



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS

MAT. LUIS MANUEL RIVERA GUTIÉRREZ

TESIS

ANÁLISIS DE PERTURBACIONES DEBIDO A ELECTRODOMÉSTICOS EN

UNA NANORED DOMÉSTICA DE CD

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA FÍSICA

QUE PRESENTA:

MIGUEL ÁNGEL CORDOVA FAJARDO

ASESOR:

DOCTOR EDUARDO SALVADOR TUTUTI HERNÁNDEZ

MORELIA, MICHOACÁN A MAYO DE 2023

Agradecimientos

Agradezco a Ely y Nico que han estado a mi lado todo este tiempo y su apoyo.

Agradecimiento total a mi asesor Dr. Eduardo S. Tututi por brindarme su guía y persistencia.

Agradezco la ayuda de parte de mi familia, así como de la familia de mi esposa.

Agradezco a mi maestros del programa del DCIF por darme la oportunidad de aprender un poco más de lo tanto que no conozco.

Un reconocimiento al personal administrativo del postgrado de Ingeniería Física por su atención recibida.

Agradezco tanto al CONACYT, como a la UMICH y al Tecnológico Nacional/Lázaro Cárdenas por su apoyo para llevar a buen fin mis estudios de doctorado.

Índice general

Declaración de responsabilidad	III
Resumen	IV
Abstract	V
1. Introducción	1
2. Nanoredes de CD	5
2.1. Antecedentes	5
2.2. Configuraciones previas	6
2.2.1. Microredes	7
2.3. Propuesta de una NDCD para pruebas experimentales	13
2.4. Selección de electrodomésticos y nivel de voltaje	14
3. Modelos Matemáticos electrodomésticos	17
3.1. Modelo matemático 1	20
3.2. Modelo matemático 2	26
3.3. Sistemas Hiperdistribuidos	36
3.4. Dinámica energética	42
3.4.1. Potencia consumida	44
3.4.2. Caso I: Corto circuito en la carga R_1 en ambas configuraciones	46
3.4.3. Caso II: Corto circuito en la carga R_2 en ambas configura- ciones	48
3.4.4. Caso III: Corto circuito simultáneo en las cargas en ambas configuraciones	48
3.4.5. Caso IV: Ausencia de alguna de las cargas en ambas confi- guraciones	49
3.5. Potencia efectiva en R_1 y R_2	50
3.5.1. Potencia efectiva en la configuración 1	50
3.5.2. Potencia efectiva en configuración 2	53
4. Montaje experimental	57
4.1. Adquisición de datos	62

4.2. Dispositivos de iluminación	65
4.2.1. Medición de armónicos para CA y CD	66
4.2.2. Lecturas de CA	67
4.2.3. Lecturas de la NDCD	67
4.3. Armónicos	68
4.3.1. Risados	71
4.4. Análisis y discusión	74
5. Conclusiones y consideraciones finales	81

Declaración de responsabilidad

1. Declaro que esta tesis denominada *Análisis de perturbaciones debido a electrodomésticos en una nanored doméstica de CD* es un trabajo original de mi investigación y ha sido escrito en su totalidad por mi.
2. Declaro que esta tesis de investigación no constituye en ninguna de sus partes un plagio del trabajo material o intelectual de ningún otro autor.
3. Declaro que esta tesis es prácticamente en su totalidad mi propio trabajo, la contribución colaborativa ha sido indicada claramente y reconocida.
4. Declaro que esta tesis no contiene material que haya sido aceptado o presentado para obtener cualquier otro grado académico, otro título o diploma en una universidad u otra institución de educación superior diferente a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
5. Declaro que se han proporcionado las debidas referencias sobre toda la literatura y los recursos de apoyo respetando íntegramente el contenido científico de los trabajos citados, y que la presente tesis es original en su totalidad y no se deriva de ningún trabajo citado.
6. Declaro que los artículos derivados, los escribimos en su totalidad nosotros, yo como estudiante y con mi asesor.

AUTOR

M.C.I.F. Miguel Ángel Cordova Fajardo

Morelia, abril 2023

Resumen

En este trabajo se estudian diversas topologías existentes de nanoredes de Corriente Directa. El uso de dicha nanoredes se ve impulsado por la incorporación de fuentes de energía renovable dentro de los sistemas eléctricos. Resulta conveniente establecer un análisis del funcionamiento de los dispositivos de almacenamiento de energía como un factor de cambio de paradigma dentro del sector energético. En lo que respecta al sector residencial, ya sea urbano o rural, es posible el uso de fuentes de energía renovable para satisfacer la mayoría de las necesidades domésticas por medio de energía eléctrica; reduciendo o evitando la dependencia de los combustibles fósiles. Este objetivo es alcanzado gracias al uso de electrodomésticos de alta eficiencia en conjunto con el sector de almacenamiento de energía, que logran reducir las pérdidas energéticas operando con corriente directa. Sin embargo, la presencia de los electrodomésticos generan perturbaciones que logran ser reproducidas por el modelo matemático presentado en este trabajo. Los principales aspectos a resaltar dentro del presente trabajo son: La topología de nanored doméstica de corriente directa propone un voltaje nominal de 120 Vcd ante falta de normas o estándares de este parámetro para su funcionamiento. Se identifican e incorporan electrodomésticos diseñados para operar en corriente alterna, dentro de corriente directa para alcanzar eficiencias relativamente mayores. El modelo matemático presentado logra describir el comportamiento de los electrodomésticos dentro de CD. El proceso de generación de energía es llevado a cabo mediante fuentes de energía renovable, donde la estabilidad de la nanored es soportada por el sector de almacenamiento de energía.

Palabras clave: Nanored CD, armónicos, almacenamiento de energía, electrodomésticos, fuentes de energía renovable.

Abstract

In the following work, various existing topologies of Direct Current nanogrids are explored. The use of these nanogrids is driven by the incorporation of renewable energy sources into electrical systems. It is convenient to establish an analysis of the operation of energy storage devices as a paradigm shift factor within the energy sector. With regard to the residential sector, whether urban or rural, it is possible to use renewable energy sources to satisfy most of the domestic needs by means of electrical energy; reducing or avoiding dependence on fossil fuels. This objective is achieved thanks to the use of high efficiency appliances in conjunction with the energy storage sector, which manage to reduce energy losses by operating with direct current. However, the presence of electrical appliances generate disturbances that can be reproduced by the mathematical model presented in this work. The main aspects to highlight in this work are:

In the proposed direct current domestic nanogrid topology, a nominal voltage of 120 Vdc is established in the lack of the standards for this parameter. Home appliances designed to operate in alternating current are identified and incorporated, into direct current system, achieving relatively higher efficiencies. A mathematical model is presented to describe the behavior of electrical appliances. The power generation process is carried out through renewable energy sources, where the stability of the nanogrid is supported by the energy storage sector.

Keywords: DC home nanogrid, harmonics, energy storage, home appliances, renewable energy sources.

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad, la búsqueda por alcanzar un medio ambiente apto para la continuidad de la civilización se ha convertido en una de las principales preocupaciones de la humanidad [1]. Es por eso que el ser humano se ha visto en la necesidad de replantearse la manera de generar energía limpia y de una manera sustentable, en particular la energía eléctrica. En el ámbito de los sistemas eléctricos de potencia, en muchos casos, el proceso de generación de energía eléctrica dentro del sistema centralizado eléctrico presenta una fuerte asociación con emisiones de gases de efecto invernadero. Este proceso se caracteriza por una baja eficiencia en las etapas de transmisión y distribución de energía hacia los usuarios. Es imperante realizar los esfuerzos tecnológicos para integrar las tecnologías de generación de energía renovables en los hogares, así como las modificaciones pertinentes a los electrodomésticos existentes en el mercado local para aumentar su eficiencia y desempeño [2] y para prevenir un eventual colapso del sistema eléctrico [3].

La presencia de dispositivos Electrodomésticos de Alta Eficiencia (EAE) en las viviendas urbanas, ha sido posible gracias a las ventajas que ofrecen las fuentes conmutadas y las políticas energéticas adoptadas por los gobiernos. Dichas fuentes conmutadas se encuentran en la mayoría de los electrodomésticos disponibles en el mercado. Esto facilita la implementación de una Nanored Doméstica de Corriente Directa (NDCD) en el hogar; reduciendo su costo económico, así como sus pérdidas de energía. Bajo éste principio, se satisface las necesidades de iluminación (lámparas led y fluorescentes), Tv, modem, carga de celulares, laptop, preparación y cocción de alimentos, disminuyendo o eliminando el consumo de gas dentro de NDCD.

Los electrodomésticos son utilizados para satisfacer necesidades en la casa ha-

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

bitación, siendo estos las principales cargas del sector doméstico en el sistema eléctrico. El consumo promedio de energía eléctrica en un hogar típico en México [4] se distribuye de la siguiente manera:

1. Iluminación, 22 %.
2. Refrigeración de alimentos, 30 %.
3. Cocción y preparación de alimentos.
4. Calentamiento de agua sanitaria.
5. Acondicionamiento de ambientes, 19 %.
6. Consumo de energía para equipos de entretenimiento y comunicación (televisión 14 %, teléfonos celulares, etcétera).

Para satisfacer las principales necesidades de una casa habitación, ha proliferado el uso de dispositivos de alta eficiencia conformado por fuentes conmutadas. Que facilitan la implementación de una NDCD dentro de una casa habitación. El incremento de la eficiencia energética dentro de la NDCD se logra gracias a que se evitan o eliminan varias etapas de conversión de energía dentro de los dispositivos electrónicos que disipan energía en forma de calor. Dando como resultado un incremento en la eficiencia del 15 al 22 % con respecto a los sistemas de Corriente Alterna [5].

Por otro lado, la incorporación de EAE's y tecnologías de energías renovables en una NDCD, trae consigo la emisión de armónicas al sistema eléctrico público, cuya estabilidad podría ser seriamente comprometida [6]. Las configuraciones convencionales de tecnologías de energías renovables presentan ciertas características técnicas que las vuelven inviables y poco atractivas para los usuarios, que las perciben como costosas y poco confiables.

El objetivo principal de las tecnologías de energía limpia es la disminución de la dependencia de combustibles fósiles, principal fuente de emisión de gases invernadero. Los retos que se enfrentan para lograr un desarrollo sustentable pueden ser resumidos a los sectores de almacenamiento y conversión de energía [7,8]. Por otro lado, con el interés que ha surgido en el desarrollo y mejoramiento del desempeño de vehículos eléctricos; en especial en el desarrollo del banco de baterías y supercapacitores para almacenar energía [9], se ha logrado bajos costos, peso y tamaño de estos dispositivos. En la actualidad, no existen normas o estándares establecidos que definan los criterios de desarrollo y operación óptima para

las NDCD [10], siendo un factor importante que complica su implementación, así como la incorporación de los EAE's. Tampoco existen estudios de los posibles efectos de los EAE's que operan dentro de una NDCD.

En esta tesis se lleva a cabo un análisis de los armónicos inducidos en una nanored de CD, debido a la presencia de electrodomésticos de alta eficiencia. También se definen ciertos criterios de regulación de voltaje que son de utilidad en el análisis. Además se lleva a cabo un estudio para cuantificar los efectos de los EAE's. Este estudio se realizó con el apoyo de pruebas experimentales y mediante un modelo matemático propuesto para simular las cargas eléctricas no lineales que representan los EAE's.

En efecto en el desarrollo de esta tesis, se logró acoplar el sistema de almacenamiento de energía de una NDCD con EAE's existentes en el mercado local y fuentes de generación de energía renovable para satisfacer las necesidades en los hogares, y con ello disminuir el consumo de energía de la red eléctrica pública. Para describir el comportamiento de las cargas no lineales que representan los EAE's, como ya se mencionó, se desarrolló un modelo matemático. Con dicho modelo matemático se realizó un análisis teórico de la NDCD cuyos resultados fueron comparados con los datos experimentales obtenidos de las perturbaciones generadas debido a la presencia de EAE

Como se sabe, la mayoría de los EAE's operan con fuentes conmutadas, las cuales muestran un comportamiento no lineal representando una fuente de emisión de armónicas en los sistemas eléctricos de CA. Este fenómeno ha sido ampliamente estudiado [11] con lo que en la literatura se ha propuesto filtros para mitigar sus efectos.

Para llevar a cabo el estudio de perturbaciones, se propuso un circuito eléctrico ideal de fuente conmutada reductora, reportada en las referencias [11–15], para la obtención del modelo matemático. Los parámetros de regulación de voltaje propuesto fue en un rango de 100 a 140 VCD siendo 120 VCD el voltaje nominal. Los aspectos a resaltar del presente trabajo, son:

- a) La instalación del sistema fotovoltaico, banco de baterías así como las conexiones eléctricas y la implementación de los dispositivos de alta eficiencia para la creación de una NDCD dentro de una casa habitación convencional.
- b) Con el uso de la instalación eléctrica existente en la casa habitación, en la cual se implementó la NDCD, se evitó ser invasivo y la realización de mínimas modificaciones en el cableado.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

- c) Se logró identificar los electrodomésticos de alta eficiencia existentes en el mercado local que permitió incorporarlos sin realizar modificaciones considerables.
- d) La obtención de perturbaciones dentro de una NDCD debido a la incorporación de electrodomésticos, a partir de modelos matemáticos propuestos y pruebas experimentales.
- e) Es propuesto el parámetro de regulación de voltaje con un valor nominal de 120 Vcd para una operación óptima de la NDCD.

Capítulo 2

Nanoredes de CD

2.1. Antecedentes

El sistema eléctrico de potencia fue implementado hace 130 años aproximadamente, formando una parte importante para el desarrollo de nuestra actual sociedad. La necesidad de un sistema eléctrico surgió, principalmente, bajo esquema de mercado que se desarrolló alrededor del invento de la bombilla incandescente, siendo su principal inversor Thomas Alva Edison, impulsor del sistema eléctrico en base a la CD o Continua (CC) [16]. El voltaje de operación era de **100 VCD** y un alcance de **transmisión efectiva de energía de 1 a 2 millas**; con unidades de generación de energía in situ [17], lo que en ese momento significaba demasiado ruido y contaminación para los usuarios debido a la operación del generador eléctrico. En 1885, George Westinghouse adquiere las patentes de transmisión eléctricas en Corriente Alterna (CA) que habían desarrollado Gaulard y Gibbs en 1881. En 1887 Nikolas Tesla registró siete patentes para el sistema de distribución de CA polifásico, motores, generadores y transformadores de CA, estos últimos dieron la ventaja de poder transmitir energía eléctrica desde grandes centros de producción de energía ubicados en los cauces de los ríos, a las ciudades de una manera barata [18]. Los primeros grandes centros de producción de energía consistían en complejo hidroeléctricos, posteriormente se implementaron complejos termoeléctricos para llevar a cabo la quema de combustibles fósiles, los cuales representaban fuentes de energía barata.

La industrialización de la sociedad se basó en sus recursos disponibles y capacidad energética para la transformación de la materia prima en insumos, así como la prestación de servicios a la población, sin dejar de mencionar el consumo hecho por la propia población. Dentro de los recursos energéticos destacan los hidrocar-

CAPÍTULO 2. NANOREDES DE CD

buros, gas natural (recursos no renovables y contaminantes), los cuales son utilizados en plantas termoeléctricas para la generación de energía eléctrica. Dichas plantas se caracteriza, principalmente, por localizarse a grandes distancias de la población y cercanas al punto para el cual el suministro del combustible usado sea más económico y transporte rápido; como lo son puertos marítimos, refinerías y se garantice la existencia de reserva y fuentes para el suministro de agua. Actualmente, el enfoque energético predominante para la industrialización de la sociedad ha sido la obtención de altas eficiencias y reducción de pérdidas durante los procesos. Acorde a lo anteriormente mencionado, los electrodomésticos de alta eficiencia existentes en el mercado ofrecen dentro de sus características un menor consumo de energía, dispositivos compactos y ligeros, con precios razonablemente aceptables para los usuarios. Su principal desventaja de su uso es la aparición de perturbaciones (armónicas) las cuales comprometen la estabilidad del sistema eléctrico.

2.2. Configuraciones previas

La generación de energía eléctrica, a partir de combustibles fósiles, ha estado asociada con problemas ambientales y a una baja eficiencia energética [19]; así como el incremento del nivel de emisiones de gases de efecto invernadero y el agotamiento de las reservas de combustible fósil [20]. Como se ha mencionado, la emisión de armónicos en la red eléctrica representa un riesgo para la estabilidad de la red del sistema eléctrico, con la posibilidad de colapso total o parcial [18].

Con respecto al sistema tradicional, la configuración del sector de generación de electricidad se caracteriza por ser altamente centralizado, con flujo de energía unidireccional. Esto es, el proceso de transformación de la energía se inicia en los generadores eléctricos síncronos ubicados en los complejos hidroeléctricos o termoeléctricos, para ser transportada por la red de transmisión y distribución hasta llegar al consumo por parte de los usuarios finales [21]. Los actuales desarrollos en tecnologías de energía renovables han facilitado su integración a la red. Con lo se ha estimulado el surgimiento de sistemas descentralizados de generación de electricidad, estableciendo sistemas eléctricos distribuidos [22] con la incorporación de tecnología de generación de cero emisiones.

En referencia al estudio realizado [23] entre los años 1992 y 2008, se muestra que la distribución del gasto energético en hogar urbano en México se compone en el consumo promedio de energía eléctrica de 76 %, en tanto que el gas LP represen-

2.2. CONFIGURACIONES PREVIAS

ta el segundo tipo de combustible empleado, marginando los otros combustibles. Con respecto a la distribución del consumo energético de hogares en zonas rurales para 1992, en promedio, el 54 % consistía en energía eléctrica, 24 % de gas LP, 17 % del petróleo, 4 % de la leña y 1 % del carbón. Para el 2008 se consolida el uso de energía eléctrica y gas como los principales combustibles, reduciendo el uso de las demás opciones de combustibles.

2.2.1. Microredes

En la actualidad, es posible contar con generación de energía en el hogar gracias a la integración de fuentes renovables que son cada vez más sencillas y asequibles [24]. Al eliminar la etapa de transmisión de energía a largas distancias a través de las líneas de transmisión, se logra la reducción de pérdidas por efecto Joule. El uso de los paneles fotovoltaicos para generación de energía eléctrica impacta en la mejora del confort en el hogar; es posible alcanzar una disminución de emisiones de gases de efecto invernadero con la implementación de electrodomésticos de alta eficiencia para la preparación, cocción y conservación de los alimentos [2]. Sin embargo, el comportamiento impredecible de la radiación solar debido a las condiciones meteorológicas, representa tan sólo una de las desventajas. El almacenamiento de energía es el punto crítico para la estabilidad y continuidad del sistema, representando un reto [25]. Estas tecnologías se restringen a ciertas configuraciones que las hacen pocas atractivas para el usuario final. En los sistemas interconectados a la red se han documentado la emisión de armónicas y suprarmonías [26], las cuales impactan en la calidad de la energía [27, 28], dando como resultado la disminución en la eficiencia debido a las etapas de transformación de la energía [2]. La estabilidad del sistema eléctrico se ve seriamente comprometida debido al sobrecalentamiento de sus componentes como lo son los transformadores de potencia. Por otra parte, durante la implementación de la configuración tipo isla, es preciso llevar a cabo la realización de una fuerte inversión económica para la adquisición del inversor de corriente. Dicho dispositivo es el encargado de efectuar la etapa de conversión de la energía desde el régimen de CD generada en los paneles fotovoltaicos y almacenada en el banco de baterías, al régimen de CA para su consumo en la operación de los electrodomésticos de CA.

Durante el desarrollo de la etapa de transformación de energía se presentan pérdidas de energía inherente a la electrónica de potencia y es limitado a su capacidad de diseño. Ante la presencia de un súbito aumento de carga en el sistema

CAPÍTULO 2. NANOREDES DE CD

que sobrepase la capacidad del inversor de corriente, provocará la desactivación del mismo por una sobrecarga, aun cuando las baterías presenten la suficiente capacidad para soportar dicha carga, lo cual no garantiza la confiabilidad y continuidad en el servicio. Para solventar dicho problema es preciso realizar una inversión económica para escalar a un inversor de corriente que presente una mayor potencia.

Existen diversas configuraciones para los sistemas fotovoltaicos tipo isla, las básicas serían las siguientes [29]:

1. Panel – Carga. Su funcionamiento está limitado a la radiación solar presente y a la capacidad del panel, la carga está directamente alimentada en CD por los paneles fotovoltaicos. Se caracteriza por una generación-consumo de energía en tiempo real, siendo la configuración más simple.

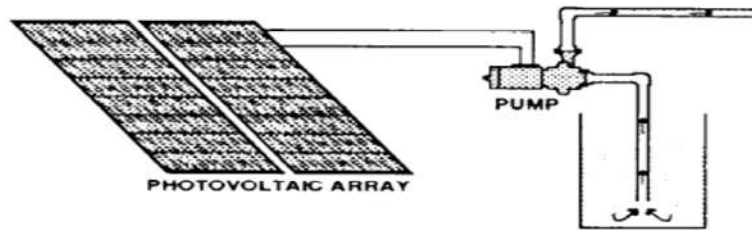


Figura 2.1: Generación-consumo de energía en tiempo real [29].

2. Panel – Control de Carga – Batería – Carga. La función del Control de Carga es verificar por medio del voltaje, la carga y descarga óptima del banco de baterías, así como la alimentación energética de la carga en el régimen de CD. Se incluye sector de almacenamiento de energía que permite una generación y consumo de energía eléctrica en diferentes instantes.

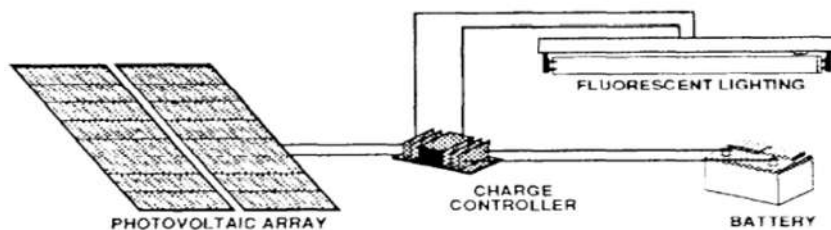


Figura 2.2: Panel – Control de Carga – Batería – Carga [29].

3. Panel – Control de Carga – Batería – Inversor – Carga. Típicamente conocida como "Isla". La energía generada por las fuentes de energía renovables se resguarda en el sector de almacenamiento de energía conformado por el banco

2.2. CONFIGURACIONES PREVIAS

de baterías, la cual es controlada por el Control de Carga, en un régimen de CD. El sector de cargas de CA es alimentado por medio del uso del Inversor de corriente encargado de transformar de CD a CA.

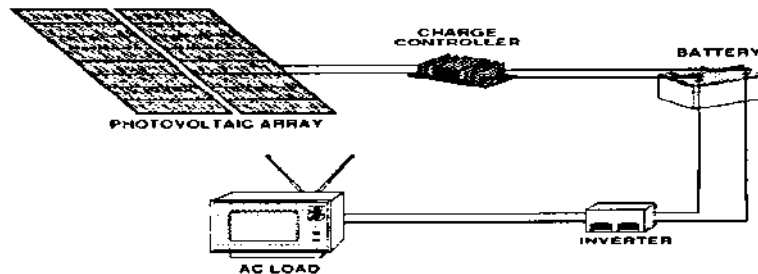


Figura 2.3: Configuración clásica tipo isla [29].

4. Interconexión a la red. Con esta configuración se prescinde de un sector de almacenamiento de energía, el excedente de energía que resulta de la generación-consumo en tiempo real es suministrada a la red de distribución del proveedor.

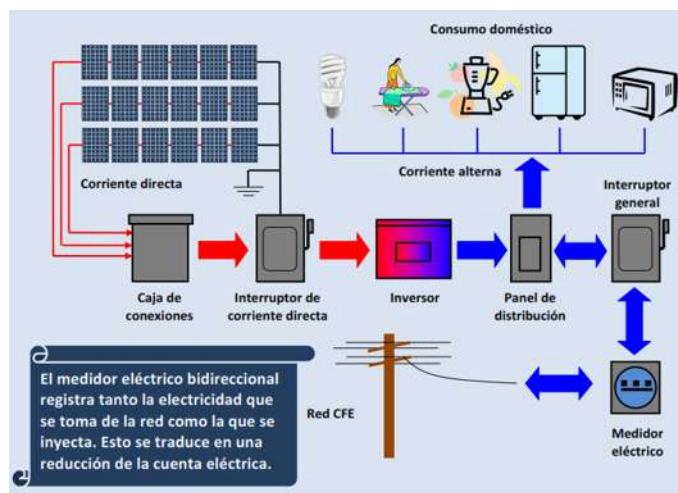


Figura 2.4: Sistema interconectado a la red [30].

Las configuraciones anteriormente mencionadas han fomentado el desarrollo de los conceptos de microrred y nanored como propuestas para la descentralización del sistema eléctrico. Dentro de una microrred es posible identificar un bloque de sectores, los principales sectores se conforman por un sector de generación de energía eléctrica distribuida, en lo general, soportado por fuentes de energía renovable; el sector de almacenamiento de energía (baterías, supercapacitores), sistema de distribución de energía, cargas y sistema de control y monitoreo. Existiendo la posibilidad de interconexión a la red de distribución centralizada para

CAPÍTULO 2. NANOREDES DE CD

intercambio de energía. Para lo cual una ciudad, colonia o calle puede ser considerada dentro del concepto de microrred para abastecer parte de su demanda. Mientras tanto una nanored, cuenta con características semejantes a la microrred pero en una menor escala, siendo una casa habitacional o un negocio, considerados la unidad básica para formar una microrred, representando el espacio físico donde se encontrarán la mayoría de las cargas. La nanored también puede interconectarse a la red o microrred para transferencia de energía u operar en forma aislada, siendo esta última, la forma donde se presenta su mejor desempeño. Las nanoredes pueden configurarse para operar en CA, CD o híbrida. Una nanored de CD es un sistema que cuenta con un bus en CD en el cual se conectan diferentes cargas y generadores. Mediante este bus de CD se presenta la opción de interconexión con un bus de CA por medio de un inversor o rectificador [3]. Siendo el control de una nanored en CD más simple que en CA.

