio (A)
\bar{I}	Intensidad compleja	Amperio (A)
j	Unidad imaginaria	$j = 1_{\angle 90^\circ}$
L	Inductancia propia / autoinducción	Henrio (H)
M	Inductancia mutua	Henrio (H)
P	Potencia activa	Vatio (W)
Q	Potencia reactiva	Voltamperio reactivo (var)
R	Resistencia	Ohmio (Ω)
S	Potencia aparente	Voltamperio (VA)
\bar{S}	Potencia aparente compleja	Voltamperio (VA)
u	Tensión instantánea	Voltio (V)
U	Tensión eficaz	Voltio (V)
\bar{U}	Tensión compleja	Voltio (V)
W	Energía	Julio (J)
X	Reactancia	Ohmio (Ω)
Y	Admitancia	Siemens (S)
Z	Impedancia	Ohmio (Ω)
\bar{Z}	Impedancia compleja	Ohmio (Ω)
η	Rendimiento	Porcentaje (%)
ρ	Resistividad	Ohmio metro (Ωm)
σ	Conductividad	Siemens por metro (S/m)
φ	Desfase entre \bar{U} e \bar{I}	Grado sexagesimal ($^\circ$)
ω	Pulsación	Radian por segundo (rd/s)





CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA

CAPÍTULO

1

A pesar de que la temática relacionada con los circuitos de corriente alterna se analiza profundamente en las asignaturas de Teoría de Circuitos, se repasan aquí los conceptos básicos y la notación que se utilizará en el resto de temas.

1.1. Introducción

Resulta evidente que cualquier tema relacionado con la electrotecnia o la tecnología eléctrica en general necesita apoyarse en la teoría de circuitos, tanto de corriente continua como de corriente alterna. No es menos cierto que existe un gran número de excelentes referencias bibliográficas relacionadas con el tema. Por otra parte, la formación básica del ingeniero de telecomunicación incluye varias asignaturas que estudian la teoría de circuitos de corriente continua y alterna monofásica. Desde el punto de vista electrotécnico clásico, es necesario complementar el estudio de la teoría de circuitos de corriente alterna monofásica con el estudio de la corriente alterna polifásica en general, o los circuitos trifásicos en particular, ya que son estos los más frecuentes en las instalaciones eléctricas industriales. Antes de abordar el estudio de los circuitos trifásicos de corriente alterna se realiza un repaso de la corriente alterna sinusoidal monofásica, con el objetivo de introducir la notación que va a utilizarse durante el resto de los temas. Se recuerda al lector que no es el objetivo de este capítulo estudiar las técnicas de análisis de circuitos, por lo que debe recurrir a los textos que se incluyen en la bibliografía si desea repasar los conceptos básicos.

1.2. Representación instantánea de señales sinusoidales

La representación instantánea de tensiones e intensidades sinusoidales se realiza según la notación siguiente:

$$x(t) = X\sqrt{2}\cos(2\pi ft + \varphi_0) \quad (1.1)$$

donde:

- $x(t)$ Valor instantáneo (en el instante t) de la tensión o intensidad.
- X Valor eficaz de la tensión o intensidad.
- f Frecuencia de la tensión o intensidad.
- φ_0 Fase inicial en el instante $t = 0$.

En la figura 1.1 se incluye la representación instantánea de una señal de tensión o intensidad.

Desde el punto de vista del ingeniero de telecomunicación, las novedades en la utilización de esta notación son dos:

i) La frecuencia f de los sistemas eléctricos europeos es de 50 Hz. EE.UU. y algunos países del continente americano utilizan 60 Hz. En España la frecuencia de 50 Hz se denomina en la jerga eléctrica marcha industrial.

ii) Las señales eléctricas, tanto de tensión como de intensidad, se representan por su valor eficaz¹. Cuando el ingeniero eléctrico o el técnico electricista expresan que una tensión es de 230 V, se refieren siempre a su valor eficaz.

Se resumen, a continuación, los parámetros básicos utilizados en la representación de señales de tensión e intensidad. El objetivo de estos parámetros es poder realizar comparaciones entre las tensiones e intensidades generadas y demandadas por fuentes de alimentación y cargas eléctricas.

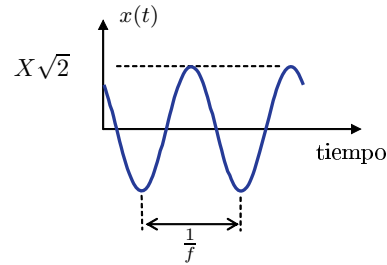


Figura 1.1. Representación instantánea de una señal sinusoidal.

Cuadro 1.1. Parámetros equivalentes de la señal en el dominio temporal.

Parámetro	Formulación
Valor medio x_{medio}	$x_{medio} = \frac{1}{T} \int_T x(t) dt$
Valor eficaz x_{rms}	$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T x^2(t) dt}$
Valor de pico x_p	$x_p = \max\{x(t)\}$
Valor pico a pico x_{pp}	$x_{pp} = \max\{x(t)\} - \min\{x(t)\}$
Factor de pico o cresta FC	$FC = \frac{x_p}{x_{rms}}$
Factor de forma FF	$FF = \frac{x_{rms}}{x_{medio}}$

1.3. Representación fasorial

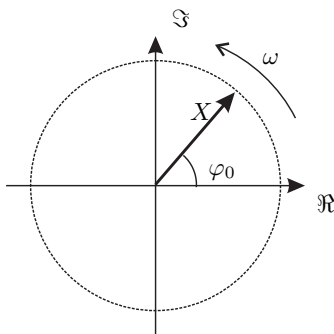


Figura 1.2. Representación fasorial de una señal sinusoidal.

De esta forma, para la señal representada por la ecuación (1.1) se obtiene la representación de la figura 1.2. Técnicamente, el fasor se representa únicamente por el vector de magnitud X y fase inicial $\varphi_0 = 0$, ya que la velocidad angular $\omega = 2\pi f$ se considera implícita en todos los vectores.

