



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

ANÁLISIS DE MODELOS DE DISTRIBUCIÓN EN CORRIENTE CONTINUA A NIVEL DOMÉSTICO

Autor: Leopoldo Cabrera Azpilicueta

Director: Tomás Gómez San Román
Director: Pablo Frías Marín

Madrid
Julio 2014

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN ACCESO ABIERTO DE DOCUMENTACIÓN

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Leopoldo Cabrera Azpilicueta, como alumno de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS (COMILLAS), **DECLARA**

que es el titular de los derechos de propiedad intelectual, objeto de la presente cesión, en relación con la obra Análisis de modelos de distribución en corriente continua a nivel doméstico (proyecto fin de carrera), que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual como titular único o cotitular de la obra.

En caso de ser cotitular, el autor (firmante) declara asimismo que cuenta con el consentimiento de los restantes titulares para hacer la presente cesión. En caso de previa cesión a terceros de derechos de explotación de la obra, el autor declara que tiene la oportuna autorización de dichos titulares de derechos a los fines de esta cesión o bien que retiene la facultad de ceder estos derechos en la forma prevista en la presente cesión y así lo acredita.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad y hacer posible su utilización de *forma libre y gratuita (con las limitaciones que más adelante se detallan)* por todos los usuarios del repositorio y del portal e-ciencia, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución, de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra (a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión.

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia, el repositorio institucional podrá:

(a) Transformarla para adaptarla a cualquier tecnología susceptible de incorporarla a internet; realizar adaptaciones para hacer posible la utilización de la obra en formatos electrónicos, así como incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección. 2

(b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato. .

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo abierto institucional, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.¹

1 En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría redactado en los siguientes términos:

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo institucional, accesible de modo restringido, en los términos previstos en el Reglamento del Repositorio Institucional

2 En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría eliminado.

(d) Distribuir copias electrónicas de la obra a los usuarios en un soporte digital. 2

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra que cede con carácter no exclusivo a la Universidad por medio de su registro en el Repositorio Institucional tiene derecho a:

a) A que la Universidad identifique claramente su nombre como el autor o propietario de los derechos del documento.

b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.

c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada. A tal fin deberá ponerse en contacto con el vicerrector/a de investigación (curiarte@rec.upcomillas.es).

d) Autorizar expresamente a COMILLAS para, en su caso, realizar los trámites necesarios para la obtención del ISBN.

d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor. 3

3

El autor se compromete a:

a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.

b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.

c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

a) Deberes del repositorio Institucional:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

a) Deberes del repositorio Institucional:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.

- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.

- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.

b) Derechos que se reserva el Repositorio institucional respecto de las obras en él registradas:

- retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 15 de Julio de 2014

ACEPTA


Fdo.....

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar la ocasión para agradecer a todas las personas que me han apoyado durante todo este tiempo.

Gracias a mis tutores de proyecto, por su grandísima paciencia, por su inestimable ayuda, por sus ganas de ayudar, y sobre todo por su trabajo, ya que, hasta incluso estando de viaje me han regalado su tiempo. Muchas gracias Tomás y Pablo.

En segundo lugar, debo dar gracias a mis padres, que siempre me han ayudado y me han apoyado, en los buenos momentos y en los malos, y por encima de todo han sido un ejemplo de esfuerzo, superación e integridad para mí, especialmente este semestre tan duro para ellos.

En tercer lugar debo mencionar a mi hermana, gracias Isa por tu paciencia, tus consejos, tu ayuda y tu exigencia. Debes saber que gracias a ti he conseguido acabar este proyecto con éxito y a tiempo.

También debó mencionar a mi primo Iñigo por su ayuda a la hora de hacer el proyecto y por su predisposición a ayudarme en cualquier situación sin pedir nada a cambio.

Una mención muy especial para mis amigos y compañeros de universidad, gracias por estar siempre ahí, para cualquier duda o problema siempre he podido contar con vosotros. Muchas gracias.

Por último, y no por ello menos importante, gracias también a mis amigos de toda la vida, al G9, Borja, Flores, Carlos, Javi, Edu, Juanki, Expo, Goyo y Mario, habéis sido como un islote que me ha ayudado a desconectar y a disfrutar toda la vida.

RESUMEN

Este proyecto estudiará las posibilidades de la distribución en corriente continua a nivel doméstico. Actualmente cada vez más consumos están basados en DC. En los últimos años se han desarrollado proyectos de distribución en corriente continua en viviendas, centros comerciales y, especialmente, en centros de datos.

En primer lugar se han analizado todos los equipos que pueden aparecer a nivel doméstico. La iluminación, los equipos de limpieza, los aparatos electrónicos, la refrigeración y algunos equipos destinados a la cocina serían más eficientes alimentados en corriente continua, mientras el resto de los equipos se podrían alimentar independientemente en corriente continua o en corriente alterna.

Además de todo esto, otros aparatos que están basados en corriente continua y que se utilizan a nivel doméstico están en expansión. Entre ellos destacan el coche eléctrico, los paneles fotovoltaicos y otras generaciones domésticas. Además las baterías eléctricas también funcionan exclusivamente en corriente continua.

Todo esto ha sido posible gracias al gran desarrollo de la electrónica de potencia. Los elementos principales son el rectificador, el transformador DC-DC y el inversor. Estos aparatos ya pueden trabajar con grandes potencias y con rendimientos superiores al 90%.

Para comparar los distintos métodos de distribución se ha simulado en Matlab el consumo de una vivienda. Todos los electrodomésticos de la casa a analizar tendrán la electrónica de potencia necesaria para alimentar los equipos.

El primer modelo de distribución a simular, distribución AC, es un modelo de distribución en corriente alterna. Para dimensionar las secciones de los conductores y la distribución de los circuitos se ha utilizado el Reglamento Español de Baja Tensión. Se analizarán las pérdidas por cableado y por la EP interna de los equipos.

El segundo modelo de distribución, distribución DC, se basará en el uso de corriente continua a un nivel de tensión de 326V y corriente alterna a 230V F-N. A la entrada de la vivienda se colocará un rectificador que transformará la corriente alterna en corriente continua a 326V y desde ahí se alimentarán todos los circuitos que tienen equipos que deben ser utilizados en corriente continua. Se analizarán las pérdidas en el cableado, en el rectificador central y en los transformadores DC-DC internos de los aparatos que necesitan trabajar a un nivel de tensión inferior.

El tercer modelo de distribución, distribución HVLV, se basará en el uso de corriente continua a dos niveles de tensión, un primer nivel de 326V que se conseguirá a partir de un rectificador central, un segundo nivel de 50V que alimentará los equipos electrónicos y un tercer nivel de corriente alterna a 230V F-N. Se estudiarán las pérdidas del rectificador y los transformadores.

De estos modelos el modelo de distribución más eficiente tanto a nivel energético como a nivel económico es el modelo DC.

ABSTRACT

The objective of this project is to study the possibilities of DC distribution in households. Nowadays the importance of DC based end-uses is emerging. In recent years some projects of DC distribution have been developed, specially in data centers.

First of all, a detailed analysis of the typical housewifely consumptions has been done. Illumination, cleaning machines, refrigeration and some cook devices would be more efficient with a DC distribution; meanwhile, the other end-uses would work independently in AC or DC.

Moreover than that, other devices that are based in DC and that are used in homes are in expansion. Within those devices PV panels, electric vehicles, must be highlighted. Besides, the electrical batteries work exclusively in DC.

All these have been possible because of the proliferation of power electronics. The most important power electronics are the rectifier, DC-DC transformers and inverters. Those devices can work with great powers and have improved dramatically their efficiency and nowadays have efficiencies up to 95%.

To compare different methods of distribution, the consumption of a household have been simulated in Matlab. All the end-uses of the house have the power electronics necessary to connect the devices to the network.

The first distribution model is the classical AC distribution. To calculate the area of the conductors the *Reglamento de Baja Tensión Español* has been used. The losses of cabling and of EP will be analysed.

The second distribution model, DC distribution, will be built on the use of direct current with a voltage level of 325V and a level of 230V F-N of alternating current. In the entry of the house a rectifier will be located. This rectifier will transform the alternating current from the network to direct current. The rectifier will feed all the circuits that have DC devices such as illumination or A.C. All the losses of cabling and EP will be studied.

The third distribution model, HVLV distribution, will be based in the use of DC current with two voltage levels. A first level of 326V from the rectifier and a second level, of 50V, that will be obtained by DC-DC transformers located strategically in the building. A third level of 230V F-N will be used to feed the appliances that do not need DC.

From those models, the most efficient and economical is DC distribution



Índice

ACRÓNIMOS	3
1 INTRODUCCIÓN	4
1.1 HISTORIA DE LA CORRIENTE CONTINUA	4
1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE SISTEMAS ENERGÉTICOS DC PARA USO DOMÉSTICO ...	5
1.2.1 PANELES FOTOVOLTAICOS	5
1.2.2 MAYORES OPORTUNIDADES DC	8
1.3 PRINCIPALES LUGARES DE APLICACIÓN DE DC	10
1.3.1 CENTROS DE DATOS.....	10
1.3.2 CENTROS COMERCIALES.....	11
1.3.3 ZONAS ALEJADAS DE LA RED Y VEHÍCULOS	11
1.3.4 VIVIENDAS	11
2 ANÁLISIS DEL CONSUMO DE CORRIENTE CONTINUA A NIVEL DOMÉSTICO	
12	
2.1 CONSUMOS DE VIVIENDA	12
2.1.1 ILUMINACIÓN	12
2.1.2 ELECTRODOMÉSTICOS DE LIMPIEZA	16
2.1.3 CONSUMOS DE COCINA.....	16
2.1.4 APARATOS ELECTRÓNICOS	17
2.1.5 REFRIGERACION.....	17
2.1.6 OTROS.....	18
2.1.7 COCHE ELECTRICO E HÍBRIDO.....	18
2.2 GENERACION ELÉCTRICA DOMÉSTICA	19
2.2.1 PANELES FOTOVOLTAICOS	19
2.2.2 MICROGENERACION EÓLICA	22
2.2.3 MICROCOGENERACIÓN	22
2.2.4 PILAS DE COMBUSTIBLE.....	23
2.2.5 MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	24
2.3 ELECTRÓNICA DE POTENCIA	25
2.3.1 DC-DC.....	25
2.3.2 AC-DC RECTIFICADOR	26
2.3.3 DC-AC INVERSOR	27
2.4 RESUMEN DE RESULTADOS	27
3 SIMULACION DE DISTINTAS REDES DE DISTRIBUCION DOMÉSTICAS ..	30
3.1 VARIABLE TIEMPO	31
3.2 ELECTRONICA DE POTENCIA	31
3.3 NIVELES DE TENSIÓN DC	34
3.4 SIMULACION DE CONSUMOS	35
3.4.1 MODELO 1. DISTRIBUCION AC.....	37
3.4.2 MODELO2. DISTRIBUCIÓN DC.....	43
3.4.3 MODELO3. DISTRIBUCION DC HVLV	48
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	54



4.1	ANÁLISIS DE EFICIENCIA	54
4.1.1	PÉRDIDAS DISTRIBUCION AC	54
4.1.2	PÉRDIDAS DISTRIBUCIÓN DC	56
4.1.3	PÉRDIDAS DISTRIBUCIÓN DC CON NIVELES DE TENSIÓN HV LV	59
4.1.4	CONCLUSIONES DE EFICIENCIA.....	62
4.2	ANÁLISIS ECONÓMICO	62
4.2.1	CONCLUSIONES.....	64
REFERENCIAS		65
ANEXO 1. ANÁLISIS ECONÓMICO		68
ANEXO 2. HERRAMIENTA SIMULINK		73



ACRÓNIMOS

DC corriente continua

AC corriente alterna

HV alta tensión (326V en corriente continua)

LV Baja tensión

EP electrónica de potencia

LFC/FCL lámpara fluorescente compacta

Distribución HVLV Método de distribución referido a un modelo con varios niveles de tensión tanto en corriente continua como en corriente alterna.

Distribución DC Método de distribución referido a un modelo con un nivel de alta tensión en DC y AC

Distribución AC Método de distribución en corriente alterna

A.C. Aire acondicionado

PV Panel fotovoltaico



1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este estudio es analizar la viabilidad y la eficiencia de añadir la corriente continua como red de distribución en viviendas. Este proyecto nace debido a que cada vez un mayor porcentaje del consumo de las casas está basado en tecnología puramente continua, y también a que lo más eficiente para la integración de las renovables es el uso de DC.

Actualmente el uso de corriente continua es prácticamente exclusivo de interconexiones internacionales, líneas largas de muy alta tensión o líneas subterráneas, sin embargo, poco a poco van apareciendo nuevos proyectos e incluso construcciones de baja tensión alimentadas con este tipo de corriente, especialmente centros de datos y grandes centros comerciales.

En este proyecto analizaremos el mercado y la eficiencia de los aparatos actualmente disponibles que usan DC a nivel doméstico y estudiaremos la mejor opción de distribución de energía eléctrica con corriente continua en el ámbito doméstico.

Con ese objetivo estudiaremos brevemente la historia y principales aplicaciones actuales de DC, posteriormente analizaremos la tendencia del mercado de consumos domésticos y finalmente realizaremos un caso de estudio y analizaremos los resultados de este.

1.1 HISTORIA DE LA CORRIENTE CONTINUA

En los inicios del uso de la energía eléctrica, en el siglo XIX, se dio uno de los episodios más importantes en la historia de la electricidad: La guerra de las corrientes. Al principio la energía eléctrica solo se usaba para telecomunicaciones, pero a finales de ese siglo se inventó la iluminación eléctrica (la lámpara de Edison 1881) y grandes motores eléctricos que sustituirían a los motores de vapor de la época, de esta manera la demanda de electricidad empezó a aumentar.

En esta tesitura surgieron dos grandes adversarios por un lado Thomas Edison y J.P Morgan defendían la corriente continua como método de distribuir la energía desde la generación hasta el consumo y, por otro lado George Westinghouse y Nicola Tesla la corriente alterna.

Finalmente, Tesla ganó la guerra debido a que en aquella época había tecnología para elevar la tensión de corriente alterna y así llevar la energía desde grandes plantas generadoras al consumo con muchas menos pérdidas de calor que con corriente continua. Desde entonces y hasta la actualidad, todo el sistema eléctrico está basado en la corriente alterna.

Sin embargo, actualmente nos encontramos cada vez más con tecnología basada en corriente continua, desde generación (Paneles fotovoltaicos, fuel cells, micro-hidráulica, eólica...) hasta consumo (luz, coche eléctrico, productos electrónicos...). Además hay nuevas



tecnologías que son capaces de elevar o disminuir tensiones en corriente continua lo que hace que la distribución de corriente continua no sea un problema a pequeña escala.

1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE SISTEMAS ENERGÉTICOS DC PARA USO DOMÉSTICO

En esta sección se describirán los aparatos más usados con tecnología de corriente continua y las formas más eficientes de adaptarlos a las viviendas.

1.2.1 **PANELES FOTOVOLTAICOS**

En primer lugar, analizaremos los paneles solares fotovoltaicos que generan electricidad en forma continua. Actualmente, en muchos lugares del mundo (Europa, USA, China...) este tipo de generación está aumentando su potencia instalada de manera exponencial (ver figura 1).

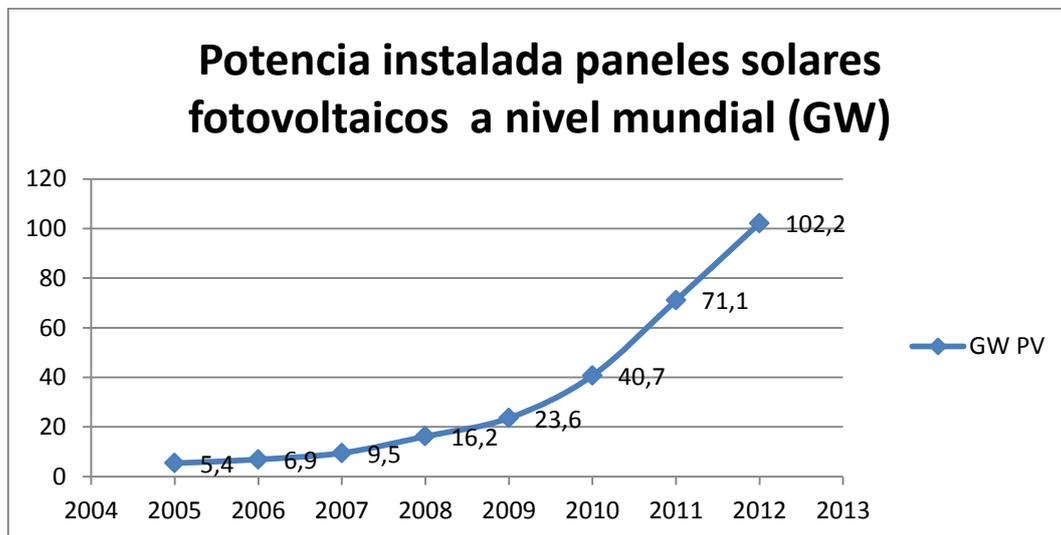


figura 1. Potencia fotovoltaica instalada en el mundo. [wikipedia.com]

Cabe destacar que los precios de los paneles fotovoltaicos han ido bajando de forma estable cada año en torno a un 5%, y han bajado de manera aún más pronunciada desde 2009 (figura 2). Además aunque aún no hay datos definitivos de 2013 el estudio de mercado realizado por el Lawrence Berkeley Laboratory "Tracking the sun" indican que el precio ha bajado 0.7\$/W (13%) para plantas menores de 10 kW, \$0.5/W (10%) para plantas 10-100 kW, y \$0.8/W (15%) para plantas mayores 100 kW (datos del Estado de California). Esto indica que los precios no solo mantienen su caída sino que incluso la agrandan.

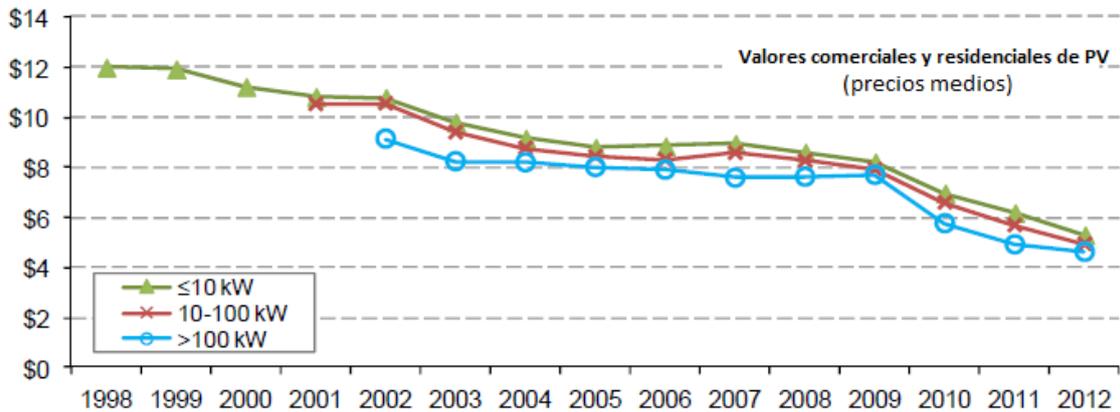


figura 2. Precios de paneles fotovoltaicos para uso residencial y comercial en USA. [Tracking the sun 2013] [epia.org]

Debido a que la mayor parte de la información es del mercado norteamericano, a partir de ahora analizaremos la expansión y uso de la energía fotovoltaica en este país y extenderemos los resultados a Europa.

De toda la potencia instalada el 93% está conectado directamente a la red a través de un inversor y solo un 5% se autoconsume en los lugares que se genera (figura 4). Además cabe destacar que la mayor parte de la generación de estos paneles actualmente es el generado en viviendas y en distritos comerciales, y solo en torno a un 20% es generado en grandes plantas de generación (figura 3).

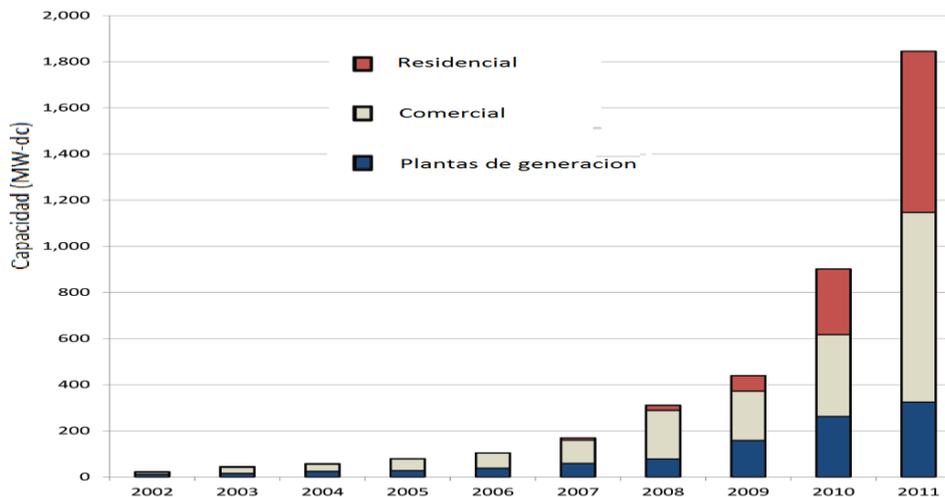


figura 3. Potencia instalada en zona residencial, comercial o plantas [IREC 2011]

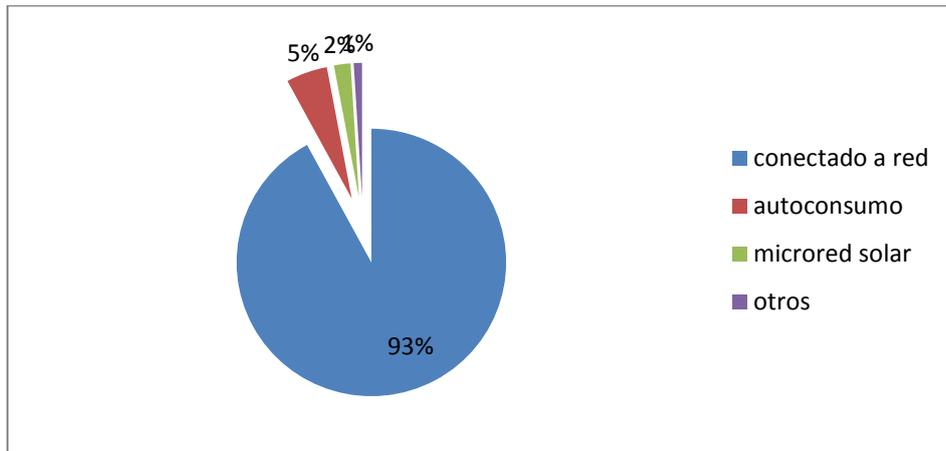


figura 4. Porcentaje de la energía solar según el modo de uso. Datos tomados de [IREC 2011]

Por tanto para poder llegar a consumir la energía fotovoltaica producida en los propios hogares debe pasar primero por un inversor a la red, posteriormente pasar de nuevo a la casa y finalmente es probable que de nuevo sea transformada a corriente continua para ser usada en un aparato de tecnología DC (figura 5),

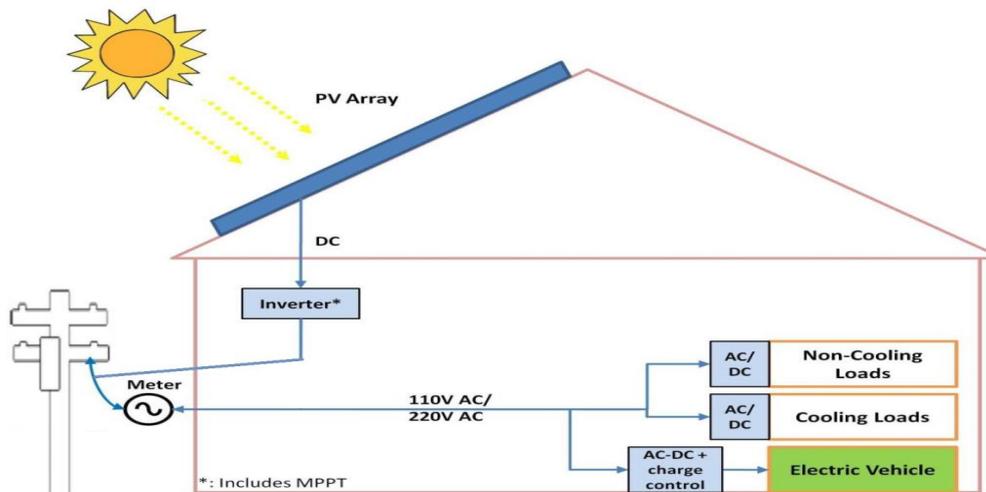


figura 5. Distribución actual de la energía eléctrica [DC report 2011]

Este proceso lógicamente no es el más eficiente y se puede llegar a perder más de un tercio de la energía generada por los paneles solares. Lo más eficiente para aprovechar e integrar este tipo de generación sería conectar directamente las cargas al punto de generación y alimentar los productos que utilizan energía continua figura (6),

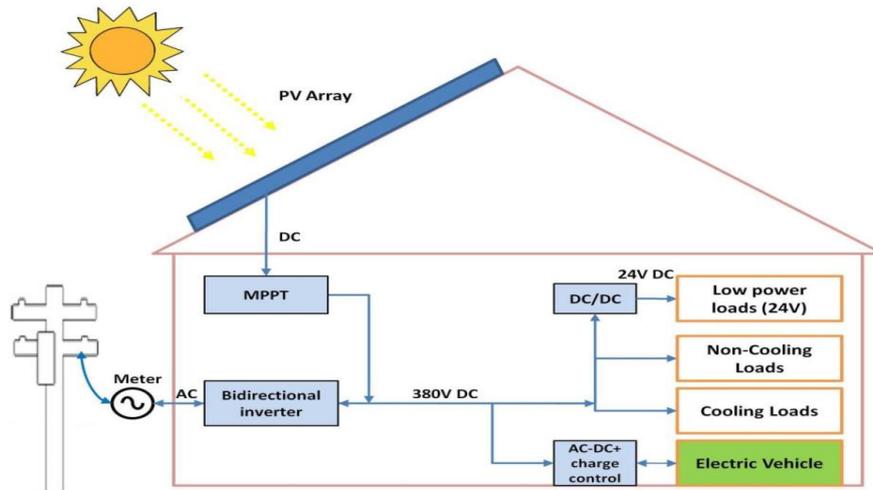


figura 6. Distribución eléctrica propuesta [DC report 2011]

Tal y como se ha comentado anteriormente, los paneles fotovoltaicos son una tecnología emergente que presentan una gran oportunidad para generar energía limpia y cercana al consumo. Además, se puede comprobar que actualmente la eficiencia de la energía generada por estos paneles mejoraría mucho si la distribución DC se instaurara.