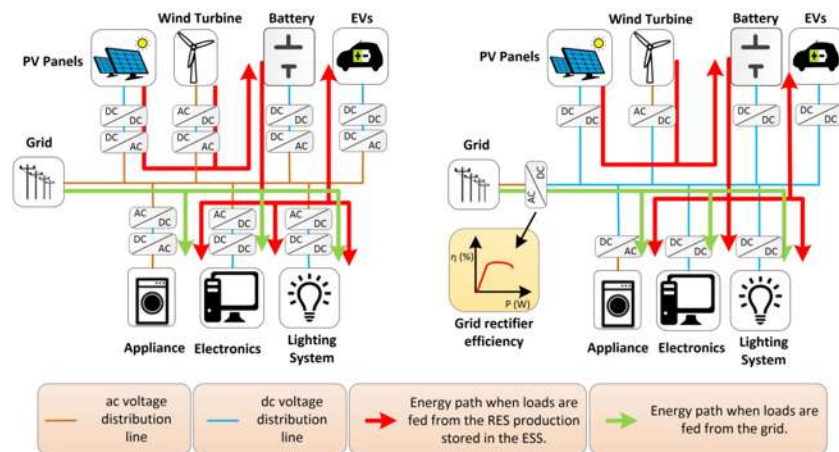


Figura 2.5: Nanored operando en CA y CD [2].

La implementación de dispositivos electrodomésticos de alta eficiencia en las viviendas urbanas, ha sido posible gracias a las fuentes conmutadas; algunas cargas residenciales operan internamente con CD, como lo son la Tv, lap top, celulares, iluminación Led y equipo de entretenimiento sin dejar de mencionar electrodomésticos para preparación, cocción y conservación de alimentos [31].

Actualmente, en los sistemas eléctricos de CA es posible encontrar normas de regulación y operación muy bien definidas y depuradas. En tanto que, las normas de regulación y operación de las nanoredes de CD aún se encuentran bajo desarrollo. Existen varias propuestas para los parámetros de regulación de voltaje; en las referencias [10, 32] se hace mención a la inexistencia de tal regulación; en la referencia [10] se proponen una configuración de nanored de CD, la cual es mostrada en la Fig. 2.6. En ella es definida una etapa de interconexión bidireccional

2.2. CONFIGURACIONES PREVIAS

al sistema eléctrico de CA por medio de un inversor - rectificador; se establece un bus de alto voltaje de 400 VCD con una etapa de interconexión bidireccional a un bus de bajo voltaje de 48 VCD por medio de un convertidor de CD - CD. La función del bus de bajo voltaje es la alimentación de las cargas eléctricas y llevar a cabo la conexión de las fuentes de energía renovables así como de los sistemas de almacenamiento mediante convertidores de CD - CD.

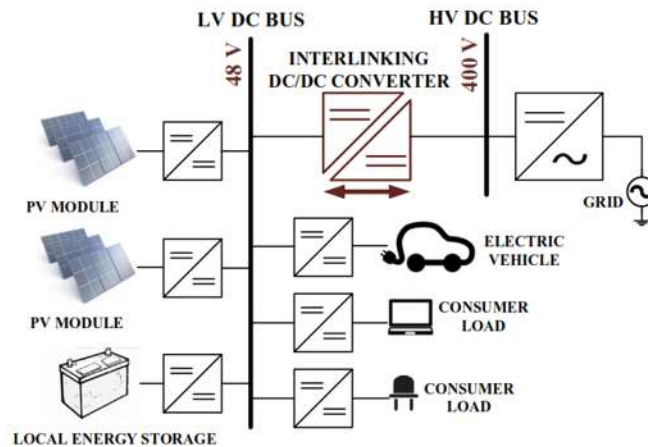


Figura 2.6: Nanored de CD en futuros hogares de CD [10].

En la referencia [32] se muestra la Fig. 2.7, en la cual se resalta la eliminación de una etapa de conversión de energía para la interconexión de las cargas, fuentes renovables y sistema de almacenamiento en el sistema de CD.

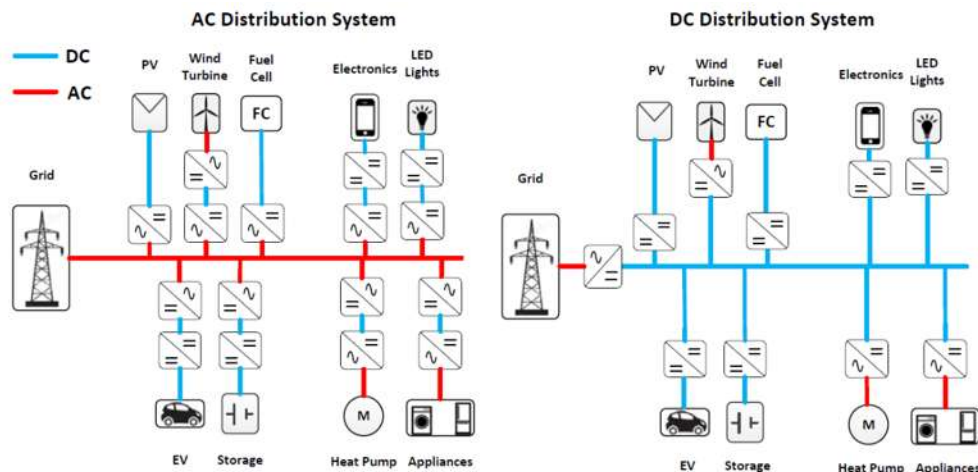


Figura 2.7: Sistemas de distribución [32].

En la Fig. 2.8 es propuesta una arquitectura híbrida, la cual consiste en un bus de 230 VAC 50 Hz para cargas de CA, un bus de 380 VCD con fuentes de energía y cargas eléctricas, un bus de 48 VCD con conexión de sistema de almacenamiento

CAPÍTULO 2. NANOREDES DE CD

y cargas, otros buses de 24 y 12 VCD para cargas. Cada interconexión entre buses se realiza con convertidores CD - CD.

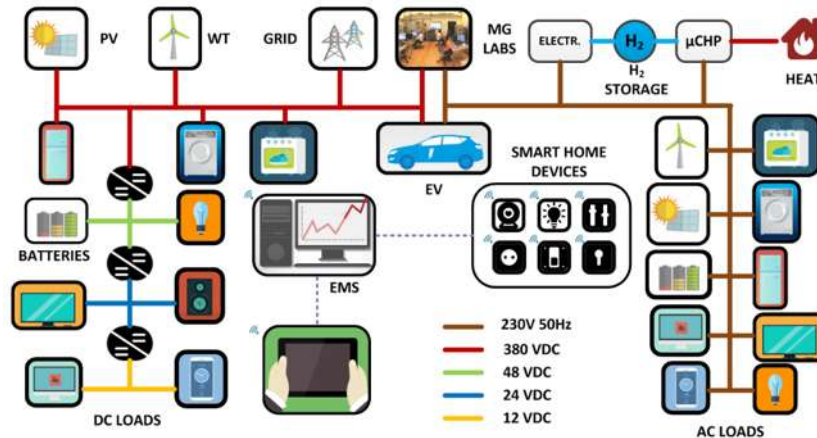


Figura 2.8: Nanored híbrida incorporando *Smart Home* [32].

En la referencia [33], se propone una nanored de CD con las siguientes características:

- * Bus de 48 VCD nominales.
- * 5 Amperes por circuito.
- * Topología de distribución similar al sistema de AC.
- * El cableado de AC puede ser usado. Los dispositivos de sobrecorriente de AC pueden ser usados.

Se puede considerar que el nivel de voltaje correspondiente a un valor de 48 VCD es seguro para los usuarios y su desempeño óptimo para distribución con una fluctuación de 10% [33]. Por otro lado, en la referencia [24] se discute sobre la existencia de entidades que aplican ciertos estándares, como lo es ETSI o EMerge Alliance, los cuales proponen buses de operación con valores a 380 VCD. En esta misma referencia, se menciona que voltajes mayores a 30 VCD no son seguros al contacto. En contraparte, en la Ref. [34], se menciona que para las condiciones de niveles de voltaje correspondiente a un valor de 120 VCD no se es requerido protección contra contacto indirecto. No obstante dentro del mercado local no se encuentran electrodomésticos, en general, que operen en CD, ya que operan con voltaje de AC.

2.3. Propuesta de una NDCD para pruebas experimentales

Desde el punto de vista histórico de los sistemas eléctricos [16–18], y tomando en cuenta que el principio de operación de la mayoría de los electrodomésticos de alta eficiencia existentes se basa en la arquitectura de fuente conmutada, facilita establecer como criterio de voltaje nominal de nuestra NDCD el valor de 120 VCD, de un rango de voltaje entre 100 y 144 VCD [35]. Los voltajes con valores de 12, 24 o 48 VCD son descartados, debido a que los sistemas operando con dichos voltajes muestran un bajo desempeño para transmitir energía a través de una mediana distancia. Actualmente, diversos electrodomésticos operan con voltajes internos en el régimen de CD, siendo las fuentes conmutadas las responsables de proporcionar y regular el nivel del voltaje interno. La operación EAEs dentro de buses con distintos valores de voltajes elevaría el nivel de complejidad para el usuario final. Ante una eventual conexión errónea del dispositivo a un bus de mayor voltaje implica un potencial daño a dicho dispositivo.

La propuesta de NDCD desarrollada durante este trabajo, es presentada en la figura 2.9. El sector de generación de energía esta conformado por 5 Paneles fotovoltaicos de 250 W cada uno, así como sus respectivos controladores de cargas. Para el desarrollo del sector de almacenamiento de energía, es implementado un banco de 10 baterías. El voltaje nominal corresponde a 120 VCD, el cual es obtenido con la configuración de conexión en serie de las baterías, con un rango óptimo de operación de 100 a 140 VCD. Para alimentar a las diferentes cargas es necesario del bus de distribución, se opta por utilizar el mismo cableado usual para sistemas de 127 V CA a 60 Hz. El sector de cargas, esta estrechamente relacionado con los electrodomésticos utilizados para satisfacer las necesidades diarias del hogar. Los electrodomésticos disponibles en el mercado local, son específicamente diseñados para su operación dentro de sistemas de CA. Sin embargo, es posible encontrar en el mercado local electrodomésticos diseñados para operar en sistemas de CD, los cuales son restringidos a aplicaciones de sectores como el automotriz, el camping o marítimas. Su adquisición representaría un aumento del costo, aunado a la falta de respaldo de refacciones.

Con respecto al sistema de protecciones eléctricas, su función principal es reducir y aislar los efectos negativos sobre los componentes de la nanored ante la incidencia de fenómenos abruptos como lo son los cortocircuitos. Este tópico es una línea a desarrollar en el futuro. En el desarrollo de esta tesis fueron implementa-

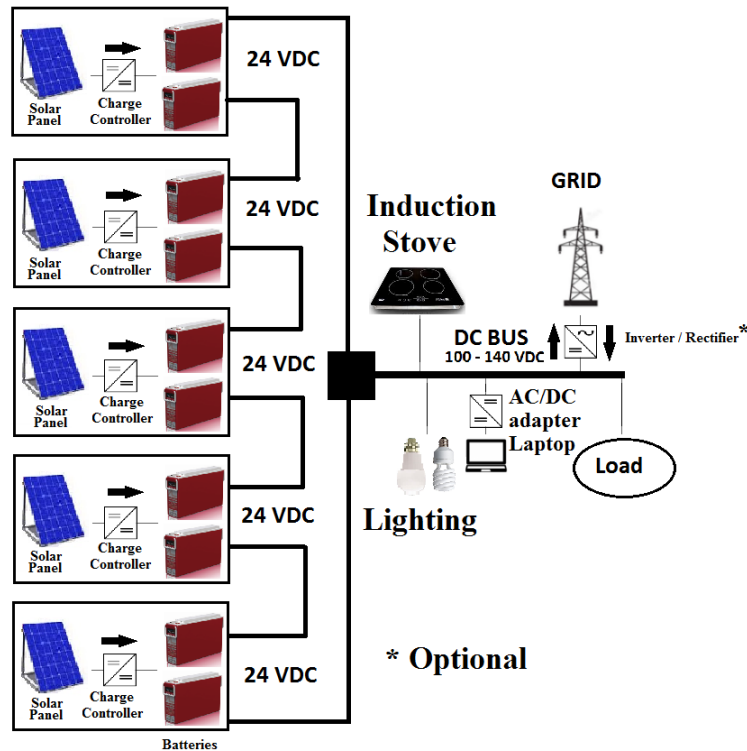


Figura 2.9: Configuración propuesta de NDCCD [36].

dos como sistema de protección eléctrica, los elementos fusibles en respaldo a las pastillas termomagnéticas.

2.4. Selección de electrodomésticos y nivel de voltaje

Es de gran importancia la selección de los electrodomésticos adecuados para un óptimo desempeño de la NDCCD. Con ello se busca establecer una propuesta técnica sólida que resulte ser una opción atractiva para el usuario final. Los aspectos a considerar son la disponibilidad y la facilidad de adquisición de electrodomésticos en el mercado local, aunado con el respaldo en soporte técnico en refacciones. El objetivo de esta sección no es el diseño de EAE para su funcionamiento dentro de CD, si no el establecer criterios para facilitar la selección de electrodomésticos de CA disponibles en el mercado para su operación en el régimen de CD.

Como se ha mencionado anteriormente, las fuentes conmutadas que están contenidas en diversos EAE's facilita la incorporación dentro de la NDCCD. La clave de esto son los procesos para la transformación de la energía. En la Fig. 2.10 se

2.4. SELECCIÓN DE ELECTRODOMÉSTICOS Y NIVEL DE VOLTAJE

muestra de manera general, dichas etapas. En ella se identifica una fuente de CA, la primera etapa consiste en el proceso de rectificación para obtener una señal semejante a CD con la presencia de un risado. La segunda etapa corresponde al filtrado, para lo cual se obtiene una señal similar a CD y se elimina la presencia del risado. En la tercera etapa, la señal completamente rectificadas, es utilizada por parte de la fuente conmutada para alimentar las cargas con un voltaje regulado. La primera y segunda etapa son la clave fundamental para la incorporación de los electrodomésticos sin grandes modificaciones. Las primeras dos etapas son visualizadas por la fuente conmutada como se muestra en la Fig. 2.11. En ella se representa las primeras dos etapas como una fuente equivalente de CD. El valor la fuente de CA mostrada en la Fig. 2.11, después de la etapa de rectificación y la obtención de voltaje en CD [37] puede ser calculado por:

$$V_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} V_{RMS} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{RMS} \approx 0,9 V_{RMS}. \quad (2.1)$$

En el caso del sistema eléctrico residencial mexicano, se suministra un voltaje de 127 V_{RMS} AC por Comisión Federal de Electricidad (CFE). El resultado de aplicar la Ec. (2.1) al voltaje suministrado por el sistema eléctrico residencial mexicano, nos arroja un valor equivalente a 114.3 VCD. Con respecto a la Fig. 2.11, las primeras dos etapas podrían ser sustituidas por una fuente de CD cuyo valor equivalga a un valor aproximado de 114.3 VCD. El dato anterior es el sustento técnico del criterio de la selección de electrodomésticos que contienen fuentes conmutadas y es de utilidad para establecer el voltaje de la NDCD en un valor de 120 VCD nominales.

Sin embargo, diversos electrodomésticos contienen elementos motrices para realizar sus funciones. En este ámbito se recurren, en general, a dos tipos de motores eléctricos. El motor de inducción y el motor universal, el primero es exclusivo para operar en sistemas de CA, mientras tanto el segundo puede operar tanto en CA como en CD. Dicho motor se define como “*un motor universal es un motor devanado serie o bien un motor devanado serie compensado que puede funcionar ya sea en corriente directa o en corriente alterna monofásica a la misma velocidad y salida aproximadamente... El motor universal es un motor de potencia fraccionaria y está diseñado usualmente para velocidades de 3 500 rpm o menos, pero también hasta de 10 000 o 15 000 rpm... El motor no compensado es menos caro...* ” [38].

El motor universal es ampliamente usado en aplicaciones donde se requiere altas velocidades como lo son licuadoras, procesadores de alimento, incluyendo herramientas de trabajo. En las aplicaciones donde se utilizan este tipo de mo-

CAPÍTULO 2. NANOREDES DE CD

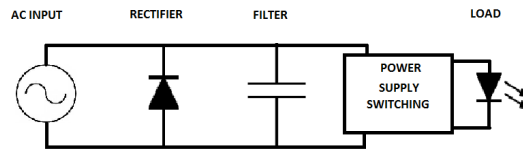


Figura 2.10: Circuito típico de lámpara de alta eficiencia.

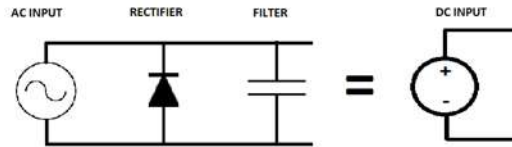


Figura 2.11: Fuente equivalente.

tores, normalmente no se requiere de un control de velocidad especializado. Por lo tanto, su incorporación a la NDCD es posible sin mayor modificaciones. Ante la intención de reducir el consumo de energía de los electrodomésticos, se han incorporados motores exclusivos de CD. Para dichas aplicaciones, es muy importante el control de velocidad y estos motores ofrecen un control más sencillo y barato. Por último, hemos detectado que las fuentes conmutadas presentes en los EAE's de CA permiten su incorporación dentro de una NDCD sin modificación alguna, como también es mostrado en el trabajo desarrollado de la Ref. [39].

Capítulo 3

Modelos Matemáticos electrodomésticos

Con el objetivo de fortalecer los esfuerzos para alcanzar una reducción en los consumos de energía por parte de los electrodomésticos, han sido establecidas propuestas técnicas sobresaliendo el uso de las fuentes conmutadas. Para el posterior análisis y propuesta del modelo matemático del comportamiento de los EAE's como cargas no lineales, en esta parte se realizará una breve introducción referente al tema de fuentes conmutadas. Durante el proceso de transformación de la energía en trabajo útil en estos dispositivos, es importante disminuir las pérdidas de potencia, logrando reflejarse en una mayor eficiencia de energía. Otros aspectos importantes a considerar es su reducción de tamaño, peso y del costo económico [14]. En la mayoría de los electrodomésticos, no siempre es posible cumplir estas características por medio de la electrónica lineal, ya que los dispositivos semiconductores operan en una región lineal (activa) y es utilizado un transformador de frecuencia de línea para el aislamiento eléctrico.

A fin de describir de una manera cualitativa y cuantitativa, las partes y funcionamiento de una fuente conmutada, consideramos el diagrama esquemático de la fuente conmutada de la Fig. 3.1, la cual nos proporcionar un voltaje nominal V_0 a una carga R . La alimentación proporcionada por CFE al primario del transformador, corresponde a 120 o 240 V CA a 60 Hz y el voltaje de salida del secundario podrá ser, por ejemplo, 5 o 12 V CA. El transformador es utilizado para aislamiento eléctrico y reducción del voltaje de la línea. El rectificador convierte la salida de CA del devanado secundario del transformador a CD. El transistor opera en su región activa como un reóstato ajustable, lo cual provoca una baja eficiencia de energía. Nótese que el transformador de frecuencia de línea se distingue por

ser relativamente grande y pesado.

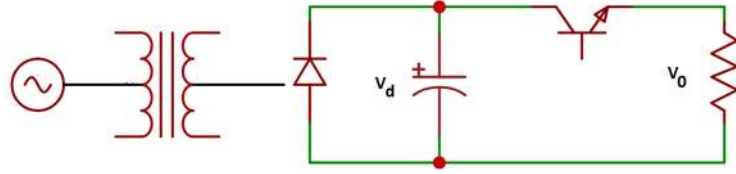


Figura 3.1: Rectificador clásico.

Una configuración clásica de fuente conmutada es mostrada en la Fig. 3.2. El transistor cumple la función de conmutador, ya sea completamente *encendido* (T_{ON}) o completamente *apagado* (T_{OFF}), con alta frecuencia de conmutación $f_s = \frac{1}{T}$, por ejemplo a 40 kHz. por lo que el voltaje V_d se convierte en un voltaje discreto, con un periodo $T = T_{ON} + T_{OFF}$. Se comienza con el voltaje V_d como entrada de CD y se logra evitar el uso del transformador, lo que resulta en un circuito equivalente. La combinación transistor/diodo se puede representar por medio de un

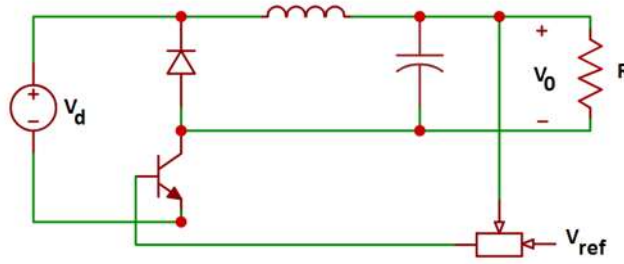


Figura 3.2: Circuito equivalente fuente equivalente.

interruptor de dos posiciones, como se muestra en la Fig. 3.3. Ya que el transistor conmuta entre el estado completamente conectado a completamente desconectado, se minimiza la pérdida de potencia. Esta pérdida de potencia de conmutación es por lo general mucho menor que la pérdida de potencia en suministros eléctricos de regulación lineal. Con altas frecuencias de conmutación, el transformador y los componentes de filtrado son muy pequeños en peso y tamaño en comparación con los componentes de frecuencia de línea. Conforme se hagan disponibles transistores con mayores velocidades de conmutación, se podrán aumentar las frecuencias de conmutación, y se podrá reducir el tamaño de transformador y filtro para la misma disipación de potencia de conmutación [2].

Para entender el principio de operación de reducción del voltaje, nos apoyaremos en la Fig. 3.4, la cual muestra un circuito resistivo en el que es regulado el voltaje V_R . Durante el tiempo $0 < t < T_{ON}$, el transistor opera completamente *encendido*

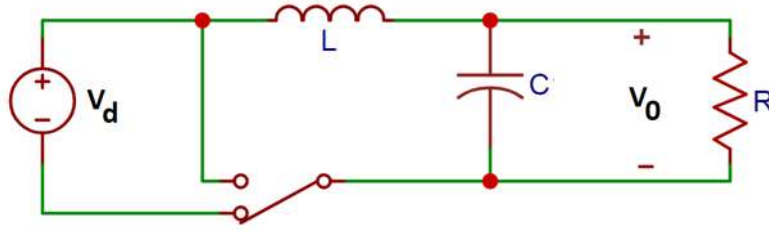


Figura 3.3: Circuito simplificado.

y la carga R está sometida a un voltaje $V_R = V_d$. Mientras que para el tiempo $T_{ON} < t < T$, el transistor opera completamente *apagado* y el voltaje en la carga R es $V_R = 0$ [12]. El voltaje promedio en la carga R en el periodo T es:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V_R dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_{ON}} V_R dt + \frac{1}{T} \int_{T_{ON}}^{T_{OFF}} V_R dt = \frac{T_{ON}}{T} V_d = D V_d, \quad (3.1)$$

donde D es el ciclo de trabajo y $0 < D < 1$.

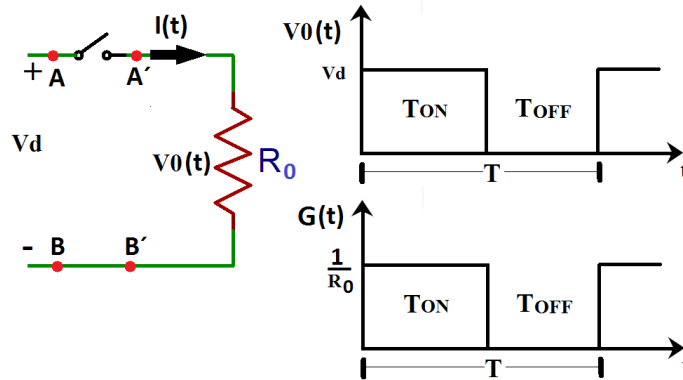


Figura 3.4: Circuito resistivo conmutado.

Existen varias técnicas de control del ciclo de trabajo, resultando la forma más simple mantener constante el tiempo de encendido T_{ON} mientras se regula el periodo T o *Modulación de frecuencia*, lo cual provoca problemas de compatibilidad electromagnética. Los problemas de compatibilidad electromagnética se pueden predecir y controlar si se mantiene constante el periodo T y se ajusta el tiempo de encendido T_{ON} o *Modulación de ancho de pulso* (PWM) [15].

Las fuentes conmutadas se encuentran en gran parte de los EAE's, los cuales representan emisiones de armónicos a la red eléctrica [40–44]. En las Figs. 3.5 y 3.6, es representado un circuito eléctrico del modelo de una carga no lineal, los cuales son la base para elaborar los modelos matemáticos de las cargas no lineales que se discutirán en las siguientes secciones.

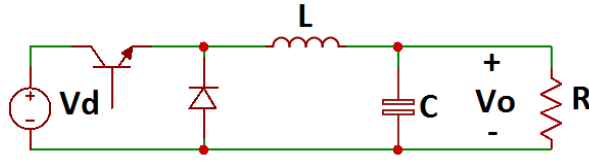


Figura 3.5: Convertidor Buck.

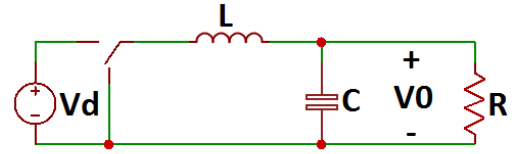
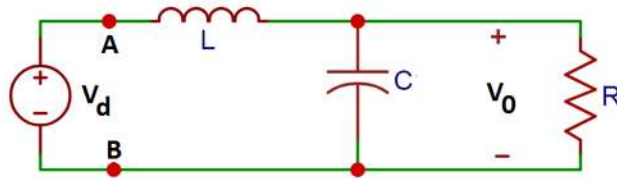


Figura 3.6: Buck ON/OFF.

3.1. Modelo matemático 1

Tomando como punto de partida la Fig. 3.6, podemos definir los modelos matemáticos de los circuitos eléctricos que resultan para los casos donde el transistor opera completamente *encendido* o completamente *apagado*. Para el primer caso donde $0 < t < T_{ON}$, tenemos el circuito de la Fig. 3.7; del cual nos interesa analizar los nodos a y b , $V_{ab} = V_d$ y $i_b = i_L$.


 Figura 3.7: Transistor completamente *encendido*.