¹Se recuerda al lector que el valor eficaz U_{rms} de una señal sinusoidal es igual al valor de pico U_{pico} de la señal dividido por $\sqrt{2}$.

La utilización de la representación de señales sinusoidales en el dominio del tiempo presenta como inconveniente la necesidad de utilizar ecuaciones íntegro – diferenciales en el análisis de circuitos. Para poder simplificar el análisis, un ingeniero norteamericano de origen alemán llamado C. P. Steinmetz propuso una transformación fasorial de las ecuaciones en expresiones algebraicas que involucran el uso de números complejos. La idea básica que subyace bajo la representación fasorial consiste en considerar que la representación instantánea de una señal procede de la proyección de un vector giratorio sobre los ejes de un sistema de coordenadas cartesianas, también denominados ejes real e imaginario. La figura 1.2 muestra la representación del fasor de una señal genérica.

1.3.1. Representación fasorial de magnitudes que involucran elementos pasivos

Este apartado está dedicado a la aplicación de la notación presentada sobre elementos pasivos.

Resistencia

Una resistencia de valor R ohmios establece una relación de proporcionalidad entre la tensión y la intensidad según las expresiones siguientes:

En el dominio del tiempo

$$u(t) = Ri(t) \quad (1.2)$$

En el dominio de la frecuencia

$$\bar{U} = R\bar{I} \quad (1.3)$$

En la figura 1.3.a se representan las magnitudes puestas en juego en las expresiones anteriores.

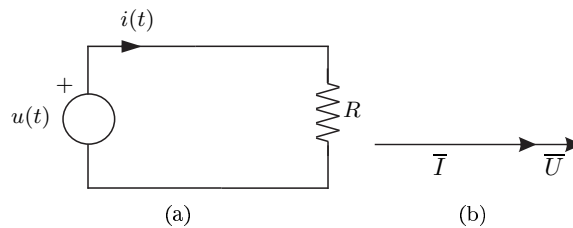


Figura 1.3. (a) Circuito resistivo simple; (b) Diagrama fasorial de tensión e intensidad de una R.

El diagrama fasorial de la relación entre tensión e intensidad se muestra en la figura 1.3.b, donde puede apreciarse que ambos fasores tienen la misma dirección y sentido.

Inductancia

Una inductancia de valor L henrios establece una relación de proporcionalidad entre la tensión y la intensidad según las expresiones siguientes:

En el dominio del tiempo

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (1.4)$$

En el dominio de la frecuencia

$$\bar{U} = j\omega L\bar{I} \quad (1.5)$$

En la figura 1.4.a se representan las magnitudes puestas en juego en las expresiones anteriores.

El diagrama fasorial de la relación entre tensión e intensidad se muestra en la figura 1.4.b, donde puede apreciarse que la intensidad está retrasada 90° respecto a la tensión.

Capacidad

Una capacidad de valor C faradios establece una relación entre la tensión y la intensidad según las expresiones siguientes:

En el dominio del tiempo

$$u(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (1.6)$$

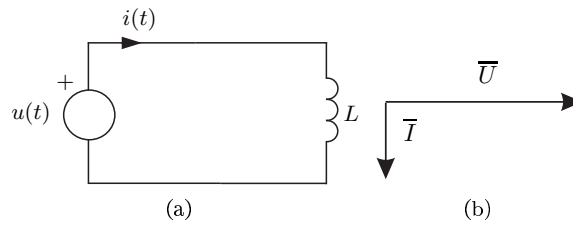


Figura 1.4. (a) Circuito inductivo simple; (b) Diagrama fasorial de tensión e intensidad de una L .

En el dominio de la frecuencia

$$\bar{U} = \frac{1}{j\omega C} \bar{I} \quad (1.7)$$

En la figura 1.5.a se representan las magnitudes puestas en juego en las expresiones anteriores.

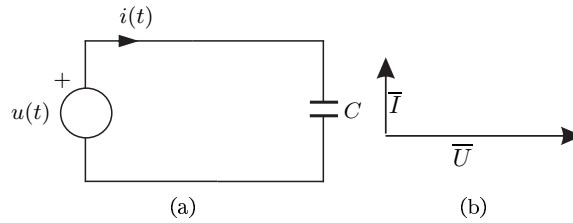


Figura 1.5. (a) Circuito capacitivo simple; (b) Diagrama fasorial de tensión e intensidad de un C .

El diagrama fasorial de la relación entre tensión e intensidad se muestra en la figura 1.5.b, donde puede apreciarse que la intensidad está adelantada 90° respecto a la tensión.



Un error típico al manejar fasores en corriente alterna consiste en realizar operaciones de suma, resta, etc, sin considerar su carácter vectorial. En general, no es posible sumar dos fasores sumando únicamente sus módulos. Lo mismo es aplicable a las operaciones resta, etc.

1.4. Potencias en corriente alterna sinusoidal monofásica

La expresión de las potencias puestas en juego en un circuito monofásico de corriente alterna sinusoidal monofásica puede ser expresada bien en el dominio del tiempo o mediante la representación fasorial de la tensión e intensidad puestas en juego.

En la figura 1.6.a se muestra el circuito eléctrico de una impedancia genérica de módulo Z y fase φ que va a utilizarse como impedancia genérica para el cálculo de las potencias puestas en juego.

Si suponemos el origen de fases para la tensión, las expresiones instantáneas de tensión e intensidad serán:

$$u(t) = \sqrt{2}U \cos(\omega t) \quad (1.8)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \varphi) \quad (1.9)$$

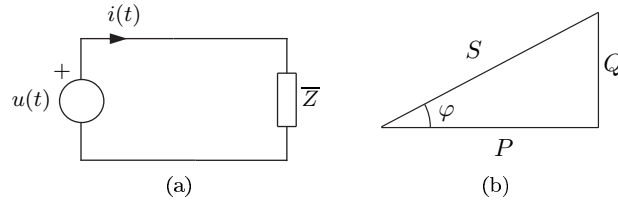


Figura 1.6. (a) Circuito genérico de impedancia \bar{Z} ; (b) Triángulo de potencias.