1.2.2 MAYORES OPORTUNIDADES DC

Actualmente, los consumos que podrían ser más eficientes en un sistema de alimentación de corriente continua serían la iluminación, los sistemas de ventilación y de refrigeración de espacio, los aparatos electrónicos y el coche eléctrico.

Para hacernos una idea de las posibilidades de este tipo de distribución en viviendas, el consumo de aparatos con tecnología DC más eficiente es de un 65% del consumo actual en Estados Unidos y se estima que en 2035 sea de un 70%, tal y como se indica en la figura 7 y tabla posterior.

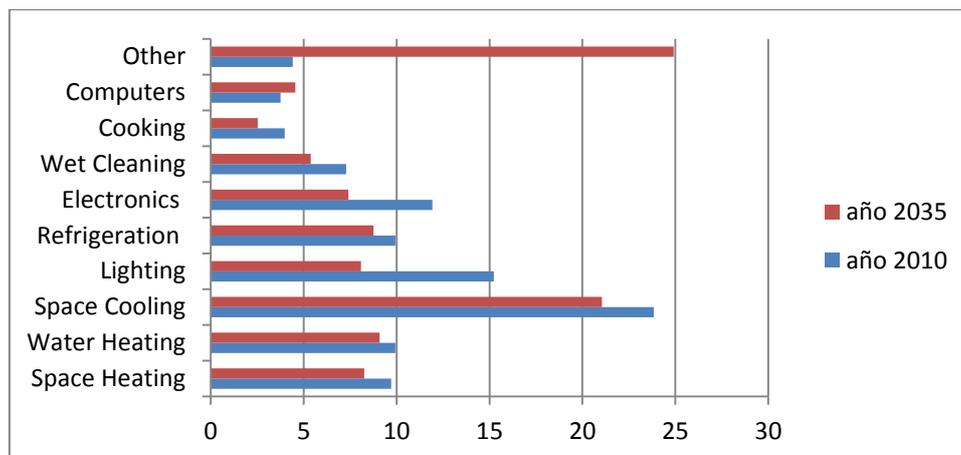


figura 7. Energía consumida doméstica según los fines de utilización [buildingsdatabook.com]



Uso	Consumo vivienda (%)	
	2010	2035
Enfriamiento espacio	23.82	21.04
Iluminación	15.23	8.08
Refrigeración	9.93	8.75
Electrónicos	11.9	7.4
Ordenadores	3.7	4.54
Otros(*)	0	20
TOTAL	64.67	69.83

(*)Vehículo eléctrico
[buidingsdatabook.com]

Además, cabe destacar que, teniendo en cuenta el consumo diario, el pico de consumo que se produce a nivel doméstico es sobre todo por el aumento de uso de los aparatos electrónicos y de iluminación. Por tanto, cualquier ahorro que se pueda producir en este sector es importante también a nivel de la eficiencia del sistema eléctrico en su conjunto de la red (figura 8).

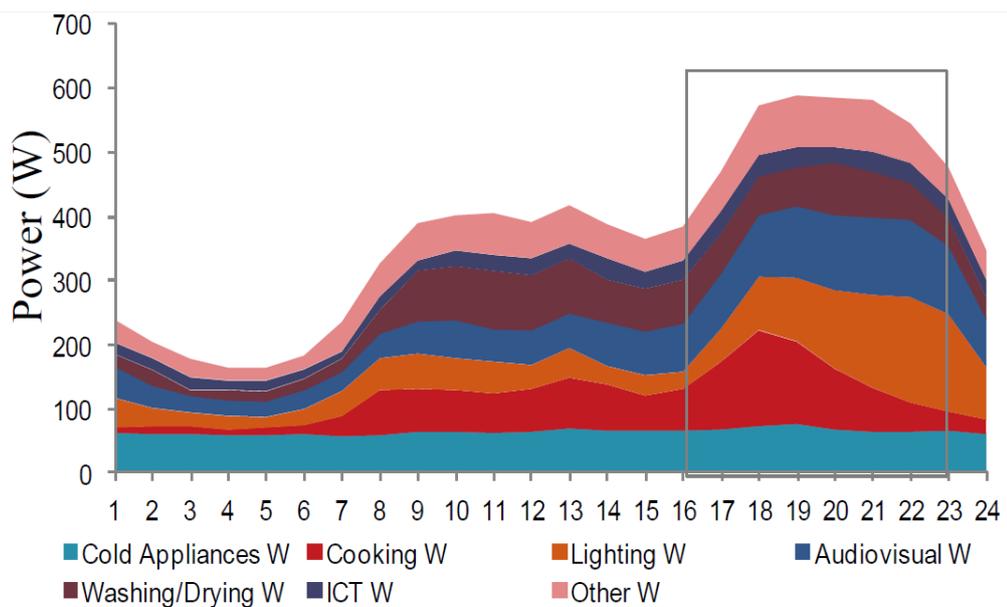


figura 8. Consumo doméstico medio en Inglaterra [Moixa 2013]

1.3 PRINCIPALES LUGARES DE APLICACIÓN DE DC

Actualmente los principales campos de instalación de corriente continua son los centros de datos y los centros comerciales. Emerge Alliance es una alianza de un conjunto de empresas (ABB, Philips, APP, Bosch, Emerson, entre otros) que está creando una serie de normas estándares y artículos para el uso de corriente continua. Actualmente, ha fijado la tensión de alimentación de continua de centros de datos a 380V y ha diseñado equipos específicos para estos. También está creando equipos y normas para el uso de corriente continua en zonas comerciales. A continuación pasaremos a explicar las principales aplicaciones de distribución en corriente continua.

1.3.1 CENTROS DE DATOS

Los centros de datos son los lugares en los que grandes empresas analizan, guardan y usan información importante. Este tipo de edificios normalmente consta de muchos elementos electrónicos (especialmente ordenadores fotocopiadoras, impresoras...) y, además, al manejar información importante, la gran mayoría de centros de datos tienen un sistema de alimentación externo a la red, normalmente basado en baterías para alimentar la oficina en caso de apagón. Por tanto, se trata de un tipo de edificación cuya carga es casi exclusivamente de consumo electrónico, de iluminación y ventilación y que suele usar baterías para proteger el sistema en caso de apagón, para lo cual es más eficiente distribuir energía con tecnología DC.

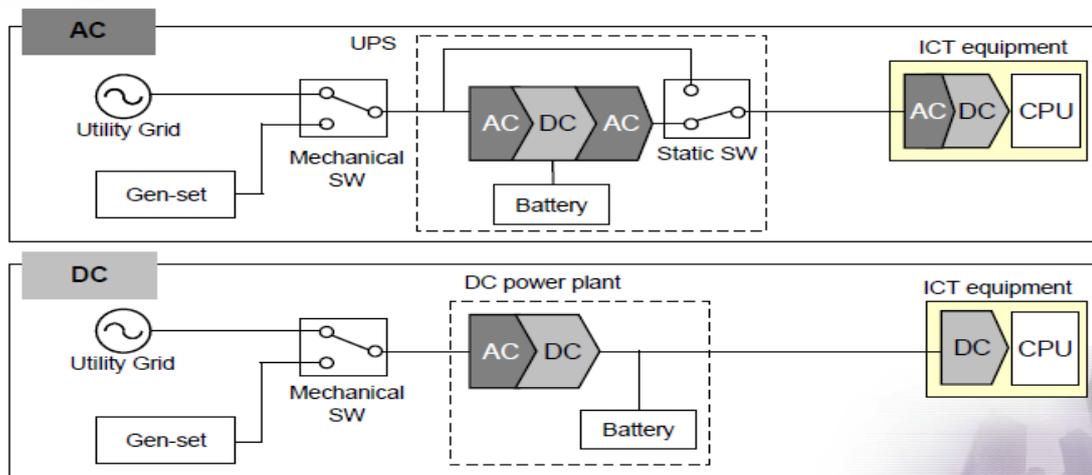


figura 9. Esquema de alimentación de centro de datos [NTT 2011]

Varios estudios estiman que con la instalación de centros de datos en corriente continua se podría aumentar hasta un 200% la fiabilidad y ahorrar un 33% de espacio, un 35% de en mantenimiento, un 15% en la inversión inicial y, además, el ahorro en de energía eléctrica se estima en un 10-30%. [STARLINE]



1.3.2 CENTROS COMERCIALES

Las principales cargas de centros comerciales son la iluminación y ventilación, cuya eficiencia es mayor en corriente continua. Además la hora punta de consumo coincide con las horas pico de generación de paneles fotovoltaicos. Esto, unido con que las leyes están promoviendo el uso de este tipo de energía en los centros comerciales (por ejemplo, en California hay una ley que exige que todos los centros comerciales sean ZNE en 2030, es decir, produzcan tanto o más energía de la que consuman), hace que este tipo de instalaciones sean propicias para la instalación de DC

1.3.3 ZONAS ALEJADAS DE LA RED Y VEHÍCULOS

En zonas alejadas de la red (zonas rurales, países subdesarrollados, campamentos militares...) o vehículos (coches, camiones, barcos, submarinos...) la corriente continua representa una gran oportunidad para su alimentación eléctrica, ya que el único medio de generación es básicamente paneles solares o *fuel cells*. De hecho, la mayoría de equipos que usan tecnología exclusivamente de corriente continua están pensados para vehículos o zonas sin red eléctrica.

1.3.4 VIVIENDAS

A medida que el mercado de aparatos en DC va aumentando en la gama de productos que se pueden utilizar en viviendas, la posibilidad de instaurar un sistema de distribución de corriente continua en viviendas aumenta. Esta posibilidad se hace cada vez más inminente conforme van apareciendo ejemplos reales de empresas que se dedican exclusivamente a diseñar aparatos o equipos en DC.



2 ANÁLISIS DEL CONSUMO DE CORRIENTE CONTINUA A NIVEL DOMÉSTICO

En esta sección se analizarán las principales oportunidades de mejorar la eficiencia al distribuir en DC en las viviendas, las compatibilidades de los distintos electrodomésticos con la corriente continua, así como la electrónica de potencia e integración y la compatibilidad de la generación distribuida.

2.1 CONSUMOS DE VIVIENDA

En este apartado se estudiarán las tendencias actuales del mercado de electrodomésticos y su compatibilidad con alimentación a corriente continua. Para ello se estudiará uno a uno los distintos tipos de electrodomésticos de una vivienda en función de la tecnología que usen y la función dentro de la casa.

Dichos electrodomésticos serán divididos en los siguientes grupos: iluminación, electrodomésticos de limpieza, consumos de cocina, refrigeración, electrónica y otros.

2.1.1 ILUMINACIÓN

Si bien actualmente hay disponibles distintos tipos de iluminación en el mercado, en este proyecto nos centraremos en las siguientes: iluminación incandescente, LFC, LED y fluorescentes.

2.1.1.1 ILUMINACIÓN INCANDESCENTE

Este tipo es el más usado históricamente y está basado en el calentamiento por efecto *joule* de un filamento metálico. Este filamento es calentado por una corriente eléctrica hasta que alcanza una temperatura en la que los electrones que atraviesan el filamento empiezan a emitir fotones luminosos. Dicho proceso se da independientemente del tipo de intensidad (AC o DC) que utilice. De hecho fue inventada por Edison y nativamente estaba basada en DC. En este grupo se incluye la iluminación halógena.

En el caso de estudio se asumirá que la eficiencia de este tipo de lámparas es el mismo en corriente continua que en corriente alterna.

2.1.1.2 LÁMPARAS FLUORESCENTES Y LFC

La iluminación fluorescente necesita para funcionar un balasto. En los fluorescentes convencionales el balasto es magnético, funciona con corriente alterna a 50 o 60 Hz y el tubo fluorescente necesita un cebador para encenderse. Actualmente, ha surgido un nuevo tipo de balasto, el balasto electrónico, que no necesita cebador y que consta de dos partes, una parte



que alimenta los filamentos del tubo a baja tensión para mantenerlos encendidos, y otra que genera tensiones con frecuencia muy altas (kHz) que ioniza los gases.

El balasto electrónico tiene grandes ventajas, entre las cuales destacamos , en primer lugar, que hace que el tubo se ionice instantáneamente, y así no hace falta esperar unos segundos a que se encienda como pasa con los balastos convencionales. Asimismo tiene una vida media notablemente mayor, se necesita menos espacio para generar los mismos lúmenes y además provoca que el parpadeo que caracteriza este tipo de luminaria sea mucho menor lo que evita los problemas que éste provoca a la salud (ataques de epilepsia, mareos, etc).

Los fluorescentes que usan este tipo de balasto se llaman LFC. Este balasto se basa en un rectificador, que transforma la corriente alterna de la red en corriente continua, y un inversor que alimentado a corriente continua genera corriente alterna de muy alta frecuencia. Llegados a este punto es interesante destacar que si alimentásemos los LFC con corriente continua nos ahorraríamos el rectificador.

Por tanto, las lámparas fluorescentes, aunque nativamente no son compatibles con la corriente continua, se ve una tendencia de mercado hacia fluorescentes con balastos electrónicos, que necesitan DC para funcionar.

El paso a corriente continua nos ahorraría el rectificador y el salto de tensión en los LFC.

2.1.1.3 LUMINARIAS LED

Las luminarias Led son nativas DC. De hecho uno de los grandes problemas que tiene este tipo de luminaria para introducirse al mercado es la adaptación de éstas a la red alterna, ya que su funcionamiento implica que para generar fotones luminosos la corriente debe atravesarlo siempre en la misma dirección y puede haber complicaciones si se producen tensiones en sentido contrario. Actualmente, se han desarrollado bombillas led que se pueden alimentar directamente de la red, pero, tal y como se puede comprobar a continuación las eficiencias de este tipo de bombillas es menor que las diseñadas exclusivamente para corriente continua.

2.1.1.4 COMPARACION EFICIENCIAS LUMINARIAS

Aunque actualmente el mercado de iluminación en corriente continua es mucho menor que el de corriente alterna, sí se pueden encontrar varios productos que tienen alimentación en corriente continua, especialmente leds y LFC, ya que son nativos DC y se alimentan de esta forma en vehículos o en circuitos de iluminación de emergencia.

En la siguiente tabla se indican los fabricantes o comerciantes de donde se ha sacado la información:



FABRICANTE	TIPO DE LUMINARIA	PAGINA WEB
Philips	LFC / LED/ fluorescente	Catalogo Philips
Vivion	CFL/LED/halógenas	Catalogo vivion
v-tac	LED	http://v-tac.co.uk/es/index.php/v-tac-e-catalog.html/
Steca	LFC	http://www.altestore.com
Otros	LED	http://www.miniinthebox.com/es/ns/dc-12v_v48700t0+dc-24v_v48701t0+dc-12-24v_v77995t0/3-5w_v78045t0/bombillas-led-para-

En primer lugar se representará la eficiencia en función de la potencia de luminarias led alimentadas en corriente alterna frente a corriente continua. En segundo lugar, se comparará la eficiencia de los fluorescentes frente a los LFC y, por último, la eficiencia de los halógenos.

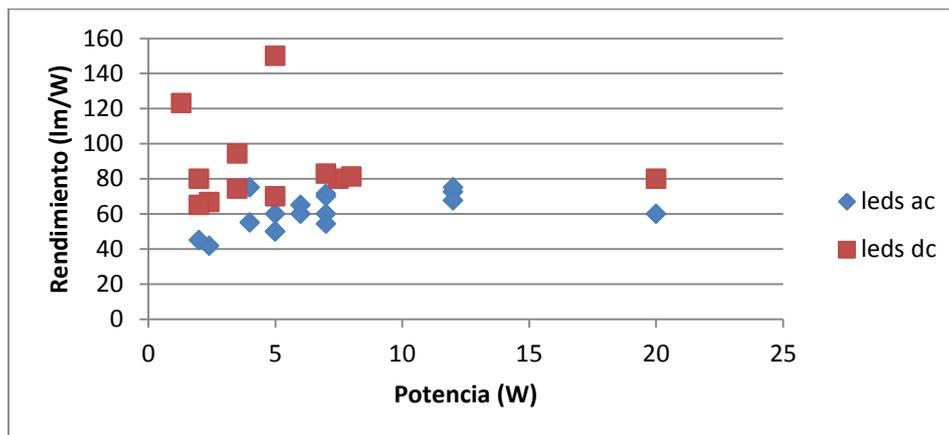


figura 10. Rendimiento de luminarias led en corriente alterna respecto a corriente continua

Aunque no se pueden sacar demasiadas conclusiones debido a que las lámparas de corriente continua se usan específicamente para vehículos o circuitos de emergencia y, además, el mercado de éstas es mucho menor y está mucho menos desarrollado, se puede observar que el rendimiento de los led alimentados exclusivamente a corriente continua es de media un 25% mayor que el de las de corriente alterna. Los precios por Vatio de las luminarias, a pesar de la eficiencia, son aproximadamente el mismo para cada potencia.

En el caso de estudio se tomará una eficiencia de 15% mayor con alimentación en DC para luminarias led, basándonos en el estudio de ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY: "Direct DC Power System for Efficiency and Renewable Energy Integration with a Residential and Small Commercial Focus" así como en el estudio de mercado realizado.



En la siguiente figura, como ya se ha señalado anteriormente, se representa la eficiencia de los CFL respecto a los tubos fluorescentes estándar.

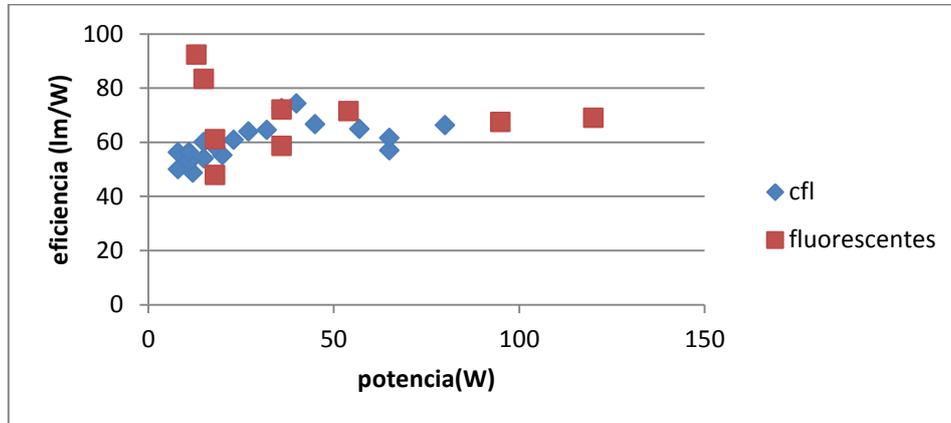


figura 11. Eficiencia de luminarias CFL respecto a fluorescentes convencionales

Como se puede observar, los fluorescentes estándares son ligeramente más eficientes que los CFL, especialmente los de potencias menores de 40W.

A pesar de esto, los CFL son más funcionales, ya que los fluorescentes tienen problemas a la hora de encender y apagar. De hecho su vida útil baja de forma muy notable en función del número de veces que se enciende y que se apaga. Tardan unos segundos en encenderse y son de un gran tamaño en comparación con cualquier otro tipo de iluminación. Por este motivo no se tendrá en cuenta la iluminación fluorescente a nivel doméstico.

Por último, se representan las eficiencias de las lámparas halógenas.

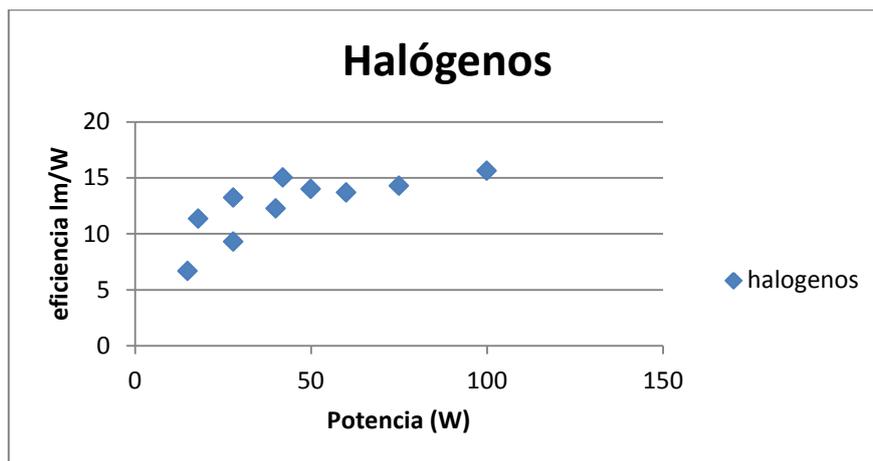


figura 12. Eficiencia de bombillas halógenas

Se puede observar que el rendimiento es muchísimo menor que cualquiera de las otras tecnologías. Además mientras que las demás tecnologías están desarrollándose y mejorando



su eficiencia año tras año, la eficiencia de la luminaria incandescente o halógena está muy estabilizada y apenas ha cambiado en los últimos años.

Este análisis no permite sacar conclusiones del todo fiables, ya que el mercado de iluminación de corriente continua es muy minoritario y está poco desarrollado. Además, las funciones de la iluminación de corriente continua son específicamente para vehículos o para luminarias de emergencia.

A pesar de esto y analizando el funcionamiento de cada luminaria se puede deducir que las luminarias led son más eficientes alimentadas a corriente continua que a corriente alterna.

Los LFC, aunque tienen peor eficiencia que los tubos fluorescentes convencionales, tienen más vida útil y son más funcionales, ya que se pueden encender y apagar sin acortar la vida útil de las mismas y además no producen problemas de salud.

Por último cabe destacar que las lámparas halógenas o incandescentes tienen un rendimiento varias veces inferior a cualquier otro tipo de luminaria.

2.1.2 ELECTRODOMÉSTICOS DE LIMPIEZA

En este grupo se incluyen la lavadora, lavadora-secadora y el lavavajillas. La actual tendencia del mercado de estos productos está orientada hacia la incorporación de reguladores de velocidad electrónicos y motores sin escobillas.

De esta forma, además de mejorar el rendimiento, se permite emitir menos ruidos y vibraciones, ya que se eliminan las escobillas que se utilizaban en los antiguos motores.

Estos electrodomésticos usan un rectificador para alimentar en corriente continua y un regulador electrónico de velocidad. Por esto, en caso de ser alimentados desde una fuente de corriente continua se ahorraría el rectificador.

Además, se considerará, dado que no hay una normalización en el nivel de tensión de los fabricantes, que cada fabricante alimentará su producto en una tensión específica, tal como ocurre con los aparatos electrónicos.

Actualmente se están introduciendo en el mercado este tipo de productos, y las principales compañías ya los tienen en catálogo. Ciertas compañías como Bosch o Siemens califican este tipo de productos como *eco-silence*.

2.1.3 CONSUMOS DE COCINA

En este conjunto se incluyen todos los aparatos relacionados con la actividad de la cocina y la manipulación de alimentos como por ejemplo, microondas, vitrocerámicas y hasta teteras y cafeteras.

- El horno, la tetera o la tostadora se basan en el calentamiento del espacio a través de una resistencia eléctrica.



- La cafetera, al igual que estos últimos, calienta el agua mediante una resistencia y luego la mezcla a través de un filtro con el café. De estos elementos se considerará que tienen igual eficiencia en corriente continua que en corriente alterna.
- El microondas: Estos aparatos se basan en el calentamiento a través de la vibración que se produce en las moléculas del agua al estar en contacto con ondas de muy alta frecuencia.
El elemento que produce estas ondas se denomina magnetrón y debe ser alimentado en corriente continua, por lo que los microondas utilizan un rectificador antes de alimentar al magnetrón. En el caso de utilizar corriente continua el rectificador no sería necesario.

2.1.4 APARATOS ELECTRÓNICOS

En este apartado se analizarán desde ordenadores hasta televisores y sistemas de audio.

Todos funcionan en corriente continua y todos necesitan un rectificador para funcionar. Son la oportunidad más obvia de ahorro en caso de alimentación en corriente continua.

2.1.5 REFRIGERACION

Los sistemas de refrigeración domésticos son principalmente los congeladores frigoríficos o aires acondicionados.

Actualmente se están comercializando refrigeradores de espacio con compresores de velocidad variables (tecnología inverter). Esta tecnología está basada en electrónica de potencia, a través de la cual un inversor alimenta el compresor a distintas frecuencias permitiendo al compresor trabajar a un 30% por encima de la potencia nominal y hasta un 20% por debajo. Esto permite, una vez alcanzada la temperatura de confort, mantenerla sin necesidad de apagar y encender el aire acondicionado, y así evitar los picos de consumo de arranque del compresor y los excesos de calor y de frío.

De acuerdo con la información de las distintas empresas que usan esta tecnología, el uso de compresores de velocidad variable permite ahorrar hasta un 40% de la energía con respecto a los refrigeradores más eficientes tradicionales.

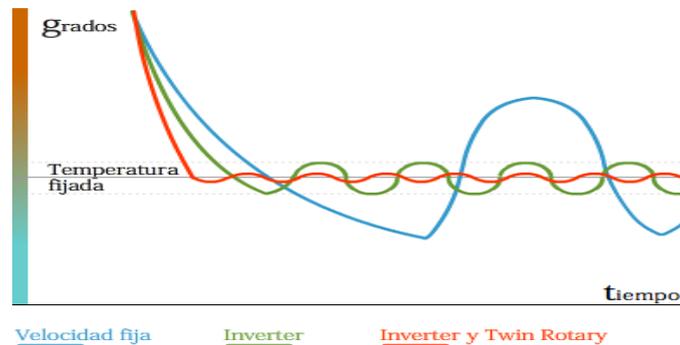


figura 13. Comparación refrigeración con tecnología inverter y sin ella. [Toshiba-aire.es]

2.1.6 OTROS

Este apartado incluye desde secadores de pelo, a bombas de acuarios y otros pequeños aparatos que usan motor. El motor que usan es el llamado motor universal, que funciona independientemente en corriente continua y en corriente alterna.