Aplicando la Ley de Voltajes de Kirchhoff (LVK) al circuito de la Fig. 3.7 obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$V_L + V_C = V_d, \quad (3.2a)$$

$$-V_C + V_o = 0, \quad (3.2b)$$

donde; $V_L = L \frac{di_L}{dt}$, $V_o = Ri_R$, $V_C = \frac{Q_c}{C}$ y $V_C = V_o$. Para la corriente i_L en la inductancia L , obtenemos una ecuación diferencial lineal no homogénea de segundo orden. En términos de frecuencia, donde $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ y $\alpha = \frac{1}{2RC}$, se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + 2\alpha \frac{di_L}{dt} + \omega_0^2 i_L = \frac{V_d}{RCL}, \quad (3.3)$$

donde α es la **frecuencia de Neper** o **coeficiente de amortiguamiento exponencial** y ω_0 es la **frecuencia natural** [45]. La respuesta natural de la Ec. (3.3) es:

$$i_{L_{nat}}(t) = Ae^{m_1 t} + Be^{m_2 t}, \quad (3.4)$$

3.1. MODELO MATEMÁTICO 1

para lo cual:

$$m_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}, \quad (3.5)$$

$$m_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}. \quad (3.6)$$

Para finalizar, la solución general de la Ec. (3.3), está compuesta de la siguiente forma:

$$i_L = i_{L_{nat}} + i_{L_{part}}, \quad (3.7)$$

cuya solución está compuesta por los siguientes casos:

$$\alpha^2 - \omega_0^2 > 0, \quad \alpha^2 - \omega_0^2 = 0 \text{ y } \alpha^2 - \omega_0^2 < 0.$$

Para $\alpha^2 - \omega_0^2 > 0$ la solución se expresa como:

$$i_L(t) = A_1 e^{m_1 t} + A_2 e^{m_2 t} + \frac{V_d}{R}. \quad (3.8)$$

Para $\alpha^2 - \omega_0^2 = 0$ resulta:

$$i_L(t) = (A_1 + A_2 t) e^{-\alpha t} + \frac{V_d}{R}. \quad (3.9)$$

Mientras que para $\alpha^2 - \omega_0^2 < 0$ obtenemos:

$$i_L(t) = (A_1 \cos(\omega t) + A_2 \sin(\omega t)) e^{-\alpha t} + \frac{V_d}{R}, \quad (3.10)$$

donde $\omega = \sqrt{|\alpha^2 - \omega_0^2|}$.

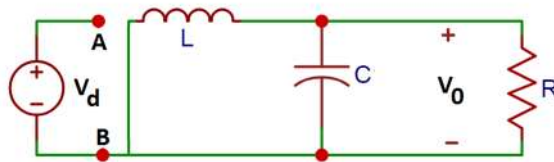


Figura 3.8: Transistor completamente *apagado*.

Aplicando LVK a la Fig. 3.8 para el caso donde el transistor se encuentra apagado $t > T_{ON}$. Se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones similar al instante anterior de tiempo, con la ausencia de V_d :

$$V_L + V_C = 0, \quad (3.11a)$$

CAPÍTULO 3. MODELOS MATEMÁTICOS ELECTRODOMÉSTICOS

$$-V_C + V_o = 0, \quad (3.11b)$$

donde; $V_L = L \frac{di_L}{dt}$, $V_o = Ri_R$ y $V_C = V_o$. Para la corriente i_L en la inductancia L , obtenemos una ecuación diferencial lineal homogénea de segundo orden; en términos de frecuencia, donde $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ y $\alpha = \frac{1}{2RC}$, se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + 2\alpha \frac{di_L}{dt} + \omega_0^2 i_L = 0. \quad (3.12)$$

La solución general de la Ec. (3.12), está compuesta de la siguiente forma:

$$i_L = i_{L_{nat}}, \quad (3.13)$$

cuya solución está dada por los siguientes casos:

$$\alpha^2 - \omega_0^2 > 0, \quad \alpha^2 - \omega_0^2 = 0 \text{ y } \alpha^2 - \omega_0^2 < 0.$$

Para $\alpha^2 - \omega_0^2 > 0$ obtenemos:

$$i_L(t) = A_1 e^{m_1 t} + A_2 e^{m_2 t}. \quad (3.14)$$

Para $\alpha^2 - \omega_0^2 = 0$ obtenemos:

$$i_L(t) = (A_1 + A_2 t) e^{-\alpha t}. \quad (3.15)$$

Mientras que para $\alpha^2 - \omega_0^2 < 0$ obtenemos:

$$i_L(t) = (A_1 \cos(\omega t) + A_2 \sin(\omega t)) e^{-\alpha t}, \quad (3.16)$$

donde $\omega = \sqrt{|\alpha^2 - \omega_0^2|}$.

El transistor conmuta a altas frecuencias, en cada pulso se debe calcular nuevamente las constantes A_1 y A_2 , según sea el caso, a partir de las condiciones iniciales. En la Fig. 3.9 se muestra el comportamiento de la corriente presente en el inductor del circuito reductor que es propuesto en la Fig. 3.6. Por otra parte, en las Figs. 3.10 y 3.11 se ilustra la corriente de la batería, el cual es nuestro parámetro de interés para el análisis de armónicos en el sistema eléctrico. Para la corriente de la batería i_{bat} se define de la siguiente manera:

$$i_{Bat} = \begin{cases} i_L, & 0 < t < T_{ON}, \\ 0, & T_{ON} < t < T. \end{cases}$$

3.1. MODELO MATEMÁTICO 1

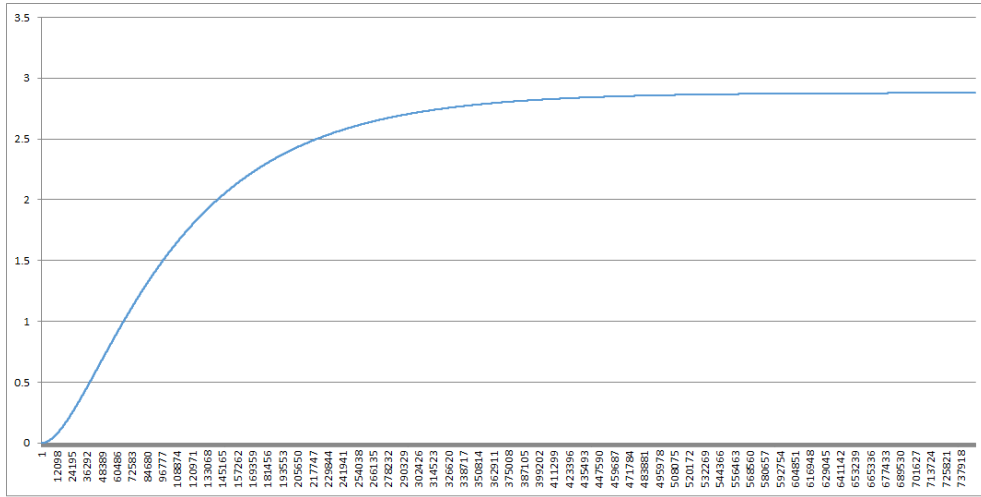


Figura 3.9: Corriente inductor i_L , para el caso $\alpha^2 - \omega_0^2 > 0$.

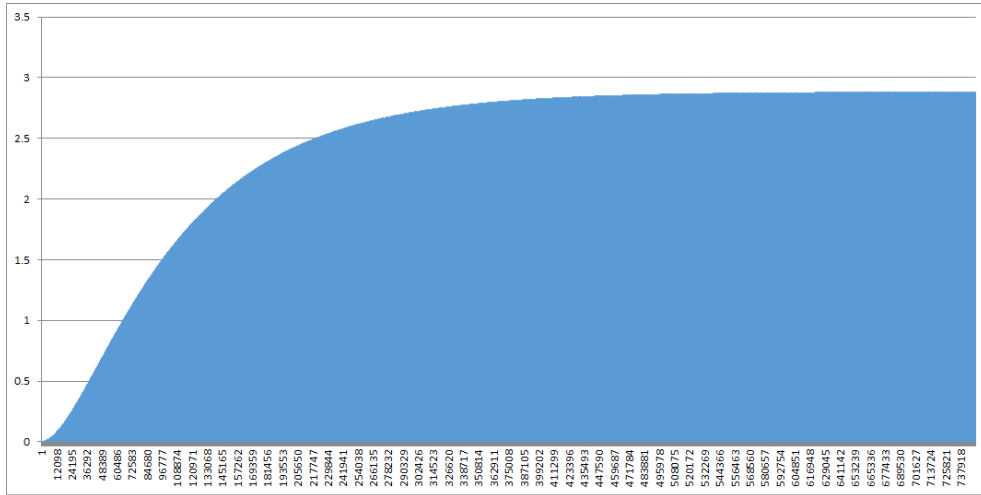


Figura 3.10: Corriente en batería i_{bat} , para el caso $\alpha^2 - \omega_0^2 > 0$.

En el análisis de armónicas emitidas por la carga no lineal, se hará uso de la herramienta que nos proporcionan el desarrollo de las series de Fourier [28]. El desarrollo en series de Fourier para $i_{bat}(t)$ es:

$$i_{bat}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} \left[a_h \cos\left(\frac{2h\pi t}{P}\right) + b_h \sen\left(\frac{2h\pi t}{P}\right) \right], \quad (3.17)$$

donde los coeficientes de la serie de Fourier son:

$$a_0 = \frac{1}{P} \int_0^P i_{bat}(t) dt, \quad (3.18)$$

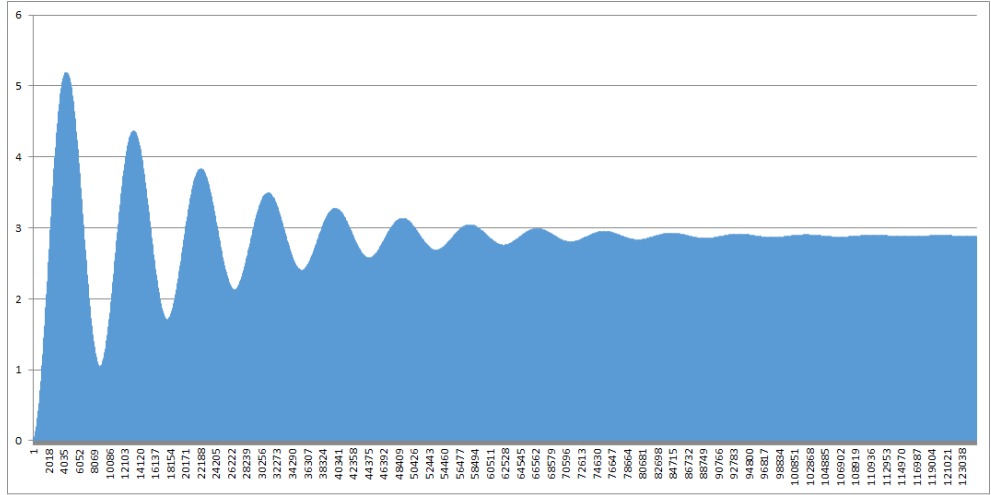


Figura 3.11: Corriente en batería i_{bat} , para el caso $\alpha^2 - \omega_0^2 < 0$.

$$a_h = \frac{2}{P} \int_0^P i_{bat}(t) \cos\left(\frac{2h\pi t}{P}\right) dt, \quad (3.19)$$

$$b_h = \frac{2}{P} \int_0^P i_{bat}(t) \sin\left(\frac{2h\pi t}{P}\right) dt, \quad (3.20)$$

donde $h = 1, 2, 3, \dots$ y P es el periodo de la corriente.

Mediante este análisis se cuantifica la distorsión provocadas por las cargas no lineales presentes en el sistema eléctrico. Para modelar el encendido y apagado del transistor, son obtenidos los coeficientes de Fourier de las Ecs. (3.8–3.10), según sea el caso, para el cálculo de armónicos inyectados al sistema. Con el apoyo de una hoja de cálculo desarrollada en Excel es implementado el algoritmo para la simulación de la corriente del inductor i_L y de la corriente en la batería i_{bat} como se muestra en la Fig. 3.12. El coeficiente a_0 , corresponde al valor promedio o componente de CD, es dado de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{P} \int_0^P i_{Bat}(t) dt, \\ &= \frac{1}{P} \left(\int_0^{T_{ON}} i_L(t) dt + \int_T^{T+T_{ON}} i_L(t) dt + \dots, \right. \\ &\quad \left. + \int_{P-T}^{P-T+T_{ON}} i_L(t) dt \right). \end{aligned}$$

Para la modelación del efecto del encendido y apagado debido al transistor, como una primera aproximación se propone una fuente V_d en forma de una función

3.1. MODELO MATEMÁTICO 1

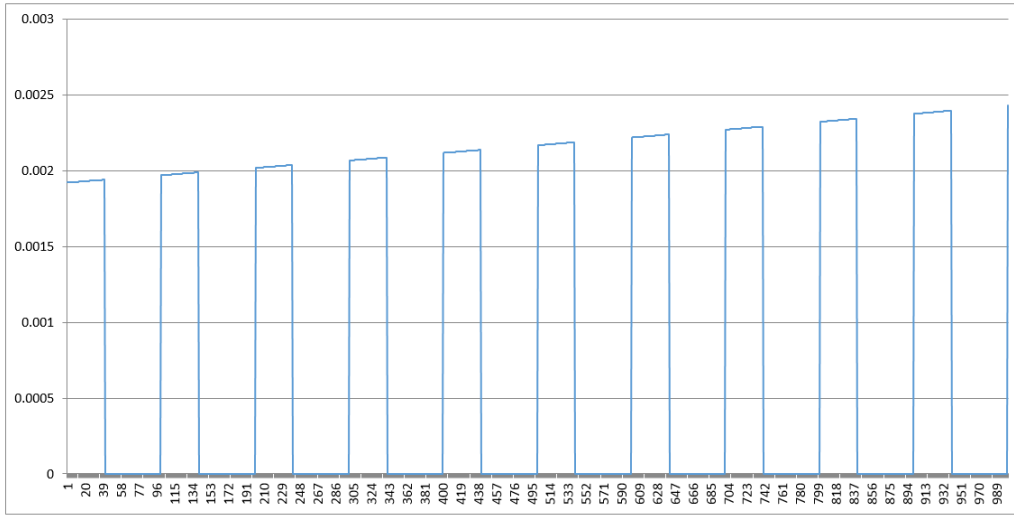


Figura 3.12: Corriente en la batería simulación.

escalón, como se muestra en la Fig. 3.13. Siendo su expresión de la siguiente forma:

$$V_d(t) = \begin{cases} V_m, & 0 < t < T_{ON}, \\ 0, & T_{ON} < t < T, \end{cases}$$

donde V_m es constante. Los coeficientes del desarrollo de Fourier, para este caso, son los siguientes:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_0^{T_{ON}} V_m dt + \frac{1}{T} \int_{T_{ON}}^T 0 dt, \\ &= \frac{T_{ON}}{T} V_m, \\ &= DV_m. \\ a_h &= \frac{2}{T} \int_0^{T_{ON}} V_m \cos(h\omega_0 t) dt + \frac{2}{T} \int_{T_{ON}}^T 0 \cos(h\omega_0 t) dt, \\ &= \frac{2V_m}{Th\omega_0} \text{Sen}(h\omega_0 T_{ON}). \\ b_h &= \frac{2}{T} \int_0^{T_{ON}} V_m \text{Sen}(h\omega_0 t) dt + \frac{2}{T} \int_{T_{ON}}^T 0 \text{Sen}(h\omega_0 t) dt, \\ &= \frac{2V_m}{Th\omega_0} (1 - \cos(h\omega_0 T_{ON})). \end{aligned}$$

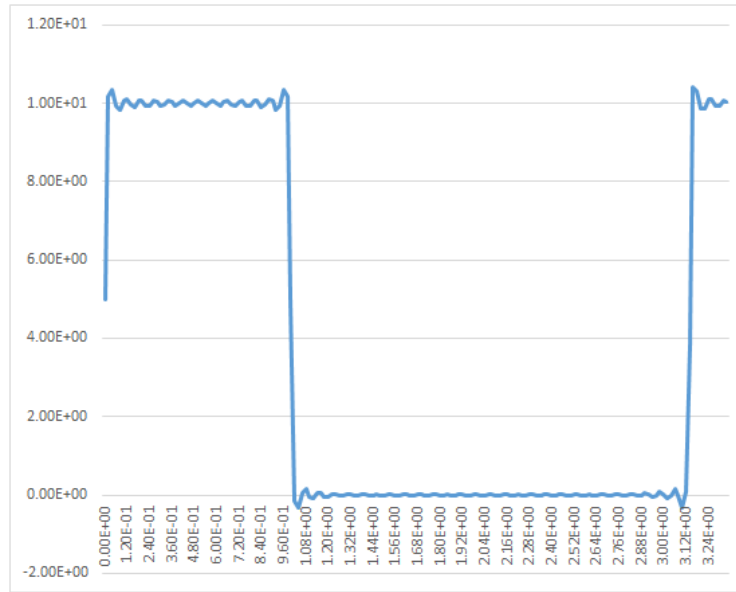


Figura 3.13: Representación de función escalón con series de Fourier.

obteniendo la siguiente serie de Fourier para el voltaje $V_d(t)$:

$$V_d(t) = DV_m + \sum_{h=1}^{\infty} \left[\frac{2V_m}{Th\omega_0} \text{Sen}(h\omega_0 T_{ON}) \text{Cos}(h\omega_0 t) + \frac{2V_m}{Th\omega_0} (1 - \text{Cos}(h\omega_0 T_{ON})) \text{Sen}(h\omega_0 t) \right]$$

Sus armónicos son mostrados en la Fig. 3.14. No abundaremos más en este análisis, basado en series de Fourier.

3.2. Modelo matemático 2

En esta sección se presenta el desarrollo del modelo matemático de las cargas no lineales. La descripción del comportamiento de ciertas cargas en sistemas de CD se ha llevado acabo tomando en cuenta el conocimiento previo de los componentes internos [46, 47]. Ahora, partiendo desde el punto de vista de la batería, se establece una carga no lineal, en la que se desconoce los componentes internos que la conforman. Sin embargo, es posible obtener su comportamiento dentro de la DCHN similar a una caja negra. Por otra parte, para simplificar los cálculos o diseño de ciertos parámetros en los sistemas de CA, el comportamiento de la fuente de voltaje se toma de la siguiente manera $V(t) = V_m \text{Sen}(\omega t)$ donde V_m es

3.2. MODELO MATEMÁTICO 2

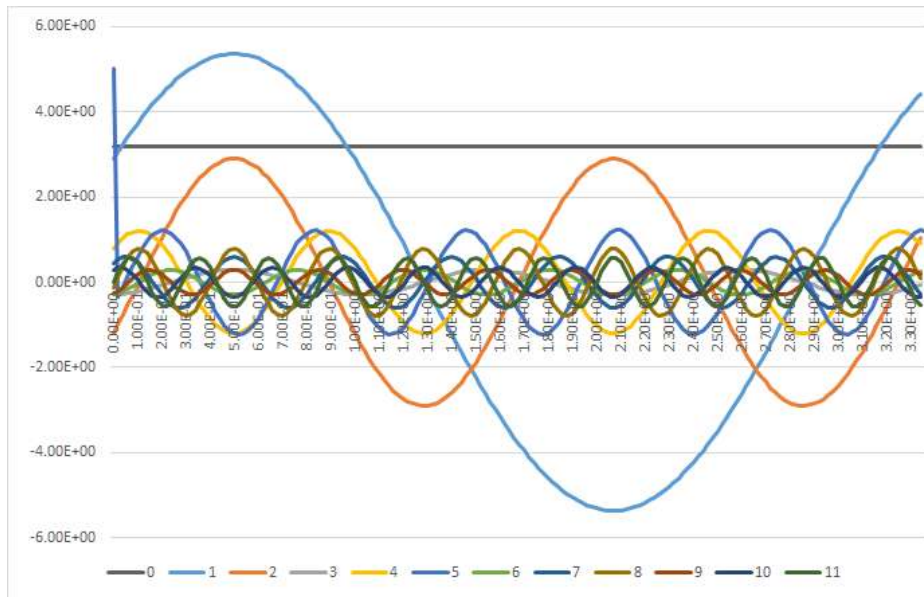


Figura 3.14: Representación de armónicos.

la amplitud del voltaje en tanto que ω es la frecuencia de la fuente. En diversos cálculos, estos datos son suficientes y no es requerida mayor información de la fuente. De manera análoga al análisis llevado a cabo en los sistemas de CA, se pretende buscar una función $R(t)$ que represente un modelo equivalente de una fuente conmutada y reproduzca su comportamiento no lineal.

Tomamos el caso del convertidor tipo Buck, mostrado en la Fig. 3.15, como una carga no lineal dentro de NDCD. En las terminales A y B se ha conectado el convertidor tipo Buck y es incorporada una etapa de filtrado de interferencias electromagnéticas que puede ser compuesto por un elemento inductivo L_f y/o una carga capacitiva C_f . Las fuentes conmutadas se caracterizan por mostrar un comportamiento periódico. Se identifica un tiempo T_{ON} donde se caracteriza por un incremento en el consumo de energía y un tiempo T_{OFF} para el cual se presenta un menor consumo de energía. El periodo T de la fuente conmutada equivale a la expresión $T = T_{ON} + T_{OFF}$. De manera que la frecuencia de la fuente conmutada se define como $\omega_s = 2\pi/T$.

En el instante T_{OFF} los elementos activos del convertidor Buck corresponden a los componentes del sistema de filtrado. El siguiente paso corresponden a T_{ON} , en esta caso el transistor permite la alimentación del circuito correspondiente formado por los componentes internos R , L y C . El filtro EMI permanece conectado a las terminales $A - B$ durante todo el periodo T . Los efectos que provocan estas cargas deben ser considerados para el diseño de una NDCD. En otras palabras, dado que los valores de los componentes internos R , L , C , C_f y L_f generalmen-

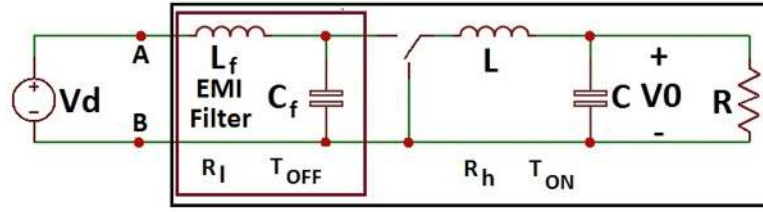


Figura 3.15: Convertidor tipo Buck.

te son desconocidos, resulta complejo un análisis de la NDGD más cercano a la realidad.

Con el objetivo de modelar el comportamiento de una carga no lineal, se establece un circuito eléctrico con una resistencia R_0 como carga, una fuente de voltaje V_d y un transistor conmutando como se muestra en la Fig. 3.4. Iniciaremos nuestro análisis estableciendo el voltaje presente debido a la operación del transistor en los nodos $A'B'$, el cual es dado por:

$$V_0(t) = \begin{cases} V_d, & 0 \leq t \leq T_{ON}, \\ 0, & T_{ON} \leq t \leq T_{OFF}. \end{cases} \quad (3.21)$$

Otro parámetro a considerar, es la corriente eléctrica $I(t)$. De acuerdo a la ley de Ohm se tiene:

$$I(t) = \begin{cases} \frac{V_d}{R}, & 0 \leq t \leq T_{ON}, \\ 0, & T_{ON} \leq t \leq T_{OFF}. \end{cases} \quad (3.22)$$

El voltaje dado en la Ec. (3.21), puede ser expresado por medio de serie de Fourier como:

$$V_0(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} \left[a_h \cos\left(\frac{2h\pi t}{T}\right) + b_h \sin\left(\frac{2h\pi t}{T}\right) \right], \quad (3.23)$$

donde los coeficientes de la serie se obtienen de la forma usual. La corriente eléctrica también presenta un comportamiento periódico y también puede ser representada por medio de series de Fourier. Una vez más, consideremos el circuito de la Fig. 3.4. El voltaje V_d en los nodos AB permanece constante. Sin embargo, debido al efecto de la operación del transistor, en este nodo se observa una resistencia equivalente dependiente del tiempo que se describe como:

$$R(t) = \begin{cases} R_0, & 0 \leq t \leq T_{ON}, \\ \infty, & T_{ON} \leq t \leq T_{OFF}. \end{cases} \quad (3.24)$$

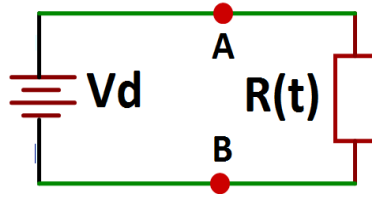


Figura 3.16: Carga no lineal dentro de la NDCD.

Es preciso mencionar que el intervalo $T_{ON} \leq t \leq T_{OFF}$ representa la condición de un circuito abierto, mientras el intervalo $0 \leq t \leq T_{ON}$ el transistor conmuta a encendido presentando un consumo de energía eléctrica descrita por la Ec. (3.22). Nuestro interés se enfoca en representar el efecto del transistor y la carga R_0 sobre el nodo AB . Para lo cual es posible establecer la siguiente relación en función a su conductancia $G_s(t)$ como:

$$G_s(t) = \begin{cases} \frac{1}{R_0}, & 0 \leq t \leq T_{ON}, \\ 0, & T_{ON} \leq t \leq T_{OFF}, \end{cases} \quad (3.25)$$

donde $G_s(t)$ también presenta un comportamiento periódico, es posible su desarrollo en series de Fourier. Sin embargo, a fin de evitar la expansión en Fourier, se busca proponer una forma más simple que describa el comportamiento que presenta la conductancia $G_s(t)$. La ecuación propuesta para este propósito se muestra enseguida:

$$G(t) = G_h |\sin(\omega t)|^n = G_h |\sin(\pi f_s t)|^n, \quad (3.26)$$

donde f_s es la frecuencia de conmutación, G_h corresponde a su amplitud y $\omega = \frac{\omega_s}{2}$, siendo ω_s la frecuencia angular de conmutación [48]. Para determinar los valores de los parámetros de G_h y n , es necesario satisfacer la condición básica que se describe a continuación. Estableciendo que el área A_r generada por la función escalón de la Ec. (3.25) deberá estar contenida bajo el área A_c formada por la función $G(t)$. Con lo anterior, para la Ec. (3.26) es preciso la siguiente condición:

$$\int_{t=0}^{t=T} G(t) dt = \frac{T_{ON}}{R_0}. \quad (3.27)$$

De igual forma, esta relación al ser expresada en su valor promedio temporal

CAPÍTULO 3. MODELOS MATEMÁTICOS ELECTRODOMÉSTICOS

como:

$$\begin{aligned} \langle G(t) \rangle &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} G(t) dt, \\ &= \frac{D}{R_0}, \end{aligned} \quad (3.28)$$

donde se utiliza el parámetro de ciclo de trabajo $D = \frac{T_{ON}}{T}$. El valor de G_h se obtiene de la Ec. (3.28) de tal forma que:

$$G_h = \frac{\frac{n!}{2!} 2^n D}{n! R_0}. \quad (3.29)$$

Por otra parte, para establecer el valor del parámetro n , se implementa el método de Newton-Raphson en la Ec. (3.26) obteniendo:

$$n = \frac{\tan((2-D)\frac{\pi}{4})}{\frac{D\pi}{4}}. \quad (3.30)$$

La función escalón y $G(t)$ son mostradas en la Fig. 3.17. La función coseno también puede ser empleada para describir la carga, sin embargo la elección de la función seno estriba en que satisface directamente con las condiciones iniciales.