La potencia instantánea puede calcularse mediante el producto de tensión e intensidad ²,

$$\begin{aligned}
 p_i(t) &= u(t)i(t) = 2UI \cos(\omega t) \cos(\omega t - \varphi) = UI(\cos(2\omega t - \varphi) + \cos(\varphi)) \\
 &= UI(\cos(\varphi)\cos(2\omega t) + \sin(\varphi)\sin(2\omega t) + \cos(\varphi)) \\
 &= UI \cos(\varphi)(1 + \cos(2\omega t)) + UI \sin(\varphi) \sin(2\omega t) \\
 &= P(1 + \cos(2\omega t)) + Q(\sin(2\omega t))
 \end{aligned} \tag{1.10}$$

donde,

$$\begin{array}{ll}
 P(1 + \cos(2\omega t)) & \text{Potencia activa instantánea.} \\
 Q \sin(2\omega t) & \text{Potencia reactiva instantánea.}
 \end{array}$$

siendo P y Q los valores medios de potencia activa y reactiva,

$$P = UI \cos(\varphi) \tag{1.11}$$

$$Q = UI \sin(\varphi) \tag{1.12}$$

La potencia activa se expresa en vatios [W], mientras que la potencia reactiva lo hace en “voltiamperios reactivos” [var]. A partir de las potencias activas y reactivas es posible obtener la potencia aparente S , que se expresa en “voltiamperios” [VA]

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{1.13}$$

En algunas ocasiones resulta práctico construir el triángulo de potencias, definido por un triángulo rectángulo de base P , altura Q e hipotenusa S .

Las diferentes componentes de potencia pueden ser calculadas también a partir de la representación fasorial de tensiones e intensidades. La potencia aparente compleja puede obtenerse como el producto del fasor de tensión por el fasor de intensidad conjugado. Si se considera el fasor de tensión como referencia, esto es, con fase cero, la intensidad tendrá un retraso φ ($I_{\angle -\varphi}$).

$$\bar{S} = \bar{U} \bar{I}^* = U_{\angle 0} I_{\angle -\varphi} = UI_{\angle -\varphi} = UI \cos(\varphi) + jUI \sin(\varphi) = P + jQ \tag{1.14}$$

Con el convenio de signos utilizado en las figuras 1.3, 1.4 y 1.5, las potencias puestas en juego por los diferentes elementos pasivos se resumen en la tabla 1.2.

La medida de potencia se realiza mediante el vatímetro, que representaremos eléctricamente mediante el símbolo que se muestra en la figura 1.7, donde los asteriscos (*) definen los puntos que se consideran como referencia positiva para las tensiones y entrada de la intensidad.

² $\cos\alpha\cos\beta = \frac{1}{2}(\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta))$
 $\cos(\alpha - \beta) = \cos\alpha\cos\beta + \sin\alpha\sin\beta$

Cuadro 1.2. Potencias puestas en juego por los elementos pasivos.

Elemento	Potencia	Descripción
R	$\bar{S} = \bar{U} \bar{I}^* = U_{\angle 0^\circ} I_{\angle 0^\circ} = UI_{\angle 0^\circ} \Rightarrow$ $P = UI; Q = 0$	Consume potencia activa. No consume ni genera potencia reactiva.
L	$\bar{S} = \bar{U} \bar{I}^* = U_{\angle 0^\circ} I_{\angle 90^\circ} = UI_{\angle 90^\circ} \Rightarrow$ $P = 0; Q = UI$	No consume potencia activa. Consume potencia reactiva.
C	$\bar{S} = \bar{U} \bar{I}^* = U_{\angle 0^\circ} I_{\angle -90^\circ} = UI_{\angle -90^\circ} \Rightarrow$ $P = 0; Q = -UI$	No consume potencia activa. Genera potencia reactiva.

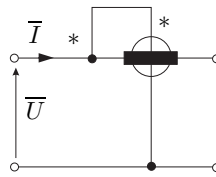


Figura 1.7. Símbolo utilizado para representar el vatímetro.

1.5. Teorema de Boucherot

Dado un sistema del que se conocen las potencias activa y reactiva puestas en juego por los elementos que lo forman, se cumple que:

- i) La potencia activa total puesta en juego es igual a la suma de las potencias activas de los elementos que forman el sistema.
- ii) La potencia reactiva total puesta en juego es igual a la suma de las potencias reactivas de los elementos que forman el sistema.

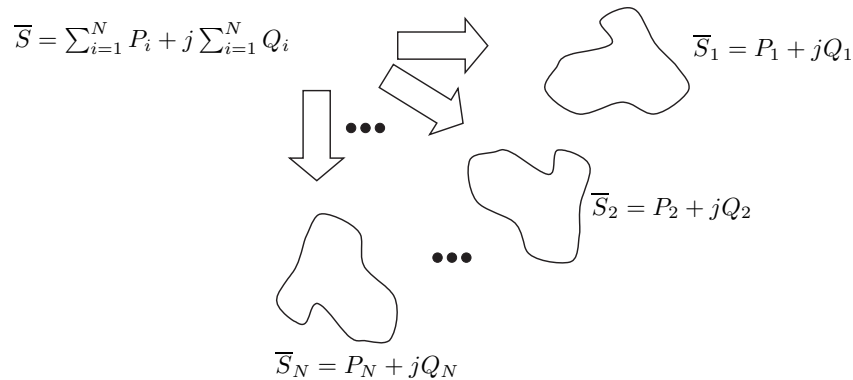


Figura 1.8. Representación gráfica del teorema de Boucherot.

La figura 1.8 resume dicho teorema. Como puede observarse en la figura, la potencia activa total aportada a todo el sistema es igual a la suma de todas las potencias activas puestas en juego por los diferentes subsistemas del conjunto. Lo mismo sucede con la potencia reactiva.

Ejemplo 1.1

Del circuito de la figura 1.5 se sabe que las resistencias R_1 y R_2 disipan una potencia de 100 y 200 W respectivamente. La inductancia L consume 50 var mientras que el condensador presenta un consumo de potencia de -50 var. Se pide: Determinar las potencias activa y reactiva puestas en juego por el generador que alimenta al circuito.