2.1.7 COCHE ELECTRICO E HÍBRIDO

El coche eléctrico está basado en el uso de baterías, las cuales solo funcionan en corriente continua.

Este tipo de vehículos tiene un gran potencial de mercado pero su desarrollo comercial se ve lastrado debido a que actualmente no hay suficientes puntos de carga para este tipo de vehículos. Por ello, se ha introducido en el mercado el coche híbrido, un tipo de vehículo que está basado tanto en el uso de baterías como en el motor de combustión.

El coche híbrido es uno de los equipos que más se vería beneficiado en caso de distribución en corriente continua y las proyecciones estiman la venta de estos vehículos aumente exponencialmente, tal como se puede comprobar en la figura 14.

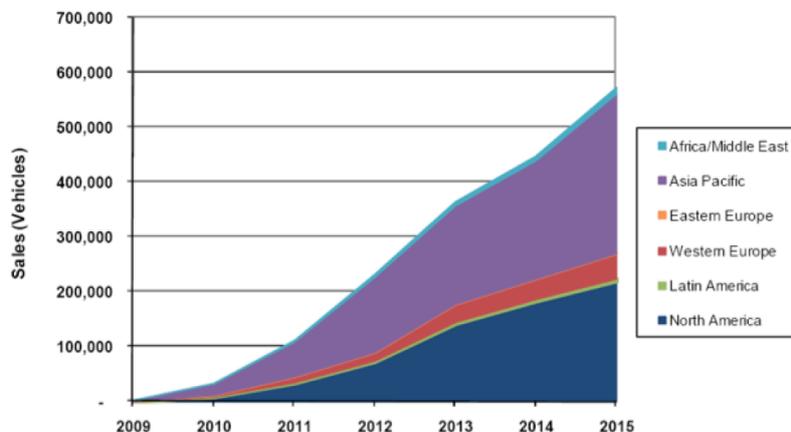


figura 14. Estimación de ventas de ventas de coches híbridos [Ornelas 2009]



2.2 GENERACION ELÉCTRICA DOMÉSTICA

Uno de los grandes retos actuales del sistema eléctrico es cómo aprovechar y manejar la generación en zonas de distribución. Este tipo de generación cada vez está más extendida y es más competitiva con respecto a los métodos de generación convencionales. Las principales técnicas de generación distribuida son los paneles fotovoltaicos, la microgeneración eólica, la microgeneración y las pilas de combustible. Este tipo de generación es claramente compatible con la corriente continua, ya que, además de generar en corriente continua, la generación está muy cerca de los consumos y la distribución a bajos niveles de tensión es más eficiente en DC. En este apartado se analizará individualmente cada una de estas tecnologías.

2.2.1 PANELES FOTOVOLTAICOS

Es una de las tecnologías más esperanzadoras y es la más competitiva de las energías renovables. En los últimos años el precio de los paneles solares ha disminuido extraordinariamente y la potencia instalada en el mundo ha aumentado exponencialmente. Los paneles fotovoltaicos generan en corriente continua y actualmente la energía generada se conecta a través de un inversor a la red y posteriormente se alimenta desde la red a los consumos de la casa. Dado que un gran porcentaje de éstos necesitan de rectificador, la eficiencia de la energía generada es mucho menor de lo deseable. Por esta razón, sería muy ventajosa para esta tecnología la instauración de distribución en DC.

2.2.1.1 CARACTERÍSTICAS ENERGIA FOTOVOLTAICA

En los últimos años esta tecnología se ha expandido de forma muy notable en todo el mundo debido, en parte, a la mayor competitividad de las celdas con respecto a los métodos de generación habituales, y a la expansión de los paneles fotovoltaicos en el mercado asiático o sudamericano. (figura1, figura 2).

Además, la gran mayoría de la potencia instalada está situada cerca de los lugares de consumo, es decir a nivel residencial o comercial, y no en grandes centrales de generación. Por esto, no es necesario elevar la tensión de la electricidad generada para transportarla al consumo, lo cual, a priori, debería permitir una mayor eficiencia a la hora de distribuir la energía.

A pesar de ello, la generación fotovoltaica representa un gran reto a la hora de adaptarla al sistema eléctrico actual, debido principalmente a:

- La incapacidad de previsión de energía generada, ya que, lógicamente, la generación de energía coincide con los momentos en los que hay sol.

Figure 5
Average Hourly Solar PV Generation Profile
(Texas, June-August period)

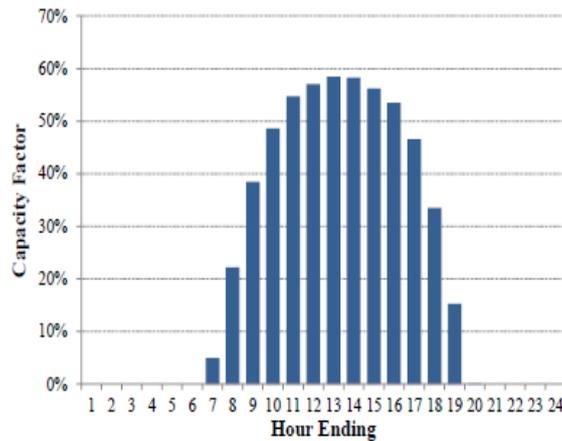


figura 15. Perfil de generación de panel fotovoltaico en un día. [seia.org]

Como se puede comprobar, las horas de mayor generación coinciden con la zona de mayor radiación solar. El gran problema es que resulta muy difícil de prever. Además el pico de generación es en la zona de mediodía, que no coincide con el pico de consumo de las zonas domésticas.

- Otro problema que provoca la generación en los puntos de consumo son las tensiones mayores en los puntos finales de distribución que en los iniciales y valores de tensión superiores a los permitidos por la legislación o los aparatos ya instalados.

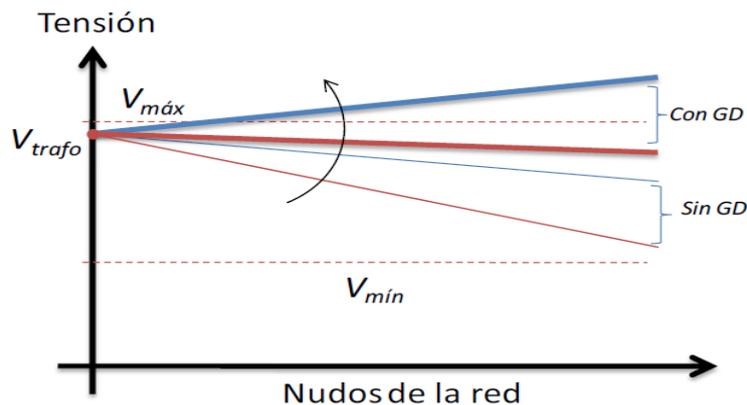


figura 16. Comparación de tensiones con y sin generación distribuida [upcomillas 2014]

- Además, los paneles fotovoltaicos necesitan electrónica de potencia para conectar la generación fotovoltaica a la red, ya que, en primer lugar, tal como se ha mencionado anteriormente, los paneles generan en corriente continua, lo que hace necesario instalar un inversor para conectarlos a la red, y mientras que los paneles solares tienen un precio aproximado de 1.2€/W hay que añadir 0.4€/W de inversor solar.
- Asimismo debido a que el panel fotovoltaico genera a distintas tensiones en función de la incidencia de los rayos solares, es necesaria la instalación de un controlador de tensión, lo que encarece aún más el precio.

Figure 5.1 Feeder Voltage at the Point of Interconnection of a Solar PV System

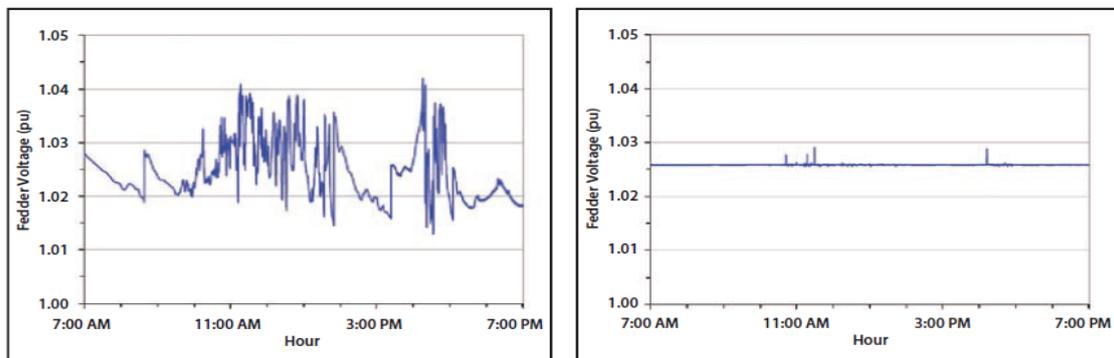


figura 17. Diferencias de salida de tensión con control electrónico y sin. [MIT 2011]

Respecto a la tensión y potencia media de los paneles instalados, aunque no está estandarizado, la gran mayoría de paneles solares en el mercado generan entre 150 y 250W y a una tensión de entre 30 y 50 V;

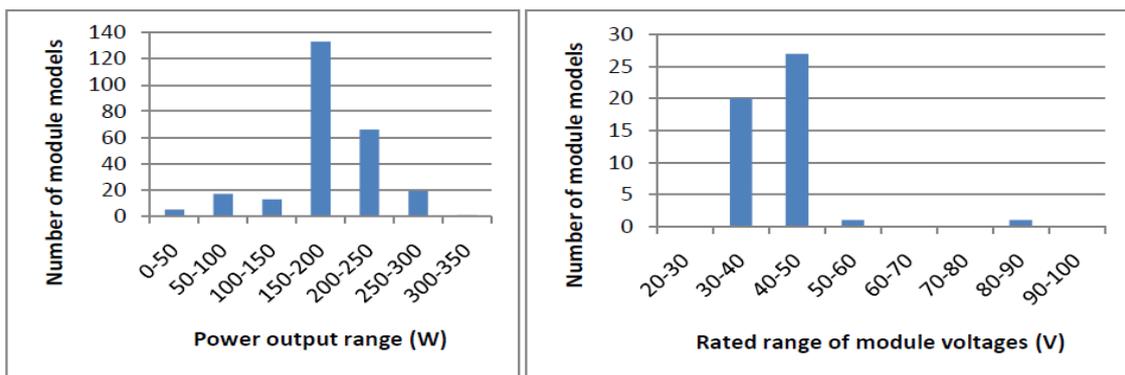


figura 18. Potencia y voltaje de modelos de paneles fotovoltaicos [DC report 2011]

La vida útil de estos los paneles es aproximadamente 35 años, y normalmente suelen constar de una garantía de 25, por lo que el coste de mantenimiento de estos equipos es muy bajo.



2.2.1.2 EFICIENCIA EN AC Y EFICIENCIA EN DC

Al generar los paneles solares en corriente continua, parece lógico que la energía generada por éstos sería más aprovechable en un contexto con distribución DC. En primer lugar, el precio de la instalación de los módulos solares disminuiría, ya que no haría falta un inversor para conectar con la red, pero además, el rendimiento de la distribución de esta energía aumentaría, ya que se evitarían las pérdidas del inversor.

2.2.2 MICROGENERACION EÓLICA

Este tipo de generación, aunque tiene más problemas a la hora de integrarse en lugares densamente habitados, o en edificios domésticos debido a las vibraciones y al ruido que produce, es una opción útil como complemento a la energía solar.

La construcción de estos generadores varía en función del fabricante, pero la mayoría de fabricantes como Kestrel o Raum están apostando ahora por generadores de corriente continua de imanes permanentes. En cualquier caso, lo que se busca es poder generar a distintas frecuencias en la pala y posteriormente, mediante el uso de electrónica de potencia, conectar a una red de corriente alterna.

La vida mínima especificada por la mayoría de fabricantes es mayor de 25 años. Los precios de las turbinas eólicas son notablemente superiores a la generación fotovoltaica, pero ofrecen mayor estabilidad de generación, ya que, aunque dependen del viento, permiten generar a cualquier hora del día y a cierta velocidad del viento la generación de potencia es relativamente estable.

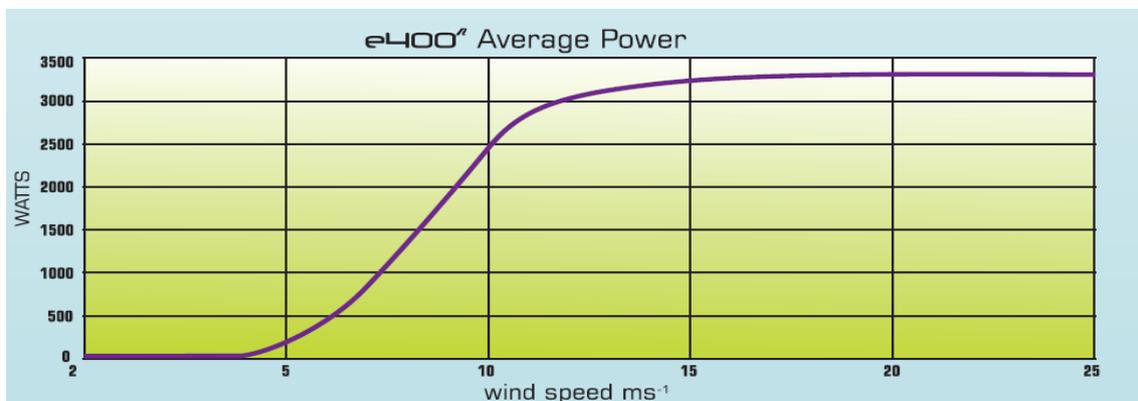


figura 19. Rendimiento de generador RAUM en función de la velocidad del viento [www.kestrelwind.co.za]

2.2.3 MICROCOGENERACIÓN

La microgeneración se basa en aprovechar la energía térmica producida a nivel doméstico o en zonas de distribución (hospitales, hoteles...) para producir energía eléctrica. De esta forma se consigue mejorar el rendimiento de la calefacción de una casa. La cogeneración es una tecnología madura, lleva más de cuarenta años funcionando en el mundo de la aeronáutica, y

con este método se consiguen eficiencias mayores del 80% de aprovechamiento de la energía calorífica del combustible.

2.2.4 PILAS DE COMBUSTIBLE

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que permiten convertir directamente la energía química en energía eléctrica. Este tipo de dispositivos representan una gran esperanza para evitar la dependencia de combustibles fósiles. Las pilas de combustible más desarrolladas actualmente son las pilas de hidrógeno, que basan su funcionamiento en transformar el hidrógeno puro en agua a través de reacciones químicas de éste con el aire, generando así una corriente continua que transcurre desde el ánodo al cátodo.

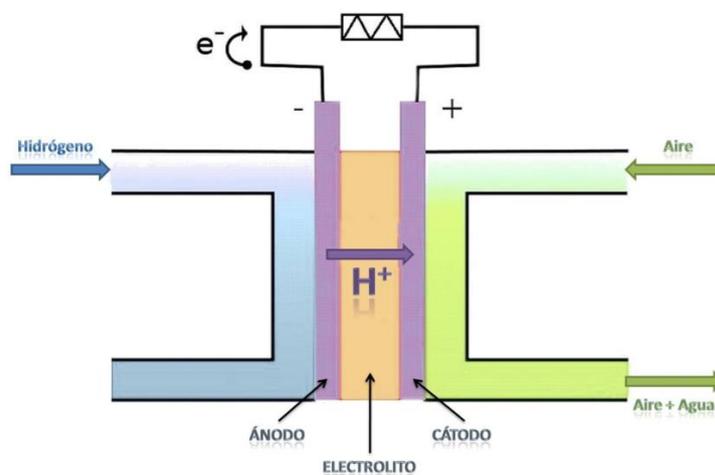


figura 20. Pila de combustible de hidrogeno [Cátedra Rafael Mariño 2014]

Su oportunidad a nivel eléctrico sería similar a un generador diésel, por lo que aparentemente no tendría sentido su utilización en un sistema doméstico conectado a red. Sin embargo la gran ventaja de la pila de combustible de hidrógeno es que el hidrógeno se puede formar a través de agua y energía eléctrica mediante la electrolisis, por lo que, si en un sistema se tienen integradas energías intermitentes y variables como pueden ser la energía eólica o solar, podría aprovechar los excesos de generación creando hidrogeno de forma limpia y aprovechar el hidrogeno a través de pilas de combustible en los momentos de mayor consumo. Así, solucionaría gran parte de los problemas de temporalidad y disponibilidad de este tipo de recursos.

Las pilas de combustible de hidrogeno tienen un rendimiento actual alrededor del 60%, y se espera mejorar el rendimiento de forma considerable en los próximos años, ya que es una tecnología en desarrollo. Este rendimiento es muy alto en comparación con los generadores de combustión, ya que no se ve afectado por el ciclo de Carnot al ser un proceso puramente químico.



Asimismo, la energía generada por las pilas de combustible es corriente continua, por lo que en caso de estar en un sistema de corriente alterna sería necesario un inversor, lo que aumentaría el precio y disminuiría la vida útil del dispositivo.

2.2.5 MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Debido a los problemas que plantean las principales energías renovables en distribución se está planteando como solución el almacenamiento de energía. Además, con la introducción al mercado del coche eléctrico se está investigando mucho en almacenamiento de energía eléctrica para conseguir vehículos eléctricos a un precio competitivo y con una autonomía comparable a los vehículos de combustión actuales, por lo que el mercado de baterías es un mercado emergente.

Principalmente hay dos métodos de almacenamiento de energía eléctrica: a través de baterías eléctricas y a través de almacenamiento de hidrógeno

2.2.5.1 BATERÍAS

Las baterías son aparatos electroquímicos capaces de acumular energía eléctrica y suministrarla. La única manera de utilizarlas es a través de corriente continua por lo que, si las alimento de una fuente de corriente alterna, necesitaría un rectificador. Además, si alimento con ellas una red AC necesitaré de un inversor.

2.2.5.2 HIDRÓGENO

El hidrógeno es un material que se puede crear mediante el uso de energía eléctrica y agua a través de electrolisis.

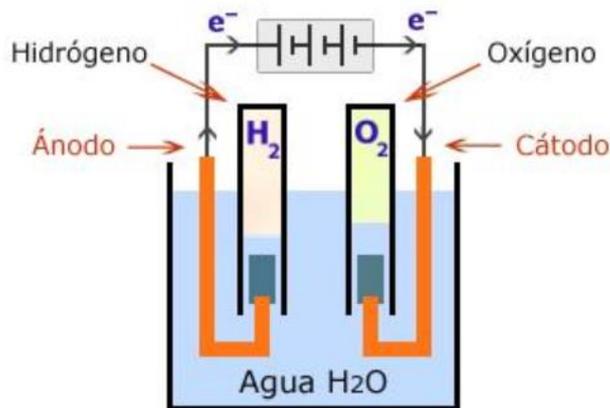


figura 21. Método de electrolisis [Cátedra Rafael Mariño 2014]

Es una tecnología que está en fase de investigación y actualmente no tiene mucha aplicación en el mercado.

El almacenamiento de hidrógeno, aunque plantea dudas de seguridad debido a la necesidad de almacenarlo en tanques con muy altas presiones por ser un elemento muy ligero, se están fabricando tanques que pasan con creces las pruebas de seguridad exigidas por la UE y



consiguen un almacenaje a grandes presiones. Por ejemplo, el tanque de hidrógeno del vehículo *Hyundai Tucson iX* almacena combustible a una presión de 700 bares y con un nivel de seguridad superior a los exigidos a los vehículos actuales de combustión.

Como ya se especificó en el apartado de las pilas de combustible, la energía eléctrica que ofrece este combustible es DC.

2.3 ELECTRÓNICA DE POTENCIA

En los últimos años se ha desarrollado de forma importante la electrónica de potencia. Cada vez es más habitual el uso de convertidores de energía eléctrica en distintas aplicaciones domésticas y para potencias y necesidades muy diversas. La electrónica de potencia permite distribuir y manejar la energía eléctrica continua a diferentes niveles de tensión y transformarla en otros tipos de energía eléctrica, como por ejemplo en energía alterna. En estos últimos años, la eficiencia, el precio y la capacidad de estos elementos han mejorado notablemente. En esta sección se analizará por separado los convertidores DC-DC, inversores y rectificadores.

2.3.1 DC-DC

Los convertidores DC-DC permiten regular la tensión de un circuito de corriente continua. Antiguamente en este tipo de circuitos se regulaba la tensión a través de convertidores lineales, que consisten en el uso de una resistencia variable usada como divisor de tensión. Sin embargo, este método es muy poco eficiente.

Actualmente, se usa la conversión conmutada, que basa su funcionamiento en el almacenamiento de energía eléctrica de manera temporal en elementos como condensadores para luego liberarla a otro nivel de tensión.

Estos elementos se usan sobre todo para controlar la tensión de baterías o dispositivos electrónicos. Históricamente, no se han utilizado para el flujo de grandes potencias, pero actualmente, debido principalmente a la irrupción de los paneles fotovoltaicos, se han desarrollado convertidores DC-DC de alta eficiencia y potencia. Actualmente, no hay una gran demanda de este tipo de convertidores, la gran mayoría de fabricantes apuesta por un convertidor inversor. No obstante, ciertos fabricantes como Emerson Network Power o Murata Power Solutions fabrican convertidores DC-DC de hasta 6000W con eficiencias de 85-95%.

En la siguiente figura se representa la eficiencia de distintos convertidores DC-DC, según un estudio realizado por Manuel A. Vargas Evans en 2013:

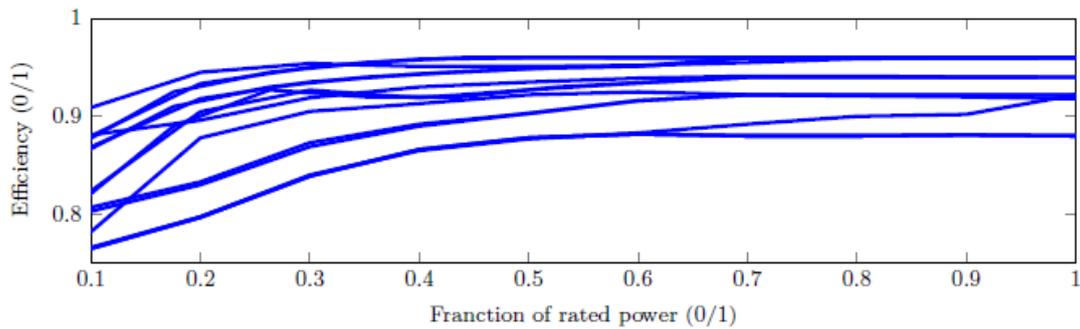


figura 22. *Curvas de eficiencia de transformadores DC-DC* [Manuel Vargas 2013]

Como se puede ver en la figura 22, los rendimientos de los transformadores oscilan entre un 75 y un 95 por ciento. Las zonas de peor rendimiento se dan en los puntos con menor potencia de trabajo.

2.3.2 AC-DC RECTIFICADOR

Un rectificador es un elemento que permite convertir corriente alterna en corriente continua, normalmente a través de diodos rectificadores.

Desde hace años, el rectificador ha sido utilizado para alimentar circuitos electrónicos en la casa, televisores, ordenadores o sistemas de audio, entre otros. Actualmente, se utiliza también para nuevos aparatos que requieren control de velocidad.

En la siguiente figura se representa la eficiencia de distintos convertidores rectificadores, según un estudio realizado por Manuel A. Vargas Evans en 2013

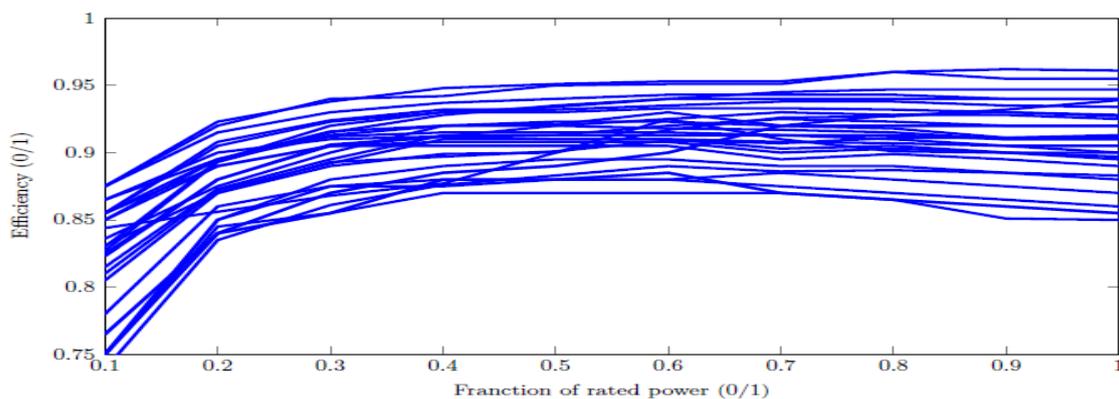


figura 23. *Curvas de eficiencia de transformadores rectificadores* [Manuel Vargas 2013]

Como se puede ver en la figura 23, los rendimientos de rectificadores oscilan entre un 75 y un 95 por ciento. Las zonas de peor rendimiento se dan en los puntos con menor potencia de trabajo. Los rendimientos son similares a los de los transformadores DC-DC.



2.3.3 DC-AC INVERSOR

El inversor es un elemento que transforma corriente continua en corriente alterna. Este elemento es, de todos los elementos de electrónica de potencia, el que actualmente tiene un mercado más desarrollado debido a los generadores nativos en corriente continua y a los controladores de velocidad. Esto ha permitido mejorar la eficiencia, capacidad y precio de estos productos pero, aun así, es el aparato más caro de los anteriores.

En la siguiente figura se representa la eficiencia de distintos inversores, según un estudio realizado por Manuel A. Vargas Evans en 2013.