Con el objetivo de obtener una mayor estabilidad de una nanored, se pretende obtener un control de los parámetros de voltaje y corriente tan simple como sea posible [49, 50]. Sin embargo, el comportamiento no lineal presentado por los electrodomésticos incorporados dentro de la NDCCD, incrementa la complejidad del análisis. En la literatura se reportan varios modelos que abordan esta cuestión [46, 47, 51]. Para la aplicación del modelo propuesto $G(t)$, se toman los electrodomésticos como cajas negras y nos permite hacer a un lado las fuentes conmutadas con sus componentes internos. Con respecto al sector de almacenamiento de energía, definimos una batería ideal con voltaje V_d e incorporamos una resistencia en serie R_s para representar las resistencia interna de la batería y accesorios. Esto permite modelar el sector de almacenamiento de energía como se muestra en la Fig. 3.18.

La corriente eléctrica instantánea en la batería I_{Bat} puede ser calculada mediante la ley de Ohm como:

$$I_{Bat} = \frac{G(t)V_d}{G(t)R_s + 1}. \quad (3.31)$$

3.2. MODELO MATEMÁTICO 2

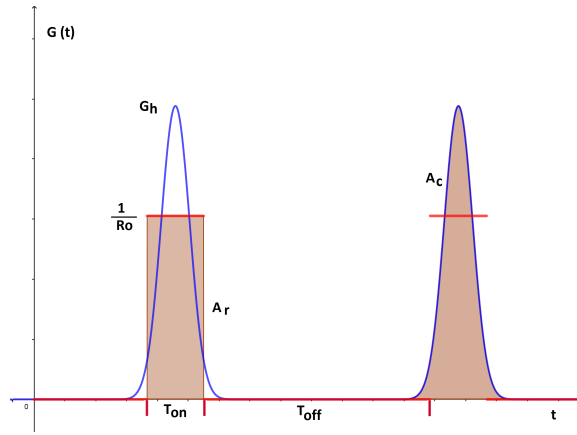


Figura 3.17: Conductancias equivalentes $G(t)$.

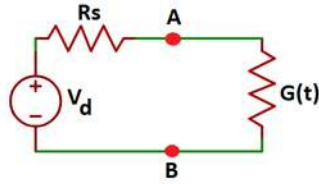


Figura 3.18: Modelo batería real.

Mientras el voltaje V_{AB} en los nodos AB es dado por:

$$V_{AB} = \frac{V_d}{G(t)R_s + 1}. \quad (3.32)$$

La potencia instantánea consumida por la carga $G(t)$ es da por:

$$P_G(t) = V_{AB}(t)I_{Bat}(t) = \frac{G(t)V_d^2}{(G(t)R_s + 1)^2}. \quad (3.33)$$

Adicionalmente, se obtiene la potencia instantánea entregada por la batería como:

$$P_{Bat}(t) = \frac{G(t)V_d^2}{G(t)R_s + 1}. \quad (3.34)$$

Por otra parte, con el objeto de disminuir los rizados en el voltaje V_{AB} , es frecuente colocar un filtro de interferencias electromagnéticas, que puede consistir en un elemento capacitor C . Esto nos establece un circuito como se muestra en la Fig. 3.19.

En este circuito, aplicando la LVK, el voltaje del capacitor V_c queda expresado como:

$$\frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c(R_s G(t) + 1)}{R_s C} = \frac{V_d}{R_s C}, \quad (3.35)$$

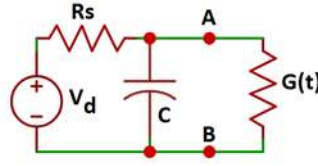


Figura 3.19: Filtro EMI.

cuya solución analítica es:

$$V_c(t) = e^{-\int \frac{R_s G(t)+1}{R_s C} dt} \left(\frac{V_d}{R_s C} \int e^{\int \frac{R_s G(t)+1}{R_s C} dt} dt + C_1 \right), \quad (3.36)$$

donde C_1 corresponde a la constante de integración que debe satisfacer las condiciones iniciales. De igual manera que el caso anterior, la corriente de la batería resulta:

$$I_{Bat}(t) = \frac{V_d - V_c(t)}{R_s}. \quad (3.37)$$

Adicionalmente, la potencia instantánea suministrada por la batería es dada por:

$$P_{Bat}(t) = \frac{V_d^2}{R_s} \left(1 - \frac{V_c(t)}{V_d} \right). \quad (3.38)$$

Para llevar a cabo la simulación numérica del comportamiento del voltaje en el banco de baterías debido a la operación de EAE's, usamos un banco de baterías que proporciona un voltaje V_d y una resistencia R_s como se muestra en el circuito de la Fig. 3.18. En la realización de la simulación numérica, se recurre al método de Runge-Kutta de cuarto orden y se emplean las cargas $G_1(t)$ y $G_2(t)$, cada una con valores de los parámetros D , R_0 , C y f_s distintos. Para ambas cargas se utiliza la condición inicial $V_c(0) = 124$ VCD la cual coincide con el voltaje nominal de la NDCD y un valor de $R_s = 2\Omega$ para considerar la resistencia interna de la batería y accesorios. Ambas cargas son empleadas en los circuitos que se muestran en las Figs. 3.18 y 3.19. En esta simulación se definen cuatro casos, en cada uno se muestra el comportamiento del voltaje y corriente tomando la variación de solamente uno de los parámetros. Los valores de cada caso se muestran en la Tabla 3.1. Los resultados de la simulación de la corriente y el voltaje de cada caso se muestran en las Figs. 3.20–3.27.

Dentro de la NDCD, es frecuente que se encuentren la operación simultánea de cargas no lineales, como por ejemplo, 2 o más lámparas LED y/o fluorescente, televisiones, etc... Sin embargo, esta condición incrementa la complejidad del análisis de la NDCD. Cada carga no lineal se caracteriza por sus propios parámetros de

3.2. MODELO MATEMÁTICO 2

Cuadro 3.1: Casos analizados

Parametros	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV
$G_1(t)$				
F_{s1}	40 KHz	40 KHz	40 KHz	40 KHz
C_1	30 μF	3 μF	30 μF	30 μF
D_1	0.4	0.4	0.32	0.4
R_{O1}	8 Ω	18 Ω	18 Ω	18 Ω
$G_2(t)$				
F_{s2}	40 KHz	40 KHz	40 KHz	38 KHz
C_2	30 μF	30 μF	30 μF	30 μF
D_2	0.4	0.4	0.4	0.4
R_{O2}	18 Ω	18 Ω	18 Ω	18 Ω
Corriente	Fig. 3.20	Fig. 3.22	Fig. 3.24	Fig. 3.26
Voltaje	Fig. 3.21	Fig. 3.23	Fig. 3.25	Fig. 3.27

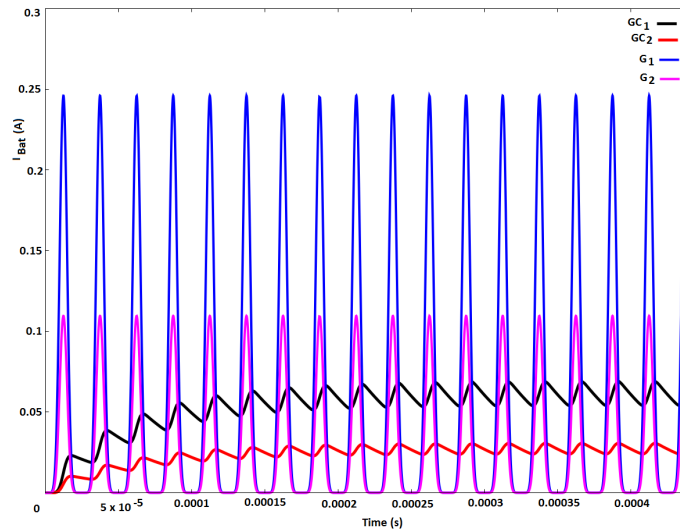


Figura 3.20: Corriente en la batería, Caso I.

frecuencia de conmutación, ciclo de trabajo y en principio se desconoce su configuración y elementos internos. Esta situación se ilustra mediante un circuito de cargas conectadas en paralelo como se muestra en la Fig. 3.28. El sector de almacenamiento de energía suministra la energía para alimentar las cargas no lineales $R_1(t)$ y $R_2(t)$, cuyas conductancias se definen como $G_1(t)$ y $G_2(t)$ con sus correspondientes corrientes eléctricas $I_1(t)$ y $I_2(t)$, respectivamente. Con la aplicación de la LVK se obtiene la siguientes ecuaciones:

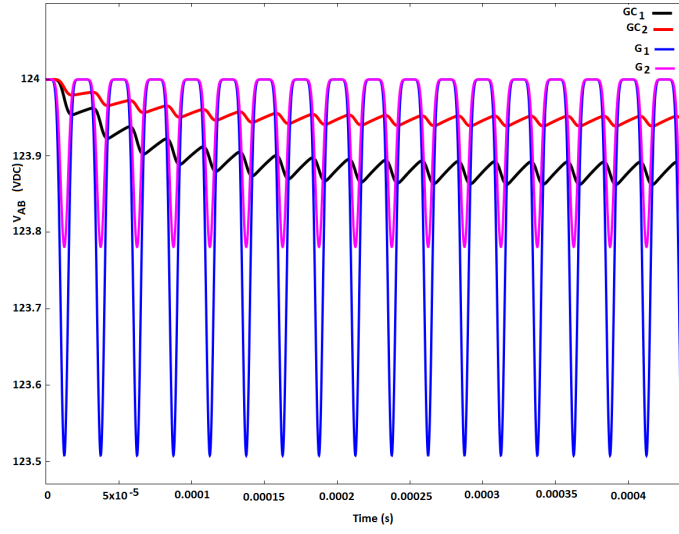


Figura 3.21: Voltaje V_{AB} , Caso I.

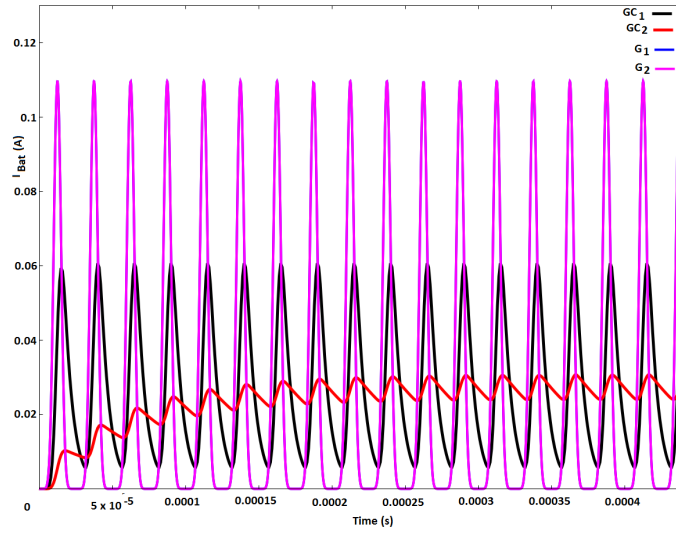


Figura 3.22: Corriente en la batería, Caso II.

$$V_d(t) - V_{R_s} = V_c(t) = V_1(t) = V_2(t), \quad (3.39)$$

$$I_{Bat}(t) = I_C + I_1 + I_2, \quad (3.40)$$

$$I_{G_{eq}}(t) = V_C(t)(G_1(t) + G_2(t)) = V_C G_{eq}(t), \quad (3.41)$$

de la cual es posible definir una conductancia equivalente G_{eq} para esta configuración como:

$$G_{eq}(t) = G_1(t) + G_2(t). \quad (3.42)$$

Un caso ilustrativo del concepto de la conductancia G_{eq} se muestra la Fig. 3.29. La expresión anterior permite la posibilidad de incorporar un desfase ϕ en cada una carga. Ante lo mencionado, para la carga $G_1(t)$ se asigna un desfase ϕ_1 y para

3.2. MODELO MATEMÁTICO 2

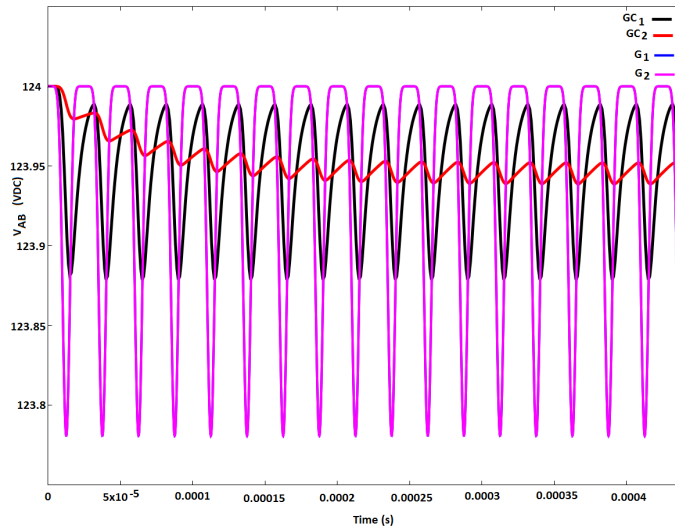


Figura 3.23: Voltaje V_{AB} , Caso II.

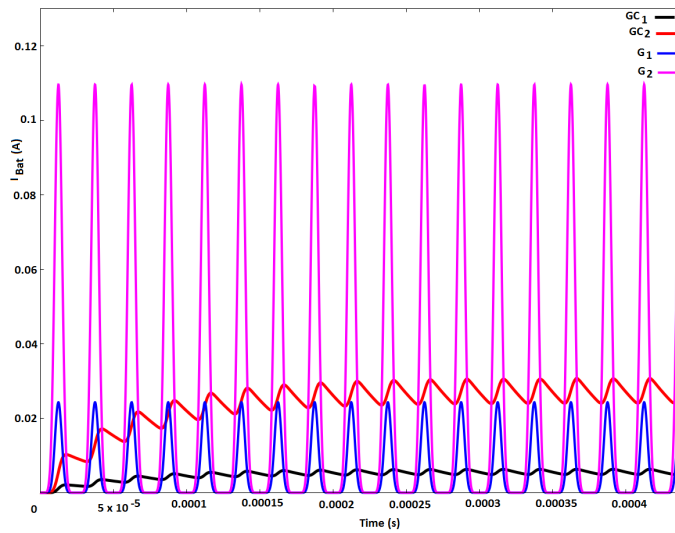


Figura 3.24: Corriente en la batería, Caso III.

la carga $G_2(t)$ un desfase ϕ_2 con lo que se establece la ecuación:

$$G_{eq1}(t) = G_{h1} \sin^{n_1}(f_1 \pi t + \phi_1) + G_{h2} \sin^{n_2}(f_2 \pi t + \phi_2). \quad (3.43)$$

Por lo tanto, con ayuda de la Ec. (3.43) se lleva a cabo la solución numérica del voltaje por medio de la Ec. (3.35). Para ello, se emplean los siguientes valores de las cargas, donde $G_1(t)$ opera con los valores $f_s = 40$ KHz, $D = 0,5$, $R_0 = 430$, Ω , $\phi_1 = 0$, mientras para la carga $G_2(t)$ se tiene las características $f_s = 40$ KHz, $D = 0,9$, $R_0 = 3900$ Ω , and $\phi_2 = \frac{4\pi}{9}$. En la Fig. 3.32 se muestra el voltaje de la operación individual de cada carga así como en su operación simultánea, con una capacitancia de $C = 30$ μF .

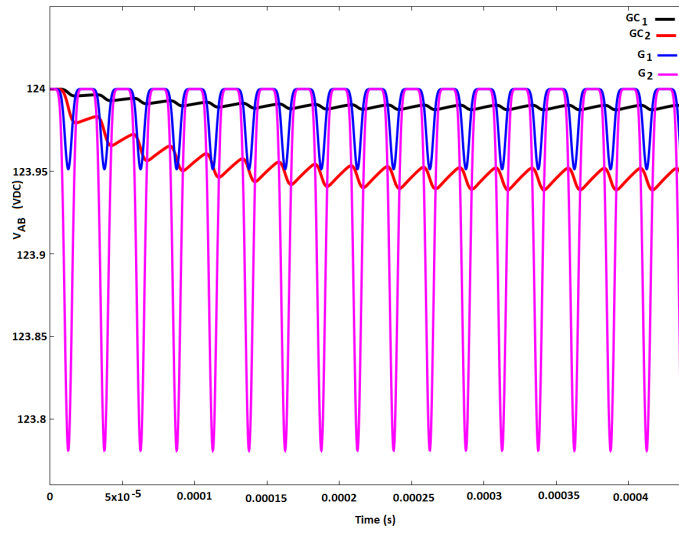


Figura 3.25: Voltaje V_{AB} , Caso III.

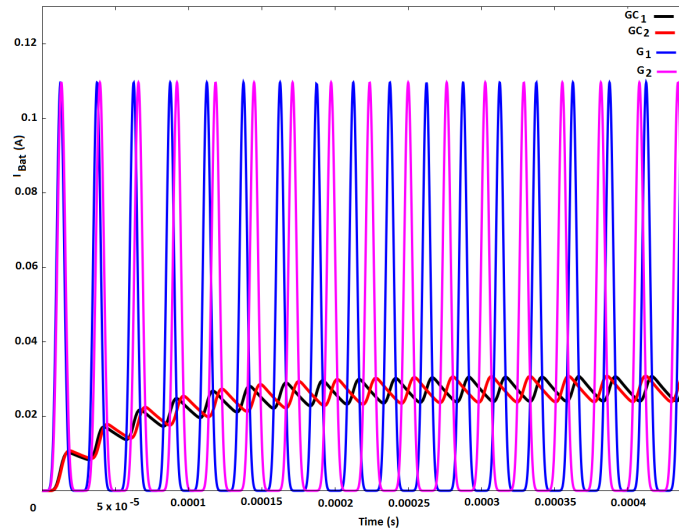


Figura 3.26: Corriente en la batería, Caso IV.

En el siguiente capítulo son discutidos los resultados experimentales y se comparan con las simulaciones numéricas.

3.3. Sistemas Hiperdistribuidos

En los sistemas de CD dentro de un hogar, es usual la implementación de rangos de voltajes de 12 a 48 Volts CD considerados seguros para el ser humano. Los electrodomésticos incorporados dentro de la NDCD usados con estos voltajes, pertenecen a sectores exclusivos de CD como el sector automotriz, marítimo y/o camping.

3.3. SISTEMAS HIPERDISTRIBUIDOS

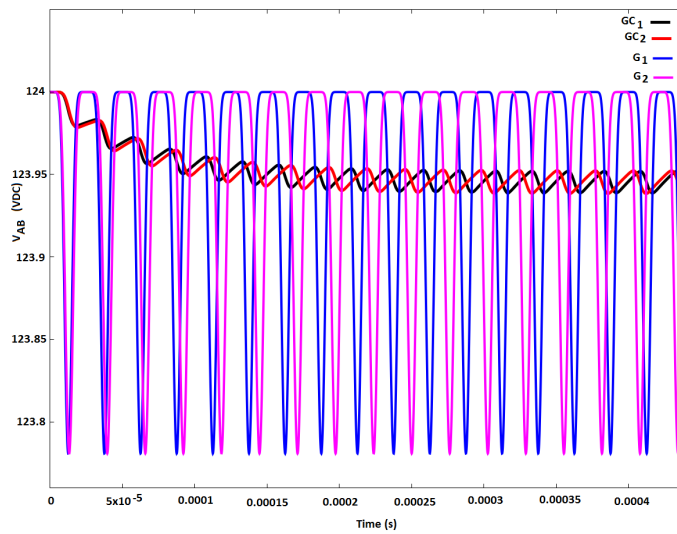


Figura 3.27: Voltaje V_{AB} , Caso IV.

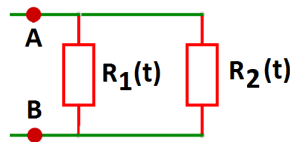


Figura 3.28: Dos cargas no lineales $R(t)$ en operación simultánea.

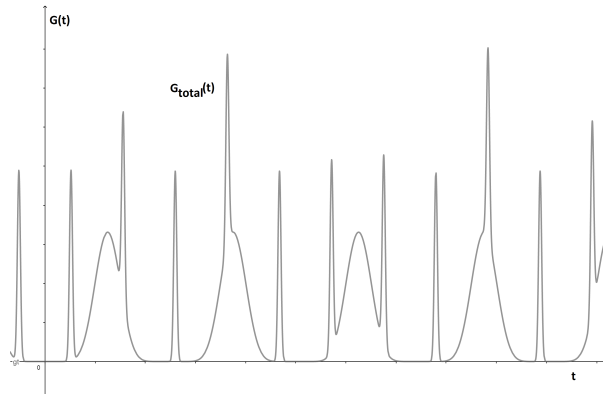


Figura 3.29: Conductancia $G_{eq}(t)$.

Las configuraciones de las NDCD se distinguen por ser sencillas y es posible clasificarlas como sistemas distribuidos, compuestos por sectores bien definidos. Principalmente, se caracterizan por contener un sector de generación de energía a partir de fuentes de energía renovables y el sector de almacenamiento de energía, compuesto por banco de baterías y/o supercapacitores. Este último es considerado crítico para garantizar la continuidad y estabilidad de la NDCD ante transitorios del sector de generación de energía. Como sectores secundarios se encuentran el sistema de distribución, formado por el bus y el sector de cargas.

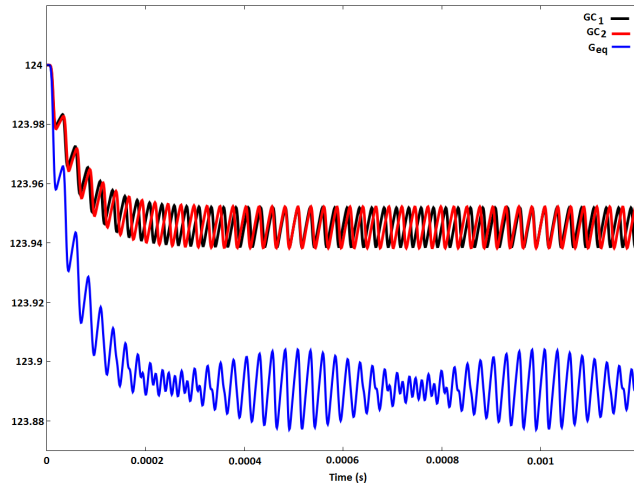


Figura 3.30: Voltaje V_{AB} , para G_{eq} .

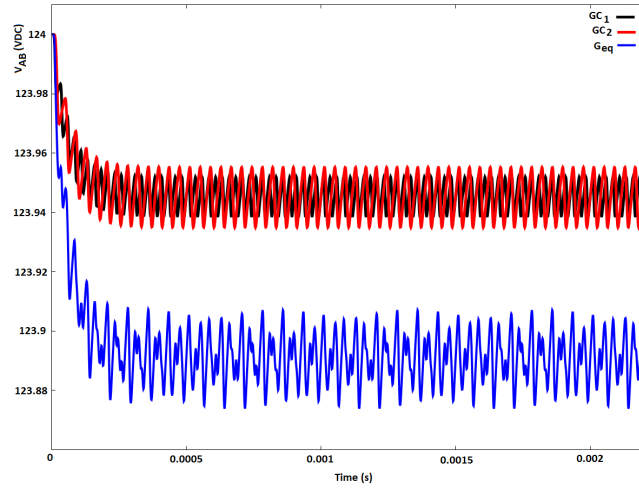


Figura 3.31: V_{AB} para G_{eq} con parámetros: $F_1 = 40$ kHz, $F_2 = 26$ KHz.

Existiendo la posibilidad de interconexión a la red u operar de manera aislada. La principal desventaja de implementar bajos voltajes dentro de nanoredes domésticas de CD radica en la corta distancia efectiva del bus de distribución debido a pérdidas de energía por el efecto Joule. Para la situación de operación de una gran carga en el extremo más alejado del bus es posible se presenten perturbaciones en el voltaje e inestabilidad en la nanored. Dentro del hogar se debe destinar un espacio físico para los sectores de generación y almacenamiento de energía, el cual puede llegar a ser de tamaño considerable, en función a la carga existente dentro del hogar. De tal forma que para una mayor carga, corresponde una mayor capacidad de almacenamiento, por lo tanto, se debe destinar un mayor espacio físico en el hogar, lo cual dependería del estilo de consumo del usuario y los estímulos económicos disponible en cada país [52].

3.3. SISTEMAS HIPERDISTRIBUIDOS

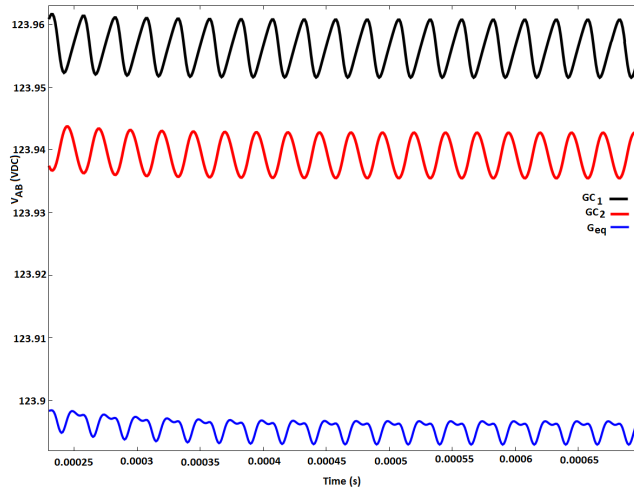


Figura 3.32: Voltaje V_{AB} presentando un desfase $\phi = 4\pi/9$ KHz.