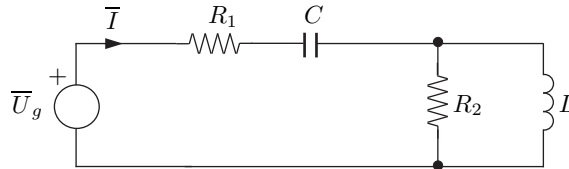


Figura 1.9. Ejemplo de aplicación del teorema de Boucherot.

Solución: Aplicando el teorema de Boucherot, es posible obtener la potencia activa generada como: $P = 100 + 200 = 300$ W, $Q = 50 - 50 = 0$ var y $S = \sqrt{300^2 + 0^2} = 300$ VA.



Un error típico consiste en aplicar el teorema de Boucherot a los módulos de las potencias aparentes. No se verifica en general que el módulo de la potencia aparente total sea igual a la suma de los módulos de las potencias aparentes de los diferentes elementos del circuito.

1.6. Factor de potencia

Se define el factor de potencia (FP) de un circuito como el cociente entre las potencia activa y aparente consumidas. También se conoce al factor de potencia como $\cos \varphi$, ya que coincide con el coseno del ángulo que forma la hipotenusa del triángulo de potencias con la base, esto es,

$$FP = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1.15)$$

Cuando la potencia reactiva consumida es positiva, se dice que el FP es inductivo (i). En el caso de que la potencia reactiva consumida sea negativa, se dice entonces que el FP es capacitivo (c).

En general, las instalaciones eléctricas tiene como objetivo que el FP sea igual a la unidad, lo que significa que no exista consumo de potencia reactiva por parte del sistema. En el caso de España, la ley establece una penalización en la factura eléctrica para aquellos usuarios con un bajo factor de potencia.

Ejemplo 1.2

De un circuito eléctrico pasivo se sabe que consume 100 W de potencia activa y 50 var de potencia reactiva. Obtener el valor del FP .

Solución: El factor de potencia FP será $FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{100}{\sqrt{100^2 + 50^2}} = 0,89$

1.7. Mejora del factor de potencia

La mejora del factor de potencia de un circuito o instalación, consiste en añadir inductancias o capacidades de forma que se disminuya el consumo total de energía reactiva, para conseguir que el FP aumente.

En la figura 1.10 se muestra el caso general de un circuito con FP inductivo en el que la mejora del factor de potencia se realiza conectando condensadores. Supóngase que el circuito de la figura 1.10 tiene el interruptor S_1 abierto.

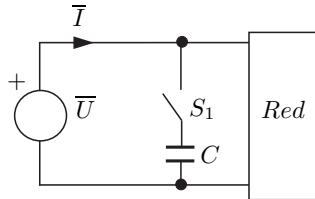


Figura 1.10. Corrección del FP en un circuito inductivo.

En dicha situación, la red presenta un consumo de potencia activa P y reactiva Q , de forma que el factor de potencia es:

$$FP_{S_1,abierto} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1.16)$$

Si se cierra el interruptor S_1 , el condensador C modifica el consumo de potencia reactiva en un valor Q_C . Dado que el circuito original presenta un $Q > 0$ y el condensador tiene un $Q_C < 0$, el FP final será

$$FP_{S_1,cerrado} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q + Q_C)^2}} \quad (1.17)$$

El valor del condensador Q'_C necesario para mejorar el FP hasta un valor FP' será,

$$FP' = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q + Q'_C)^2}} \quad (1.18)$$

de donde despejando Q'_C

$$Q'_C = P \sqrt{\frac{1}{FP'^2} - 1} - Q \quad (1.19)$$

Ejemplo 1.3

Una instalación eléctrica monofásica de 230 V, 50 Hz, presenta un consumo de potencia activa y reactiva de 1 kW y 100 var respectivamente. Calcular el valor del condensador C que habría que conectar para conseguir un factor de potencia unidad.

Solución: Sabiendo que: $P = 1000$ W, $Q = 100$ var, $\omega = 2\pi f = 2\pi 50$ rd/s, $U = 230$

V y $FP' = 1$, el valor del condensador $C = \frac{100 - 1000 \sqrt{\frac{1}{1^2} - 1}}{2\pi 50 \cdot 230^2} = 6 \mu F$

1.8. Energía

En el mundo eléctrico tanto los equipos como las instalaciones se representan por su potencia nominal. Esto es debido a que una vez definida la tensión de alimentación, el dimensionamiento de conductores y aparataje (interruptores, protecciones, cuadros, etc.) de las instalaciones se realiza en base a la potencia que deben manipular. Resulta habitual, por tanto, que tanto técnicos como usuarios caractericen los equipos que conectan a la red por la potencia que éstos consumen. Desde el punto de vista de las compañías eléctricas, sin embargo, la potencia contratada por los usuarios para sus instalaciones proporciona una idea de la disponibilidad para conectar dicha potencia en un determinado instante. Supóngase, como ejemplo, un usuario que tiene contratada una potencia de 4,4 kW en su vivienda. El contrato entre éste y la compañía eléctrica de distribución de electricidad establece que dicho usuario podrá conectar como máximo una potencia igual a 4,4 kW. Si se conectan equipos cuya potencia suma más de 4,4 kW, el interruptor de control de potencia desconectará la alimentación. Sin embargo, es posible que durante determinados intervalos de tiempo el usuario no conecte ningún equipo, por lo que la demanda de potencia sería nula. Se hace necesario, por tanto, establecer algún tipo de métrica que permita caracterizar el consumo de un usuario en base al tiempo durante el cual consume una determinada potencia. Dicha métrica no es otra cosa que la energía consumida. Se define la energía consumida en un intervalo T_E como la integral de la potencia instantánea durante dicho intervalo T_E .

$$E_{ACTIVA} = \int_T P(t) dt \quad (1.20)$$

La unidad eléctrica de la energía activa es el Wh (“vatio hora”), con sus múltiplos correspondientes: kWh (“kilo vatio hora”) y MWh (“mega vatio hora”). De forma similar, la potencia reactiva se calcula según la expresión,

$$E_{REACTIVA} = \int_T Q(t) dt \quad (1.21)$$

La unidad eléctrica de la energía reactiva es el varh (“volti amperio reactivo hora”), con sus múltiplos correspondientes: kvarh (“kilo voltio amperio reactivo hora” o también “kilo var hora”) y Mvarh (“mega voltio amperio reactivo hora” o también “mega vares hora”). Un símil hidráulico de los parámetros potencia y energía es el siguiente: Si una tubería de agua alimenta un depósito, la potencia sería equivalente al caudal que circula por la tubería en un determinado instante. La energía consumida en un intervalo T_E sería equivalente al volumen de agua almacenado en el depósito durante dicho intervalo T_E .