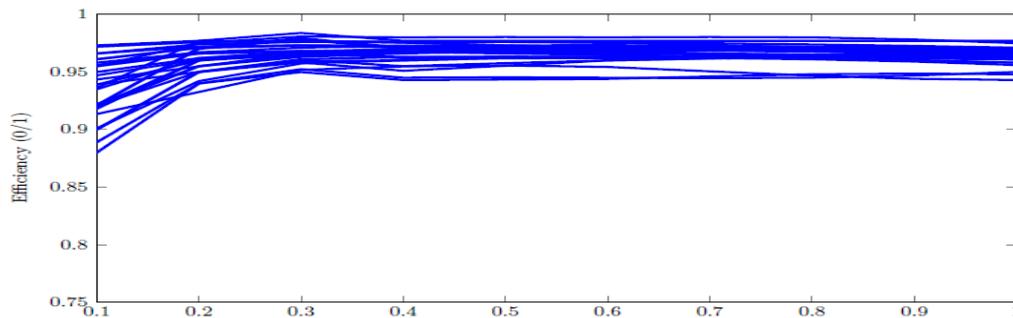


figura 24. Curvas de eficiencia de inversores [Manuel Vargas 2013]

Como se puede ver en la figura 24, los rendimientos de inversores oscilan entre un 85 y un 99 por ciento. Las zonas de peor rendimiento se dan en los puntos con menor potencia de trabajo. El rendimiento de estos aparatos es mayor que el resto de la EP.

2.4 RESUMEN DE RESULTADOS

A continuación se resume los ahorros energéticos y compatibilidad para las distintas tecnologías estudiadas en los apartados anteriores a nivel doméstico.

En la primera tabla se establecen las posibilidades de ahorro energético para distintos electrodomésticos de una casa en el caso de que fuesen de la tecnología más eficiente disponible en el mercado.

En la segunda tabla se ponderan los resultados anteriores con el consumo total de una vivienda estándar según la información disponible en DOE Buildings Energy Data Book:

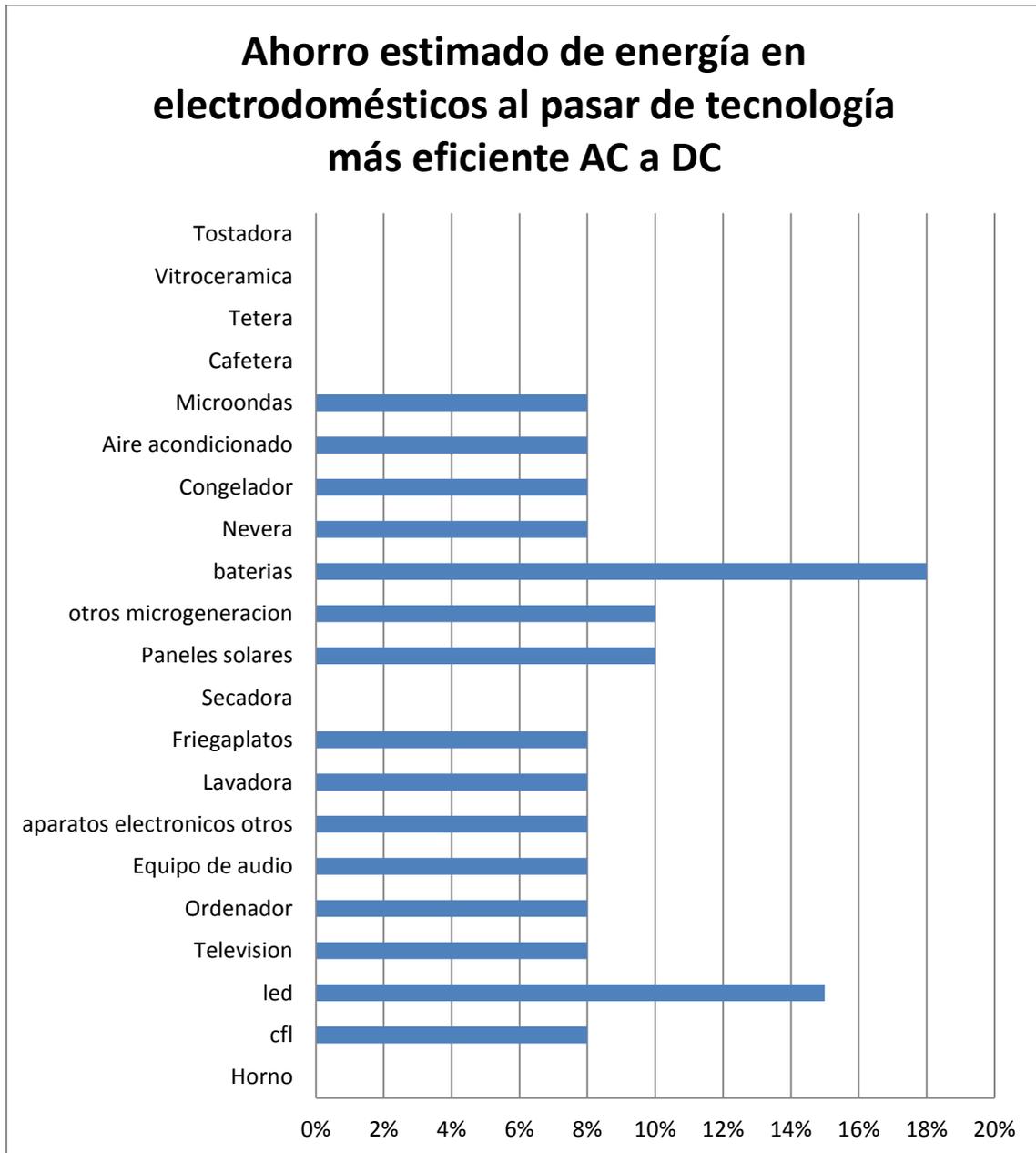


figura 25. Ahorro estimado al pasar a distribución en corriente continua según electrodoméstico

En todos los electrodomésticos, salvo en la iluminación LED, la mejora de eficiencia se debe a la eliminación de electrónica de potencia.

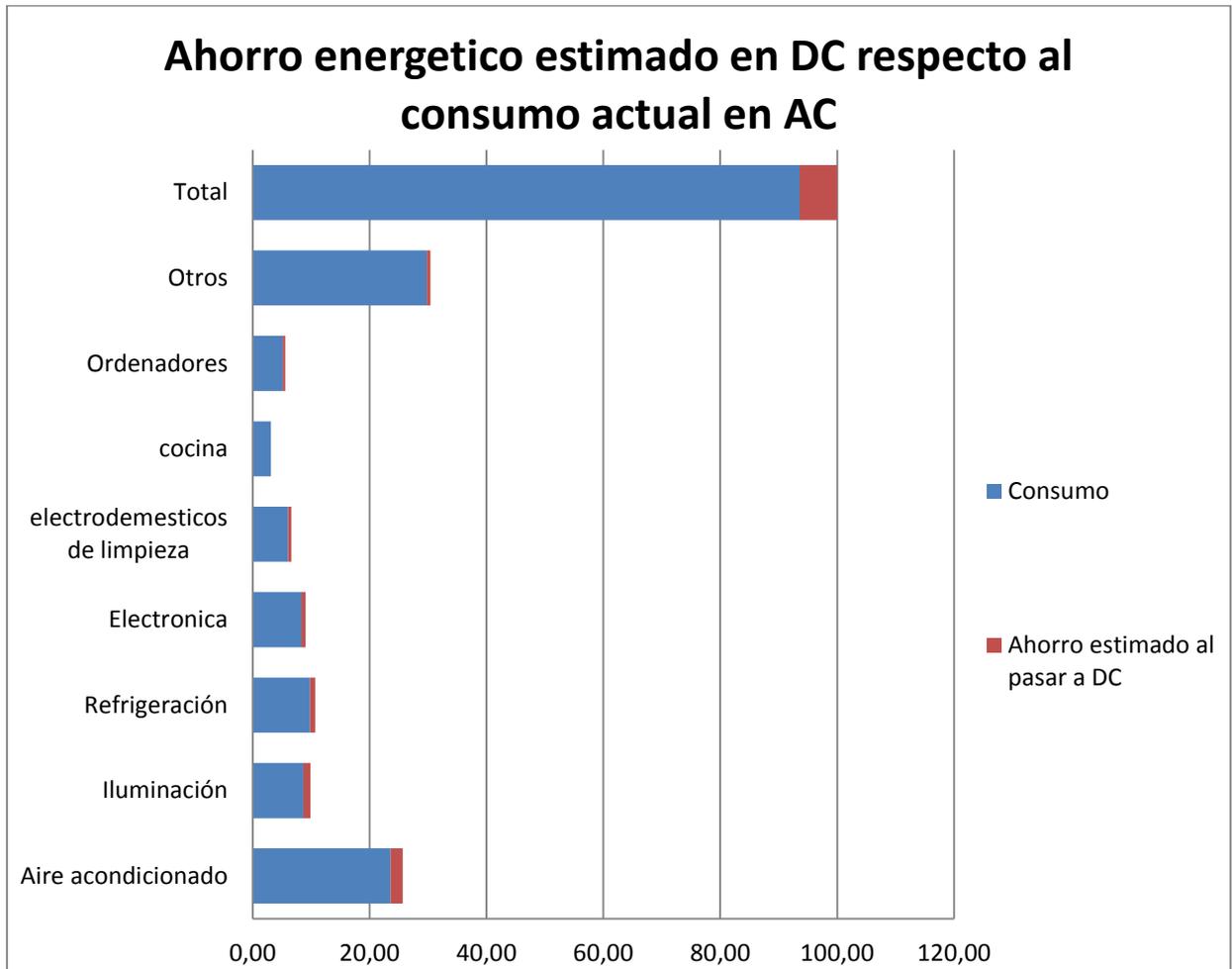


figura 26. Ahorro estimado de energia al pasar a distribucion en corriente continua en funcion del uso final.

Esta figura es una aproximación basada en los consumos eléctricos actuales de Estados Unidos, utilizando los electrodomésticos de la figura anterior. El ahorro estimado es de un 6.5%.

Los resultados son claramente positivos. Todos los productos analizados o bien son totalmente compatibles con el uso de la corriente continua, o hay una tendencia del mercado hacia el uso de la electrónica de potencia que favorecería la integración de corriente continua.

Este análisis de resultados no pretende dar un resultado concreto sino una aproximación para clarificar lo anteriormente expuesto. Los datos de las figuras son presunciones justificadas y datos aproximados, pero en realidad el análisis se debe realizar para cada consumo de forma independiente tal y como se realiza en el caso de estudio del capítulo 3.



3 SIMULACION DE DISTINTAS REDES DE DISTRIBUCION DOMÉSTICAS

En este apartado analizaremos la forma más eficiente de distribución eléctrica con los medios actuales a nivel doméstico.

Con ese objetivo, simularemos el consumo de una casa en verano en el programa Matlab. Todos los electrodomésticos tendrán las características especificadas en el apartado 2 y el consumo de ellos se basará en un electrodoméstico específico de un fabricante actual.

Se simularán tres modelos de distribución, en primer lugar, distribución en corriente alterna clásica, siguiendo las instrucciones del reglamento español de baja tensión, en segundo lugar, un modelo de distribución híbrido de corriente continua y corriente alterna y por ultimo un último modelo de distribución con varios niveles de tensión en corriente continua y corriente alterna.

La casa a analizar tiene aproximadamente 200 metros cuadrados y la distribución especificada en la figura 27.

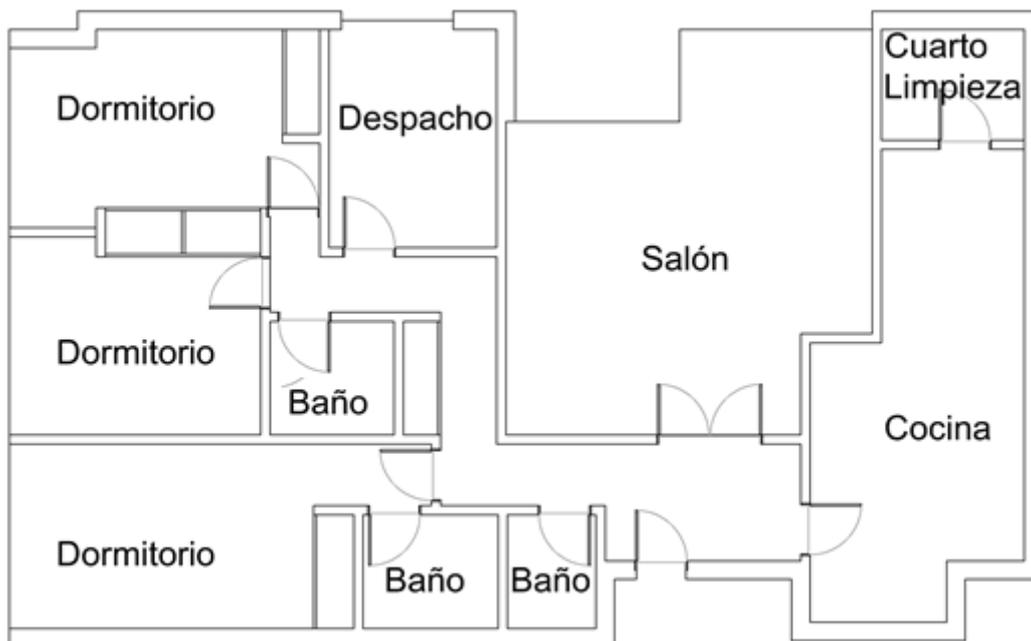


figura 27. Planta de vivienda analizada (200m²)



3.1 VARIABLE TIEMPO

La herramienta de simulación Simulink desarrolla una serie de variables en un tiempo definido. En esta simulación cada hora se corresponderá con 10s. La simulación durará 240s, es decir un día.

3.2 ELECTRONICA DE POTENCIA

La mayoría de los consumos que incluyen electrónica de potencia suelen tener rectificador, transformador de corriente continua y un inversor para alimentar finalmente con las frecuencias óptimas.

Cada uno de estos aparatos tiene unas características específicas y unas pérdidas específicas. En el caso de estudio se analizarán las pérdidas de estos equipos y su influencia respecto al consumo total de la casa. Para ello, se incluirá en los electrodomésticos que necesitan este tipo de componentes un sistema que permita obtener el valor de las pérdidas producidas en cada instante.

La curva característica de los distintos aparatos de electrónica de potencia se ha estimado a partir de los datos de: “ *Why Low Voltage Direct Current Grids? A case-study assessment of using direct current in low voltage distribution*” por Manuel A. Vargas Evans

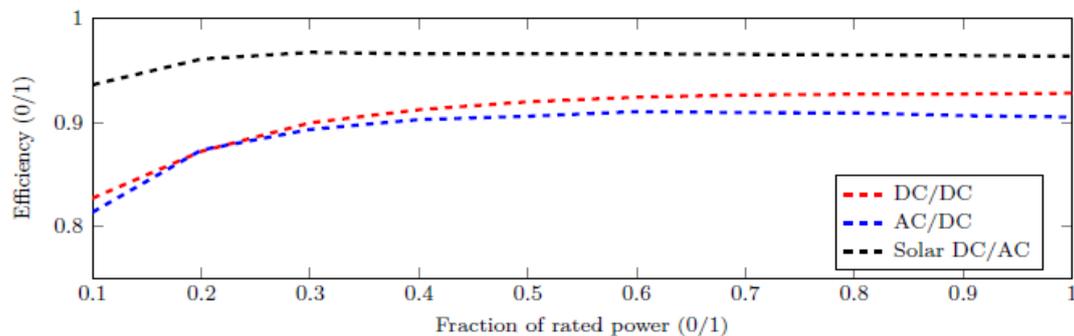


figura 28. Eficiencia media de EP en función de la potencia de carga (pu) [Manuel Vargas 2013]

A partir de esta figura se han extrapolado las curvas específicas de cada aparato, que se resumen en la siguiente figura:

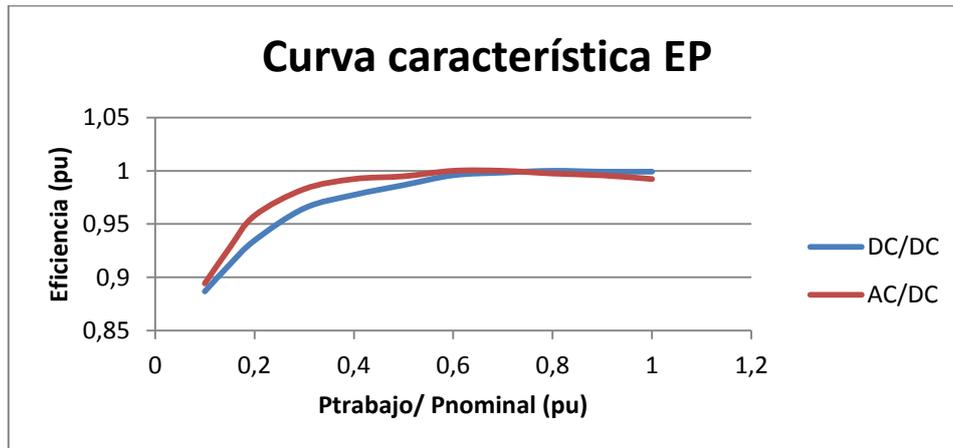


figura 29. Curva de eficiencias en función de la potencia de trabajo (pu).

Las curvas de transformadores DC-DC y rectificadores de la figura 29 son equivalentes a las de la figura 28, pero la máxima eficiencia de las curvas de a la figura 29 es 1 en todas las curvas, mientras que las de la figura 28 dependen del tipo de electrónica de potencia que representan (rectificador o transformador).

Una vez conseguida la curva específica del aparato, basándonos en la información de <http://www.energystar.gov/> se han tomado tres niveles de eficiencia en función de la potencia nominal del conjunto electrónico rectificador transformador, estos niveles son los siguientes:

POTENCIA (W)	Conjunto DC-DC y AC-DC
0-20	70%
20-100	80%
mayor 100	87%

Como se puede comprobar, estos valores coinciden con un estudio realizado en 2010 en el estudio *Direct DC Power Systems for Efficiency and Renewable Energy Integration with a Residential and Small Commercial Focus*, ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY.

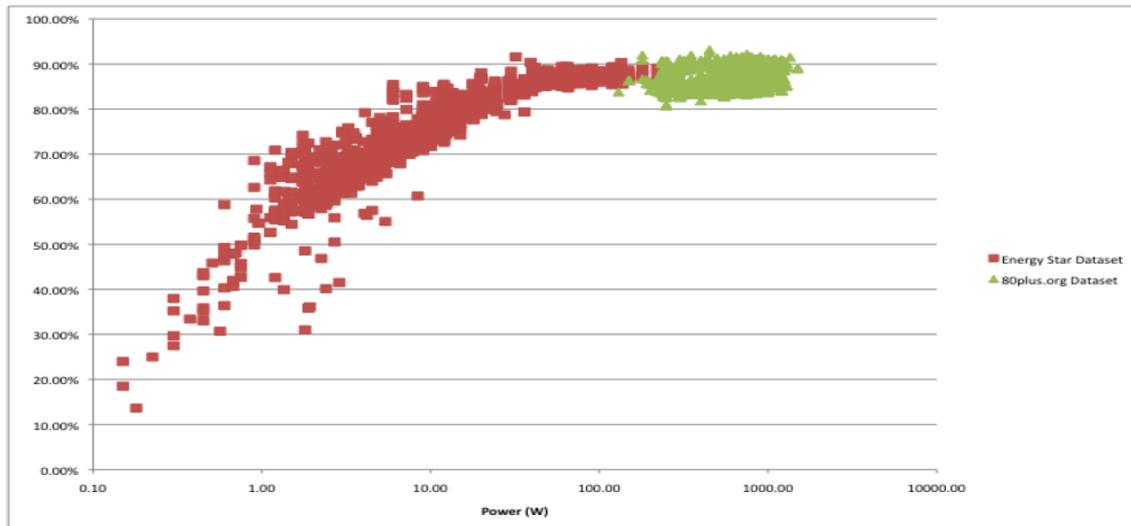


figura 30. Esta figura representa la eficiencia de los conjuntos rectificador y DC/DC en el mercado [DC report 2011]

Finalmente, se plasmarán en el simulador la curva de eficiencias en función de la potencia de trabajo y la eficiencia máxima en función de la potencia nominal de la electrónica de potencia, tal y como representa la siguiente figura:

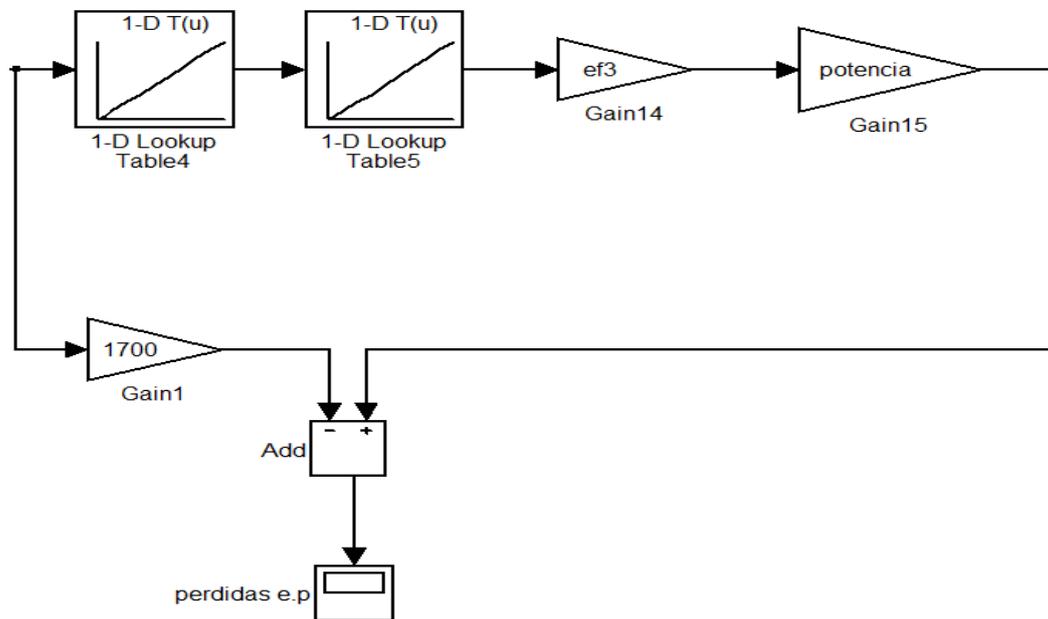


figura 31. Simulación de la electrónica de potencia en la herramienta Simulink



3.3 NIVELES DE TENSIÓN DC

Actualmente, no hay ningún tipo de estándares para niveles de tensión en corriente continua. Aun así, en los últimos años, varias asociaciones han intentado normalizar la tensión en DC.

En estos momentos, hay dos grandes grupos de niveles de tensión en distribución; un primer nivel, denominado LVDC, que se situaría entre 5-50V (este nivel se usaría para alimentar elementos electrónicos) y un segundo nivel entre 240-400V, denominado HVDC, que se utiliza para alimentar, entre otros, vehículos eléctricos.

En el caso de estudio los niveles de tensión utilizados con DC serán: Un primer nivel de alta tensión (HV) de 326V, que coincide con la salida de tensión de un rectificador y un segundo nivel de baja tensión (LV) de 50V. La justificación de estos niveles de tensión se explicará en profundidad en las simulaciones en los que se usan.

La siguiente figura representa los distintos niveles de tensión utilizados en la actualidad y se especifican los utilizados en el proyecto.

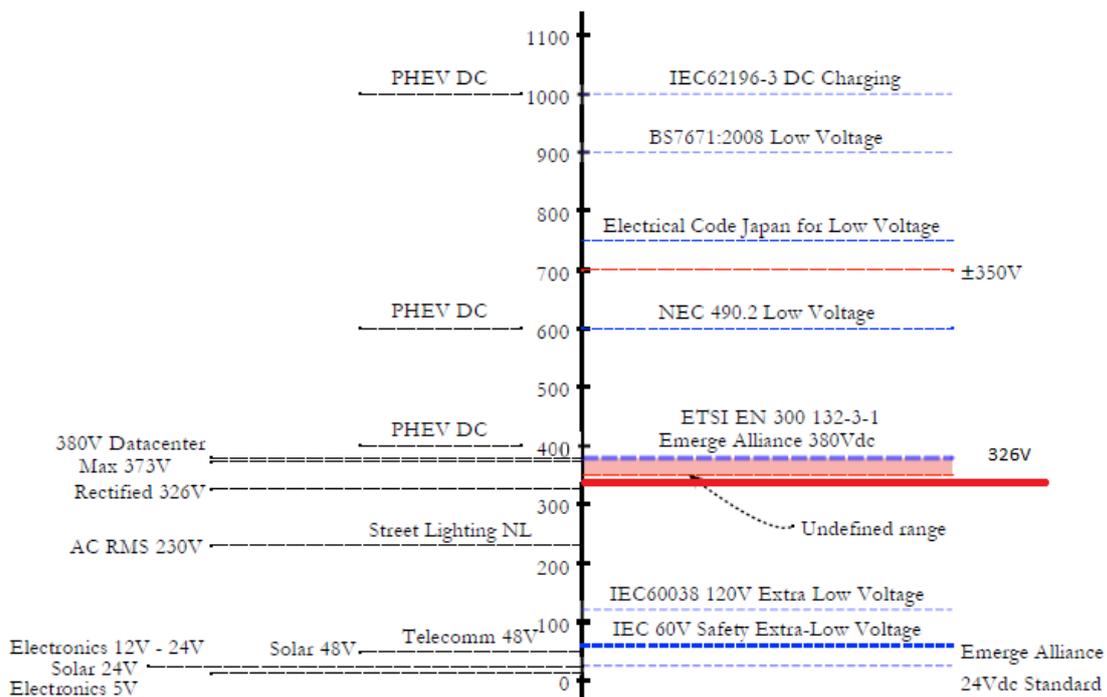


figura 32. Niveles de tensión en DC destacados. [Manuel Vargas 2013]

Cabe destacar el papel de *Emmerge Alliance* en el intento de normalización de tensiones DC, ya que ha definido dos niveles de tensión para la alimentación de todos sus productos, un primer nivel, denominado AT de 380V DC y un segundo nivel, denominado LV de 24 V DC.