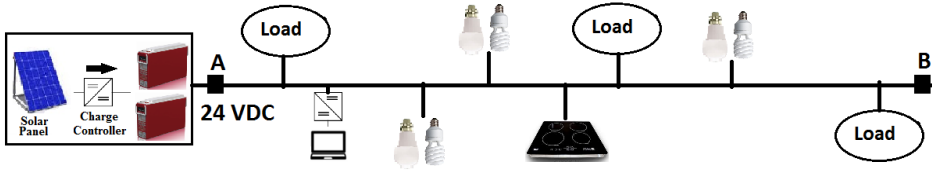


Figura 3.33: Configuración 1 de NDCD de bajo voltaje.

En las Referencias [53, 54] se realiza una descripción de diversas topologías factibles para sistemas de CD. En el presente trabajo se proponen la configuración anillo, malla y radial para su análisis y posible uso. En la Fig. 3.33 se observa la configuración clásica utilizada en la NDCD, la cual denominaremos como Configuración 1 tipo radial. Se logra identificar los sectores de la cual se conforma. El sector de generación de energía tiene una capacidad total de generación $P_{tot_{gen}}$ y una capacidad de almacenamiento de energía $P_{tot_{alm}}$ para el banco de baterías. El bus de distribución esta formado por el segmento $\overline{AB}$; se recomienda no sobrepasar la Distancia Efectiva de Distribución (DED) del cableado, lo cual se define como aquella en la cual se permite cierta caída de voltaje sin comprometer la estabilidad de la red. Para ello el bus de distribución debe de ser diseñado para soportar las corrientes eléctricas de las cargas para cualquier instante, dada de la siguiente forma:

$$I_{bus}(t) = \sum_{n=1}^m I_n(t), \quad (3.44)$$

donde $I_n(t)$ corresponde a la corriente eléctrica consumida por la carga n en el

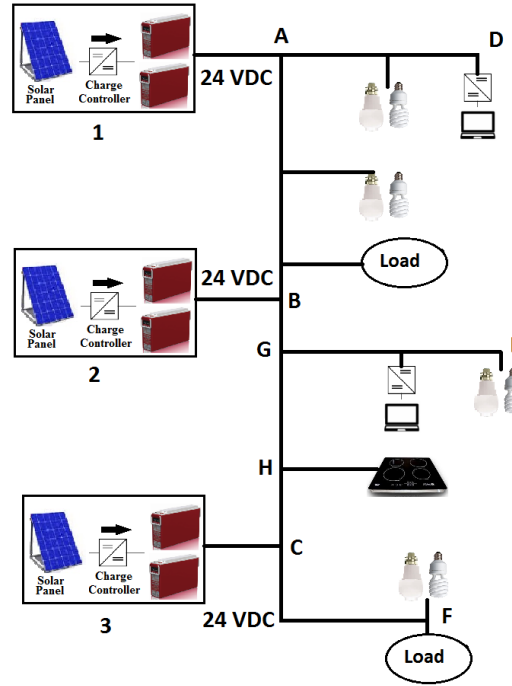


Figura 3.34: Configuración 2 radial distribuida de NDCC.

instante t .

Otra propuesta que vemos factible a desarrollar es mostrada en la Fig. 3.34, denominada Configuración 2 tipo radial distribuida. En ella el bus de distribución también es formado por segmentos de cable, los cuales pueden incluirse bifurcaciones. Es alimentada por diversos sectores de generación y almacenamiento de energía distribuidos en diferentes ubicaciones de la nanored.

En los sistemas eléctricos de potencia, se establecen varias configuraciones con la finalidad de mejorar la estabilidad y confiabilidad de la red. En la Fig. 3.35 proponemos la instalación de una NDCC conocida como tipo anillo. El bus está formado por los segmentos $\overline{AB}$, $\overline{BC}$ y $\overline{AC}$ para lo cual:

$$\overline{AB}, \overline{BC}, \overline{AC} \leq ABCA, \quad (3.45)$$

en el cual se localizan contribuyendo varios sectores de generación y almacenamiento de energía. Para llevar a cabo esta topología, es preciso su ubicación física en diversos espacios dentro del hogar. Esta configuración ofrece la posibilidad de disminuir su tamaño y capacidad de cada uno de sus sectores. La potencia total de generación y de almacenamiento de energía del sistema, se encuentran *distribuida* entre los n sectores. Las cargas que se alimentan por el segmento $\overline{AB}$ se encuentran bajo el dominio de los sectores 1 y 2, principalmente. En tanto las

3.3. SISTEMAS HIPERDISTRIBUIDOS

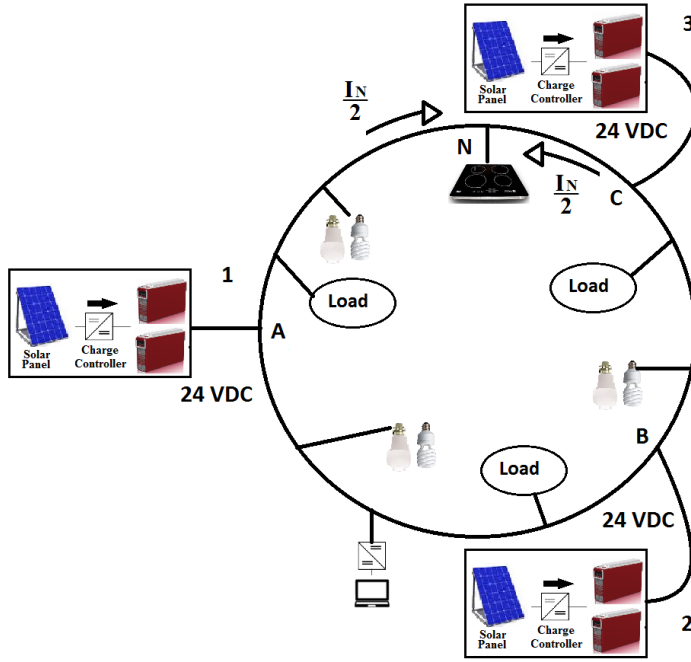


Figura 3.35: NDCD en anillo de bajo voltaje.

cargas ubicadas en el segmento $\overline{BC}$ estarán bajo el dominio de los sectores 2 y 3. De igual manera ocurre en el segmento $\overline{AC}$. Así entonces la potencia total de generación y almacenamiento de la nanored se expresa:

$$P_{tot_{gen}} = \sum_{i=1}^n P_{gen_i}, \quad (3.46)$$

$$P_{tot_{alm}} = \sum_{i=1}^n P_{alm_i}, \quad (3.47)$$

siendo n el número de sectores de almacenamiento y generación de energía presentes en la NDCD. Mientras para una carga alimentada en el punto N , por ejemplo, perteneciente al segmento $\overline{AC}$. Se espera que la corriente eléctrica que circula por el segmento $\overline{AN}$ sea $\frac{I_N}{2}$ suministrada por el sector 1. En tanto, para el segmento $\overline{CN}$ circulará una corriente eléctrica $\frac{I_N}{2}$ alimentada por el sector 2.

Durante el desarrollo de este trabajo, no se realizará el análisis de sistemas de protecciones eléctricas para cada uno de los sistemas propuestos, como puede ser la condición de corto circuito o sobrecarga. Sin embargo, durante el desarrollo de pruebas experimentales las pastillas termomagnéticas han mostrado un óptimo desempeño para el fenómeno de sobrecarga, mientras para la presencia de un corto circuito recomendamos la utilización de elementos fusibles. Todos ellos

pueden ubicarse en cada uno de los segmentos con intención de proteger y aislar de alguna falla y garantizar la continuidad del servicio en el resto de los segmentos ajenos a la falla eléctrica.

3.4. Dinámica energética

A fin de clarificar las características de las Configuraciones 1 y 2 mostradas en las Figs. 3.33 y 3.34, en esta sección se desarrolla un análisis con sus circuitos equivalentes en las Figs 3.36 y 3.37, respectivamente. Para efectos de simplificación en los cálculos, establecemos cargas lineales (resistivas). Por otra parte, se lleva a cabo el análisis para la cuantificación de las pérdidas por efecto Joule y la dinámica de corrientes eléctricas.

La Fig. 3.36 corresponde al circuito equivalente de la configuración 1 de la nanored de CD de bajo voltaje. R_C corresponde a la resistencia del cableado eléctrico implementado como bus, mientras que para R_1 y R_2 corresponde a las cargas de la nanored. La relación entre las cargas y la resistencia del cable se puede expresar como $R_1, R_2 \gg R_C$ para un óptimo funcionamiento. El cableado eléctrico usado para ambas configuraciones, es representado por el segmento $\overline{1234}$ y $\overline{1'2'3'4'}$, respectivamente. En la configuración 1 se localizan las cargas lineales R_1 y R_2 en los nodos 2 y 4. Con ello resultan dos mallas que son analizadas mediante la aplicación de LVK. Las ecuaciones de mallas resultantes son:

$$\begin{aligned} (2R_C + R_1)i_1 + R_1(i_1 - i_2) &= V, \\ -R_1 i_1 + (4R_C + R_1 + R_2)i_2 &= 0, \end{aligned} \quad (3.48)$$

donde se obtiene:

$$i_1 = \frac{V(4R_C + R_1 + R_2)}{8R_C^2 + (2R_2 + 6R_1)R_C + R_1R_2}, \quad (3.49)$$

$$i_2 = \frac{VR_1}{8R_C^2 + (2R_2 + 6R_1)R_C + R_1R_2}, \quad (3.50)$$

donde i_1 representa la corriente eléctrica suministrada por el banco de baterías V .

El análisis de la NDCD correspondiente a la configuración 2 se realiza en base a la Fig. 3.37. La configuración 2 presenta una semejanza con la configuración 1, difiriendo en la presencia de dos sectores más de generación y almacenamiento de energía. El segmento $\overline{ABCD}$ y $\overline{A'B'C'D'}$ corresponde al segmento de cable $\overline{1234}$ y

3.4. DINÁMICA ENERGÉTICA

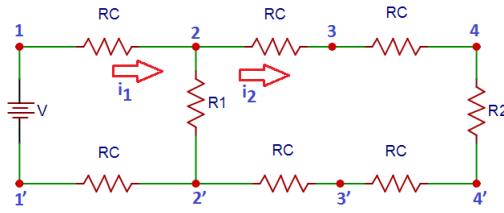


Figura 3.36: Circuito equivalente configuración 1.

$\overline{1'2'3'4'}$ de la Fig. 3.36. El segmento $\overline{DE}$ y $\overline{D'E'}$ se adiciona para la interconexión de banco de batería 3. El nodo C se encuentra conectado al banco de batería 2, el cual corresponde al nodo 3 de la Fig. 3.36.

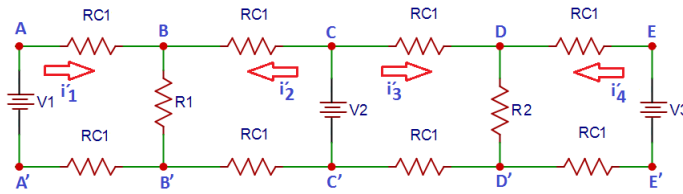


Figura 3.37: Circuito equivalente configuración 2.

Al aplicar LVK al circuito de la Fig. 3.37 obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} (2R_{C1} + R_1)i_1' + R_1i_2' + 0 + 0 &= V_1, \\ R_1i_1' + (2R_{C1} + R_1)i_2' + 0 + 0 &= V_2, \\ 0 + 0 + (2R_{C1} + R_2)i_3' + R_2i_4' &= V_2, \\ 0 + 0 + R_2i_3' + (2R_{C1} + R_2)i_4' &= V_3, \end{aligned} \quad (3.51)$$

de donde se solucionan las corrientes de malla:

$$i_1' = \frac{(2R_{C1} + R_1)V_1 - R_1V_2}{4R_{C1}^2 + 4R_1R_{C1}}, \quad (3.52)$$

$$i_2' = -\frac{R_1V_1 - (2R_{C1} + R_1)V_2}{4R_{C1}^2 + 4R_1R_{C1}}, \quad (3.53)$$

$$i_3' = \frac{2R_{C1}V_2 + R_2(V_2 - V_3)}{4R_{C1}^2 + 4R_2R_{C1}}, \quad (3.54)$$

$$i_4' = \frac{2R_{C1}V_3 + R_2(V_3 - V_2)}{4R_{C1}^2 + 4R_2R_{C1}}, \quad (3.55)$$

donde la corriente i_1' corresponde a la corriente alimentada por el banco de baterías V_1 , para la corriente del banco de baterías V_2 equivale a $i_2' + i_3'$, por último, el banco de baterías V_3 es dada por i_4' . Durante la operación de esta configuración,

CAPÍTULO 3. MODELOS MATEMÁTICOS ELECTRODOMÉSTICOS

se muestra una situación interesante para el estado en el cual no se encontraría ninguna carga funcionando dentro del sistema, $R_1 = R_2 = \infty$ y los sectores de almacenamiento y generación de energía presentan voltajes distintos entre ellos. Las expresiones de las corrientes para este caso son:

$$i'_1 = \frac{V_1 - V_2}{4R_{C1}}, \quad (3.56)$$

$$i'_2 = \frac{V_2 - V_1}{4R_{C1}}, \quad (3.57)$$

$$i'_3 = \frac{V_2 - V_3}{4R_{C1}}, \quad (3.58)$$

$$i'_4 = \frac{V_3 - V_2}{4R_{C1}}. \quad (3.59)$$

Para poder simplificar los cálculos, es preciso establecer la siguiente relación para la condición en la cual los diversos sectores de almacenamiento y generación de energía tienen igual nivel de voltaje:

$$V_1 = V_2 = V_3 = V. \quad (3.60)$$

En este caso la solución de las corrientes de mallas se reducen a:

$$i'_1 = \frac{V}{2(R_{C1} + R_1)}, \quad (3.61)$$

$$i'_2 = \frac{V}{2(R_{C1} + R_1)}, \quad (3.62)$$

$$i'_3 = \frac{V}{2(R_{C1} + R_2)}, \quad (3.63)$$

$$i'_4 = \frac{V}{2(R_{C1} + R_2)}. \quad (3.64)$$

Expresiones que se emplearan para determinar la potencia suministrada al sistema.

3.4.1. Potencia consumida

Otros aspectos a considerar, es la potencia consumida por las cargas y la potencia disipada durante la distribución de la energía eléctrica a través del cableado en las dos configuraciones establecidas. Para estas condiciones con cargas lineales, la potencia consumida por una carga R es:

$$P = Ri^2, \quad (3.65)$$

3.4. DINÁMICA ENERGÉTICA

donde i es la corriente que fluye a través de la carga. Para el cálculo de las pérdidas por conducción de la configuración 1, P_{cond_1} , así como las de la configuración 2, P_{cond_2} , utilizaremos las Ecs. (3.49), (3.50), (3.61), (3.62), (3.63) y (3.64), respectivamente, para obtener:

$$P_{cond_1}(R_1, R_2, V) = 2R_C i_1^2 + 4R_C i_2^2, \quad (3.66)$$

$$P_{cond_2}(R_1, R_2, V) = 2R_C (i_1'^2 + i_2'^2 + i_3'^2 + i_4'^2). \quad (3.67)$$

Por otra parte, la configuración 2 ofrece la posibilidad de distribuir la potencia de la batería V de la configuración 1 de la Fig. 3.36 entre la potencia de sus n sectores de almacenamiento y generación de energía. Para lo cual, es posible establecer valores de potencia similar, que desde el punto de vista económico, no resulta conveniente salvo que se presente un incremento de cargas al sistema. Durante la cuantificación de las pérdidas por conducción por la resistencia del cableado R_C , utilizaremos la Ec. (3.65). Para la Fig. 3.36 obtenemos:

$$P_{cond_1}(R_1, R_2, V) = \frac{2V^2 R_C ((4R_C + R_1 + R_2)^2 + 2R_1^2)}{(8R_C^2 + (2R_2 + 6R_1)R_C + R_1 R_2)^2}. \quad (3.68)$$

Mientras que para la Fig. 3.37 resulta:

$$P_{cond_2}(R_1, R_2, V) = R_C V^2 \left(\frac{1}{(R_C + R_1)^2} + \frac{1}{(R_C + R_2)^2} \right). \quad (3.69)$$

Para definir el valor de R_C , se considera un cable de cobre aislado THW calibre 12 AWG, frecuentemente usado en instalaciones domésticas; para el cual su resistencia eléctrica nominal a CD corresponde a $5.64 \Omega/\text{Km}$ a 25°C [55]. Con el dato anterior, es posible definir un dato aproximado para la resistencia del cableado R_C . Establecemos una longitud de 15 metros para cada segmento de ambas configuraciones. Obteniendo el valor de $R_C = 0.0846 \Omega$. Para obtener el comportamiento de ambas configuraciones, hemos establecido diversas condiciones. En el caso de pérdidas por efecto Joule en el cableado, establecemos un voltaje constante de 120 VCD, en tanto las cargas R_1 y R_2 se presentan como las variables de estudio. Aplicando la Ec. (3.68) en la configuración 1, se genera la Fig. 3.38 que representa la superficie de potencia debido a las pérdidas por conducción.

En la Fig. 3.39 se muestra la superficie que surge a partir de aplicar la Ec. (3.69), que corresponde a la potencia disipada por el cableado en la configuración 2. En tanto, la Fig. 3.40 se contrastan las pérdidas de cada una de las configuraciones.

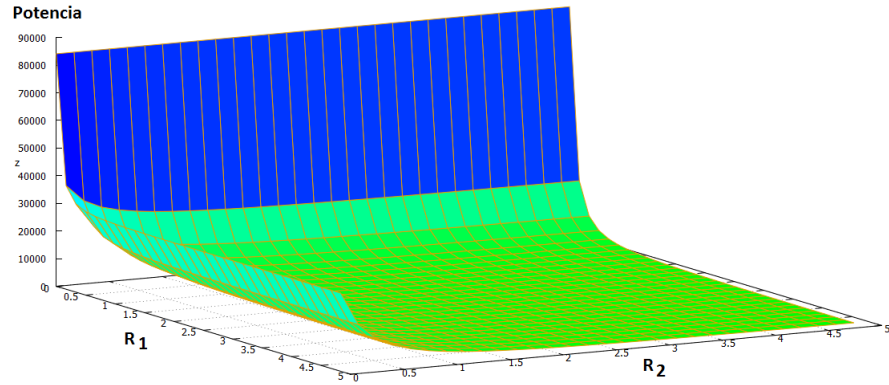


Figura 3.38: Pérdidas por conducción de la configuración 1.

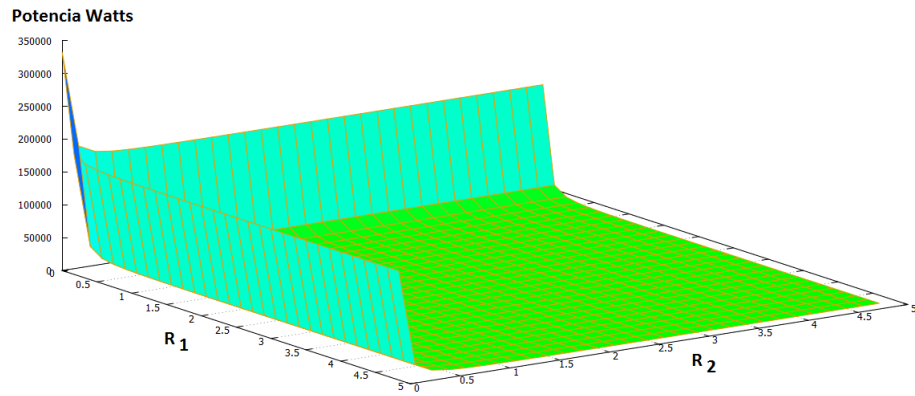


Figura 3.39: Pérdidas por conducción de la configuración 2.

También es posible el análisis de las condiciones cercanas a un corto circuito donde $R_1, R_2 \rightarrow 0$. Durante la operación en condiciones nominales para ambas configuraciones se presenta la potencia por pérdidas de conducción mostrado en la Fig. 3.41.

3.4.2. Caso I: Corto circuito en la carga R_1 en ambas configuraciones

En este caso, se analiza la presencia de corto circuito debido a $R_1 \rightarrow 0$, para ello son usadas las relaciones dadas por las Ecs. (3.68) y (3.69) para determinar la potencia disipada en las dos configuraciones. Luego entonces, de la Ec. (3.68) se

3.4. DINÁMICA ENERGÉTICA

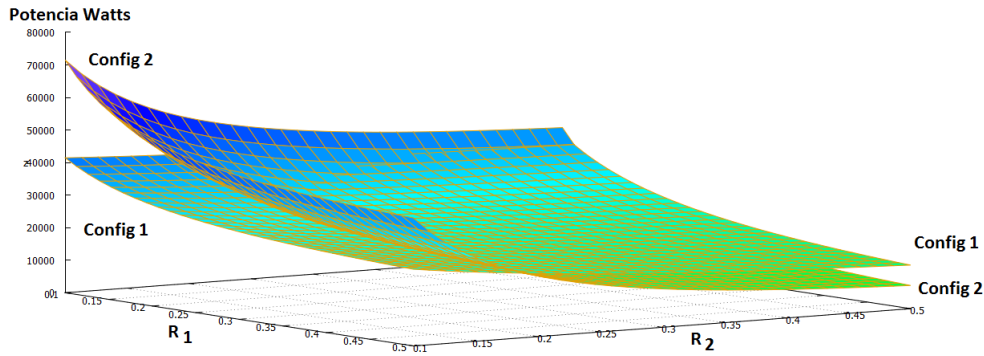


Figura 3.40: Pérdidas por conducción de ambas configuraciones con V cte.

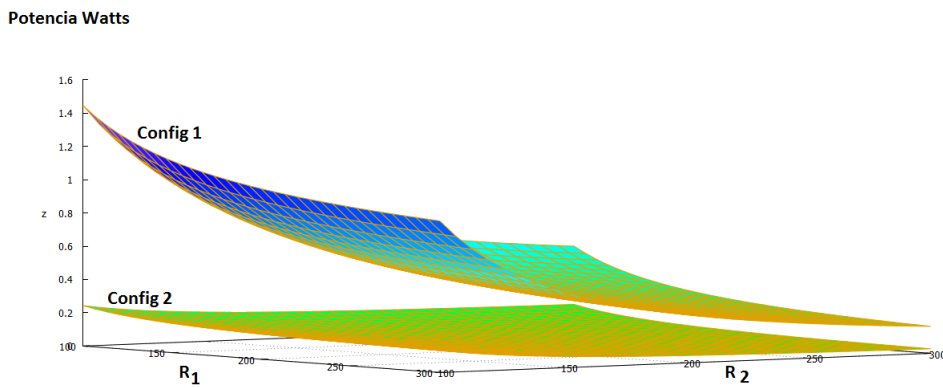


Figura 3.41: Pérdidas por conducción de ambas configuraciones en condiciones nominales.

encuentra la potencia disipada como:

$$\lim_{R_1 \rightarrow 0} P_{cond_1}(R_1, R_2, V) = \frac{V^2}{2R_C}, \quad (3.70)$$

mientras que la potencia disipada por el cableado en la configuración 2 es dada por:

$$\lim_{R_1 \rightarrow 0} P_{cond_2}(R_1, R_2, V) = R_C V^2 \left(\frac{1}{R_C^2} + \frac{1}{(R_C + R_2)^2} \right). \quad (3.71)$$

Cuando se cumplan las condiciones establecidas anteriormente, la diferencia entre las pérdidas en el cableado en ambas configuraciones debido a la presencia de

un corto circuito es:

$$\lim_{R_1 \rightarrow 0} P_{cond_1}(R_1, R_2, V) - \lim_{R_1 \rightarrow 0} P_{cond_2}(R_1, R_2, V) = -R_C V^2 \left(\frac{1}{2R_C^2} + \frac{1}{(R_C + R_2)^2} \right). \quad (3.72)$$

3.4.3. Caso II: Corto circuito en la carga R_2 en ambas configuraciones

Primeramente se define la potencia que es disipada en el cableado debido a la presencia de corto circuito para el caso donde $R_2 \rightarrow 0$, para ambas configuraciones. La potencia disipada en la configuración 1 es dada de la siguiente forma:

$$\lim_{R_2 \rightarrow 0} P_{cond_1}(R_1, R_2, V) = \frac{V^2}{2R_C} \left(1 - \frac{2(8R_C R_1 + 3R_1^2)}{(4R_C + 3R_1)^2} \right). \quad (3.73)$$

Mientras tanto, el cálculo para la configuración 2 resulta en:

$$\lim_{R_2 \rightarrow 0} P_{cond_2}(R_1, R_2, V) = R_C V^2 \left(\frac{1}{R_C^2} + \frac{1}{(R_C + R_1)^2} \right). \quad (3.74)$$

De igual forma, la diferencia de potencia disipada entre ambas configuraciones es:

$$\lim_{R_2 \rightarrow 0} P_{cond_1}(R_1, R_2, V) - \lim_{R_2 \rightarrow 0} P_{cond_2}(R_1, R_2, V) = -V^2 R_C \left(\frac{1}{2R_C^2} + \frac{R_1(8R_C + 3R_1)}{R_C^2(4R_C + 3R_1)^2} + \frac{1}{(R_C + R_1)^2} \right). \quad (3.75)$$

3.4.4. Caso III: Corto circuito simultáneo en las cargas en ambas configuraciones

Para este caso, se representa una situación en la cual ocurre un corto circuito simultáneo en ambas cargas. La probabilidad de que esta condición ocurra es muy baja. Sólo se realiza por cuestión de verificar la continuidad del sistema, para este caso se tiene que:

$$\lim_{R_1, R_2 \rightarrow 0} P_{cond_1}(R_1, R_2, V) = \frac{V^2}{2R_C}, \quad (3.76)$$

$$\lim_{R_1, R_2 \rightarrow 0} P_{cond_2}(R_1, R_2, V) = \frac{2V^2}{R_C} = 4 \left(\lim_{R_1, R_2 \rightarrow 0} P_{cond_1}(R_1, R_2, V) \right). \quad (3.77)$$

3.4.5. Caso IV: Ausencia de alguna de las cargas en ambas configuraciones

Aunque es frecuente que en el sistema se encuentre solamente una carga operando, es preciso expresar esta situación en ambas configuraciones. Para establecer la presencia de una sola carga en las Ecs. (3.68) y (3.69), en otras palabras, la representación de un circuito abierto o la ausencia de alguna de las cargas se lleva a cabo por medio de $R_1 \rightarrow \infty$ o $R_2 \rightarrow \infty$. Para la potencia perdida por conducción de la configuración 1 con circuito abierto en R_1 se define por:

$$\lim_{R_1 \rightarrow \infty} P_{cond_1}(R_1, R_2, V) = \frac{6R_C V^2}{(6R_C + R_2)^2}, \quad (3.78)$$

mientras que la ausencia de R_2 es dada por:

$$\lim_{R_2 \rightarrow \infty} P_{cond_1}(R_1, R_2, V) = \frac{2R_C V^2}{(2R_C + R_1)^2}. \quad (3.79)$$

La potencia disipada por conducción en la Configuración 2 con la ausencia de R_1 es calculada por:

$$\lim_{R_1 \rightarrow \infty} P_{cond_2}(R_1, R_2, V) = \frac{R_C V^2}{(R_C + R_2)^2}. \quad (3.80)$$

Con respecto al circuito abierto presente en R_2 la correspondiente potencia es:

$$\lim_{R_2 \rightarrow \infty} P_{cond_2}(R_1, R_2, V) = \frac{R_C V^2}{(R_C + R_1)^2}. \quad (3.81)$$

La comparación de pérdidas por conducción entre ambas configuraciones está dada por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \lim_{R_1 \rightarrow \infty} (P_{cond_1}(R_1, R_2, V) - P_{cond_2}(R_1, R_2, V)) &= \frac{5R_C V^2 (R_2^2 - 6R_C^2)}{((6R_C + R_2)(R_C + R_2))^2}, \\ &y \\ \lim_{R_2 \rightarrow \infty} (P_{cond_1}(R_1, R_2, V) - P_{cond_2}(R_1, R_2, V)) &= \frac{R_C V^2 (R_1^2 - 2R_C^2)}{((2R_C + R_1)(R_C + R_1))^2}. \end{aligned} \quad (3.82)$$

En la siguiente sección se analiza el comportamiento de la potencia efectiva o alimentadas en las cargas R_1 y R_2 en cada una de las configuraciones.