En términos geométricos, la energía puede entenderse también como el área bajo la curva definida por la potencia instantánea. En el apartado siguiente dedicado a introducir las tarifas eléctricas se incide de nuevo en la diferencia entre potencia y energía.

1.9. Introducción a las tarifas

Al igual que sucede con la telefonía, la energía eléctrica presenta unos costes para el usuario que dependen de varios factores, entre los que destacan la potencia eléctrica contratada y la energía consumida.

La disposición transitoria segunda de la Ley 17/2007, de 4 de julio, que modificó la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, para adaptarla a lo dispuesto en la Directiva 2003/54/CE, de 26 de junio de 2003 sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad, determina que el Ministro de Industria, Turismo y Comercio establecerá el mecanismo de traspaso de clientes del sistema a tarifa al sistema de tarifa de último recurso que les corresponda. El Real Decreto 485/2009, de 3 de abril, por el que se regula la puesta

en marcha del suministro de último recurso en el sector de la energía eléctrica, determina qué comercializadores asumirán la obligación de suministro de último recurso, de acuerdo con la habilitación del artículo 9 y de la citada Ley 54/1997, de 27 de noviembre. A partir de la entrada en vigor del citado Real Decreto 485/2009, de 3 de abril, los distribuidores informarán a los consumidores acerca de la nueva situación, facilitándoles el acceso a las distintas empresas comercializadoras disponibles. Deberán, asimismo, indicar aquéllas que asumirán el suministro de último recurso y que, por tanto, no solamente estarán obligadas a suministrar a todos los consumidores que, según la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, tengan derecho a ello, sino que además, deberán hacerlo a un precio máximo fijado por el Ministerio. En esta orden, se regula, de acuerdo con lo establecido en la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, el mecanismo de traspaso de clientes manteniendo el sistema actualmente vigente de suministro regulado por parte de los distribuidores hasta el día 1 de julio de 2009, fecha a partir de la cual los comercializadores o, en su caso, los comercializadores de último recurso deben formalizar o adaptar los contratos al nuevo marco legal. Asimismo se establece la forma de facturación de los suministros a tarifa que en dicha fecha se encuentren pendientes de facturación de aquellos consumidores transferidos al comercializador de último recurso. Por su parte, el artículo 7 de dicho Real Decreto 485/2009, de 3 de abril, fija la metodología de cálculo y revisión de las tarifas de último recurso, disponiendo al respecto que el Ministro de Industria, Turismo y Comercio dictará las disposiciones necesarias para el establecimiento de estas tarifas de último recurso determinando su estructura de forma coherente con los peajes de acceso. A estos efectos el Ministro de Industria, Turismo y Comercio podrá revisar la estructura de los peajes de acceso de baja tensión para adaptarlas a las tarifas de último recurso y asegurar la aditividad de las mismas. A los expresados efectos, la Orden ITC/1659/2009, de 22 de junio, por la que se establece el mecanismo de traspaso de clientes del mercado a tarifa al suministro de último recurso de energía eléctrica y el procedimiento de cálculo y estructura de las tarifas de último recurso de energía eléctrica desarrolla las previsiones del citado artículo 7 del Real Decreto 485/2009, de 3 de abril, estableciendo la estructura de las tarifas de último recurso aplicables a los consumidores de baja tensión con potencia contratada hasta 10 kW, y sus peajes de acceso correspondientes. Se fija asimismo el procedimiento de cálculo del coste de producción de energía eléctrica que incluirán las tarifas de último recurso y los costes de comercialización que le corresponden a cada una de ellas, de tal forma que se respete el principio de aditividad que exige la norma, posibilitando su revisión de forma automática conforme establece el artículo 7.3 del Real Decreto 485/2009, de 3 de abril.

El objeto de la ITC/1659/2009, de 22 de junio, es ordenar el establecimiento del mecanismo de traspaso al suministro de último recurso de energía eléctrica de los clientes que tengan un contrato en vigor en el mercado a tarifa y que, por tanto, estén siendo suministrados por un distribuidor, regular el procedimiento de cálculo y estructura de las tarifas de último recurso en el sector eléctrico y la estructura de los peajes de acceso correspondientes. Esta orden será de aplicación a todos los sujetos del sistema eléctrico que intervengan en el suministro de último recurso y, en particular, a los comercializadores de último recurso y a los consumidores con derecho al suministro de último recurso. Son consumidores con derecho al suministro de último recurso aquellos conectados en baja tensión y con potencia contratada menor o igual a 10 kW. Asimismo la estructura de los peajes de acceso que se regula será de aplicación a todos comercializadores y consumidores en baja tensión con una potencia contratada menor o igual a 10 kW.

Es importante tener en cuenta que el sistema de suministro a tarifa por parte de las empresas distribuidoras vigente antes de la entrada en vigor de la Ley 17/2007, de 4 de julio, quedó extinguido el día 1 de julio de 2009, en todos sus términos. Los consumidores tienen derecho a formalizar el contrato de suministro con un comercializador sea o no de último recurso. Aquellos consumidores no hubieran procedido a formalizar un contrato de suministro con una comercializadora, automáticamente se entenderá que consienten en obligarse con el comercializador de último recurso que les corresponda de acuerdo con lo establecido en el artículo 4 del Real Decreto 485/2009, de 3 de abril, subrogándose el comercializador de último recurso en la obligación de suministro con los mismos parámetros técnicos y datos del anterior contrato de suministro a tarifa con el distribuidor. A estos efectos las empresas distribuidoras tenían la obligación de

comunicar antes del 1 de julio de 2009 todos los datos de los contratos a tarifa.