3.4 SIMULACION DE CONSUMOS

A continuación se resumirán las características de la vivienda. En la siguiente tabla se especifican los distintos aparatos y las condiciones de uso de cada uno.

APARATO	POTENCIA (sin EP)	HORARIO Y FORMA DE USO	MODELO
COCINA			
Tostadora	1000W	100% de 9:10-9:15 y 18:00-18:05	Moulinex Subito LS2608
Cafetera	450W	100% de 22:00-22:40 y de 12:00 -12:40	Cafetera italiana De'Longhi EMK 9
Tetera	1800W	100% de 19:00-19:05	Cloer Kettle 4709
Microondas	800W	60% de 09:05-9:10 , de 15:00-15:10 y de 21:00-21:10	Bosch MasterChef HMT75G451
Vitroceramica	7200W	5% de 10:00-11:00 , 10% de 13:30-15:00 y 10% de 20:00-21:00	PID975L24E Inducción
Frigorífico	90W	50% de 00:00-6:00 y de 21:00-00:00 y paso de 50% al 100% de 18:00-21:00 y de 6:00-9:00 hasta 100% de 9:00-18:00	KSV36AI41
Congelador			Frigorífico
Horno	2460W	40% de 16:00-18:00 y 60% de 21:15-21:45	Bosch HBC86P753
Iluminación	6 núcleos de 12W CFL	100% de 9:00-10:00 y de 21:00-22:30 , 33% de 10:00-11:00 , 12:00-12:40 y 13:30-15:00 . 70% de 15:00-16.30. 50% de 16:00-18:30 y de 20:00-21:00	Philips Tornado 12W E27 CFL
Televisión	70W (0,5W en stand by)	100% 9:00-10:00 , de 15:00-16:00 y de 21:00-22:00 el resto en stand by	UE32F6400AW 32" Smart TV
Teléfono fijo	3,25W	100% todo el día	panasonic KX-TG1311SP
DVD	17W (0,5W stand by)	100% stand by	Blu-ray BD-F6500
ZONA DE LAVADO			
Lavadora-Secadora	1800W	75% de 11:00-11:20 , 25% de 11:30-12:00	WAY28740ES Lavadora
Lavaplatos	2200W	75% de 00:00-00:20 y 25% de 00:30-01:00	SMS69U88EU Lavavajillas
Iluminación zona de lavado	1 núcleo de 8W led	100% 00:00-00:10 y 100% de 12:00-12:30	SKU: 2601641E
SALON			
TV	104 (1W stand by)	100% de 12:00-14:00 y de 16:00-19:00 y de 22:30-24:00 el resto stand by	UE50F6400AW 50"
Iluminación	6 núcleos de 12W CFL	40% de 12:00-14:00 y de 40% de 16:00-19:00 y de 100% de 22:30-24:00	Philips Tornado 12W E27 CFL
Audio	12W (0.2W stand by)	100% stand by	panasonic SC HC18
DVD	17W (0,5W stand by)	100% de 16:00-19.00 el resto stand by	Blu-ray BD-F6500
Teléfono fijo	3,25W	100% todo el día	panasonic KX-TG1311SP



INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

A.C.	1700W (stand by 1W)	de 12:00-14:00 (130% de 12:00-12:10. caída hasta 80% de 12:10-12:40 y 80% hasta las 14) y de 15:00-19:00 (130% de 15:00-15:20 recta de 130% a 80% de 15:20-15:50 y 80% de 16:50-19:00)	DAIKIN TXG50JA
BAÑOS (3)			
Iluminación	3 baños con 2 núcleos de 8W CFL	100% 8:30-8:59 y 30% 16:00-17:00 y 60% 23:30 a 00:00	Philips 8W SES CFL Candle Bulb
Secador de pelo	2000W	100% de 8:40-8:45 y de 23:55-00:00	philips HP8195/00
PASILLO			
Iluminación	6 núcleos de 8W led	100% 8:30-9:00 , de 10:00-14:00 , 18:00-20:00 y de 22:30-00:00	SKU: 2601641E
Teléfono fijo	3,25W	100% todo el día	panasonic KX-TG1311SP
DESPACHO			
Audio	12W (0.2W stand by)	100% de 16:00-17:00 y 19:00-21:00 resto del día stand by	panasonic SC HC18
Ordenador	250W (1W reposo)	100% 18:00-21:00 y de 23:00-24:00 resto del día en reposo	W2800WF081IT
Pantalla de ordenador	30W (0,5W stand by)	100% de 18:00-21:00 y de 23:00-24:00, resto en stand by	Monitor HP Pavilion 23xi 23" LED IPS
Impresora	375W (1W stand by)	todo el día en stand by	HP LaserJet Pro M1132
Teléfono fijo	3,25W	100% todo el día	panasonic KX-TG1311SP
Iluminación	4 núcleos de 8W LED	100% de 16:00-17:00 , de 18:00-21:00 y de 23:00-24:00	SKU: 2601641E
WIFI	8W	todo el día al 100%	TP-LINK TL-WR1043ND
HABITACIONES (3)			
Iluminación	3 habitaciones con 4 bulbos de 12W CFL	100% de 00:00-00:30 y de 8:30-9:00	Philips Tornado 12W E27 CFL
Audio	12W (0.2W stand by)	todo el día stand by	panasonic SC HC18
Cargador de ordenador	dos cargadores de 75W	40% de media	Asus X54 X54H
Cargador de móvil	3 cargadores de 7,5W	60% de media	GooseWhite CUBO
GENERACION			
Fotovoltaicos	20 paneles de 250W pico (1,2m2)	Perfil de generación	SW 250 Poly Solarworld

Con estas características y analizando los perfiles de consumo de electrodomésticos como la lavadora, aire acondicionado o lavaplatos, el consumo total de la casa en 24 horas tendría la siguiente forma:

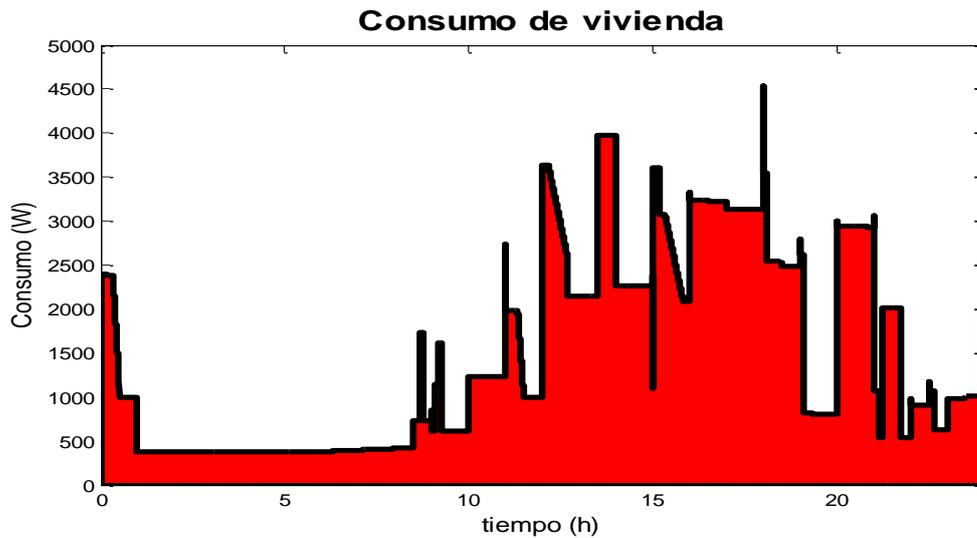


figura 33. Perfil de consumo de la vivienda simulada

3.4.1 MODELO 1. DISTRIBUCION AC

En primer lugar, se simulará el modelo en una casa con distribución en corriente alterna en la que los elementos que necesitan de electrónica de potencia incluyen, internamente, un sistema para transformar la corriente alterna de la red en corriente continua a la tensión óptima. Este sistema constará de dos niveles, un primer nivel que será el rectificador y un segundo nivel que incluye un transformador DC/DC para transformar la tensión de salida del rectificador a la tensión necesaria específica para cada aparato. Debido a la falta de normalización de niveles de tensión en el mundo de la corriente continua, se asumirá que este sistema está en todos los aparatos que utilizan EP.

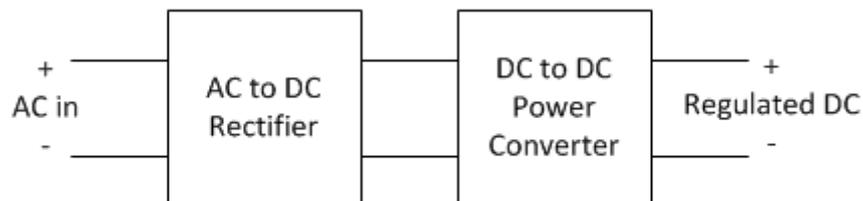


figura 34. Esquema de electrónica de potencia en electrodomésticos [DC report 2011]



La electrónica de potencia que usa cada elemento se resume en la siguiente tabla:

APARATO	DC/DC	AC/DC
<u>Tostadora</u>	—	—
<u>Cafetera</u>	—	—
<u>Tetera</u>	—	—
<u>Microondas</u>	Sí	Sí
<u>Vitrocera mica</u>	—	—
<u>Frigorífico</u>	Sí	Sí
<u>Congelador</u>	—	—
<u>Horno</u>	—	—
<u>Iluminación CFL</u>	Sí	Sí
<u>Televisión</u>	Sí	Sí
<u>Teléfono fijo</u>	Sí	Sí
<u>Lavadora-secadora</u>	Sí	Sí
<u>Friegaplatos</u>	Sí	Sí
<u>Iluminación LED</u>	Pérdidas del 15% respecto a AC	
<u>Audio</u>	Sí	Sí
<u>DVD</u>	Sí	Sí
<u>A.C.</u>	Sí	Sí
<u>Secador de pelo</u>	—	—
<u>Ordenador</u>	Sí	Sí
<u>Pantalla de ordenador</u>	Sí	Sí
<u>Impresora</u>	Sí	Sí
<u>WIFI</u>	Sí	Sí
<u>Cargador de ordenador</u>	Sí	Sí
<u>Cargador de móvil</u>	Sí	Sí

La casa estará alimentada a 230V F-N, y las características de distribución respetarán la normativa establecida en el Reglamento Español de Baja Tensión (en adelante, REBT). En primer lugar, se dividirá la distribución en distintos circuitos. En este caso los circuitos serán los siguientes:



CIRCUITOS	POTENCIA PREVISTA POR TOMA (W)	FACTOR DE SIMULTANIEDAD	FACTOR DE UTILIZACION	SECCION MINIMA CONDUCTORES (mm ²)
C1 <i>Iluminación</i>	20(*)	0,75	0,5	1,5
C2 <i>Tomas de uso general</i>	3450	0,2	0,25	2,5
C3 <i>Cocina y horno</i>	5450	0,5	0,75	6
C4 <i>Lavadora y lavavajillas</i>	3450	0,66	0,75	2,5(**)
C5 <i>Tomas de baño y cocina</i>	3450	0,4	0,5	2,5
C6 <i>Circuito adicional iluminación</i>	20(*)	0,75	0,5	1,5
C7 <i>Circuito adicional tomas de corriente</i>	3450	0,2	0,25	2,5
C9 <i>Aire acondicionado</i>	2500(***)	1	0,75	6

(*)El REBT especifica 200W por toma, pero dado que la tecnología utilizada es exclusivamente CFL y LED se considerara un potencia prevista de 20W

(**) El REBT especifica que cada toma individual puede conectarse con un cable de 2.5mm²

(***) El REBT no especifica potencia, pero dado que el aire acondicionado escogido tiene una Pn de 1700W se considera que al dimensionar con 2500W es suficiente.

ITC BT 25

La potencia utilizada por cada uno de los circuitos en la vivienda especificada anteriormente se resume en la siguiente imagen:

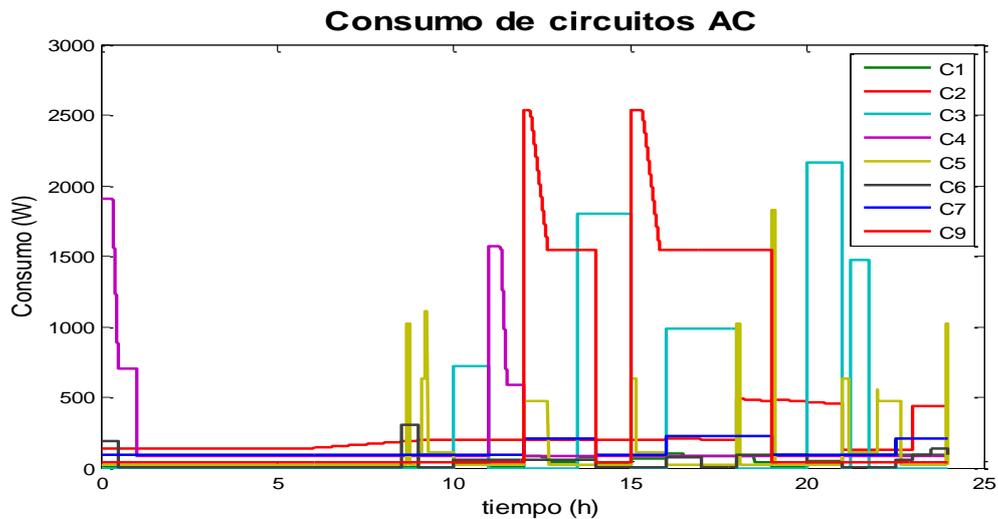


figura 35. Potencia consumida por circuito

Con estas condiciones, en la herramienta de simulación Simulink se simularán los 9 circuitos individualmente, y dentro de cada circuito se situaran todos los consumos con sus respectivas perdidas de potencia.

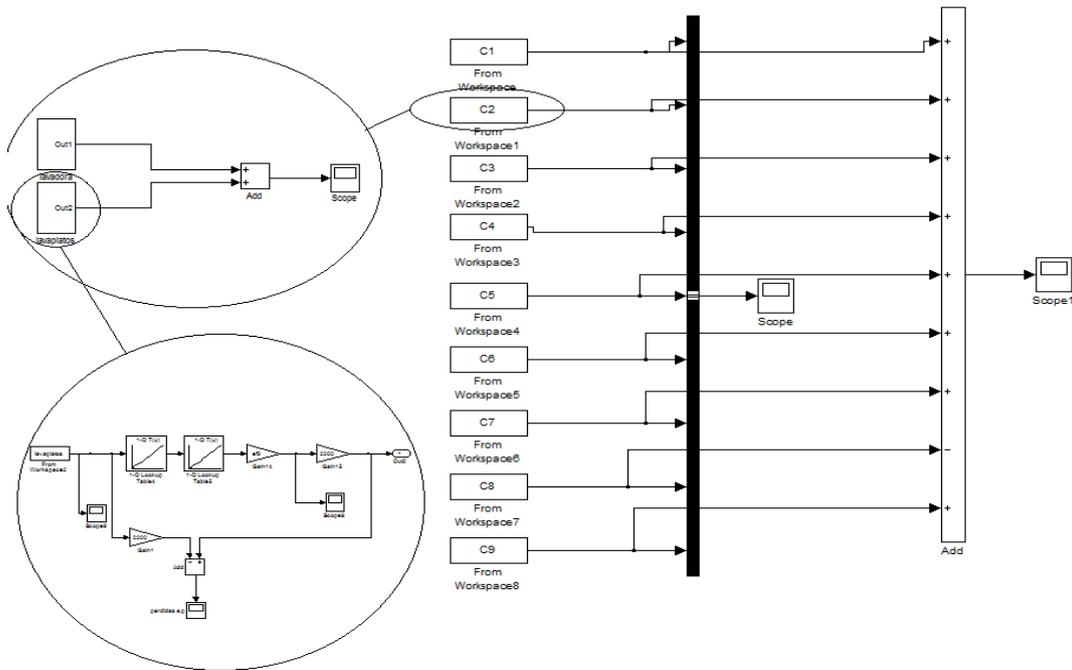


figura 36. Simulación en Simulink de los distintos circuitos

Finalmente, se dimensionará la sección de los conductores de cada circuito. En este caso, dado que la normativa del reglamento lo permite, se seguirá exclusivamente la reglamentación del REBT.

3.4.1.1 METODO MAXIMA CARGA

Los cálculos se llevarán a cabo de la siguiente manera para todos los circuitos salvo para el circuito 9, ya que éste es trifásico. En primer lugar, se comprobará que el cableado permita la carga máxima calculada en los circuitos. La carga máxima se realizará teniendo en cuenta los factores de utilización y simultaneidad.

- Circuito monofásico: $I = \frac{\sum P_a \cdot f_u \cdot f_s}{U_S \cdot \cos \gamma}$
- Circuito trifásico: $I = \frac{\sum P_a \cdot f_u \cdot f_s}{U_F \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \gamma}$



Siendo:

- I Intensidad de diseño del circuito
- $\sum P_a$ Suma de las potencias de todas las aplicaciones del circuito
- f_u Factor de utilización
- f_s Factor de simultaneidad
- U_s Tensión simple
- U_F Tensión compuesta
- $\cos \gamma$ Factor de potencia

Los conductores se dimensionarán como si fueran de cobre estuviesen aislados en tubos empotrados en paredes aislantes con aislamiento XLPE. Calcularemos la intensidad máxima partiendo de la potencia calculada a partir de los datos de la tabla 1 del artículo ITC BT 19.

3.4.1.2 MÉTODO CAÍDA DE TENSIÓN

La máxima variación de tensión permitida especificada en el REBT es de un 3% por circuito. Los cálculos se llevarán a cabo de la misma manera en todos los circuitos.

- Circuito monofásico:
$$S = \frac{2 \cdot L \cdot \sum P_{aplicaciones}}{\gamma \cdot e \cdot U_s}$$
- Circuito trifásico:
$$S = \frac{L \cdot \sum P_{aplicaciones}}{\gamma \cdot e \cdot U_F}$$

Siendo:

- S sección en mm^2
- e Caída de tensión en voltios
- γ Conductividad en $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$

El resumen de datos y resultados se resume en la siguiente tabla:

CIRCUITO	CARGA MAXIMA (A)	Longitud del circuito (m)	METODO CAIDA DE TENSION (mm2)	RESULTADO FINAL
C1	0,61	25,5	0,081	1,5mm2
C2	11,25	40	2,329	2,5mm2
C3	17,77	11	1,011	6mm2
C4	7,425	11	0,422	2,5mm2
C5	18	35	3,260	4mm2
C6	0,58	33,5	0,101	1,5mm2
C7	7,50	38	1,475	2,5mm2
C9	2,08	10	0,053	6mm2

También se comprobará la caída de tensión en nuestro modelo:

Caidas de tension circuitos AC

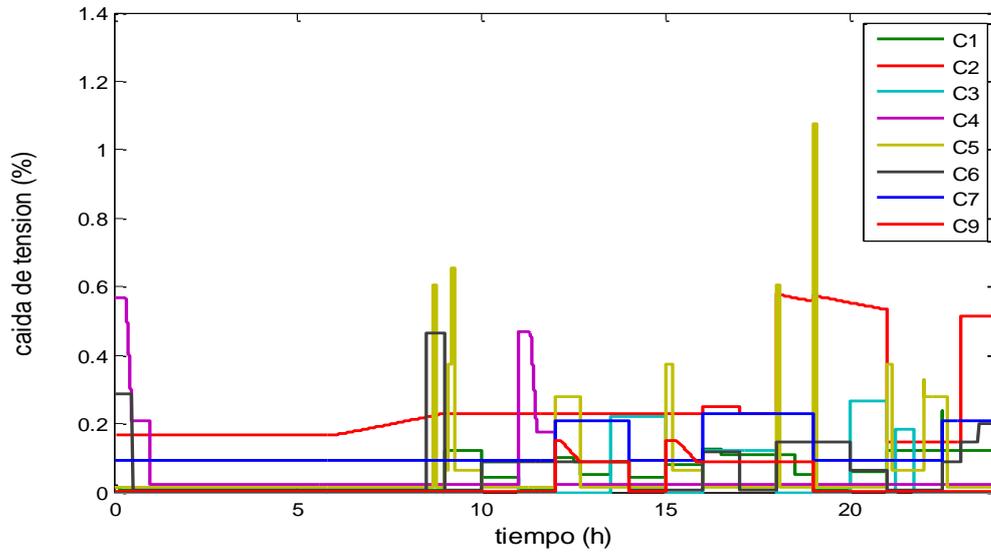


figura 37. Variación de tensión (%) en la vivienda

Como se puede comprobar ningún circuito sobrepasa el límite establecido.

A partir de estos resultados comprobaremos la caída de tensión y calcularemos en el simulador las pérdidas en el cableado mediante la siguiente ecuación y tal como representa el esquema:

$$\blacktriangleright P_{\text{cableado}} = e \cdot I$$

Siendo:

- P_{cableado} La potencia perdida en el cableado (W).

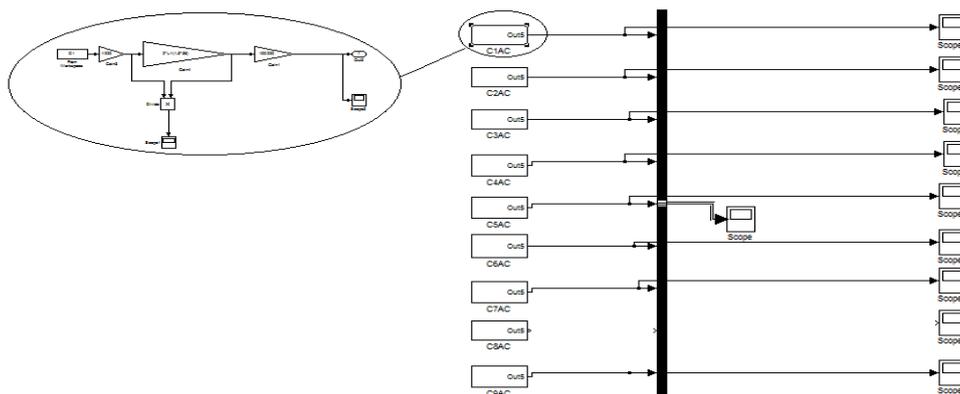


figura 38. Método de cálculo de pérdidas de potencia en cableado y caídas de tensión en simulink

3.4.2 MODELO2. DISTRIBUCIÓN DC

En esta sección se simulara el consumo doméstico con una distribución de corriente continua a 326V acompañado de un sistema de corriente alterna de 230V F-N.

El método de distribución se basa en un gran rectificador que transforma la energía eléctrica de la red a energía continua, y posteriormente alimenta todos los servicios de la casa con el nivel de tensión de salida del rectificador.

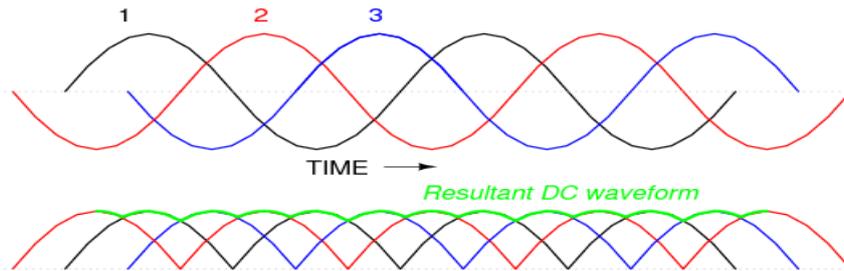


figura 39. Salida del rectificador [allaboutcircuits.com]

Se ha elegido el nivel de tensión de 326V ya que se estima que es el valor de tensión de la salida del rectificador, ya que se ha considerado que el rectificador transforma a la tensión pico de la entrada senoidal.

$$\triangleright U_{rect} = \sqrt{2} * U_F$$

Siendo:

- U_{rect} La tensión de salida del rectificador

Una vez definido el nivel de tensión en corriente continua a utilizar, se ha considerado que los aparatos no electrónicos que necesitan electrónica de potencia (Aire acondicionado, frigorífico, lavadora, iluminación led...) pueden funcionar a este nivel de tensión directamente, por lo que no necesitarían ningún tipo de electrónica de potencia adicional.

El resto de elementos basados en DC que consideramos que no pueden trabajar a un nivel de tensión tan alto se les colocará un transformador DC/DC en su entrada de potencia nominal igual a la del aparato utilizado, tal y como se hizo en el método de distribución AC.

Además de estos dos niveles de tensión, para evitar sobredimensionar el rectificador y reducir las pérdidas producidas en éste por trabajar por debajo de su potencia nominal, se usará un cableado en corriente alterna exclusivamente para alimentar la cocina y el horno (C3).



Los niveles de tensión y el tipo de energía utilizado por cada aparato quedan especificados en la siguiente tabla:

APARATO	nivel de tensión (V)	ELECTRONICA DE POTENCIA
Tostadora	326 DC	—
Cafetera	326 DC	—
Tetera	326 DC	—
Microondas	326 DC	—
Vitrocerámica	220AC	—
Frigorífico	326 DC	—
Congelador	326 DC	—
Horno	220AC	—
Iluminación CFL	LV DC	DC-DC
Televisión	LV DC	DC-DC
Teléfono fijo	LV DC	DC-DC
Lavadora-secadora	326 DC	—
Friegaplatos	326 DC	—
Iluminación Led	326 DC	—
Audio	LV DC	DC-DC
DVD	LV DC	DC-DC
A.C.	326 DC	—
Secador de pelo	326 DC	—
Ordenador	LV DC	DC-DC
Pantalla de ordenador	LV DC	DC-DC
Impresora	LV DC	DC-DC
WIFI	LV DC	DC-DC
Cargador de ordenador	LV DC	DC-DC
Cargador de movil	LV DC	DC-DC

A continuación, se considerará que de los rendimientos anteriores la mitad de las pérdidas corresponden al rectificador y la otra mitad al transformador DC/DC. Además, se respetarán los circuitos especificados por el REBT.

Para dimensionar el rectificador de la entrada se considerará un f_u de la potencia total conectada a él. Este factor de corrección se ha estimado a partir de la simulación del edificio, de tal forma que permite un funcionamiento holgado en cualquier momento del día.

$$\text{➤ } f_{u(\text{rectificador})} = 0.3$$

$$\text{➤ } P_{\text{rectificador}} = f_{u(\text{rectificador})} * \sum P_{\text{conectada}}$$

Siendo:

- $f_{u(\text{rectificador})}$ El factor de utilización del rectificador.
- $P_{\text{rectificador}}$ Potencia nominal del rectificador.
- $\sum P_{\text{conectada}}$ Potencia total máxima conectada al rectificador.