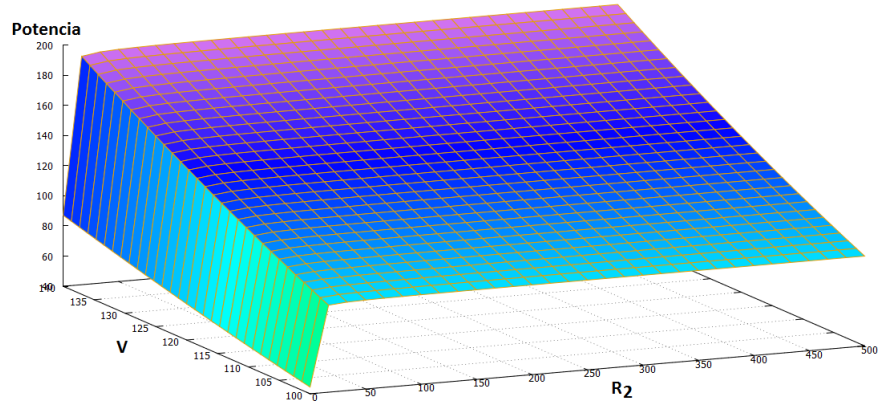


Figura 3.42: Potencia efectiva en R_1 configuración 1, como función de V y R_2 .

3.5. Potencia efectiva en R_1 y R_2

3.5.1. Potencia efectiva en la configuración 1

Es de interés describir el comportamiento de la potencia efectiva en cada carga al presentarse cambios en los parámetros de los elementos que conforman la NDCD. Para ello, se procede a realizar variaciones de sus parámetros utilizando las Ec. (3.65), (3.49) y (3.50). Las relaciones que nos definen la potencia efectiva suministrada a las cargas R_1 y R_2 , respectivamente, para Configuración 1 son dadas por:

$$P_{efR_1}(R_1, R_2, V) = \frac{R_1 V^2 (4R_C + R_2)^2}{(8R_C^2 + (2R_2 + 6R_1)R_C + R_1 R_2)^2}, \quad (3.83)$$

$$P_{efR_2}(R_1, R_2, V) = \frac{R_2 (R_1 V)^2}{(8R_C^2 + (2R_2 + 6R_1)R_C + R_1 R_2)^2}. \quad (3.84)$$

En primer lugar, tomamos la potencia efectiva en la carga R_1 dentro de la configuración 1 dada por la Ec. (3.83). Asignamos el valor de 100 Ω , mientras que el voltaje se encontrará dentro de un rango de 100 a 140 VCD. En la Fig. 3.42 se muestra la superficie de potencia efectiva alimentando a una carga R_1 constante y presentándose variaciones en el voltaje V como la carga R_2 . También puede ser apreciada la situación de cortocircuito presente en $R_2 \rightarrow 0$.

Ahora, manteniendo el uso de la Ec. (3.83) para el caso de potencia efectiva alimentada a la carga R_1 , se mantiene un valor de R_2 y cuyos parámetros variables serán V y R_1 con sus respectivas variaciones, la superficie de la potencia suministrada es posible visualizarla en la Fig. 3.43.

3.5. POTENCIA EFECTIVA EN R_1 Y R_2

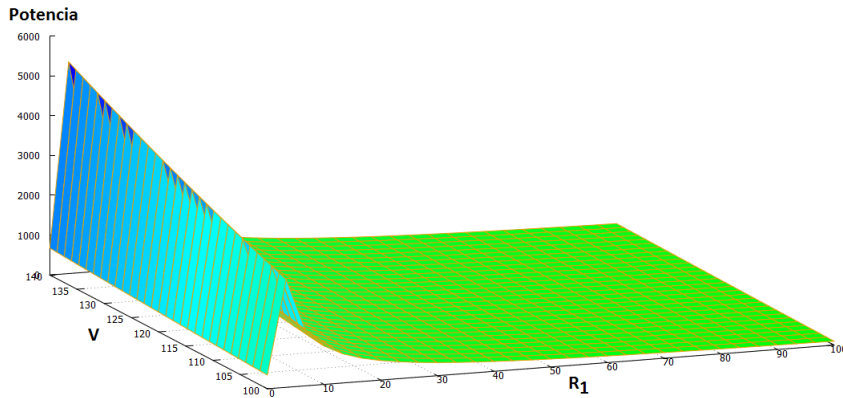


Figura 3.43: Potencia efectiva en R_1 configuración 1, como función de V y R_1 .

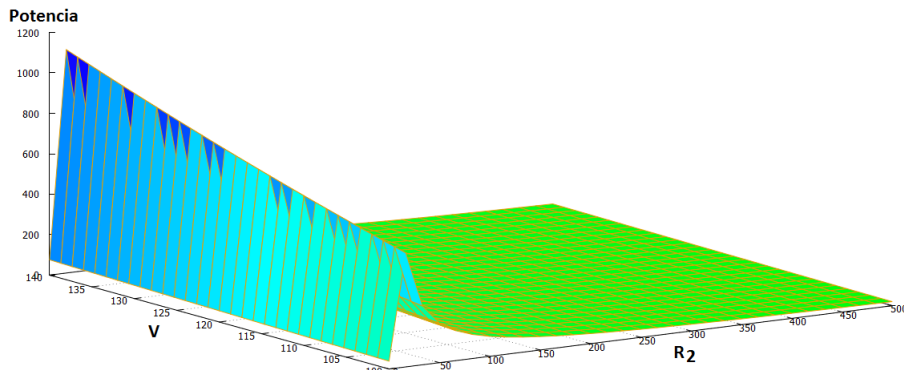


Figura 3.44: Potencia efectiva en R_2 configuración 1 Variables V y R_2 R_1 cte.

Para el caso de la potencia alimentada a la carga R_2 de la configuración 1, recurrimos a la Ec. (3.84). Manteniendo un valor de $R_1 = 100 \Omega$, el resultado se muestra en la Fig. 3.44. Finalmente, para $R_2 = 100 \Omega$ su potencia alimentada se presenta en la Fig. 3.45. Para cerrar el caso respectivo a la configuración 1, a continuación se describen las ecuaciones que dan las potencias efectivas de cada carga bajo condiciones de corto circuito o circuito abierto.

Corto circuito configuración 1

En esta condición encontramos que la potencia efectiva en la carga R_1 en corto circuito es:

$$\lim_{R_1 \rightarrow 0} P_{efR_1}(R_1, R_2, V) = 0, \quad (3.85)$$

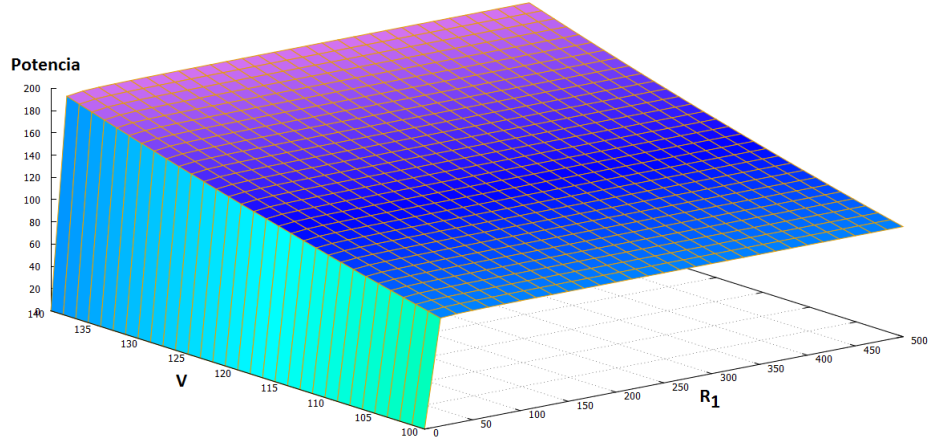


Figura 3.45: Potencia efectiva en R_2 configuración 1 en función de V y R_1 .

$$\lim_{R_1 \rightarrow 0} P_{efR_2}(R_1, R_2, V) = 0. \quad (3.86)$$

En tanto que la corriente presente en la batería es:

$$i_{bat} = i_1 = \frac{V}{2R_C}. \quad (3.87)$$

Mientras que la corriente i_2 se vuelve nula. Cuando se presenta la carga R_2 en condición de corto circuito se observa que la potencia efectiva en las cargas son dadas por:

$$\lim_{R_2 \rightarrow 0} P_{efR_1}(R_1, R_2, V) = \frac{4R_1 V^2}{(4R_C + 3R_1)^2}, \quad (3.88)$$

$$\lim_{R_2 \rightarrow 0} P_{efR_2}(R_1, R_2, V) = 0. \quad (3.89)$$

Surgiendo las siguientes corrientes de mallas:

$$i_1 = \frac{V(4R_C + R_1)}{2R_C(4R_C + R_1)}, \quad (3.90)$$

$$i_2 = \frac{VR_1}{2R_C(4R_C + 3R_1)}. \quad (3.91)$$

Circuito abierto configuración 1

En la ausencia de la carga R_1 dentro la NDCCD, la potencia efectiva en cada carga es dada por:

$$\lim_{R_1 \rightarrow \infty} P_{efR_1}(R_1, R_2, V) = 0, \quad (3.92)$$

3.5. POTENCIA EFECTIVA EN R_1 Y R_2

$$\lim_{R_1 \rightarrow \infty} Pef_{R_2}(R_1, R_2, V) = \frac{R_2 V^2}{(6R_C + R_2)^2}. \quad (3.93)$$

Mostrando las siguientes corrientes de malla:

$$i_1 = i_2 = \frac{V}{6R_C + R_1}. \quad (3.94)$$

Dado la falta de la carga R_2 la potencia efectiva es:

$$\lim_{R_2 \rightarrow \infty} Pef_{R_1}(R_1, R_2, V) = \frac{R_1 V^2}{(2R_C + R_1)^2}, \quad (3.95)$$

$$\lim_{R_2 \rightarrow \infty} Pef_{R_2}(R_1, R_2, V) = 0. \quad (3.96)$$

Resultando las siguientes corrientes de malla:

$$i_1 = \frac{V}{2R_C + R_1}, \quad (3.97)$$

$$i_2 = 0. \quad (3.98)$$

3.5.2. Potencia efectiva en configuración 2

En el análisis de la potencia efectiva de cada una de las cargas dentro de la configuración 2, es preciso el uso de las Ecs.(3.61), (3.62), (3.63) y (3.64). La potencia efectiva en las cargas R_1 y R_2 es dada por:

$$Pef_{R_1}(R_1, V) = \frac{R_1 V^2}{(R_C + R_1)^2} = R_1 (i'_1 + i'_2)^2, \quad (3.99)$$

$$Pef_{R_2}(R_2, V) = \frac{R_2 V^2}{(R_C + R_2)^2} = R_2 (i'_3 + i'_4)^2. \quad (3.100)$$

La potencia efectiva en la carga R_1 se muestra en la Fig. 3.46. El comportamiento de la potencia efectiva suministrada a la carga R_2 es similar al comportamiento mostrado por la carga R_1 .

Corto circuito configuración 2

En esta condición encontramos que la potencia efectiva en las cargas debido a un corto circuito en R_1 es:

$$\lim_{R_1 \rightarrow 0} Pef_{R_1}(R_1, R_2, V) = 0, \quad (3.101)$$

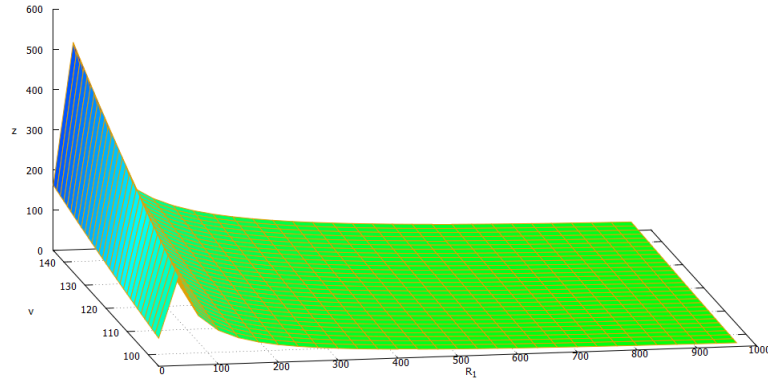


Figura 3.46: Potencia efectiva en R_1 configuración 2, como función de V y R_1 .

$$\lim_{R_1 \rightarrow 0} Pef_{R2}(R_1, R_2, V) = \frac{R_2 V^2}{(R_C + R_2)^2}. \quad (3.102)$$

Resultando en las siguientes corrientes de malla:

$$i'_1 = i'_2 = \frac{V}{2R_C}. \quad (3.103)$$

Mientras las corrientes i'_3 y i'_4 se mantienen sin cambios, debido a que no presentar una dependencia de R_1 . Cuando el corto circuito se presenta en la carga R_2 , se muestra un comportamiento similar al caso tratado anteriormente. Con lo cual su potencia efectiva en cada carga se muestra por las ecuaciones siguientes:

$$\lim_{R_2 \rightarrow 0} Pef_{R1}(R_1, R_2, V) = \frac{R_1 V^2}{(R_C + R_1)^2}, \quad (3.104)$$

$$\lim_{R_1 \rightarrow 0} Pef_{R2}(R_1, R_2, V) = 0. \quad (3.105)$$

Resultando las siguientes corrientes de malla:

$$i'_3 = i'_4 = \frac{V}{2R_C}. \quad (3.106)$$

Mientras las corrientes i'_1 y i'_2 se mantienen sin cambio, debido a que no dependen de R_2 .

3.5. POTENCIA EFECTIVA EN R_1 Y R_2

Circuito abierto configuración 2

De igual manera que se realizó con la configuración 1, es de interés describir la potencia efectiva en cada carga debido a la operación de una sola carga dentro de NDCCD. En la ausencia de la carga R_1 dentro la NDCCD, la potencia efectiva en cada carga es dada por:

$$\lim_{R_1 \rightarrow \infty} P_{efR1}(R_1, V) = 0, \quad (3.107)$$

$$\lim_{R_1 \rightarrow \infty} P_{efR2}(R_2, V) = \frac{R_2 V^2}{(R_C + R_2)^2}. \quad (3.108)$$

Mostrando las siguientes corrientes de malla:

$$i'_1 = i'_2 = 0. \quad (3.109)$$

Mientras las corrientes i'_3 y i'_4 quedan descritas por las Ecs. (3.63) y (3.64), respectivamente. Dado la falta de la carga R_2 la potencia efectiva es dada por:

$$\lim_{R_2 \rightarrow \infty} P_{efR1}(R_1, V) = \frac{R_1 V^2}{(R_C + R_1)^2}, \quad (3.110)$$

$$\lim_{R_2 \rightarrow \infty} P_{efR2}(R_1, R_2, V) = 0. \quad (3.111)$$

Generando las siguientes corrientes de malla:

$$i'_3 = i'_4 = 0, \quad (3.112)$$

en tanto que las corrientes i'_1 y i'_2 estan dadas por las Ecs. (3.61) y (3.62), respectivamente.

CAPÍTULO 3. MODELOS MATEMÁTICOS ELECTRODOMÉSTICOS

Capítulo 4

Montaje experimental

En este capítulo se describe las pruebas con EAE's diseñados originalmente para funcionar con CA, operando en la NDCD propuesta en el presente trabajo. En general, el cableado utilizado en una instalación dentro de una casa habitacional que opera en CA, también puede ser utilizado en la NDCD. Los accesorios usados en el circuito eléctrico doméstico de CA, como lo son los apagadores, contactos, enchufes..., etc, también es posible incorporarlos a la NDCD sin necesidad de mayores adaptaciones. En referencia al tema de sistemas de protecciones eléctricas para la NDCD este es un tópico de gran importancia que garantiza la continuidad e integridad del sistema. Este tema va más allá del alcance de este trabajo, queda fuera de la discusión y puede dar lugar a una futura línea de investigación. La realización de las pruebas experimentales para recopilar los datos de la NDCD, fueron llevadas bajo condiciones de operación nominal. De acuerdo a esto, se optó por la utilización de pastillas electromagnéticas convencionales destinadas para su operación dentro de CA. Durante el desarrollo de la pruebas experimentales se presentó una condición de sobrecarga en la NDCD, provocando la activación de las pastillas de manera correcta. Dentro de los fenómenos que se abarcan con las protecciones eléctricas que es objeto de estudio, se encuentran el denominado corto circuito. Dicha perturbación se distingue por la presencia abrupta y repentina de una cantidad elevada de corriente eléctrica. Ante esto, este trabajo se limita en mencionar la propuesta de utilización del uso de elementos fusibles para el control de fallas de corto circuito dentro de la NDCD.

Para realizar las pruebas experimentales, se llevó acabo la instalación del sistema fotovoltaico, banco de baterías así como habilitación de las conexiones eléctricas y la implementación de EAE's en la NDCD. Dentro del sector de almacenamiento de energía se cuenta con la existencia de un banco de baterías perteneciente

CAPÍTULO 4. MONTAJE EXPERIMENTAL

originalmente a un carro eléctrico, como se muestra en la Fig. 4.1. La casa habitación seleccionada cuenta con dos circuitos en su instalación eléctrica, el primer circuito alimenta las siguientes áreas: una habitación, sala y cocina. El segundo circuito alimenta: baño, una habitación y patio de servicio.



Figura 4.1: Instalación de NDCE.

El sector de almacenamiento y generación de energía es conectado a la casa habitación por medio del cable de dos polos calibre 10 AWG, al tablero de distribución del circuito 1 como se muestra en la Fig. 4.2. Todo lo anterior fue realizado sin ninguna modificación al cableado existente, incluyendo las pastillas termomagnéticas. En tanto el segundo circuito continuó siendo alimentado con la red eléctrica pública (CFE), debido a la existencia de electrodomésticos con componentes exclusivos de CA que imposibilita su incorporación a la NDCE, por ejemplo para la refrigeración de alimentos¹.

Dentro de las principales necesidades en un hogar en México [4], se identifican algunos EAE's existentes en el mercado local que permiten su incorporación sin modificaciones considerables. Para la función de iluminación se usaron lámparas fluorescentes y LED como es mostrado en la Fig. 4.3(a). Respecto al área de comunicación y entretenimiento, se incorporaron dispositivos como es Tv, reproductor de DVD, cargadores de celular, laptop, modem, entre otros (Fig. 4.3(b)).

Una actividad fundamental dentro del hogar consiste en la preparación y cocción de alimento. Se ha implementado el uso de estufas de inducción para satisfacer dicha necesidad en las zonas rurales [56], que reducen el consumo de biomasa. Se logra identificar e incorporar una estufa de inducción de potencia eléctrica de 3

¹En su funcionamiento motriz es utilizado motores de inducción asíncronos exclusivos de CA.



Figura 4.2: Conexión al tablero principal.



(a) lámparas fluorescentes y LED.



(b) TV, reproductor de DVD, modem, cargadores de celular

Figura 4.3: Electrodomésticos de alta eficiencia operando a 120 VCD.

600 W, una parrilla eléctrica y licuadora sin la necesidad de realizar modificación alguna [57, 58]. Para reducir en lo posible el consumo de gas LP en una primera etapa, se utilizó un horno eléctrico; este último no opera bajo el principio de

CAPÍTULO 4. MONTAJE EXPERIMENTAL

fuentes conmutadas como se muestra en la Fig. 4.4.



Figura 4.4: Estufa de inducción y parrilla eléctrica a 120 VCD.

En los electrodomésticos disponibles en el mercado local, se identificaron varias opciones de hornos eléctricos. Se seleccionó un horno eléctrico de una potencia eléctrica de 1350 W a 120 VCA 60 Hz para efectuar pruebas. El sistema de control de temperatura es realizado por medio del termostato bimetalico que controla la apertura o cierre de los platinos y con ello interrumpe la alimentación a las resistencias. Durante su operación en la NDCD se presentó una falla en el control de la temperatura. Al verificar el funcionamiento del termostato, se ubicó la falla en los platinos del termostato. Dicha falla consistió en la fusión de los platinos debido al arco de corriente alcanzando su punto de fusión al intentar interrumpir el flujo de la corriente, como se muestra en la Fig. 4.6(a).

Para disponer de agua caliente, existen en el mercado local opciones accesibles que satisfacen esta necesidad por medio de calentadores solares, representando una opción viable para su incorporación dentro del hogar. Sin embargo, se procede a desinstalar un boiler de gas LP existente y para cubrir esta necesidad dentro de NDCD se emplea un boiler eléctrico con una capacidad de 38 litros y potencia eléctrica declarada de 2 240 W. Su control de temperatura es en base a termostato similar al caso del horno eléctrico; con una alta probabilidad de presentar la falla reportada en el caso anterior. Para su fuente de generación y alimentación de energía, se cuenta con 2 paneles solares de 300 W con una configuración de alimentación en tiempo real.

La NDCD se habilitó y se mantuvo en funcionamiento durante el periodo aproximado de cuatro meses. Tiempo en el cual se realizaron pruebas de manera individual con los EAE's en CD y en CA. Después de estar operando cuatro meses continuos la NDCD, se realiza el cambio de la instalación eléctrica de CD a CA.



Figura 4.5: Boiler eléctrico para agua caliente sanitaria.

En dicho cambio, la Tv y una grabadora de cámaras de seguridad presentaron una falla visible. Al realizar la revisión de la Tv, se esperaba que la falla estuviera presente en la fuente de poder (fuente conmutada) pero su falla es localizada en la tarjeta electrónica de los puertos HDMI como se muestra en la Fig. 4.6(b). Mientras que en el caso de la grabadora no se logra identificar la falla.

De igual forma que el caso del horno eléctrico, los sistemas de calefacción eléctricos convencionales utilizan en su sistema de control de temperatura un sistema similar al horno eléctrico. Por lo tanto, no es recomendable su incorporación sin antes haber realizado la modificación pertinente.

La casa habitación debe contar con los electrodomésticos adecuados que se adapten a la NDCD. Para ello es preciso establecer los criterios técnicos de selección de electrodomésticos existentes en el mercado local con el objetivo de no realizar modificaciones en tales electrodomésticos. Para el caso de electrodomésticos donde algunos de sus componentes sean motores de inducción o polos sombreados, debe ser considerada su sustitución por motores de CD o la incorporación de inversores de corriente (híbridos). Con lo anterior, no se descarta la existencia de redes híbridas con un aumento en la complejidad para el usuario, ya que deberá identificar los sectores que operan con CA y CD, para no alimentar cargas que son exclusivas de CA en el bus de CD, mientras que el caso contrario se considera que no representan conflictos serios [36].



(a) Platinos fundidos del termostato del horno eléctrico.



(b) Tarjeta de puertos HDMI de Tv.

Figura 4.6: Daños en el algunos electrodomésticos.

4.1. Adquisición de datos

Se realizaron y registraron lecturas de consumo de corriente eléctrica de cada EAE empleado, bajo las mismas condiciones de funcionamiento, tanto en el régimen de CD como en CA, así como en el estado de *Stand by* o *de espera*. Dicho estado es aquel donde el electrodoméstico se encuentra interconectado físicamente en el sistema eléctrico, sin embargo no se encuentra realizando ninguna función como tal. Para realizar la estimación del desempeño de los electrodomésticos dentro de la NDCD, se ha seleccionado la estufa de inducción, que representa la carga de mayor consumo. Dentro de las cargas que se consideran usuales en un hogar, seleccionamos una licuadora con potencia de 600 W a 120 VAC 60 Hz y una laptop marca Lenovo modelo G505 con AC-DC Adapter Model ADLX45NDC3A INPUT 100-240 VAC 50/60 Hz 1.2 A, OUTPUT 20 VDC 2.25 A (Fig. 4.9) [59].

La prueba de funcionamiento de la estufa de inducción, corresponde a una hor-

4.1. ADQUISICIÓN DE DATOS

Cuadro 4.1: Consumo de corriente eléctrica de Electrodoméstico.

Electrodoméstico	DC (A)		AC (A)		Porcentaje
	ON	Standby	ON	Standby	
Lap Top	0,3	0,0	0,3	0,01	3,33 %
Cargador batería	0,1	0,0	0,2	0,0	---
Licuadora	2,7	0,0	2,4	0,0	---
Estufa inducción	9,1	0,0	10,8	1,8	16,66 %

nilla a su máxima potencia, con la cual se registra un consumo de 10.8 A en CA, mientras que en CD su lectura corresponde a 9.1 A (Fig. 4.7). En el estado *de espera* en el régimen de CA se registran consumo de corriente eléctrica, en el caso de la estufa de inducción es de 1.8 A y la laptop es de 0.01 A, mientras que para el régimen de CD, no hay consumo alguno como se muestra en la Tabla 4.1, que corresponde a los valores RMS (Raíz media cuadrática) de la corriente eléctrica.