1.9.1. Tarifa de último recurso y Precio voluntario para el pequeño consumidor (PVPC)

Estas tarifas serán de aplicación a los consumidores conectados en baja tensión y con potencia contratada menor o igual a 10 kW, que contraten el suministro con un comercializador de último recurso. Existirá un único tipo de tarifas de último recurso denominado Tarifa PVPC que se aplicará a los suministros efectuados a tensiones no superiores a 1 kV y con potencia contratada menor o igual a 10 kW. Opcionalmente, los consumidores acogidos a esta tarifa que dispongan del equipo de medida, podrán acogerse a la modalidad con discriminación horaria que diferencie dos o tres periodos tarifarios al día, periodos 1 y 2 o periodos 1, 2 y 3. La duración de cada período será la que se detalla en la tabla 1.3.

Cuadro 1.3. Periodos tarifarios 1-2 y 1-3.

Periodo tarifario	Duración
P1	10 horas/día
P2	14 horas/día
P1	10 (punta) horas/día
P2	8 (valle) horas/día
P3	6 (supervalle) horas/día

Se considerarán como horas del periodo tarifario en todas las zonas las mostradas en la tabla 1.4:

Cuadro 1.4. Horarios de los periodos tarifarios.

Periodos 1 y 2				Periodos 1, 2 y 3		
Invierno		Verano		Invierno y verano		
P1	P2	P1	P2	P1	P2	P3
12-22	0-12	13-23	0-13	13-23	7-13	1-7
	22-24		23-24		23-1	

Los cambios de horario de invierno a verano o viceversa coincidirán con la fecha del cambio oficial de hora. La duración de cada periodo y las horas concretas de aplicación serán las mismas que las de los correspondientes peajes.

Las tarifas de último recurso se componen de un término de facturación de potencia y un término de facturación de energía y, en su caso, un término por la facturación de la energía reactiva. La suma de los términos mencionados constituye, a todos los efectos, el precio de estas tarifas. En las cantidades resultantes de la aplicación de estas tarifas, de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 18.4 de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, no se incluyen los impuestos, recargos y gravámenes establecidos o que se establezcan tanto sobre el consumo y suministro que sean de cuenta del consumidor y de los que estén las empresas comercializadoras de último recurso encargadas de su recaudación, como sobre los alquileres de equipo de medida o control, los derechos de acometida, enganche y verificación, ni aquellos otros cuya repercusión sobre el usuario esté autorizada por la normativa vigente.

La orden establece que el término de energía se calculará para cada trimestre y periodo tarifario. En caso de que el periodo de aplicación de las tarifas de último recurso se fije por un periodo superior al trimestral, y siempre que dicho periodo sea un múltiplo de trimestres enteros, el coste estimado de la energía se calculará para cada trimestre y se obtendrá un coste medio ponderado.

La ponderación del coste estimado para cada trimestre se corresponderá con el peso relativo de la energía entregada en el mismo trimestre del año anterior sobre el total de la energía entregada en el conjunto de los trimestres del año anterior que se corresponda con el periodo de aplicación de las tarifas de último recurso. A efectos de calcular dichas ponderaciones, se considerará la energía total consumida por todos los consumidores con derecho al suministro de último recurso, con independencia de si fueron o no suministrados por comercializadores de último recurso.

El cálculo de la factura eléctrica F se realiza mediante el polinomio siguiente:

$$F = FPU + FEU \quad (1.22)$$

donde,

FPU Término de facturación de potencia.

FEU Término de facturación de energía.

El término de facturación de potencia será el producto de la potencia a facturar, Pot expresada en kW, por el precio del término de potencia de la tarifa de último recurso, TPU expresado en Euros/kW y año, de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$FPU = TPU \cdot Pot \quad (1.23)$$

La potencia a facturar (Pot) será la potencia contratada, en aquellos casos en que el control de potencia se realice con un interruptor de control de potencia. En los casos previstos en el artículo 8 del Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre en que el control de potencia se realice por medio de un máxímetro la potencia a facturar se calculará teniendo en cuenta lo siguiente:

1. Si la potencia máxima demandada registrada estuviere dentro del 85 al 105 % respecto a la contratada dicha potencia registrada será la potencia a facturar (Pot).
2. Si la potencia máxima demandada, registrada, fuere superior al 105 % de la potencia contratada, la potencia a facturar (Pot) será igual al valor registrado más el doble de la diferencia entre el valor registrado y el valor correspondiente al 105 % de la potencia contratada.
3. Si la potencia máxima demandada fuere inferior al 85 % de la potencia contratada, la potencia a facturar (Pot) será igual al 85 % de la citada potencia contratada.

El registro de una demanda de potencia superior a la solicitada en contrato, a efectos de acometida, autoriza a la empresa suministradora a facturar al cliente los derechos de acometida correspondientes a este exceso, cuyo valor quedará adscrito a la instalación. La facturación se realizará de forma proporcional al número de días del año incluidos en el período de facturación correspondiente. La potencia contratada será la máxima potencia prevista a demandar considerando todos los períodos tarifarios.

El término de facturación de energía activa será el sumatorio resultante de multiplicar la energía consumida en cada período tarifario por el precio término de energía correspondiente, de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$FEU = \sum_p (E_p \cdot TEU_p) \quad (1.24)$$

siendo:

E_p Energía consumida en el período tarifario p expresada en kWh.

TEU_p Precio del término de energía del período tarifario p , expresado en Euros/ kWh.

Las condiciones que se establecen para la facturación de la energía reactiva, así como las obligaciones en relación con el mismo, serán las fijadas para la tarifa 2.0.A en el Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre, por el que se establecen los peajes de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.