El resultado final de imponer estas condiciones en Simulink es el siguiente:

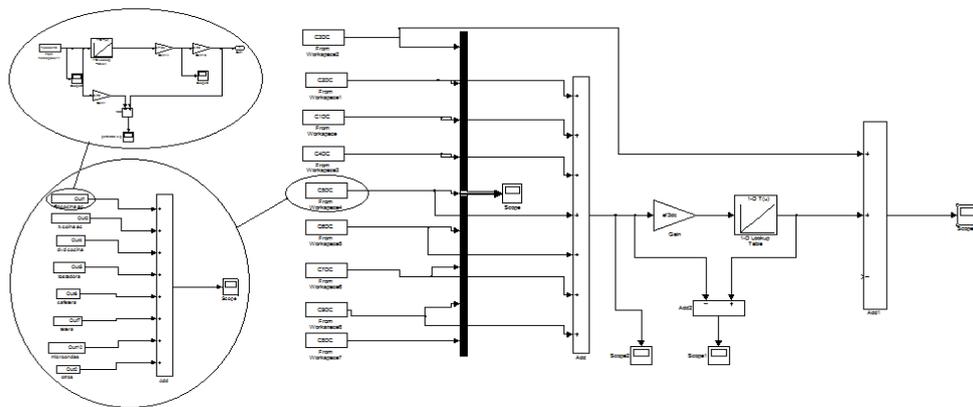


figura 40. Representación en Simulink de distribución en DC

Dado que no se especifica nada en el reglamento acerca de distribución en alta tensión en corriente continua se asumirán las siguientes características:

- Al ser la tensión lo suficientemente elevada se considerara que la mínima sección para todos los circuitos es de 1.5mm^2 .
- La máxima caída de tensión permitida será de un 3%.



Con estas condiciones las características de los circuitos se resumen en la siguiente tabla:

CIRCUITOS	POTENCIA PREVISTA POR TOMA (W)	FACTOR DE SIMULTANIEDAD	FACTOR DE UTILIZACIÓN	SECCIÓN MÍNIMA CONDUCTORES (mm ²)
<u>C1</u> iluminación	20	0,75	0,5	1,5
<u>C2</u> Tomas de uso general	3450	0,2	0,25	1,5
<u>C3(**)</u> Cocina y horno	5450	0,5	0,75	6
<u>C4</u> Lavadora y lavavajillas	3450	0,66	0,75	1,5
<u>C5</u> Tomas de baño y cocina	3450	0,4	0,5	1,5
<u>C6</u> circuito adicional iluminación	20	0,75	0,5	1,5
<u>C7</u> circuito adicional tomas de corriente	3450	0,2	0,25	1,5
<u>C9(*)</u> Aire acondicionado	2500	1	0,75	1,5

(*) Se alimentara de forma análoga al resto de los circuitos DC (326V)

(**) Se respetara lo especificado en el REBT

Finalmente y con un método análogo al de corriente alterna, y dado que el modelo de corriente continua es análogo a un modelo de corriente alterna monofásico con factor de potencia nulo, se calculan las secciones mínimas de los conductores a utilizar, que se resumen en la siguiente tabla:



CIRCUITOS	CARGA MÁXIMA (A)	Longitud del circuito (m)	CAÍDA DE TENSIÓN (mm2)	RESULTADO FINAL
C1	0,37	25,5	0,040	1,5mm2
C2	6,80	40	1,159	1,5mm2
C3	18,57	11	1,057	6mm2
C4	4,49	11	0,210	1,5mm2
C5	10,89	35	1,623	2,5mm2
C6	0,35	33,5	0,050	1,5mm2
C7	4,53	38	0,734	1,5mm2
C9	1,23	10	0,052	1,5mm2

Finalmente se comprobarán las caídas de tensión en nuestra vivienda en concreto:

Variación de tensión (DC)

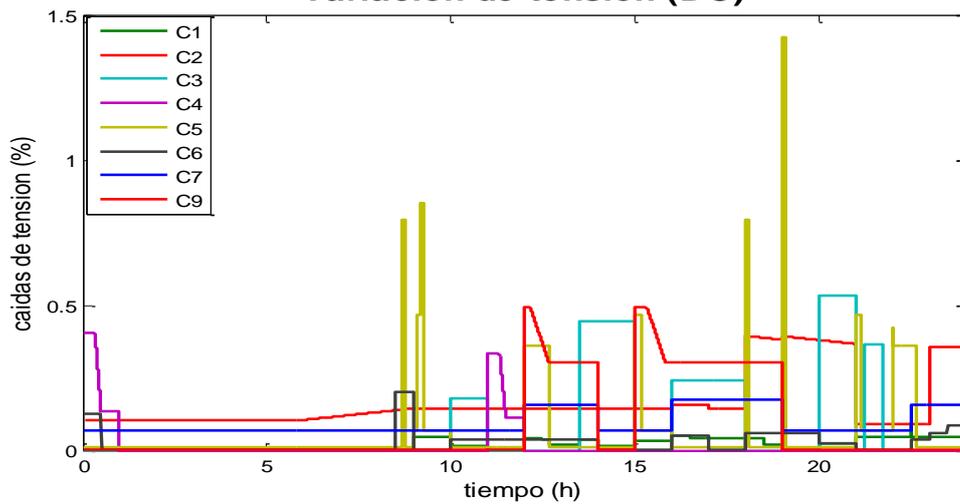


figura 41. Variación de tensión según el circuito de la vivienda simulada con distribución DC

Por último se calcularán las pérdidas en el cableado usando Simulink:

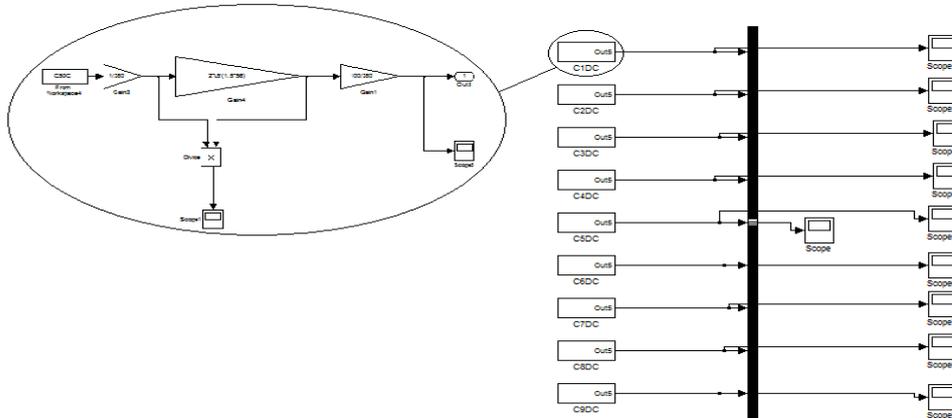


figura 42. Método de cálculo de caída de tensión

3.4.3 MODELO3. DISTRIBUCION DC HVLV

En este último modelo de distribución la casa dispondrá de circuitos en corriente alterna en cocina y cuartos de baño, distribución en HVDC (326V) y distribución en LVDC.

El circuito en corriente alterna alimentará directamente el horno y la vitrocerámica y tendrá tomas de uso general en cocina y baños con el objetivo de alimentar todos los elementos que no utilizan electrónica de potencia (como el tostador, cafetera...) y así no sobredimensionar el rectificador de entrada.

En la entrada del cableado eléctrico en la vivienda se situará un rectificador que transformará la energía alterna en energía continua. Desde el propio rectificador se alimentarán distintos circuitos, parte de los cuales tendrán como objetivo alimentar elementos en HVDC y otra parte para alimentar transformadores DC/DC que crearan un nivel de LVDC.

Desde este último punto de transformadores se alimentarán todos los aparatos electrónicos que requieren ser alimentados a LVDC. Estos transformadores se situarán estratégicamente en puntos de la vivienda de tal forma que haya que recorrer la menor distancia posible en este nivel de tensión, evitando así pérdidas y caídas de tensión elevadas. La siguiente imagen representa la posición de estos transformadores en nuestra vivienda.

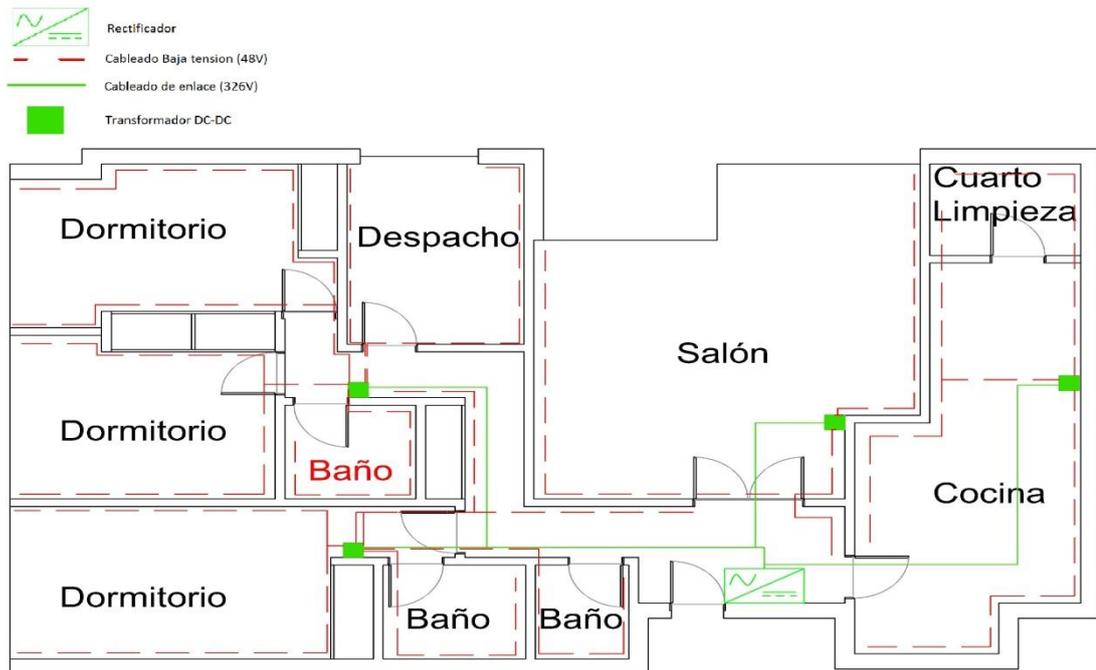


figura 43. Distribucion de baja tension en el modelo de distribucion LVHV

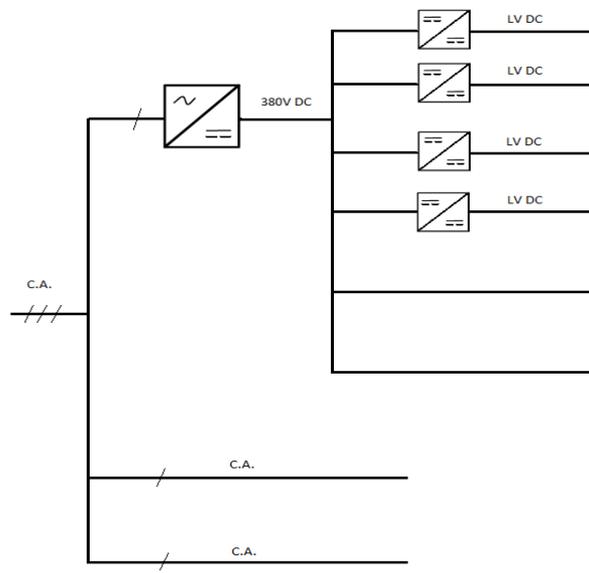


figura 44. Circuito monofásico explicativo del modelo de distribución LVHV

Este sistema surge con el objetivo de evitar la electrónica de potencia DC/DC instalada en los aparatos electrónicos, y es viable debido a que la potencia de estos aparatos es muy inferior



comparada con otros tipos de consumos eléctricos, por lo que, a pesar de que el nivel de tensión es inferior, la sección de los cables no se sobredimensionará.

En el sistema de distribución de la vivienda propuesta en concreto se definen los siguientes circuitos:

3.4.3.1 CIRCUITOS AC

-Circuito 1: Alimentará el horno y la cocina y será equivalente al circuito 3 establecido en el REBT

-Circuito 2: Circuito de tomas de potencia que se situarán en baños y cocina con el objetivo de alimentar aparatos que no utilizan electrónica de potencia

3.4.3.2 CIRCUITOS HV DC

-Circuito 3: Este circuito distribuiría energía exclusivamente a la lavadora y el fregaplatos, es el equivalente al circuito 4 establecido en el REBT

-Circuito 4: Alimentará exclusivamente el aire acondicionado, será el equivalente al circuito 9 establecido en el REBT

3.4.3.3 TRANSFORMADORES LV DC

-Transformador 1: Este transformador alimentará tomas de potencia en baja tensión y iluminación en la cocina.

-Transformador 2: Se alimentarán las tomas de potencia y la iluminación de baja tensión de dos de las habitaciones, el despacho y un baño.

-Transformador 3: Alimentará las tomas de potencia e iluminación del salón.

-Transformador 4: Alimentará la habitación restante, dos baños y el pasillo.

A la hora de elegir el nivel de baja tensión de corriente continua se debe tener en cuenta que las longitudes en nivel de baja tensión no superarán los 10 metros para tomas de potencia ni los 30 metros para circuitos de iluminación.

Se considerará que los niveles de tensión en los que podrían trabajar los elementos electrónicos abarcan desde los 12 hasta los 48V, ya que si bien es cierto que algunos aparatos como teléfonos móviles funcionan a un nivel de tensión menor, se considera que en caso de normalización se podrían fabricar para esos niveles de tensión. Además cabe destacar que todos los niveles de tensión por debajo de 60V se consideran "tensiones seguras".

Se diseñará de tal manera que los circuitos de baja tensión de corriente continua tengan una carga inferior a 1000W.

Con estas premisas buscaremos el nivel de tensión más favorable para la distribución, buscando el nivel de tensión más bajo posible (para facilitar la adaptación de estándares en todos los aparatos electrónicos), y que permita distribuir la suficiente energía y la suficiente distancia sin tener una sección desproporcionada.

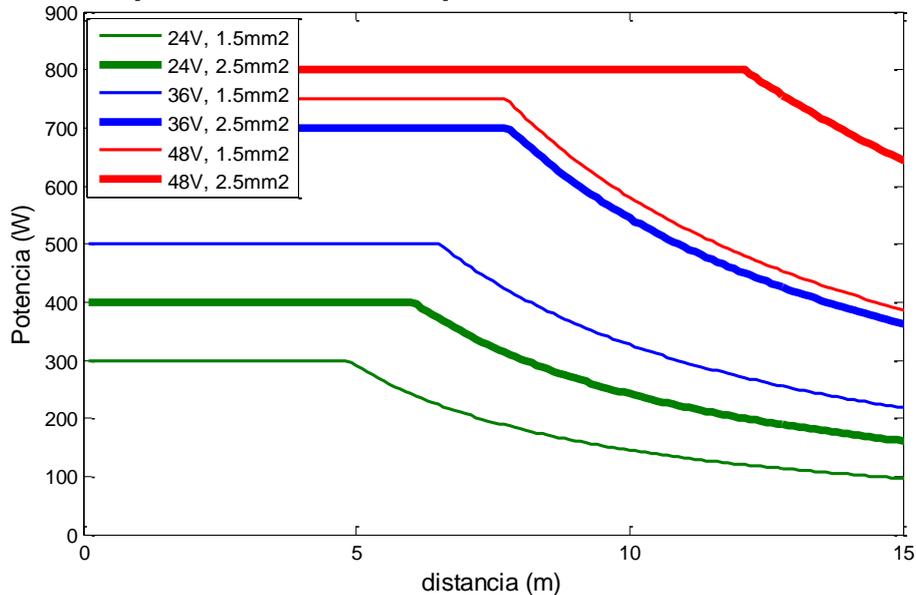
**Máxima potencia admisible por el metodo de caída de tensión**

figura 45. Representa la potencia máxima admisible en función de la distancia y la sección del conductor.

Tal como se puede observar en la figura, las tensiones inferiores o iguales a 24V se descartan, ya que para una sección igual o inferior a $2,5\text{mm}^2$ no permiten potencias mayores a 300W.

El nivel de tensión de 36V, si bien permite cierta maniobrabilidad, no permitiría circuitos demasiado largos para potencias cercanas a 700W, por lo que también se descarta.

Por último, vemos que el nivel de tensión de 48V permite alimentar con potencia mayor de 700W en 10 metros para secciones iguales o mayores a $2,5\text{mm}^2$, por lo que este será el nivel seleccionado para baja tensión.

$$\text{➤ } U_{LV} = 48V$$

Aunque los niveles de tensión de los circuitos de iluminación son menos exigentes, se considerará el mismo nivel de tensión, pero aumentaremos la longitud mínima de este tipo de circuitos con el fin de simplificar el cableado de la vivienda, ya que la potencia de iluminación es muy baja.

Para dimensionar la sección del cableado de salida de cada transformador se comprobará el circuito que exija una sección más exigente en función del método de máxima carga y de máxima variación de tensión. La sección resultante se usará para todos los circuitos del transformador.

También se tendrá en cuenta la caída de tensión producida en la distribución desde el

rectificador hasta los transformadores de tensión, pero el cable de unión de alta tensión no tendrá por qué tener la misma sección que los de baja tensión del mismo circuito.

En nuestro caso las secciones se calcularán a partir de la simulación de Simulink por el método de máxima caída de tensión y se comprobará analíticamente mediante el método de máxima carga. La siguiente figura representa el método de dimensionamiento de secciones en este modelo de distribución.

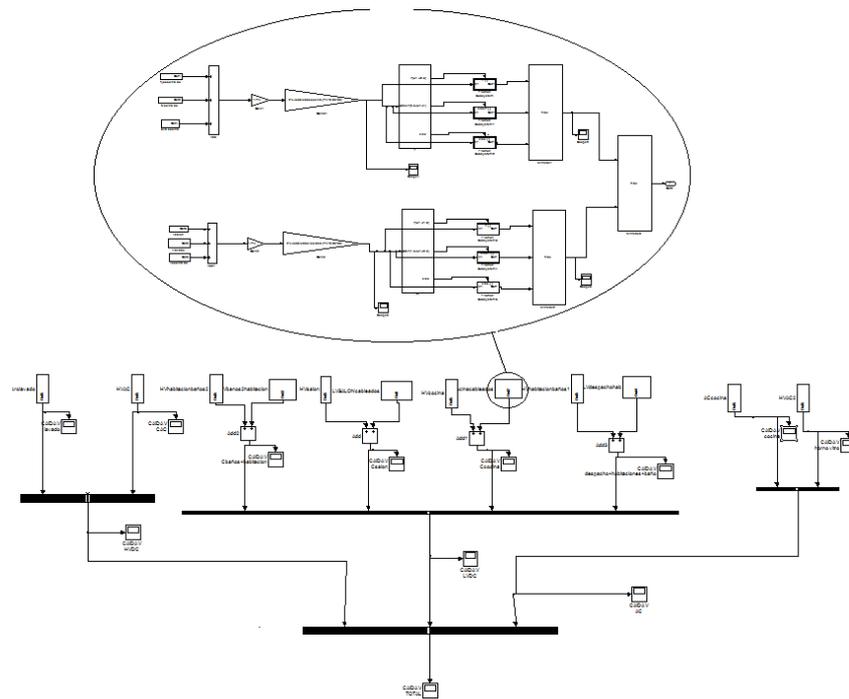


figura 46. Método de cálculo de caída de tensión en Simulink en el modelo HVLV

Los resultados de llevar a cabo los cálculos anteriormente descritos se recogen en la siguiente tabla:

CIRCUITOS	TENSION	RESULTADO FINAL
C1	AC	6mm ²
C2	AC	1,5mm ²
C3	HVDC	1,5mm ²
C4	HVDC	1,5mm ²
T 1	LVDC	1,5mm ²
T 2	LVDC	1,5mm ²
T 3	LVDC	1,5mm ²
T 4	LVDC	1,5mm ²



Con estas secciones las caídas de tensión se resumen en la siguiente figura:

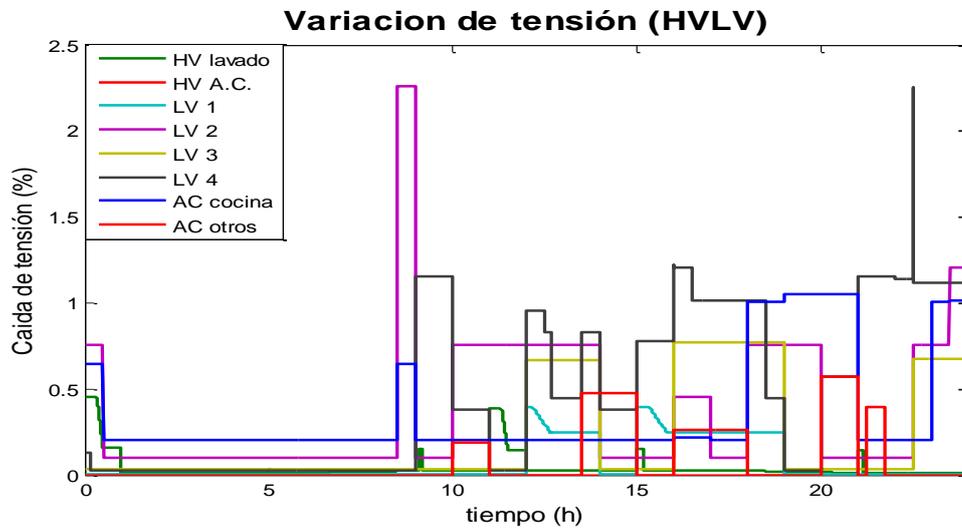


figura 47. Caídas de tensión en el modelo HVLV

Para dimensionar los transformadores de HV-LV se usarán dos opciones, una primera opción de 500W de potencia nominal y un segundo de 1000W de potencia nominal. En el caso del caso de estudio se escogerán todos de 500W salvo el que alimenta al despacho y al salón que serán de 1000W, ya que estos dos últimos tienen una potencia pico mayor de 500W.



4 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El análisis de los resultados se dividirá en dos apartados diferentes, en primer lugar se analizarán los distintos modelos de distribución desde el punto de vista de la eficiencia energética. Finalmente se realizará un estudio económico.

4.1 ANÁLISIS DE EFICIENCIA

Todos los porcentajes de las figuras se tomarán respecto al consumo total doméstico en cada uno de las distribuciones, que se considerará equivalente y comparable en los tres casos, ya que los únicos cambios producidos son los métodos de distribución y no los consumos de los electrodomésticos.

Los consumos reales de cada tipo de distribución de la casa a lo largo de las 24 horas consideradas se resumen en la siguiente tabla:

Modelo AC	Modelo DC	Modelo HVLV
14.7kwh	13.25kwh	13.19kwh

4.1.1 PÉRDIDAS DISTRIBUCION AC

Las pérdidas producidas por el cableado y la electrónica de potencia internas en los aparatos electrodomésticos en el modelo de distribución alterna se presentan a continuación:

Perdidas por electrónica de potencia	Perdidas por cableado	Pérdidas totales
19%	0.2%	19.2%

Cabe destacar que las pérdidas en el cableado son mucho menores que las pérdidas en electrónica de potencia de los aparatos electrodomésticos.

La electrónica de potencia produce importantes pérdidas. Esto es debido a que, como ya se ha explicado en apartados anteriores, los consumos de aparatos con electrónica de potencia

suponen aproximadamente un 70% del consumo total. La siguiente imagen representa el porcentaje de energía consumida en la vivienda de aparatos con y sin EP:

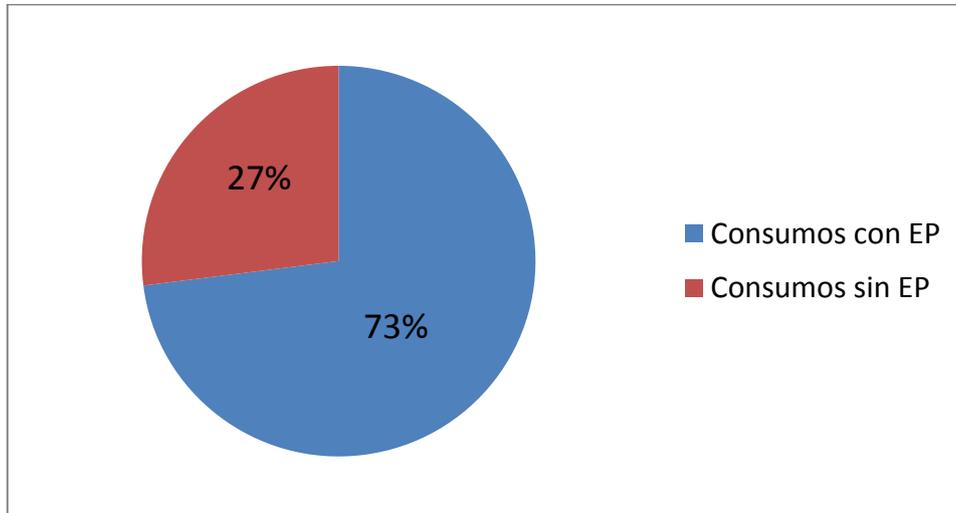


figura 48. Energía consumida de los electrodomésticos con y sin EP

Las pérdidas por electrónica de potencia y cableado a lo largo del tiempo se distribuyen de la siguiente manera:

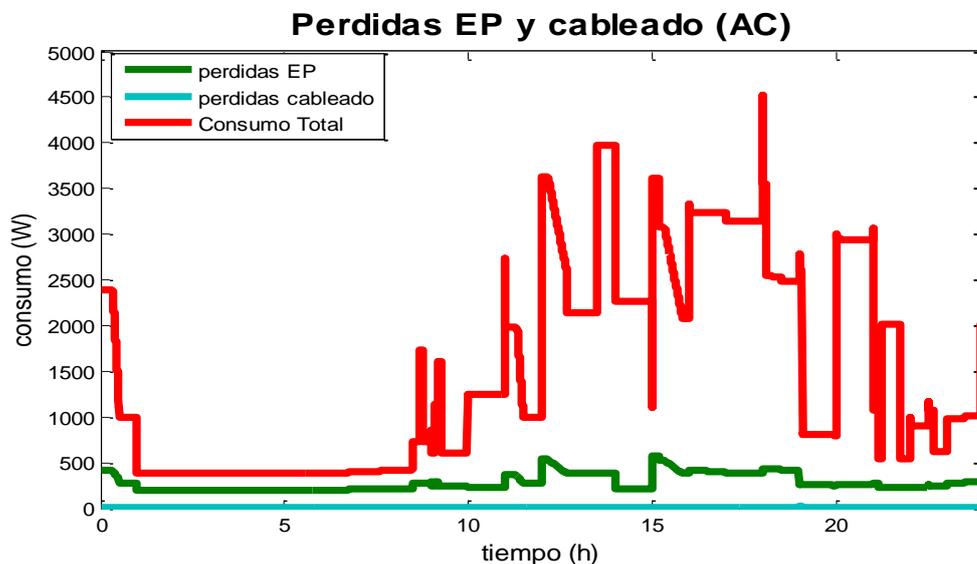


figura 49. Perdidas de EP y cableado en distribución AC

Como se puede observar en la figura, el mayor peso de las pérdidas por EP se da por la noche. Esto se debe a que por la noche los únicos aparatos que consumen energía son los aparatos de carga, o los electrónicos con stand by, y al trabajar la electrónica de potencia a tan bajas potencias respecto a su potencia nominal el rendimiento baja notablemente.