Figura 4.7: Estufa inducción.

Dicho consumo es denominado como *consumo parásito* y su presencia es debido a la existencia de un capacitor dentro de la estufa de inducción, cuya función es filtrar interferencias electromagnéticas (EMIF) [60]. Por otra parte, la corriente en un capacitor C , se define como $i_C = C \frac{dV(t)}{dt}$. Para el régimen de CA la fuente de voltaje se representa como $V(t) = V_M \sin(\omega t + \theta)$, mientras que para el régimen de CD, la fuente de voltaje se representa como $V(t) = V_d \approx Cte$, en la estufa de inducción se identifican 4 capacitores de $10 \mu F$ c/u y un capacitor de $1 \mu F$, en

CAPÍTULO 4. MONTAJE EXPERIMENTAL

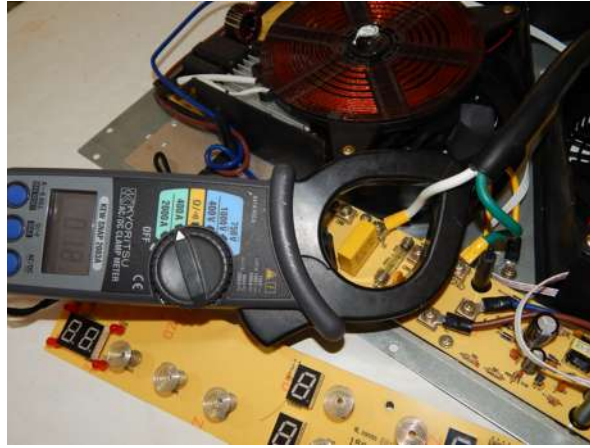


Figura 4.8: Corriente eléctrica.

paralelo (Fig. 4.8).

$$\begin{aligned} I_{RMS} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_C^2 dt}, \\ &= \frac{V_M C \omega}{\sqrt{2}}, \\ &= V_{RMS} C \omega, \end{aligned} \tag{4.1}$$

donde $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ y $f = 60$ Hz. De acuerdo a esta ecuación, la corriente eléctrica de la estufa de inducción es 1.8548 A. Lo anteriormente mencionado se puede observar de manera experimental en la Fig. 4.11, en la cual se manifiesta una onda de corriente eléctrica debido al consumo parásito. Mientras tanto, en la Fig. 4.12 corresponde a la lectura de la corriente eléctrica producida por la estufa de inducción en Standby, resultando un valor cercano a cero.



Figura 4.9: Cargador de Laptop.

4.2. DISPOSITIVOS DE ILUMINACIÓN



Figura 4.10: Motor Licuadora.

Mientras el electrodoméstico permanezca interconectado con el sistema eléctrico en CA, el consumo parásito debido al capacitor estará latente. Esto representa una pérdida del 16.66 % con respecto a la máxima potencia de una hornilla, en tanto que en referencia a la potencia intermedia de su funcionamiento nominal significa una pérdida del 32.72 %. Para el régimen de CD $\frac{dV(t)}{dt} = 0$, por lo tanto, dicha corriente es cero (Fig. 4.12) [36].

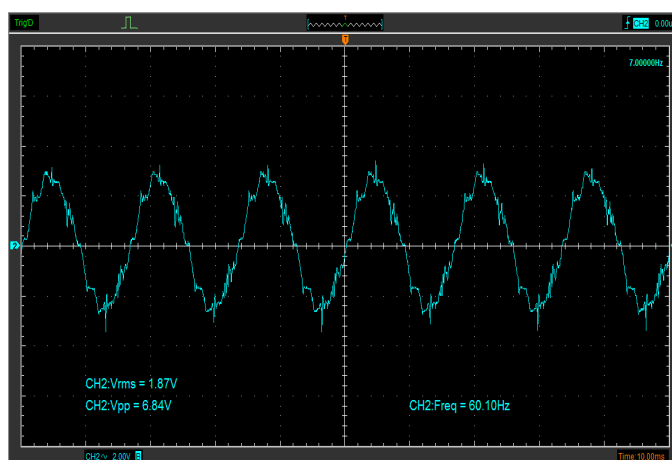


Figura 4.11: Consumo parásito estufa de inducción en CA correspondiente a 1.87 A.

4.2. Dispositivos de iluminación

Los dispositivos de iluminación disponibles en el mercado local, como lo son lámparas fluorescentes y LED, son diseñadas para operar en sistemas de CA y ofrecen la ventaja de ser incorporadas sin modificación alguna a la NDCD (Fig. 4.13). En esta sección se mostrará la distorsión que se provoca a los sistemas

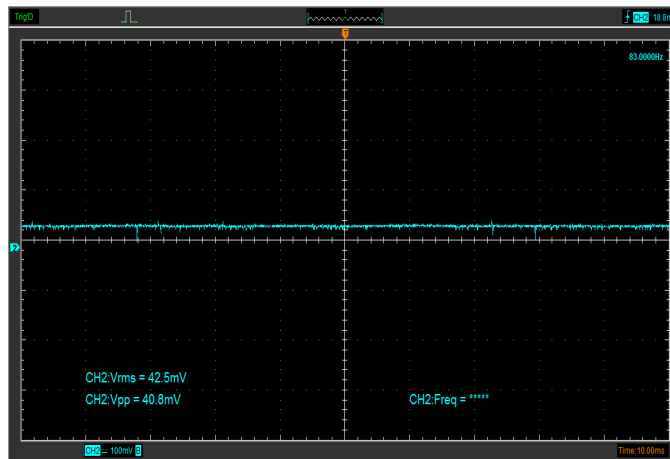


Figura 4.12: Corriente estufa de inducción dentro de NDCC cercano a cero.

eléctricos debido a su incorporación. Se analiza las emisiones de armónicos con el apoyo de la función de Transformada Rápida de Fourier (FFT). Es cuantificada la distorsión de la señal de corriente y voltaje, tanto en CA como en la NDCC [61].

4.2.1. Medición de armónicos para CA y CD

El análisis de Fourier es llevado a cabo mediante la función de la FFT incorporada dentro de las funciones que proporciona el osciloscopio implementado en la adquisición de las señales de corriente y voltaje. Para cada lámpara se evalúa su desempeño en ambos regímenes. La evaluación del nivel de distorsión de onda se lleva a cabo con la ayuda del índice denominado Distorsión Armónica Total o Total Harmonic Distortion (THD). El THD es definido como:

$$THD_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=i+1}^{\infty} V_h^2}}{V_i} 100\%, \quad (4.2)$$

donde i es el índice que corresponde a la frecuencia fundamental del sistema y h indica la componente armónica.

También se define el indicador Distorsión Armónica Individual o Individual Harmonics Distortion (IHD) que representa la distorsión por cada componente armónico h correspondiente a la señal de voltaje o corriente, el cual es dado por:

$$IHD_h(\%) = \frac{V_h}{V_i} 100\%. \quad (4.3)$$

La frecuencia fundamental en los sistemas eléctricos de CA se establece en 50 o 60 Hz, dependiendo de las normas del país. Los armónicos son múltiplos enteros de

4.2. DISPOSITIVOS DE ILUMINACIÓN



Figura 4.13: Lámparas fluorescente y LED disponible en mercado local.

la frecuencia fundamental. Sin embargo, en el sistema es posible que se manifiesten frecuencias para las cuales sus valores no representen múltiplos exactos de la frecuencia fundamental, ellas son llamadas Interarmónicas. Las interarmónicas son relacionadas al comportamiento no lineal de las cargas [6]. Continuando con el régimen de CD, la frecuencia fundamental del sistema corresponde al valor de 0 Hz coincidiendo con el valor del índice del coeficiente de la serie de Fourier de $i = 0$. De acuerdo con la Ec. (4.2), para los sistemas de CA se tiene que índice de la fundamental es $i = 1$, y su respectiva componente de CD es $i = 0$.

4.2.2. Lecturas de CA

La emisión de armónicos debido a la operación de electrodomésticos de alta eficiencia, sistemas fotovoltaicos, lámparas LED y fluorescentes dentro de sistemas de CA, han sido ampliamente estudiado [62–66]. La complejidad de las soluciones a dicha cuestión, se incrementa cada vez más. Esto es debido al comportamiento no lineal de los dispositivos electrónicos [67–70]. Iniciamos colocando en funcionamiento la lámpara fluorescente diseñada para operar un voltaje de 120 V CA, 60 Hz con una potencia de diseño de 15 W. La lectura de corriente que se obtiene es de 163 mA que se muestra en la Fig. 4.14. La lámpara LED también es diseñada para operar a un voltaje de 120 V CA, 60 Hz dando una lectura de corriente de 101 mA.

4.2.3. Lecturas de la NDCCD

Las lecturas que a continuación se describen, corresponden a las lámparas operando dentro de la NDCCD con un voltaje presente de 102 VCD. La lectura de

CAPÍTULO 4. MONTAJE EXPERIMENTAL

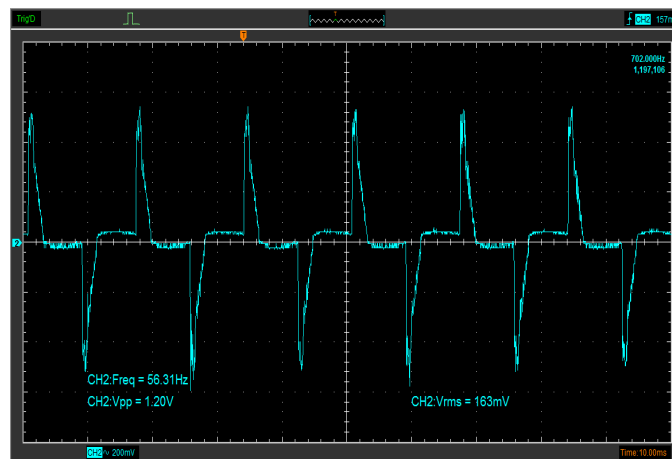


Figura 4.14: Corriente de lámpara fluorescente en CA.

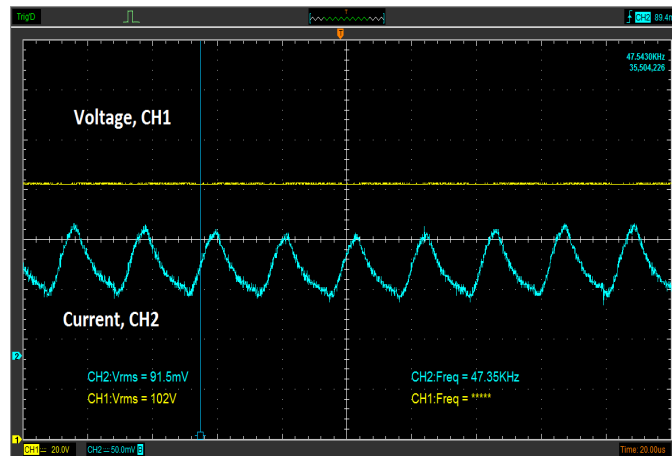


Figura 4.15: Corriente y voltaje de lámpara fluorescente en CD.

corriente obtenida para la lámpara fluorescente es de 91.5 mA, identificándose un comportamiento periódico con una frecuencia de 47.35 KHz, como puede observarse en la Fig. 4.15. En el turno de la lámpara LED, se registra una lectura de corriente de 125 mA, también se manifiesta un comportamiento periódico con una frecuencia de 67.20 KHz, plasmado en la Fig. 4.16.

En la siguiente sección se muestra las lecturas del risado en las señales de voltaje y corriente debido a la operación de dos tipos de lámparas dentro de la nanored doméstica de CD, así como la reducción del consumo en modo de standby.

4.3. Armónicos

El comportamiento de los diversos dispositivos de iluminación dentro de la NDCD han manifestado un comportamiento periódico cuya frecuencia difiere de la frecuencia fundamental del sistema. Antes de dar inicio al análisis de FFT, es rele-

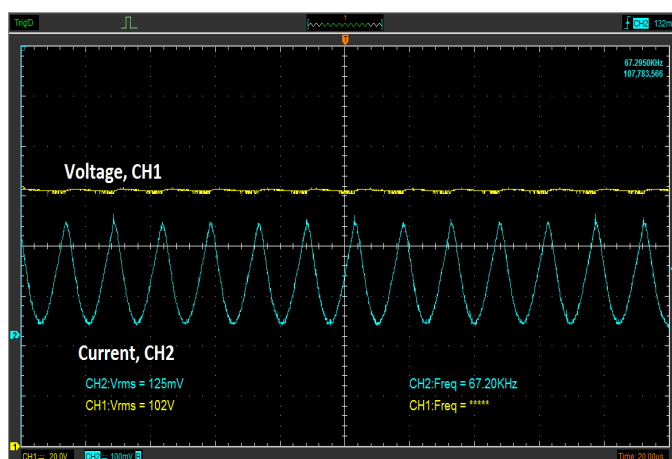


Figura 4.16: Corriente y voltaje de lámpara LED en CD.

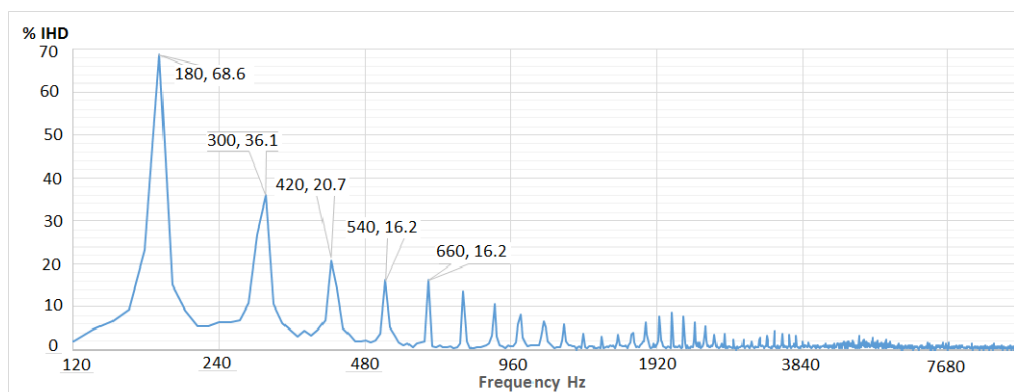


Figura 4.17: Espectro de corriente de lámpara fluorescente en CA.

vante mencionar que para cualquier fenómeno periódico presente dentro de los parámetros de la NDCD debe ser considerado como un interarmónico, recordando la definición de armónico así como la de interarmónico.

El espectro de la señal de corriente de la lámpara fluorescente y LED operando dentro del sistema eléctrico de CA de 127 VAC, 60 Hz son mostrados en las Figs. 4.17 y 4.18, respectivamente. En la Fig. 4.14 se observa el perfil de la corriente de la lámpara fluorescente; el cual es similar a los reportados en la literatura [69,70]. El comportamiento de la lámpara LED mostrado en su espectro de la Fig. 4.18, se identifica un mayor contenido armónico cerca del valor de la frecuencia fundamental. Sin embargo, se registra para las frecuencias de 55.86 y 58.86 KHz contenido armónico con valores del 15.4% y 11.86%, respectivamente. Es posible asociar estas frecuencias a las frecuencias de conmutación de las propias lámparas.

En la Fig. 4.19 es mostrado el espectro de frecuencia de la corriente eléctrica resultante debido a la operación de la lámpara fluorescente dentro de la NDCD. Es

CAPÍTULO 4. MONTAJE EXPERIMENTAL

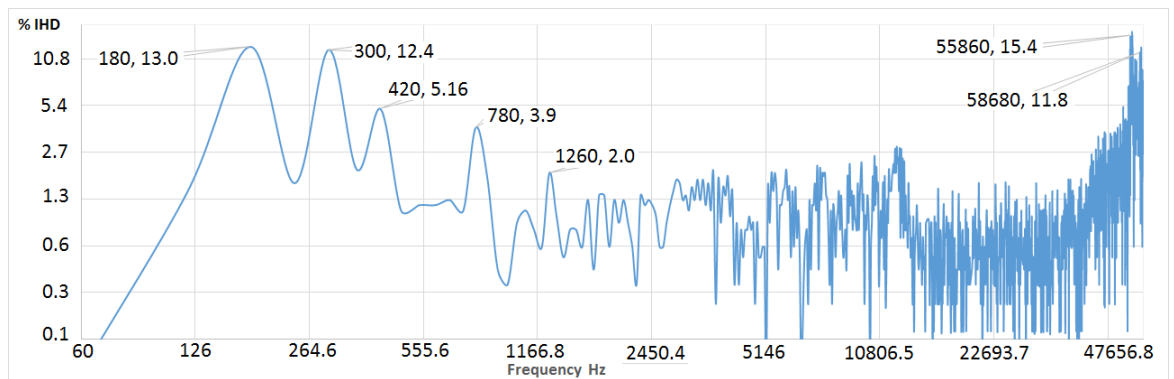


Figura 4.18: Espectro de corriente de lámpara LED en CA.

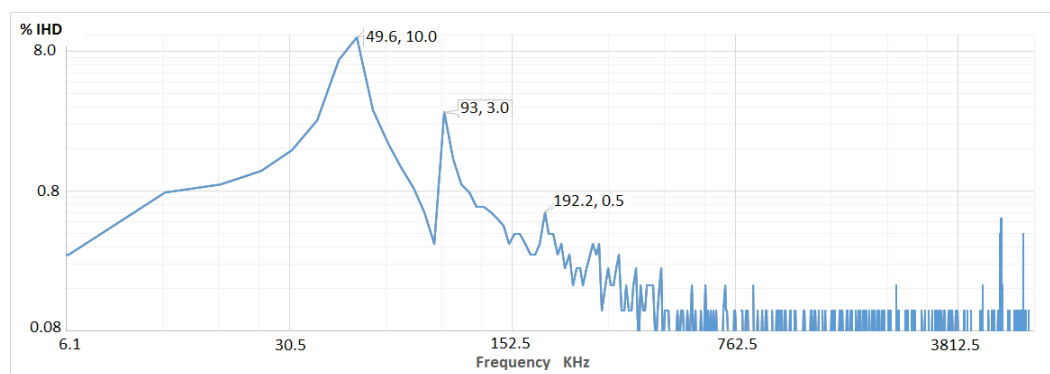


Figura 4.19: Espectro de corriente de lámpara fluorescente en CD.

importante resaltar que la frecuencia de 49.6 KHz presenta un mayor contenido de armónicos de intensidad del 10.073% con respecto a la fundamental. En relación a la distorsión del voltaje debido a la misma lámpara, esta se muestra en la Fig. 4.21. En este caso la mayor distorsión corresponde a 0.043%, con respecto a la fundamental, siendo localizada en la ya mencionada frecuencia. Para el caso de la lámpara LED, se observa que la máxima distorsión en la señal de corriente que se presenta al operar dentro de la NDCD, corresponde a la frecuencia de 68.2 KHz con un valor de intensidad del 43.66%, con respecto a la fundamental. En lo que respecta a la señal de voltaje, se ha identificado que la máxima distorsión se presenta en la frecuencia de 68.2 KHz con un valor de 0.243% (ver Fig. 4.22).

En la Tabla 4.2 se muestra el valor de THD obtenido para ambos sistemas. En el sistema CA solamente es mostrada la lectura de los armónicos presentes en la corriente eléctrica, mientras que para la NDCD se indican los espectros del voltaje y corriente eléctrica. Podemos observar que la máxima distorsión se presenta con la lámpara fluorescente con un 107.74% correspondiente a operar en CA. En la situación de la lámpara LED también presenta una gran distorsión en la corriente

4.3. ARMÓNICOS

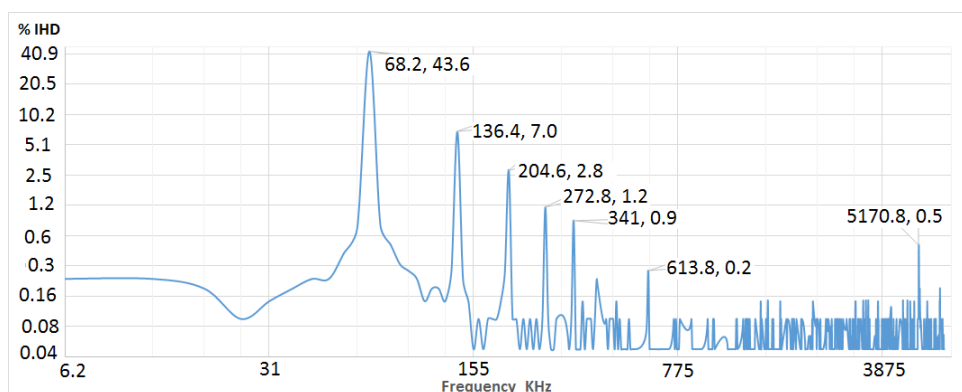


Figura 4.20: Espectro de corriente de lámpara LED en CD.

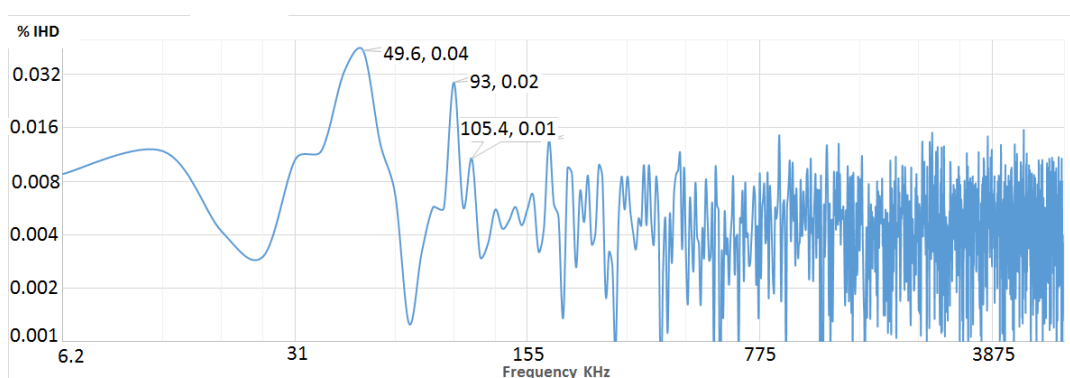


Figura 4.21: Espectro de voltaje de lámpara fluorescente en CD.

eléctrica (89.1 %). Para el caso de las distorsiones dentro de la ND CD, la distorsión en la corriente eléctrica es muy pequeña mientras que la señal de voltaje es relativamente despreciable.

4.3.1. Risados

La distorsión presente en las señales obtenidas de corriente y voltaje muestran un comportamiento periódico. El perfil de las señales son formadas por crestas y valles con un contorno bien definido. La existencia de estas crestas y valles, puede ser interpretado como *Risado* en la señal. La amplitud entre la cresta y valle es un

Cuadro 4.2: %THD de lámparas

lámpara	%THD		
	CA	CD	
	Corriente	Corriente	Voltaje
Fluorescente	107.743	14.108	0.191
LED	89.089	44.408	0.306

CAPÍTULO 4. MONTAJE EXPERIMENTAL

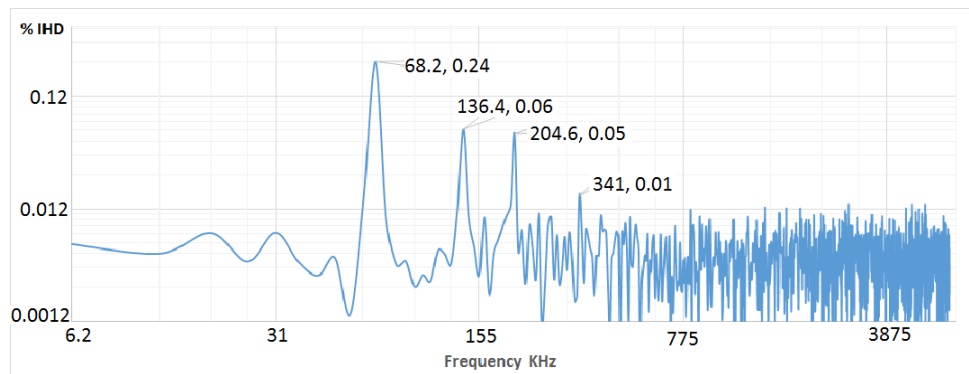


Figura 4.22: Espectro de voltaje de lámpara LED en CD.

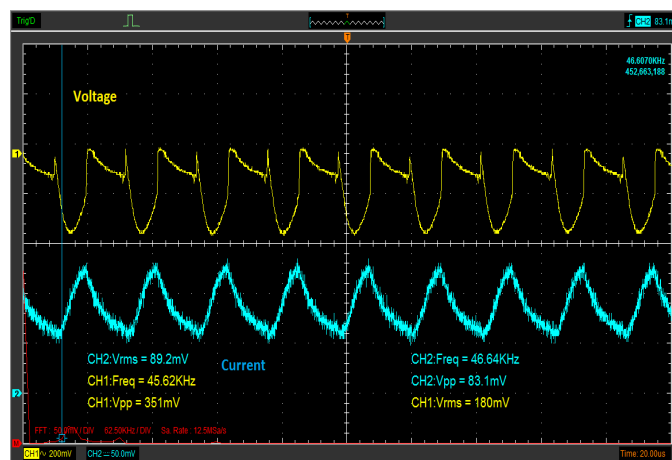


Figura 4.23: Risado del voltaje y la corriente de lámpara fluorescentes dentro de NDCCD.

dato obtenido durante su funcionamiento. En las Figs. 4.23 y 4.24 se muestra el risado presente en la señal de voltaje provocado por la operación de la lámpara fluorescente y LED, respectivamente. El risado en el voltaje debido a la lámpara fluorescente dentro de la NDCCD equivale a un valor de pico a pico de 351 mV, en tanto que en la corriente se presenta un risado con valor de pico a pico 83.1 mA. La lámpara LED presenta un risado en el voltaje de con valor de pico a pico 1.39 V, mientras que el risado en la señal de corriente corresponde a un valor de pico a pico de 282 mA.