Las condiciones generales del contrato de tarifas de suministro de último recurso serán las establecidas para los contratos de suministro en el mercado libre, sin perjuicio de lo dispuesto a estos efectos en el artículo 5 del Real Decreto 485/2009, de 3 de abril, por el que se regula la puesta en marcha del suministro de último recurso en el sector de la energía eléctrica.

La Dirección General de Política Energética y Minas, de acuerdo con el artículo 7 del Real Decreto 485/2009, de 3 de abril, y lo establecido en el capítulo III de la ITC/1659/2009 al aprobar el coste de producción de energía eléctrica establecerá los precios de los términos de potencia y energía, activa y reactiva, a aplicar en cada tarifario de las diferentes tarifas.

1.9.2. Tarifas de referencia

La Orden IET/107/2014 de 31 de enero de 2014 revisa los peajes y las tarifas y primas de determinadas instalaciones a partir del 1 de abril de 2014.

Tarifas TUC sin bono social

La tabla 1.5 resume la tarifa PVPC sin discriminación horaria.

Cuadro 1.5. Tarifa PVPC sin discriminación horaria.

Tarifas de referencia para suministros de baja tensión hasta 10 kW con aplicación de TUR sin discriminación horaria	Término de potencia	Término de energía
	Tp: euros / kW día	Te: euros / kWh
Potencia < 10 kW, sin discriminación horaria (1)	0,115188	0,044027

La tabla 1.6 resume la tarifa PVPC con discriminación horaria.

Cuadro 1.6. Tarifa PVPC con discriminación horaria.

Tarifas de referencia para suministros de baja tensión hasta 10 kW con aplicación de TUR con discriminación horaria	Término de potencia	Término de energía P1	Término de energía P2	Término de energía P3
	Tp: euros / kW día	Te: euros / kWh	Te: euros / kWh	Te: euros / kWh
P1 y P2. Potencia < 10 kW	0,115188	0,062012	0,002215	–
P1, P2 y P3. Potencia < 10 kW	0,115188	0,062012	0,002878	0,000886

Tarifas TUC con bono social

Las tarifas de bono social se aplican a colectivos de los grupos siguientes:

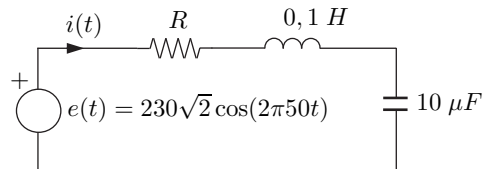
- Potencia inferior a 3 kW.
- Pensionistas.
- Familias numerosas.

- Desempleados que cumplan ciertos requisitos.

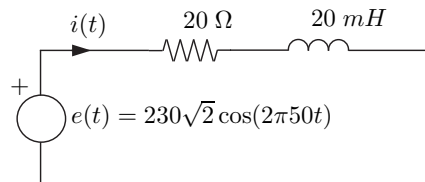
La aplicación del bono social se traduce en la aplicación de un descuento del 25 % sobre el PVPC que corresponda en cada caso.

1.10. Ejercicios

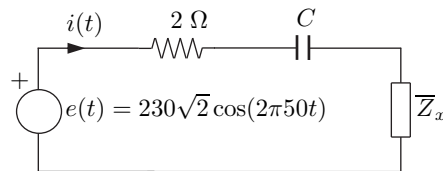
1. En el circuito de la figura, la corriente $i(t)$ está adelantada 45° respecto a la tensión $e(t)$ de la fuente. Determinar el valor de la resistencia R , así como el valor instantáneo de la tensión en cada uno de los elementos del circuito.



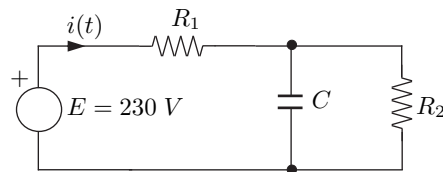
2. Determinar las potencias activa, reactiva y aparente puestas en juego por el generador del circuito siguiente.



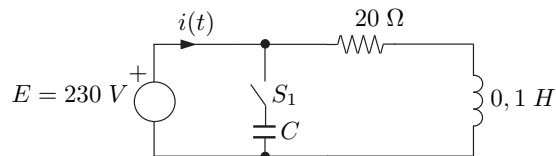
3. Del circuito de la figura se sabe que la impedancia \bar{Z}_x tiene un módulo de 10Ω y que consume 1500 W . La potencia activa suministrada por el generador es de 2000 W . Calcular: a) \bar{Z}_x ; b) Valor de condensador C . NOTA: \bar{Z}_x tiene un FP inductivo. La carga total vista por el generador presenta un FP capacitivo.



4. Obtener los fasores de tensión en R_1 y R_2 así como el de intensidad en C . Representar también el fasor de intensidad en el condensador C . NOTA: $R_1 = 10 \Omega$, $C = 1 \mu\text{F}$ y $R_2 = 10 \Omega$



5. Del circuito siguiente se pide: a) Calcular el FP de la carga vista por la fuente de tensión si el interruptor S_1 está abierto; b) Calcular el valor del condensador C para que al cerrar el interruptor S_1 el FP de todo el conjunto sea la unidad.



6. Una familia tiene un consumo medio diario de 238 W durante las 24 horas del día. La potencia contratada es de 5,5 kW y tienen un contrato de tarifa de último recurso sin bono social. Sabiendo que la familia tiene el contador alquilado a la compañía de distribución y considerando un periodo de facturación de 56 días, se pide: a) Término de potencia; b) Energía consumida y término de energía; c) Coste del impuesto sobre la electricidad; d) Coste del alquiler de los equipos; e) Importe total (impuestos incluidos)

1.11. Actividades

1. Buscar en el BOE la relación de tarifas básicas del periodo 2009 y representar la evolución de los términos de potencia y energía para una instalación con un consumo inferior a 10 kW, junto con el incremento del IPC anual.