La siguiente figura representa el valor de las pérdidas de la electrónica de potencia respecto al consumo total en cada momento.

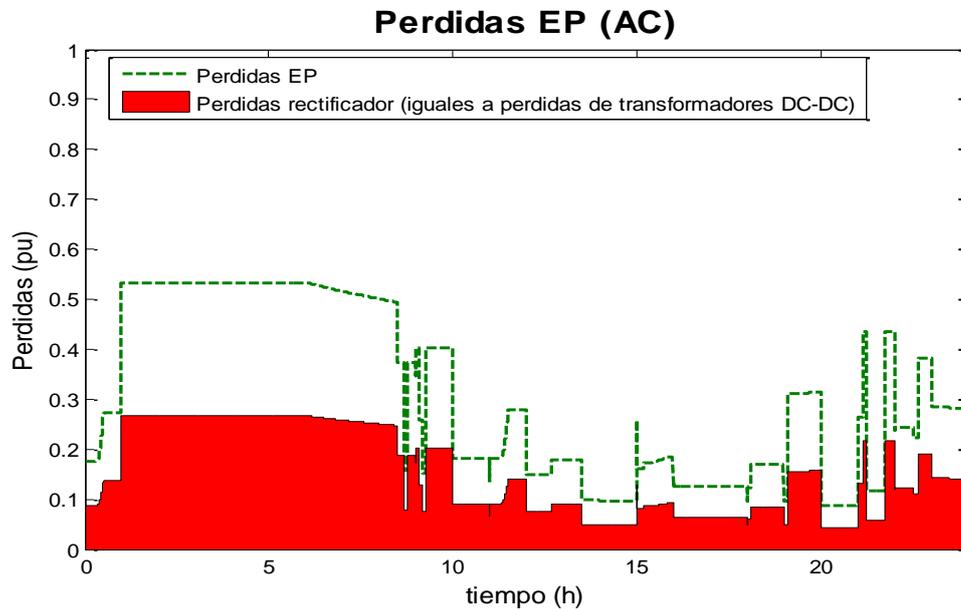


figura 50. Pérdidas de EP según tipo con distribución AC (%)

Las pérdidas en EP llegan a suponer hasta un 50% de la potencia consumida total en los momentos donde solo existe en la casa consumo residual. Las pérdidas se han considerado iguales en el transformador y en el rectificador.

4.1.2 PÉRDIDAS DISTRIBUCIÓN DC

Las pérdidas producidas por el cableado y la electrónica de potencia en el modelo de distribución continua se presentan a continuación:

Pérdidas transformadores DC/DC	Pérdidas Rectificador	Pérdidas Cableado	Pérdidas Totales
3.5%	6.7%	0.5%	10.7%

Las pérdidas en el cableado aumentan notablemente respecto a la distribución en corriente alterna. Esto se debe a que a la hora de dimensionar el cableado hemos tomado como mínima sección 1.5mm² y, por ello, aumentan las caídas de tensión, incrementando así las pérdidas. A pesar de ello siguen siendo totalmente despreciables respecto a las pérdidas en electrónica de potencia.



Como se puede comprobar en la tabla anterior, el ahorro de energía supondría aproximadamente un 9% respecto a la distribución en AC.

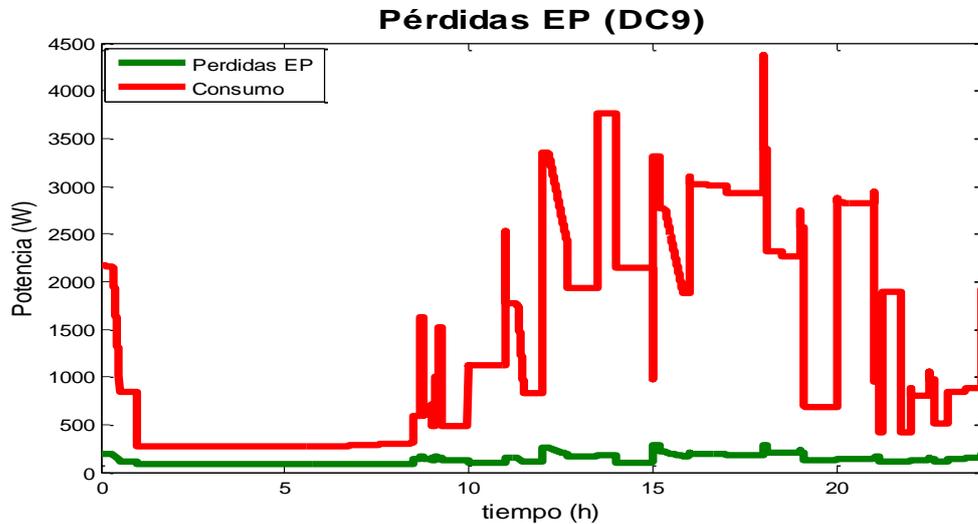


figura 51. Pérdidas de EP con distribución DC (%)

Esto se debe a dos motivos fundamentales:

- En primer lugar, al colocar un rectificador central de gran potencia nominal, aumentamos la eficiencia de éste a un 93.5% respecto al 85% de eficiencia de rectificadores con menor potencia nominal.

Aunque por otro lado la mayoría del tiempo el rectificador está trabajando muy por debajo de la potencia nominal. Se puede observar en la siguiente tabla, (considerando que la mitad de las pérdidas de electrónica de potencia se daban por el rectificador en la distribución AC), que las pérdidas se reducen en un 2.8% con el cambio a un rectificador centralizado.

Perdidas rectificador AC	Perdidas rectificador DC
9.5%	6.7%

- Por otro lado, en esta distribución se asume una normalización de 326VDC para los elementos nativos en DC, lo que permite ahorrarse un transformador DC/DC por cada aparato de este tipo. Esto nos ahorra aproximadamente un 5.5% de la energía total consumida.

Perdidas transformadores DC/DC en AC	Perdidas transformadores DC/DC en DC
9.5%	4%

Por último se comprobará el peso de las pérdidas de EP respecto al consumo total a lo largo del día:

Perdidas EP (DC)

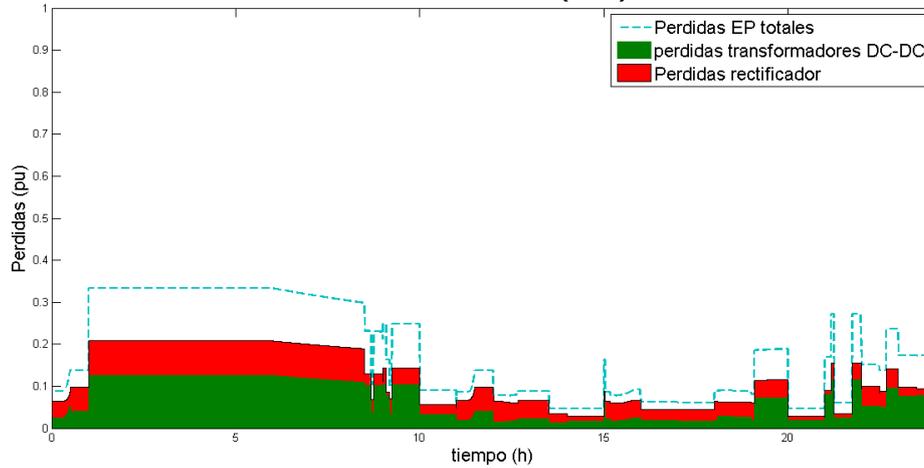


figura 52. Pérdidas de EP según tipo

Como se puede comprobar en la figura 52, la electrónica de potencia llega a suponer un 35% del consumo total. Además, mientras que las pérdidas de los transformadores oscilan entre un 2% y un 12%, las del rectificador oscilan entre un 4% y un 20%.

Para demostrar la importancia del dimensionamiento del rectificador, se comprobará a continuación el efecto que tienen variaciones en la potencia nominal de este en las pérdidas totales de la casa.

A continuación, se representa una gráfica que expresa el consumo total de los circuitos que se utilizan en el rectificador y la potencia nominal de este.

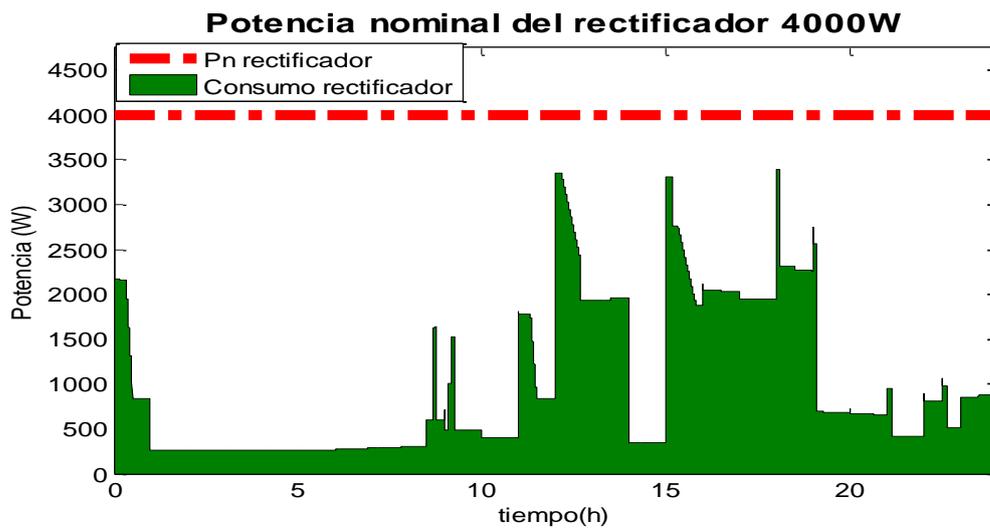


figura 53. Dimensionamiento de rectificador en modelo DC



La potencia nominal del rectificador se ha calculado como un 30% de la potencia total conectada a los circuitos, (la potencia total de estos circuitos es de 13337W), y como se puede comprobar este dimensionamiento en este caso específico es muy adecuado, ya que los picos de potencia suponen aproximadamente un 87.5% de la potencia nominal del rectificador. A continuación se pondrán los resultados de las pérdidas del rectificador al aumentar la potencia nominal de este:

Potencia nominal:	3500W (26%)	4000W (30%)	5000W (37.5%)	6000W (45%)	7000W (52.5%)
<u>Perdidas:</u>	6.3%	6.7%	7.4%	8.1%	8.85%

Como se puede comprobar en la tabla, al aumentar la potencia nominal a un 52,5% de la potencia total conectada al circuito, las perdidas aumentan un 30% respecto al caso analizado inicialmente. Por ello, podemos concluir que el dimensionamiento del rectificador es un factor clave.

4.1.3 PÉRDIDAS DISTRIBUCIÓN DC CON NIVELES DE TENSIÓN HV LV

Las pérdidas producidas por el cableado y la electrónica de potencia en el modelo de distribución híbrida con distintos niveles de tensión en continua se presentan en la siguiente tabla:

Pérdidas transformadores DC/DC	Pérdidas Rectificador	Pérdidas Cableado	Pérdidas Totales
3.8%	5.8%	0.9%	9.6%

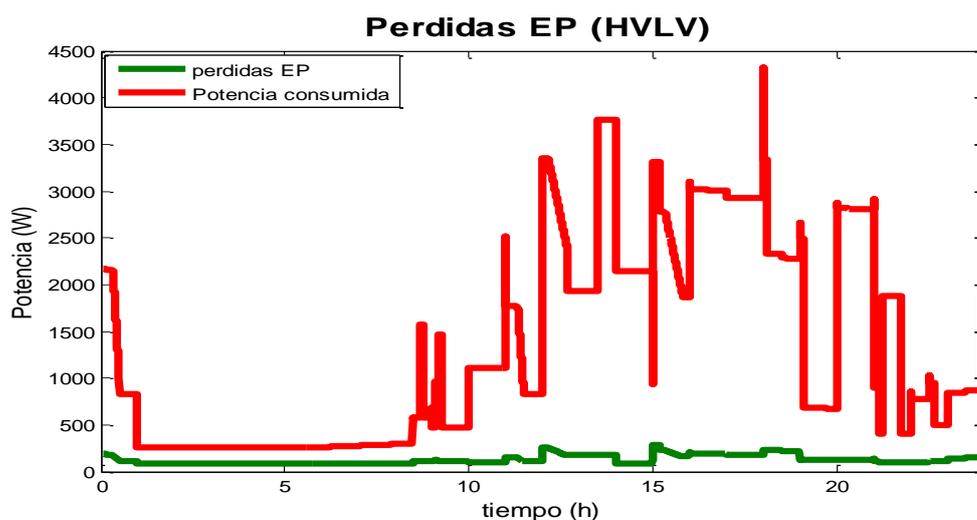


figura 54. Pérdidas de EP en modelo HVLV

Los resultados solo suponen un 0.5% de ahorro respecto a la distribución en DC en electrónica de potencia, esto se debe a:

- En primer lugar a los transformadores DC/DC, ya que se han dimensionado de tal forma que solo haya dos modelos, de 1000W y de 500W, cuando prácticamente ningún circuito LV supera los 300W de potencia pico. Tal y como están estos transformadores representan un gran fracaso, debido a que disminuyen la eficiencia respecto al modelo de distribución en DC y, además, complican la maniobrabilidad de la casa al añadir un modelo de enchufe (50V).

La siguiente figura representa las distintas potencias de cada circuito y la potencia nominal de cada rectificador.

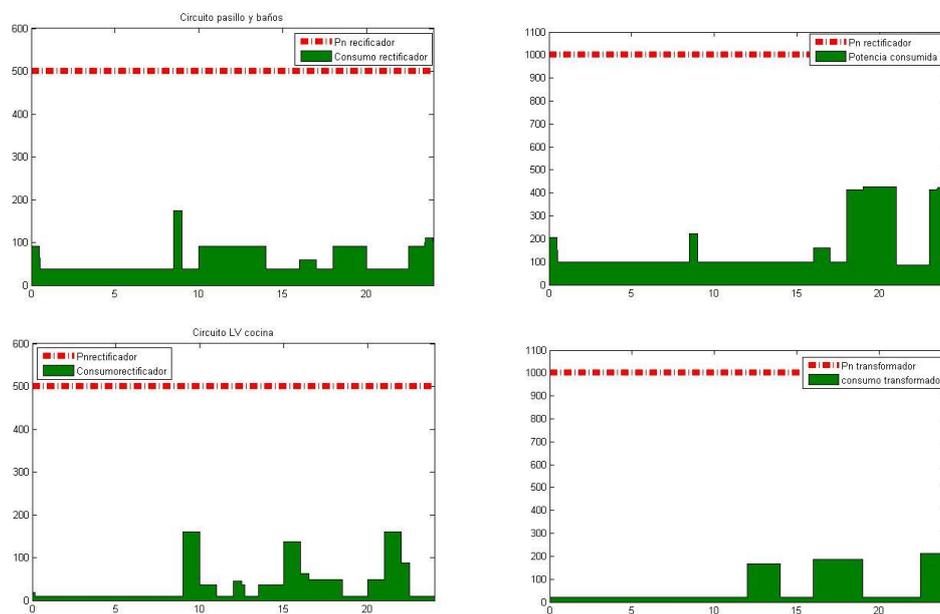


figura 55. Dimensionamiento de los distintos transformadores DC-DC

Como se puede comprobar, todos los transformadores están sobredimensionados para los circuitos y el consumo dado.

Si personalizáramos para cada circuito un transformador específico en función de la potencia consumida, de tal forma que el pico de consumo coincidiese con la potencia nominal, es decir, el dimensionamiento más eficiente posible, el resultado sería el siguiente:



Perdidas transformadores DC/DC: 3.5%

Este valor es similar al conseguido por el dimensionamiento inicial, pues solo difiere en un 8%, y por tanto en este caso el dimensionamiento no es excesivamente importante. Esto se debe a que, a pesar de que trabaja muy por debajo de condiciones nominales, los consumos de electrónica se caracterizan por tener un componente residual que hace que la electrónica de potencia específica para consumos electrónicos no trabaje por debajo de un 5-10% del dimensionamiento inicial.

- En segundo lugar, la mejora en el rendimiento del rectificador respecto al modelo DC, se debe a que debido a la redistribución de los circuitos se puede alimentar las tomas de potencia de la vivienda en AC o en DC independientemente de la localización del consumo. Esto permite un ahorro de casi un 1% del consumo total, pero complica la maniobrabilidad en la casa, ya que habría tres tipos de enchufe en toda la casa.
- Finalmente, las pérdidas en cableado aumentan, lo que se debe a: La necesidad de utilizar más longitud de cableado debido a que es necesario cablear varias zonas de la casa con distintos niveles de tensión, y a las pérdidas producidas en el nivel de tensión LVDC, ya que la tensión en este nivel es muy baja y produce variaciones de tensión importantes en pocos metros.

La grafica siguiente representa las pérdidas de cada tipo de EP en función de la potencia total consumida en cada instante.

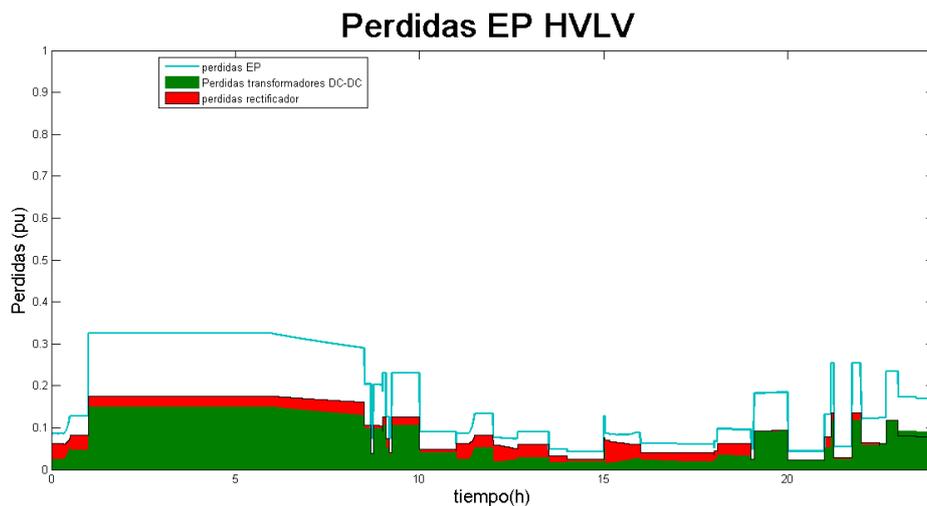


figura 56. Pérdidas en EP según tipo en el modelo HVLV (%)

Como se puede comprobar, en ciertos momentos las pérdidas producidas por los transformadores y el rectificador son muy parecidas, mientras que en otros momentos de



menor consumo o de funcionamiento de aire acondicionado las pérdidas del rectificador son mayores.

4.1.4 CONCLUSIONES DE EFICIENCIA

Las conclusiones se basan en los resultados de este caso de estudio pero se consideran extrapolables a los consumos domésticos con los aparatos especificados en el capítulo 2.

La conclusión es clara, el sistema de alimentación en corriente continua es más eficiente debido a la cada vez mayor utilización de la electrónica de potencia.

En caso de una normalización en los electrodomésticos con alta tensión que utilizan electrónica de potencia, la disminución de pérdidas sería notable (en torno a un 6% del total).

La centralización del rectificador aporta ahorro significativo de pérdidas, (en torno a un 3%) y se considera un factor importante del dimensionamiento del rectificador.

El uso del nivel de LVDC es complicado, ya que es necesario un estudio muy específico de los consumos para un correcto dimensionamiento y complica muchísimo la electrificación de la vivienda. Además, obligaría a tener tres tipos de enchufes distribuidos por la casa.

A mayor hibridación del sistema entre AC y DC mejores eficiencias se obtienen, ya que nos permite dimensionar el rectificador de forma más exacta.

Por todo esto se considera que el método más eficiente y viable de distribución doméstica es un sistema de alimentación híbrido, alimentando con tomas de potencia en AC y DC la cocina y, el resto de la casa, exclusivamente en DC, con un nivel de tensión normalizado en corriente continua de 326V (valor de tensión a la salida del rectificador), y transformadores de tensión específicos para cada aparato domestico que utilice electrónica de potencia y necesite estar alimentado a un nivel de tensión inferior.

4.2 ANÁLISIS ECONÓMICO

En este apartado se analizará la viabilidad económica de las opciones de distribución analizadas anteriormente. Con ese objetivo se calculará el precio estimado de la electrónica de potencia utilizada en los tres casos y las longitudes y las secciones de los cables instalados.

En primer lugar, y a partir de datos tomados de artículos reales y de los datos tomados por el estudio realizado por Manuel Vargas [Manuel Vargas 2013], estimaremos el precio aproximado por vatio en función de la potencia nominal del aparato de electrónica de potencia. Dado que en el mercado actual no se venden específicamente rectificadores o transformadores por separado, se considerara que los cargadores de aparatos electrónicos del mercado constan de un rectificador y un transformador electrónico, ambos con precios iguales.

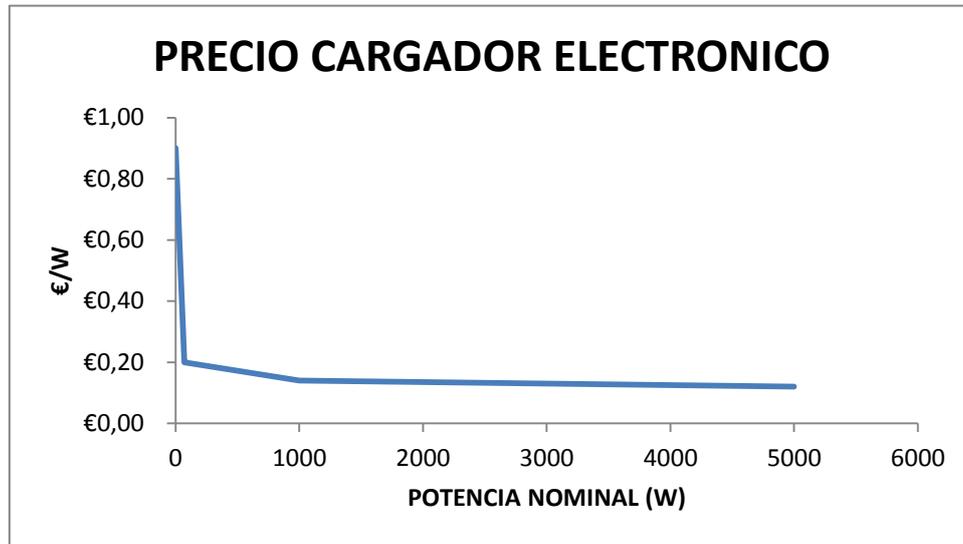


figura 57. Precio de los conjuntos de EP (rectificador y transformador)

Como se puede comprobar en la figura, los precios de la electrónica de potencia disminuyen en función de la potencia de forma notable, siendo mucho mayor el precio para potencias pequeñas.

Con estos datos introduciremos todos los artículos que usan electrónica de potencia en un programa de Simulink, que nos permitirá conocer el precio aproximado de la electrónica de potencia instalada en cada equipo, con resultados detallados en el [anexo 1](#). Los resultados económicos se resumen a continuación:

	Rectificadores	Transformadores electrónicos	TOTAL EP
Distribución AC	566.03€	566.03€	1132.05€
Distribución DC	242.50€	135.97€	378.47€
Distribución HVLV	215.00€	212.25€	427.25€

Como se puede comprobar, el menor precio corresponde al sistema DC puro. Esto se debe principalmente a la eliminación de los transformadores destinados a sistemas electrónicos alimentados a alta tensión, a la centralización del rectificador y a un buen dimensionamiento de la centralización. Para más detalle consultar el [anexo 1](#).

Por último se debe tener en cuenta las longitudes y secciones de cableado necesarias en cada caso. Las longitudes y secciones de cada modelo están especificadas en el [anexo 1](#) y los resultados finales de precio de cableado se especifican en la siguiente tabla.



Distribución AC	Distribución DC	Distribución HVLV
228.84€	141.54€	159.6€

Cabe destacar que las diferencias de precio entre los modelos AC y DC se corresponden a las diferentes secciones de los cables en los circuitos, ya que la longitud y la distribución de los circuitos es la misma. Por este mismo motivo las pérdidas de cableado son mayores en el modelo DC que en el AC.