1.12. Soluciones a los ejercicios

1. $R = 286,9 \Omega$, $u_R(t) = 230 \cos(2\pi 50t + 45^\circ)$, $u_L(t) = 25,1 \cos(2\pi 50t + 135^\circ)$ y $u_C(t) = 255,1 \cos(2\pi 50t - 45^\circ)$
2. $P_g = 2407,1 \text{ W}$, $Q_g = 756,3 \text{ var}$ y $S = 2523,4 \text{ VA}$
3. a) $\bar{Z}_x = 6 + j8 \equiv 10_{\angle 53,1^\circ}$; b) $C = 157,9 \mu F$
4. $\bar{U}_{R1} = 115_{\angle 0,09^\circ}$, $\bar{U}_{R2} = 114,99_{\angle -0,09^\circ}$ e $\bar{I}_C = 0,036_{\angle 89,91^\circ}$
5. a) $FP = 0,54 (i)$; b) $C = 72,1 \mu F$
6. a) $T_P = 16,96 \text{ €}$; b) $E = 320 \text{ kWh}$, $T_E = 36,71 \text{ €}$; c) *Impuesto electricidad* = 2,74 €; d) *Equipos medida* = 1,51 € e) *Total* = 67,19 €

Eléctrica de Santander		Teléfono de atención al cliente																																	
		902 xxx yyy																																	
		www.electricadesantander.com																																	
Datos del suministro		Pepito Pérez C/ Del Pino s/n Santander (Cantabria)																																	
CUPS: ES1234XYZ																																			
Dirección del suministro: C/ Del Pino s/n, Santander, Cantabria																																			
Número de contrato: 1234567890																																			
Tensión Suministro: BT < 1kV / =<15 kW																																			
Tarifa: TUR																																			
Potencia contratada: 5,5 kW		Resumen de consumo																																	
Tipo Equipo Medida: EL01CA		Consumos anteriores en kWh																																	
Actividad económica (CNAE): 95100 Vivienda habitual																																			
Datos del cliente y de la factura		Coste medio del periodo: 0,96 euros																																	
Titular: Pepito Pérez		Información ATR (peaje Distribuidora)																																	
CIF/NIF: 123456789X		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Concepto</th> <th>Unidad</th> <th>Precio</th> <th>Importe</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Energía (P1)</td> <td>0 kWh</td> <td>0,000000</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Energía (P2)</td> <td>320 kWh</td> <td>0,051940</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Potencia (P1)</td> <td>5,5 kW</td> <td>16,102425</td> <td>13,78</td> </tr> <tr> <td>Equipos medida</td> <td></td> <td></td> <td>1,51</td> </tr> <tr> <td>Base imponible</td> <td></td> <td></td> <td>31,91</td> </tr> <tr> <td>IVA</td> <td></td> <td></td> <td>5,11</td> </tr> <tr> <td>TOTAL ATR</td> <td></td> <td></td> <td>37,02</td> </tr> </tbody> </table>		Concepto	Unidad	Precio	Importe	Energía (P1)	0 kWh	0,000000		Energía (P2)	320 kWh	0,051940		Potencia (P1)	5,5 kW	16,102425	13,78	Equipos medida			1,51	Base imponible			31,91	IVA			5,11	TOTAL ATR			37,02
Concepto	Unidad	Precio	Importe																																
Energía (P1)	0 kWh	0,000000																																	
Energía (P2)	320 kWh	0,051940																																	
Potencia (P1)	5,5 kW	16,102425	13,78																																
Equipos medida			1,51																																
Base imponible			31,91																																
IVA			5,11																																
TOTAL ATR			37,02																																
Número de factura: V20050023		Tarifa ATR:2.0A según BOE 29/06/2009																																	
Ref.: 123456789		Información al Cliente																																	
Fecha de emisión: 8 de septiembre de 2009		Solicitud Bono Social																																	
Periodo de facturación: Del 08/07/2009 al 01/09/2009		Si Usted está dentro de los colectivos con derecho a solicitar Bono Social (percepción de pensiones mínimas, familia numerosa, o unidad familiar con todos sus miembros en situación de desempleo), tras recabar la documentación acreditativa del Organismo Competente, deberá hacerla llegar a Eléctrica de Santander Comercializadora de Último Recursos, por cualquiera de las siguientes vías informadas en esta factura. (Correo postal, correo electrónico, o entregándola en los puntos de atención al cliente).																																	
Datos de Pago		Atentamente,																																	
Caja o Banco: 0065(Banco del Pas)		Eléctrica de Santander CUR																																	
Sucursal: 0010		Apto. de Correos 9999, 39005 Santander																																	
D.C.: 55		bono_social @electricadesantander.com																																	
Cuenta Corriente: 543**** (Ocultos por seguridad)																																			
Importe: 67,19 €																																			
El importe de esta factura le será cargado en su cuenta a partir del 15/09/2009. Su pago se justifica con el correspondiente apunte bancario.																																			
Cuadro de Consumos																																			
Activa actual (Real)	01/09/2009	5.612																																	
Activa anterior (Real)	08/07/2009	-5.292																																	
		320																																	
Factor de multiplicación		x1																																	
Consumo del periodo		320 kWh																																	
Conceptos																																			
Concepto	Cálculos	Importes (€)																																	
Potencia	5,500 kW x 56 días x 20,102425 €/kW y año	16,96																																	
Consumo	320 kWh x 0,114730 €/kWh	36,71																																	
	Subtotal	53,67																																	
Impuesto eléctrico	53,67 x 1,05113 x 4,864 %	2,74																																	
Equipos de medida		1,51																																	
	Base imponible	57,92																																	
	IVA (16 %) de 57,92	9,27																																	
	Total de la factura (€)	67,19																																	
Total factura 67,19																																			
Eléctrica de Santander Comercializadora de Último Recurso, S.L. Inscrita en el Registro Mercantil de Cantabria. Tomo xxx, Folio yyy, Hoja S-XXXXX - NIF X1234567. Domicilio Social: Calle de la Energía nº 10 - 39005 Santander.																																			
		Teléfono Averías: 902 zzz www																																	

Figura 1.11. Ejemplo de una factura correspondiente a una tarifa de tipo TUR.