Por otro lado el modelo de distribución HVDC tiene mayor longitud de cable que cualquier otro modelo, por ello el gasto en cableado debe ser mayor que el de modelo de distribución DC

4.2.1 CONCLUSIONES

En el análisis económico debemos distinguir entre el precio del cableado y el precio de la electrónica de potencia:

- **Electrónica de potencia:** A medida que se va centralizando la EP saldrá más económica, debido al factor de utilización que se utiliza al centralizar y a la curva de precios de la figura 59, luego a priori, el sistema más económico analizando la EP sería el modelo de distribución HVLV, pero, debido al mal dimensionamiento, el sistema más económico en el caso de estudio es el modelo de distribución DC.
- **Cableado:** El modelo de distribución DC y AC tienen la misma longitud de cableado. El modelo de distribución HVLV tiene mayor longitud de cableado, ya que se debe distribuir en varios niveles de tensión por la casa, por ello, debería ser el modelo más caro. A pesar de ello, debido a las consideraciones tomadas a la hora de dimensionar la sección de los conductores en los modelos de distribución, en el caso de estudio el modelo más caro es el modelo AC



REFERENCIAS

- **[MIT 2011]** Massachusetts Institute of Technology (MIT), "*The Future of the Electric Grid An Interdisciplinary MIT study*", Diciembre 2011.
- **[epia.org]** epia.org
- **[The economist 2013]** "*Electricity: Edison's revenge*" The economist, from the print edition. Octubre 2013
- **[Manuel Vargas 2013]** Master of science thesis, Tufdelft, Manuel A. Vargas Evans "*Why Low Voltage Direct Current Grids? A case-study assessment of using direct current in low voltage distribution*" Julio 2013
- **[DC microgrids 2012]** Chris Marnay, Steven Lanzisera, Michael Stadler, Judy Lai, "*Building Scale DC Microgrids*", IEEE mayo 2012
- **[Tracking the sun 2013]** Galen Barbose, Naím Darghouth, Samantha Weaver, and Ryan Wise, "*Tracking the Sun VI*" Lawrence Berkeley national laboratory, July 2013
- **[buidingsdatatook.com]** <http://buildingsdatatook.eren.doe.gov/TableView.aspx?table=2.1.5>
- **[Emerge Alliance]** <http://www.emergealliance.org>
- **[IEEE 2012]** David E. Geary, P.E. "*phasing out AC-directly*" IEEE septiembre 2012
- **[Emerge 2013]** Emerge alliance "*380 vdc architectures for the modern data center*" 2013
- **[NTT 2011]** NTT facilities "*DC powered data centers in the world*" Keiichi Hirose, September 2011
- **[eia.gov]** EIA Household energy use in California, <http://www.eia.gov/>
- **[Pacific gas and electric company 2012]** Breesa Collyer, Pacific Gas and Electric Company, "*DC Distribution Market, Benefits, and Opportunities in Residential and Commercial Buildings*" Octubre, 2012.
- **[DC report 2011]** Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, "*Direct DC Power Systems for Efficiency and Renewable Energy Integration with a Residential and Small Commercial Focus*", Environmental Energy Technologies Division, June 30 2011



- **[IEEE 2003]** Ambra Sannino, "Feasibility of a DC Network for Commercial Facilities" IEEE transactions on industry applications, vol. 39, no. 5, 1499, septiembre/octubre 2003
- **[greentechmedia.com]** <http://www.greentechmedia.com/articles/read/intel-ford-to-test-dc-microgrids>
- **[Moixa 2013]** Simon Daniel, Spyros Skarvelis-Kazakos, Priyanka Jain, "local smart DC networks and distributed storage for reducing and shifting peak load" moixa technology Junio 2013
- **[Yale 2010]** Yale school of forestry & environmental studies, Paul Savage, Robert R. Nordhaus, and Sean P. Jamieson: "DC Microgrids: Benefits and Barriers" 2010
- **[ZNE 2012]** ZNE Stakeholders "Zero Net Energy Action Plan: Commercial Building Sector" 2012
- **[americanhistory.si.edu]** <http://americanhistory.si.edu/lighting/20thcent/invent20.htm>
- **[Eurostat 2011]** Eurostat: "Consumos del Sector Residencial en España Resumen de Información Básica" Junio 2011
- **[catálogos]** Catálogos: Kestrel, Bosch 2014(frio, lavavajillas, lavado, secado, hornos, microondas, placas, campanas), Airis iluminacion, RAUM energy
- **[www.unicrom.com]**http://www.unicrom.com/maq_motor_universal_caracteristicas_velocidad.asp
- **[NEMA 2013]** "Achieving Major Breakthrough in DC (Direct Current, that is)" NEMA electroindustry Noviembre 2013
- **[wikipedia.com]** http://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics#cite_note-EPIA2012-3
- **[IREC 2011]** interstate renewable energy council IREC, "U.S. Solar MARKET TRENDS 2011," Larry Sherwood Agosto 2012
- **[ehowenespanol.com]** http://www.ehowenespanol.com/tecnologia-inversor-microondas-info_399447/
- **[Wikipedia.org]** <http://es.wikipedia.org/wiki/Magnetron%C3%B3n>
- **[comser.com]** <http://www.comser.com.ar/micro/magnetron/magnetron.html>
- **[elaireacondicionado.com]** <http://www.elaireacondicionado.com/inverter/>
- **[Toshiba-aire.es]** <http://www.toshiba-aire.es/toshiba-inventa/30-aniversario/que-es-inverter/comment-page-5/>
- **[unicrom.com]** http://www.unicrom.com/maq_motor_universal_caracteristicas_velocidad.asp



- **[kitsolar.com]** <http://www.kitsolar.com/es/tarifas-de-precios.html>
- **[Ornelas 2009]** Ornelas, "E.Basics of electric vehicle charging", 2009
- **[seia.org]** <http://www.seia.org/research-resources/potential-impact-solar-pv-electricity-markets-texas>
- **[upcomillas 2014]** Universidad Pontificia de Comillas, asignatura "The challenge of future electric systems", module 3: distribution systems, Pablo Frías, 2014
- **[www.kestrelwind.co.za]** www.kestrelwind.co.za modelo e400
- **[Catedra Rafael Mariño 2014]** Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas "Tecnologías de hidrógeno y pilas de combustible: mercado actual y expectativas." Rafael Luque. ARIEMA. Febrero 2014.
- **[allaboutcircuits.com]** http://www.allaboutcircuits.com/vol_3/chpt_3/4.html
- **[MTB 2009]** MTB, microturbinas para microgeneración, mayo 2009, turbinas MTB 100 de SALICRU.
- **[esen]** [esen](http://esen.es) "Microgeneración"
- **[STARLINE]** Starline DC solutions, "Chip2Grid™ Technology", www.uecorp.com

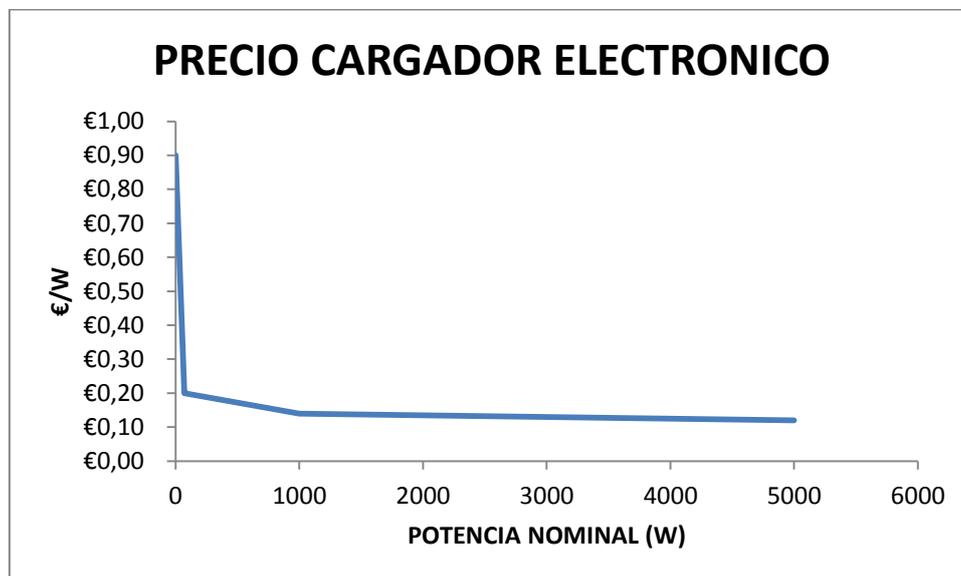


ANEXO 1. ANÁLISIS ECONÓMICO

En este anexo se explican las consideraciones llevadas a cabo en el análisis económico del proyecto:

- Se ha considerado que el precio de los cargadores electrónicos analizados en el mercado tienen una parte dedicada a rectificar la onda sinusoidal de entrada y otra a disminuir el nivel de tensión para adecuarla a las exigencias del consumo concreto. Estas dos partes se ha estimado que tienen un coste del 50% respectivamente del precio de mercado del cargador.
- A partir de un análisis de mercado se han obtenido precios aproximados de este tipo de artículos, especialmente de artículos con una potencia nominal menor de 150W. Para potencias mayores se han tomado datos del artículo *Why Low Voltage Direct Current Grids? A case-study assessment of using direct current in low voltage distribution* Manuel A. Vargas Evans

El resultado se resume en la siguiente imagen:



Estos datos se han traducido en *Matlab* a través de una *look-up table* 1D.

Se han tenido en cuenta todos los aparatos que utilizan electrónica de potencia, estimando que la potencia nominal de cada aparato es igual a la potencia nominal de su equipo electrónico. Los resultados de los distintos aparatos necesarios así como su precio obtenido se resumen en las siguientes tablas:



DISTRIBUCIÓN AC		
Potencia de EP	€ RECTIFICADOR	€ TRANSFORMADOR
800	56,45	56,45
90	8,35	8,35
72	7,13	7,13
70	7	7
3,25	1,19	1,19
17	3,18	3,18
1800	116	116
2200	139	139
104	9,30	9,30
72	7,13	7,13
12	2,82	2,82
17	3,18	3,18
3,25	1,19	1,19
1700	110,25	110,25
3,25	1,19	1,19
12	2,82	2,824
250	19,19	19,19
30	4,12	4,12
375	27,66	27,66
3,25	1,19	1,19
32	4,26	4,264
8	2,53	2,53
144	12,01	12,01
12	2,82	2,82
150	12,41	12,41
22,5	3,58	3,58
TOTAL AC	566,03€	566,03€

En la distribución en corriente alterna cada aparato electrónico tiene un transformador y un rectificador de potencia igual a la potencia del aparato al que alimentan.



DISTRIBUCIÓN DC			
Potencia de transformador (W)	€ TRANSFORMADOR	Potencia de rectificador (W)	€ RECTIFICADOR
72	7,13	4000	242,5
70	7	TOTAL	242,5€
3,25	1,19		
17	3,18		
104	9,30		
72	7,13		
12	2,82		
17	3,18		
3,25	1,19		
3,25	1,19		
12	2,82		
250	19,19		
30	4,12		
375	27,66		
3,25	1,19		
32	4,26		
8	2,53		
144	12,01		
12	2,82		
150	12,41		
22,5	3,58		
TOTAL	135,97€		

Como se puede comprobar, en el caso de distribución en DC se ha considerado un rectificador central dimensionado tal y como se especifica en el proyecto, y una serie de transformadores electrónicos específicos para cada aparato que no puede trabajar a 340V.

DISTRIBUCIÓN HVLV			
Potencia de transformador	€ TRANSFORMADOR	Potencia de rectificador	€ RECTIFICADOR
500	36,12	3500	215
500	36,12	TOTAL	215€
1000	70		
1000	70		
TOTAL	212,25€		



En el caso de distribución a distintos niveles de tensión, toda la electrónica de potencia es centralizada a través de un gran rectificador que alimenta a toda la vivienda y grandes transformadores para alimentar distintas zonas de ésta.

La siguiente tabla analiza el precio total en electrónica de potencia de los tres modelos de distribución.

	Rectificadores	Transformadores electrónicos	TOTAL EP
Distribución AC	566.03€	566.03€	1132.05€
Distribución DC	242.50€	135.97€	378.47€
Distribución HVLV	215.00€	212.25€	427.25€

Como se puede comprobar, el centralizar el rectificador permite disminuir el precio destinado a este tipo de electrónica de potencia. Lógicamente, cuanto menos carga tenga que alimentar el rectificador, menor será su potencia y menor precio tendrá, como ocurre en el caso de distribución HVLV.

Por otro lado, en el análisis económico de los transformadores se dan dos situaciones. En primer lugar, cabe destacar que en caso de normalización de AT se ahorrarían una serie de transformadores y eso explica la diferencia de precios entre la distribución en AC y en DC. Por otro lado, a pesar de que la centralización sería positiva para la electrónica de potencia, al estar sobredimensionado el sistema de transformación en distribución HVLV saldría más caro que el sistema de distribución DC.

Por último, en esta sección se analizara el precio del cableado en cada una de las distribuciones.

La siguiente tabla representa la longitud del cableado en función de su sección y del sistema de distribución escogido:

Sección (mm ²)	AC		DC		HVLV	
	Fase	Neutro	Fase	Neutro	Fase	Neutro
1,5	59	59	193	193	227	227
2,5	89	89	--	--	--	--
4	35	35	--	--	--	--
6	21	21	11	11	10	10



Asimismo basándonos en el precio de mercado los precios según la sección por metro de cable admisible en consumo doméstico según el reglamento son:

1.5 mm^2	<u>0.3 €/m</u>
2.5 mm^2	<u>0.5 €/m</u>
4 mm^2	<u>0.79 €/m</u>
6 mm^2	<u>1.17 €/m</u>

Con estos datos los precios totales en los distintos métodos de distribución de los cables serán:

Distribución AC	<u>228.84€</u>
Distribución DC	<u>141.54€</u>
Distribución HVLV	<u>159.6€</u>

Cabe destacar que la diferencia de precios entre el modelo DC y AC se debe simplemente a la diferencia de secciones de cableado, al dimensionar el cableado en el modelo DC con una sección mínima de 1.5mm^2 obtenemos mayores pérdidas de energía pero menor coste en cableado.

Por otra parte, la diferencia de precios entre el modelo DC y HVLV se debe exclusivamente a la mayor longitud de cableado utilizado en el modelo HVLV, ya que en este modelo es necesario el cableado en distintas zonas de la casa en baja tensión (48V) y en alta tensión (326V).

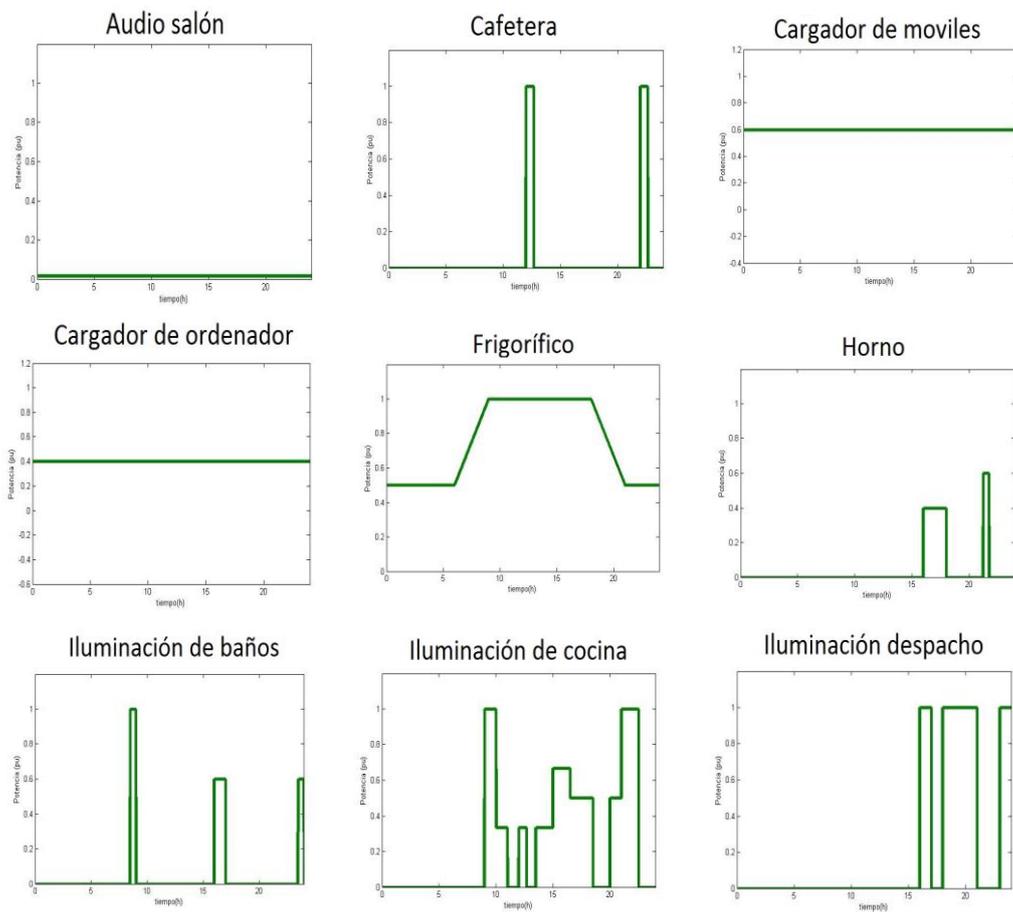


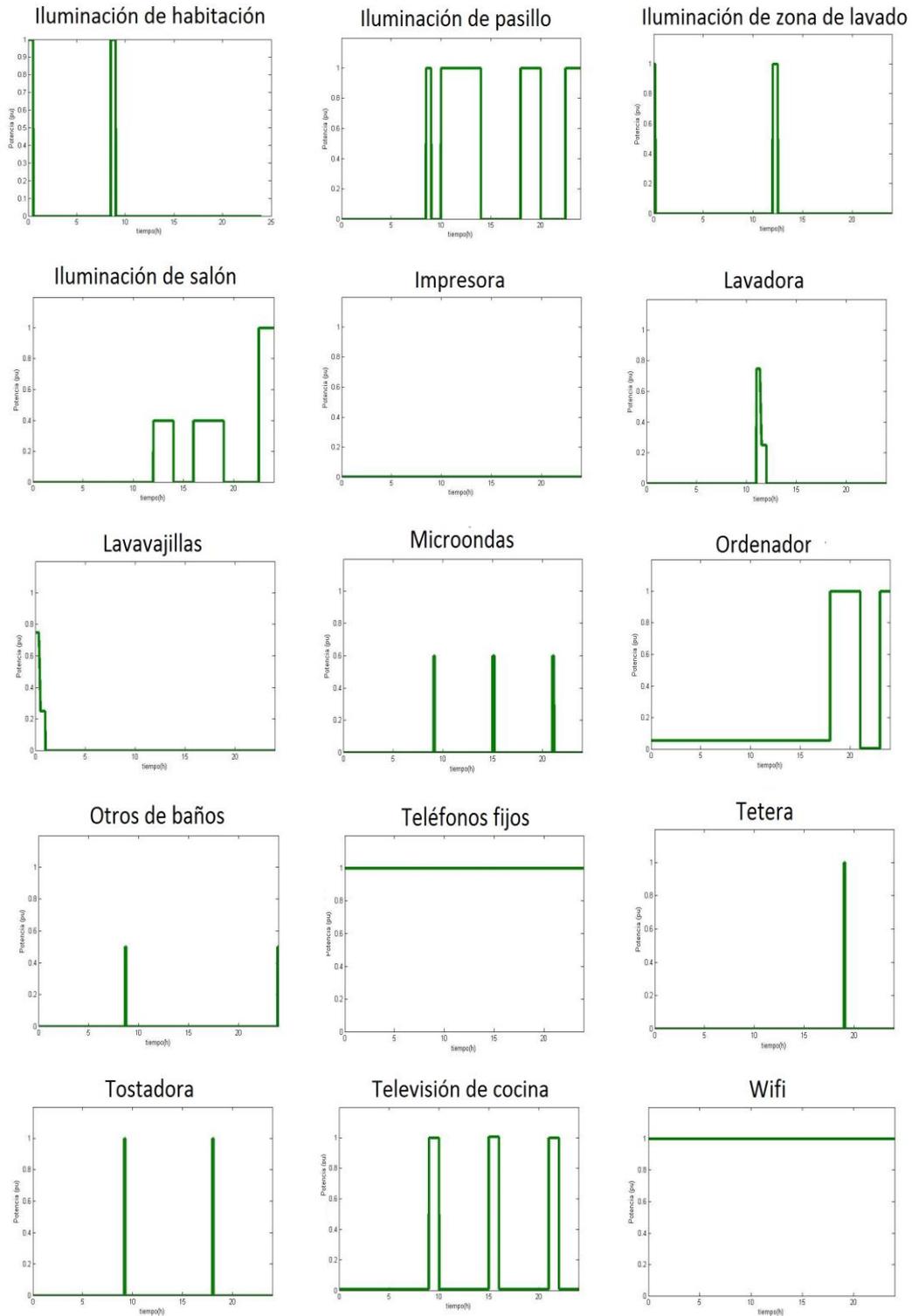
ANEXO 2. HERRAMIENTA SIMULINK

En este apartado se explicará el proceso de simulación en el programa Matlab Simulink.

En primer lugar se ha definido la variable tiempo como un vector de 0.001 de paso cuyos valores van de 0 a 24 (para el funcionamiento de los electrodomésticos se ha traducido el tiempo al sistema métrico, de tal forma que cada minuto representa 0.0166).

En segundo lugar se han definido el modo de funcionamiento y consumo en p.u. de todas las variables a partir de un programa de Matlab. El resultado se resume en las siguientes imágenes:

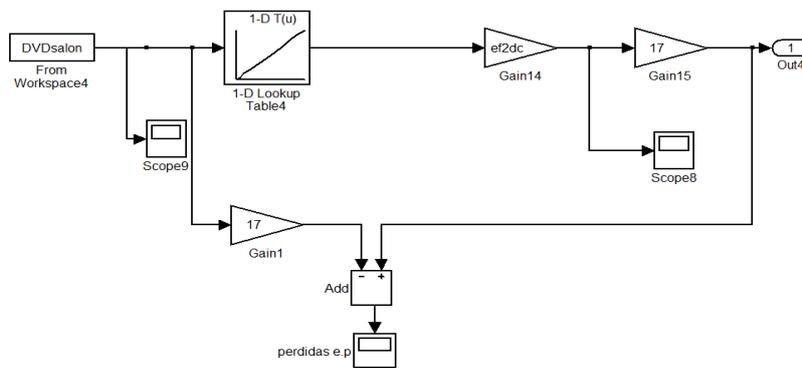




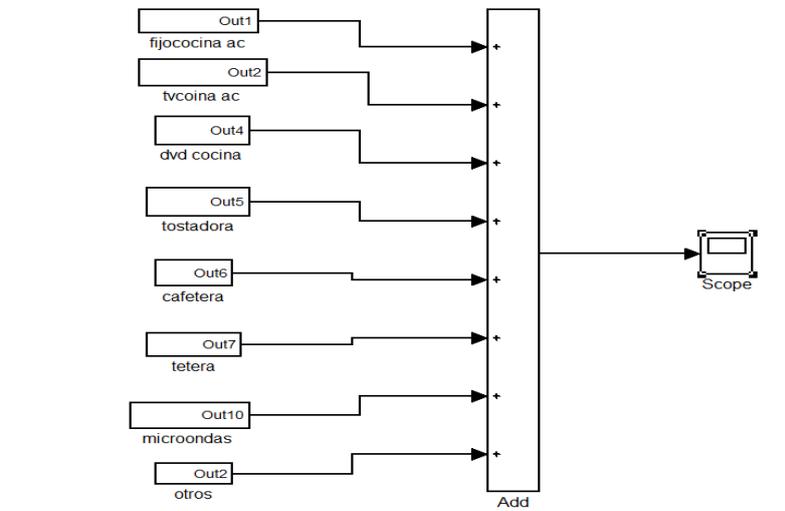
A continuación se ha introducido en Simulink las variables y se les ha colocado una electrónica de potencia con una curva y una eficiencia específica para cada modelo, y finalmente se les ha



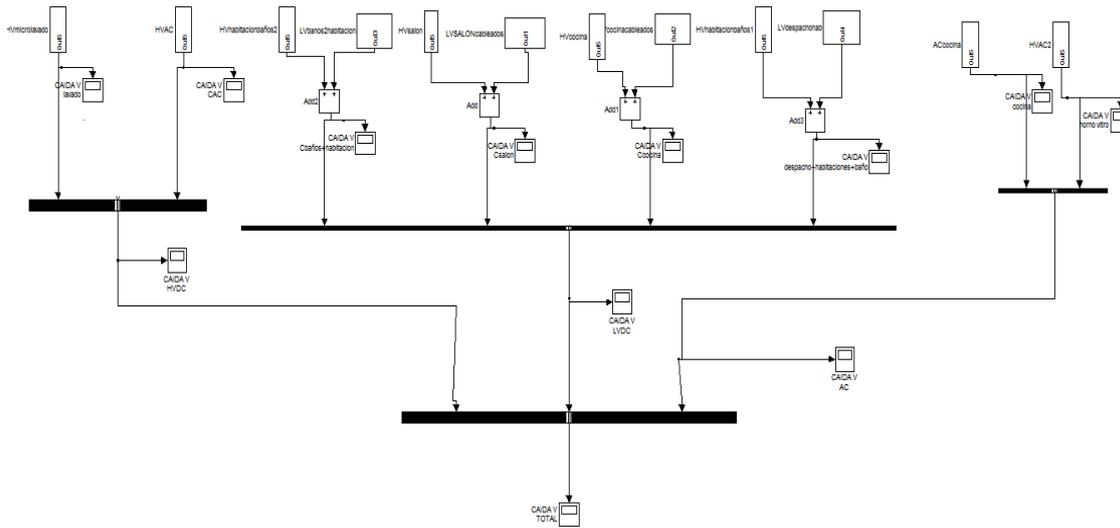
multiplicado por la potencia nominal del electrodoméstico, de tal forma que a la salida del bloque se tendrá la potencia total consumida por el aparato y su electrónica de potencia, tal y como representa la figura siguiente.



Tras realizar lo anterior se han distribuido las distintas cargas en los circuitos especificados. En la siguiente figura se representa el circuito 5 de la distribución DC:



Posteriormente se ha colocado en cada tipo de distribución la EP centralizada de cada una. La siguiente figura representa la distribución de circuitos en DC con el rectificador centralizado:



Para concluir, los resultados de las variables obtenidas se han analizado en un nuevo programa de Simulink para obtener las gráficas y resultados especificados en el proyecto.