En referencia a la Fig. 4.11, corresponde al comportamiento de la estufa de inducción generando un consumo parásito de energía eléctrica en el sistema de CA. En el momento de encontrarse en *Stand by* dentro de la NDCCD no es registrado lectura de corriente como se muestra en la Fig. 4.12. Es de nuestro interés verificar también el comportamiento de los parámetros eléctricos de la NDCCD, durante el periodo de tiempo en el cual se encuentran operando diversos electrodomésticos simultáneamente. Para este caso, establecemos las condiciones para la toma

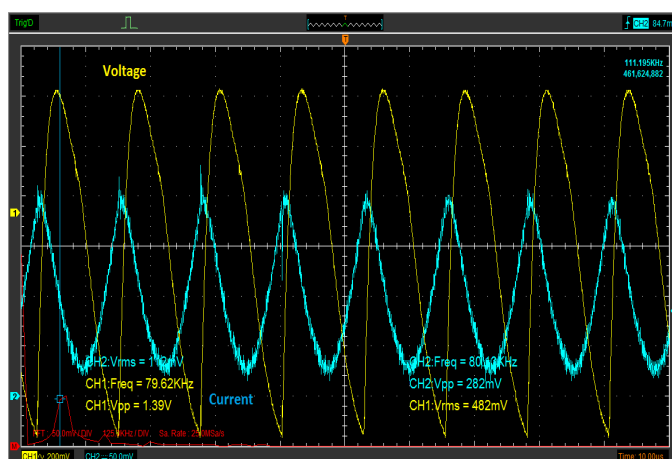


Figura 4.24: Risado del voltaje y la corriente de lámpara LED dentro de NDCCD.

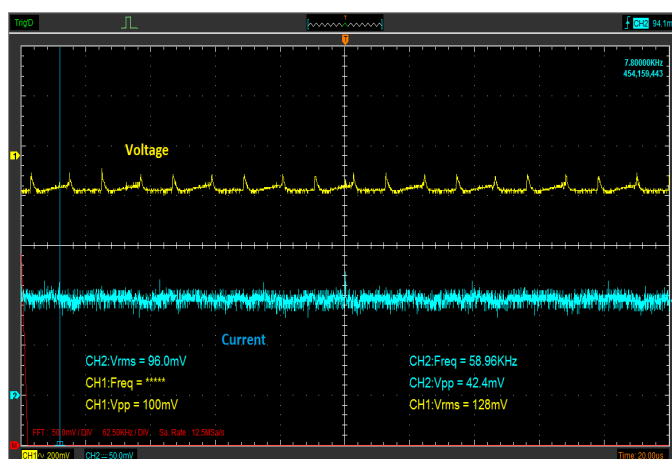


Figura 4.25: Risado del voltaje y la corriente de lámpara fluorescentes con estufa de inducción en Stand by dentro de NDCCD.

de lecturas de una lámpara con la estufa de inducción en su modo de *Stand by*. El comportamiento de los parámetros de voltaje y corriente de la lámpara fluorescente y LED, se muestran en las Figs. 4.25 y 4.26, respectivamente. En ellas se aprecia una marcada atenuación en el risado de ambos parámetros gracias al efecto de la estufa de inducción.

En las lecturas correspondientes a la lámpara fluorescente se logra reducir el risado en el voltaje a un valor de 100 mV lo cual representa una atenuación del 71.50%. En la señal de corriente se obtiene un risado de 42.4 mA, con un valor de atenuación del 48.97%. En el caso de la lámpara LED, tenemos un risado en el voltaje de 113 mV, que corresponde a una atenuación del 91.87%. En lo correspondiente a la señal de corriente se obtiene un valor de 89.4 mA con un factor de atenuación del 68.29%. Los dispositivos de iluminación dentro de sus componentes contienen filtros para reducir las interferencias electromagnéticas y evitar

CAPÍTULO 4. MONTAJE EXPERIMENTAL

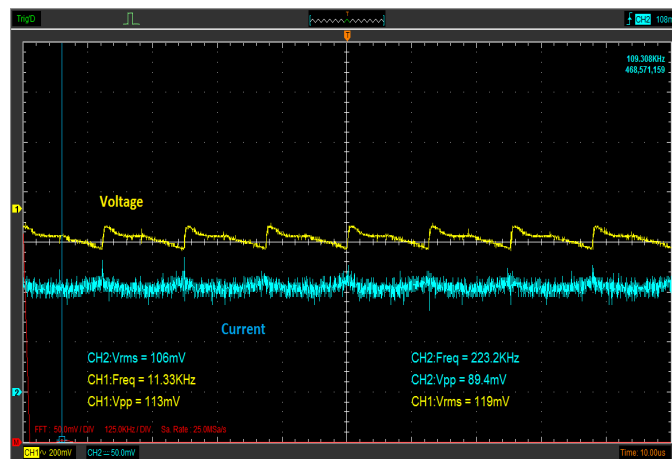


Figura 4.26: Risado del voltaje y la corriente de lámpara LED con estufa de inducción en Stand by dentro de NDCD.

Cuadro 4.3: Risados de lámparas en NDCD

lámpara	Corriente Pk-Pk	Voltaje Pk-Pk
C=0		
LED	282 mA	1.39 V
Fluorescente	83.1 mA	351 mV
C= 40 μ F		
LED	89.4 mA	113 mV
Fluorescente	42.4 mA	100 mV

los efectos de estas sobre el sistema eléctrico [40, 71, 72]. Sin embargo, dentro de la NDCD se presentan dichas distorsiones cuyos efectos sobre sus sectores aún se desconocen.

En la Tabla 4.3 se resumen los dos casos descritos anteriormente. En ella se visualiza los valores de pico a pico de las señales de corriente y voltaje dentro de la NDCD sin ($C= 0 \mu\text{F}$) y con ($C= 40 \mu\text{F}$) la presencia de la estufa de inducción, respectivamente. Sobresale el hecho de la marcada reducción en el risado del voltaje y corriente gracias al efecto del capacitor ubicado en la estufa de inducción. Tomando en cuenta la Fig. 3.19, el capacitor se encontraría localizado del lado derecho del nodo AB en el circuito. Pasando entonces a formar parte del sector de cargas.

4.4. Análisis y discusión

La selección del voltaje de 120 V CD en nuestra NDCD ha permitido la fácil incorporación de EAE's disponibles en el mercado local para satisfacer diversas

4.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

necesidades dentro de un hogar. Se ha empleado una topología lo más simple posible como una opción viable para su uso tanto en las comunidades rurales como en las zonas urbanas. En la actualidad, el tema de generación de energía por medio de fuentes energía renovable presenta un sólido desarrollo tecnológico y económico. Destaca el interés sobre los sistemas de almacenamiento de energía, La búsqueda de lograr extender su aplicación en diversas actividades; han dado pie al planteamiento del concepto de microrredes y nanoredes. Las eficiencias energéticas alcanzadas en los EAE's son resultado del uso de la electrónica de potencia incorporada en las fuentes conmutadas, principalmente. Para describir el comportamiento de una fuente conmutada como la presentada en la Fig. 3.4, empleamos el modelo matemático dado en la Ec. (3.26). Queremos con ello caracterizar el comportamiento físico de una conductancia que muestra el patrón periódico como el de la Ec. (3.25). En cada uno de los periodos se pretende alcanzar una conductancia promedio definida por la Ec. (3.27).

La aplicación del modelo matemático en diferentes condiciones es mostrado en la Tabla 3.1. Los valores teóricos del voltaje y corriente son calculados y su representación gráfica se encuentra en las Figs. 3.20–3.27, que corresponde a la operación individual de dos cargas dadas desde su conductancia como $G_1(t)$ y $G_2(t)$. Como puede ser apreciado en la tabla, los casos mostrados corresponden al cambio en un solo parámetro, manteniendo el resto sin modificación. En el primer caso, las cargas se diferencian sólo con el parámetro R_0 manteniéndose el resto iguales. El parámetro R_0 impacta en proporción inversa en el risado en la corriente y voltaje como se muestra en las Figs. 3.20 y 3.21, respectivamente; así como también en su consumo de energía. En el desarrollo del segundo caso, el parámetro a variar es el valor de la capacitancia C . Existe una relación inversamente proporcional con el risado presente en las señales de corriente y voltaje (Figs. 3.22 y 3.23). En el siguiente caso, toca el turno del ciclo de trabajo D . Se registra un efecto directamente proporcional sobre el risado en la corriente y el voltaje, así como el consumo de energía como se muestra en las Figs. 3.24, and 3.25. En el último caso tiene una especial importancia, se analiza la operación de diferentes frecuencias de conmutación de las cargas. Los parámetros de corriente y voltaje se mantiene sin cambio únicamente presentándose un desfase como se plasma en las Figs. 3.26 y 3.27. Ahora tomemos a análisis la condición que se presenta cuando dos cargas ($G_1(t)$ y $G_2(t)$) se encuentran operando simultáneamente. Podemos echar mano de la existencia de una conductancia equivalente para ambas cargas como se muestra en la Fig. 3.29 con la ayuda de la Ec. (3.43). Para esto, se toman los

CAPÍTULO 4. MONTAJE EXPERIMENTAL

parámetros del caso IV definido en la Tabla 3.1 siendo aplicada la Ec. (3.42). El voltaje V_{AB} de la NDCD debido a la operación simultánea de las dos cargas es presentado en la Fig. 3.30. La aparición del fenómeno de pulsaciones se muestra en la Fig. 3.30. La operación simultánea de diversas cargas puede generar señales de corriente y voltaje semejantes a ruido emitido hacia la red como el que se observa en la Fig. 3.31. Este efecto puede ser controlado al implementar filtros EMI, como el uso de un elemento capacitor. Sin embargo, existe la posibilidad de añadir otra característica a los filtros EMI, que es la función de elemento adicional de almacenamiento de energía.

Continuamos con la discusión sobre el modelo matemático $G(t)$ mediante la aplicación de datos obtenidos de manera experimental a partir de la operación de los dispositivos de iluminación dentro de la NDCD. Podemos resaltar que el risado presente debido a la lámpara LED (Fig. 4.24), muestra una mayor magnitud con respecto a las lecturas de la lámpara fluorescente (Fig. 4.23). El risado presente en la corriente y voltaje se ve reducido en su amplitud gracias al efecto de capacitor perteneciente a la estufa de inducción como se muestra en las Figs. 4.26 y 4.25.

Las lamaparas LED y fluorescentes analizadas en este trabajo, presentan en sus señales una frecuencia de 80 KHz y 46 KHz, respectivamente, siendo asociadas a sus frecuencias de conmutación. Con el efecto del capacitor perteneciente a la estufa de inducción, el risado en la corriente y voltaje de la lámpara fluorescente se ve atenuado en un 49 % y 72 %, respectivamente, con respecto al valor inicial. En la lámpara LED se muestran grandes reducciones en los risados, siendo del 91.87 % para el voltaje y del 68.3 % a lo que respecta la corriente. Para llevar a cabo la solución del circuito mostrado en la Fig. 3.19 es empleada la Ec. (3.35). La reducción en la amplitud del risado es tratada en el caso III planteado en la Tabla 3.1. En un primer acercamiento del modelo hacia datos experimentales se da con la señal dada en color azul de la Fig. 3.32 simulando un risado semejante al provocado por la lámpara fluorescente en la Fig. 4.23. De hecho, el valor experimental de la amplitud del risado en el voltaje V_{pp} es relacionado con el modelo matemático de la Ec. (3.32). Resultando entonces como:

$$V_{pp} = V_d \left(1 - \frac{1}{G_h R_s + 1} \right), \quad (4.4)$$

para la amplitud del risado en la corriente I_{pp} es dado por:

$$I_{pp} = \frac{G_h V_d}{G_h R_s + 1}, \quad (4.5)$$

4.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

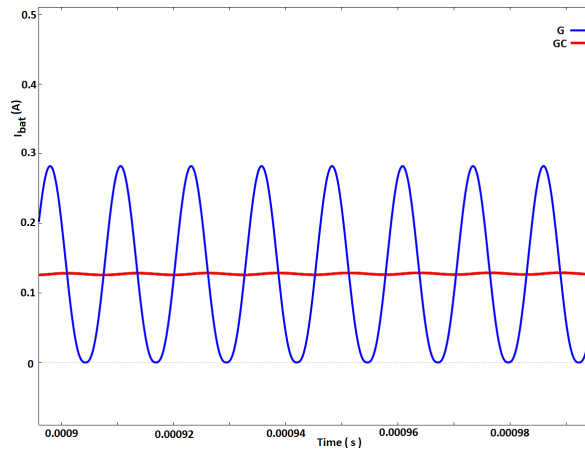


Figura 4.27: Risado teórico de la corriente en lámpara LED.

donde el valor de la amplitud de la conductancia G_h es escrita en términos de los datos experimentales V_{pp} y I_{pp} como:

$$G_h = \frac{I_{pp}}{V_d - V_{pp}}. \quad (4.6)$$

Estas expresiones permiten al modelo matemático reproducir las señales experimentales de manera sencilla. De la misma manera, los términos R_0 y R_s son expresados en función a los valores experimentales de V_{pp} and I_{pp} como:

$$R_0 = \frac{\left(\frac{n!}{2!}\right)^2 2^n D (V_d - V_{pp})}{n! I_{pp}}, \quad (4.7)$$

$$R_s = \frac{V_{pp}}{I_{pp}}. \quad (4.8)$$

Considerando los datos experimentales de la lámpara LED mostrados en la Fig. 4.24 para su utilización al modelo matemático por las Ecs. (4.6) y (4.8). De la Tabla 4.3 se dan los siguientes datos: $V_{pp} = 1,39$, $I_{pp} = 282$ mA, en el ciclo de trabajo se establece $D = 0,75$ con una frecuencia de conmutación de $f_s = 79,62$ KHz, los cuales son usados en la Ec. (3.35) con una capacitancia de $C = 40 \mu\text{F}$. Las señales teóricas obtenidas de corriente y voltaje de la lámpara LED se muestran en las Figs. 4.28 y 4.27, respectivamente. En estas figuras la línea roja corresponde a la señal atenuada por el efecto del capacitor presente dentro de la estufa de inducción, mientras que para la solución sin capacitor se muestra en color azul.

De igual forma para la lámpara fluorescente, desde la Fig. 4.23 son usados los siguientes datos: $f_s = 45.62$ KHz, $V_{pp} = 351$ mV, $I_{pp} = 83.1$ mA y $D = 0,45$. Las Figs.

CAPÍTULO 4. MONTAJE EXPERIMENTAL

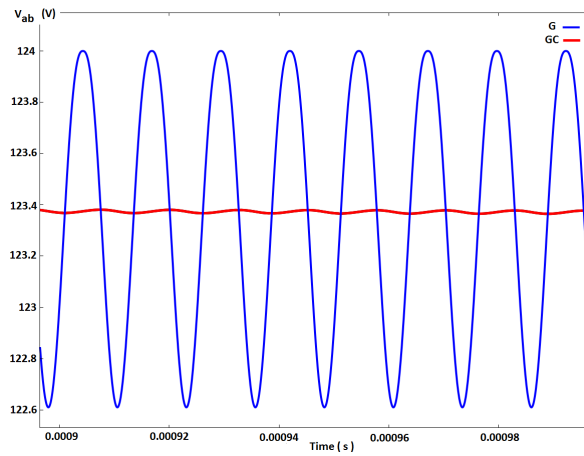


Figura 4.28: Risado teórico en el voltaje de lámpara LED.

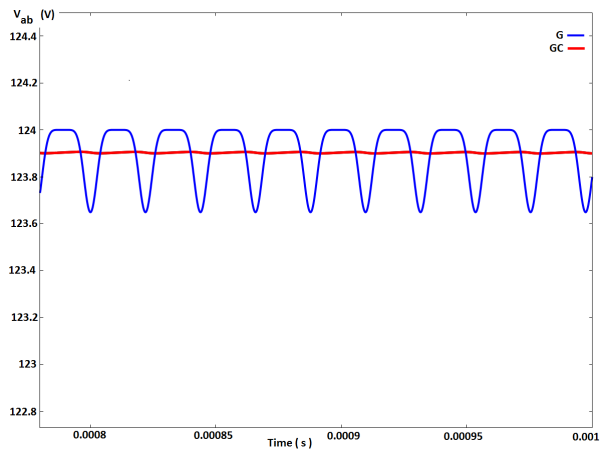


Figura 4.29: Risado teórico en el voltaje de lámpara fluorescente.

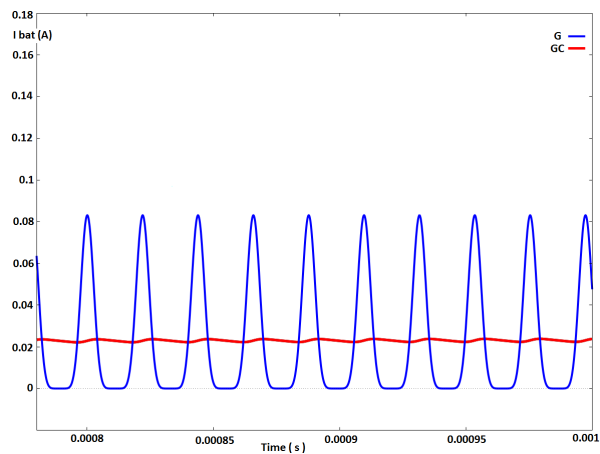


Figura 4.30: Risado teórico en la corriente de lámpara fluorescente.

4.29 y 4.30 muestran las solución teórica para los risados en el voltaje y corriente, respectivamente. Una vez más, la línea roja corresponde al efecto del capacitor y la curva azul en ausencia del mismo. El modelo matemático logra reproducir los

4.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

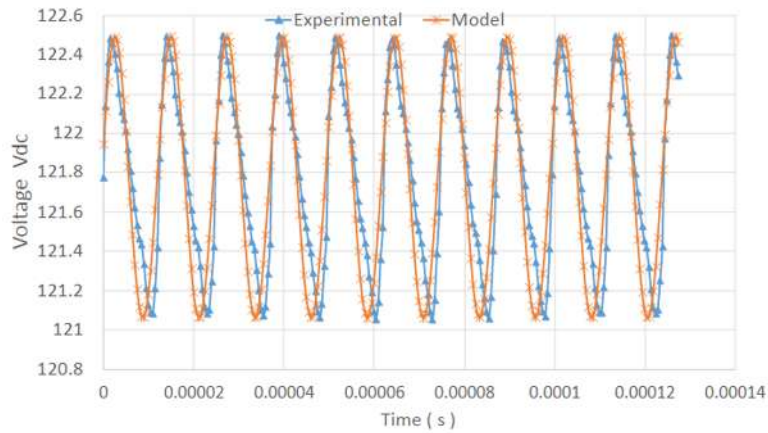


Figura 4.31: Voltaje teórico y experimental de lámpara LED.

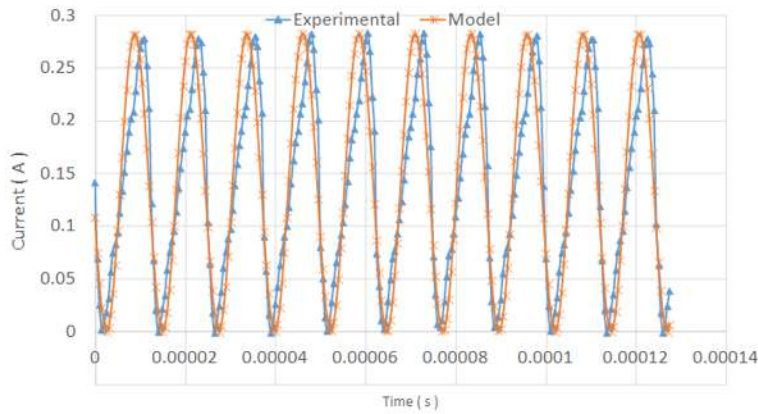


Figura 4.32: Corriente teórica y experimental de lámpara LED.

perfiles experimentales con la utilización de los datos de V_{pp} , I_{pp} , D y f_s . También nos es posible modelar el efecto del capacitor en la reducción de los rizados presentes en el voltaje y corriente. El uso de los parámetros experimentales dentro del modelo matemático para reproducir las señales de corriente y voltaje obtenidas de la lámpara LED, son mostradas en las Figs. 4.31 y 4.32. Para este caso, cabe resaltar la concordancia entre los resultados teóricos y experimentales, poniendo en relieve el valor predictivo del modelo propuesto para las cargas no lineales. Finalmente, es interesante notar la presencia del efecto de restauración en la señal de voltaje de la batería [73], siendo mostrado en las Figs. 4.24 y 4.23.

CAPÍTULO 4. MONTAJE EXPERIMENTAL

Capítulo 5

Conclusiones y consideraciones finales

En este trabajo hemos analizado el comportamiento de una nanored de CD cuando se conectan a la misma EAE's. El efecto de estos es la emisión de armónicos en la nanored que puede alterar su comportamiento. Estos electrodomésticos presentan, como cargas resistivas, un comportamiento no lineal. Este comportamiento es descrito mediante un modelo propuesto en esta tesis. En base a este modelo se lleva a cabo un estudio de la nanored cuando operan de manera simultanea dos o mas electrodomésticos.

Los EAE's diseñados para CD, se limitan a bajos niveles de voltaje así como a satisfacer reducidas necesidades, como lo es iluminación, refrigeración de alimentos. En el desarrollo de esta investigación, se logró identificar diversos electrodomésticos de alta eficiencia diseñados inicialmente para operar dentro de los sistemas de CA que fueron incorporados a la NDCCD sin realizar alguna modificación. Un caso mostrado de ello fue la incorporación de lámparas fluorescentes y LED en la NDCCD.

Nuestros datos experimentales obtenidos de las lámparas demuestran un gran comportamiento no lineal dentro de la NDCCD que se manifiesta en forma de emisión de armónicos. Sin embargo, la amplitud de los armónicos emitidos resultan relativamente pequeños con respecto a su comportamiento en el sistema de CA. Muestra de ello es que el THD correspondiente a la corriente de la CFL operando en CA fue del 107.74%, mientras que operando dentro de la NDCCD generó un 14.10% donde la mayor distorsión se presenta a la de frecuencia de 49.6 KHz. Para el caso de la lámpara LED, se obtuvo para la corriente operando dentro de la NDCCD un THD del 44.40% de la cual se asocia una frecuencia de conmutación

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

de 68.2 KHz. La disminución de dicha distorsión es posible realizarse con la implementación de filtros de interferencias electromagnéticas. Las frecuencias que se miden para cada uno de los parámetros de las lámparas de iluminación, corresponden a la frecuencia de las fuentes conmutadas incorporadas dentro de las mismas. Es de importancia la realización de un estudio relativo a los efectos sobre diversos sectores que conforman la NDCD debido a la emisión de armónicos por parte de las cargas no lineales, por ejemplo, el banco de baterías.

Por otra parte, la incursión de las fuentes de energía renovable dentro de los sistemas eléctricos ha generado la creación de sistemas distribuidos. Con ello se privilegia la generación y consumo de energía in situ, eliminando la necesidad de transmitir a largas distancias. Sin embargo, no han tenido gran impacto para el usuario residencial, mucho menos fomenta su participación activa para la toma de decisiones en el tema energético, reduciéndolo a un elemento pasivo. Esta NDCD se define como un sistema energético en el cual es conformado por su propio sector de generación, almacenaje y consumo de energía. Con el desarrollo en el sector de electro movilidad, se ha trabajado para la reducción en los costos económicos, tamaño y peso así como incrementar la capacidad en las baterías o sistemas de almacenamiento de energía. Con la incorporación de elementos de almacenamiento de energía dentro de sistemas de generación de energía por medio de fuentes renovables, destinadas para uso residencial y/o comercial, se ha creado nanoredes eléctricas, que son la unidad básica para la creación de los sistemas realmente distribuidos y ofrecen un mejor desempeño para el almacenamiento de energía. Esta propuesta tecnológica brinda la oportunidad al usuario residencial y/o comercial de una mayor participación, así como la reducción o eliminación de la dependencia de combustibles fósiles, debido que dicha topología representa una opción para alcanzar el acceso universal a la energía eléctrica.

Con el modelo matemático obtenido en la presente tesis, fue posible reproducir el comportamiento no lineal de los dispositivos de iluminación mediante el uso de parámetros sencillos. Se espera que dicho modelo sea una herramienta de apoyo para el análisis energético para diversas topologías de NDCD. El estudio que se llevó a cabo, resulta de utilidad en el desarrollo de las llamadas casas inteligentes. En efecto, en el diseño de estas casas es necesario el monitoreo de los consumos energéticos de los dispositivos en el hogar para controlar y regular los parámetros que nos permitan un mejor desempeño de la NDCD.

Bibliografía

- [1] Blanca Iris Romero Rodríguez. El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas*, pages 91 – 97, 2003.
- [2] E. Rodriguez-Diaz, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero. Potential energy savings by using direct current for residential applications: A danish household study case. In *2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, pages 547–552, June 2017.
- [3] A. Goikoetxea, J. M. Canales, R. Sanchez, and P. Zumeta. Dc versus ac in residential buildings: Efficiency comparison. In *Eurocon 2013*, pages 1–5, July 2013.
- [4] Samuel A. Martinez Montejó and Claudia Sheinbaum Pardo. The impact of energy efficiency standards on residential electricity consumption in mexico. *Energy for Sustainable Development*, 2016.
- [5] H. H. Sathler, L. H. Sathler, F. L. F. Marcelino, T. R. de Oliveira, S. I. Seleme, and P. F. D. Garcia. A comparative efficiency study on bidirectional grid interface converters applied to low power dc nanogrids. In *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pages 1–6, Nov 2017.
- [6] David Elvira-Ortiz, Daniel Morinigo-Sotelo, Oscar Duque-Perez, Roque Osornio-Rios, and Rene Romero-Troncoso. Study of the harmonic and interharmonic content in electrical signals from photovoltaic generation and their relationship with environmental factors. *J. Renewable Sustainable Energy*, 2019.
- [7] Aiping Yu, Victor Chabot, and JiuJun Zhang. *Electrochemical supercapacitors for energy storage and delivery. Fundamentals and applications*. CRC Press, 2013. ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE AND CONVERSION.
- [8] V S Arutyunov and G V Lisichkin. Energy resources of the 21st century: problems and forecasts. can renewable energy sources replace fossil fuels? *Russian Chemical Reviews*, 86(8):777–804, aug 2017.
- [9] Vladimir S. Bagotsky, Alexander M. Skundin, and Yuriy M. Volfkovich. *Electrochemical power sources. Batteries, Fuel Cells and Supercapacitors*. Wiley, 2015.
- [10] K. Tomas-Manez, Z. Zhang, and Z. Ouyang. Unregulated series resonant converter for interlinking dc nanogrids. In *2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, pages 647–654, Dec 2017.
- [11] A. Khan, M. A. Alkali, S. Parasuraman, I. Elamvazuthi, M. Amudha, and N. Debnath. Harmonics analysis in a dc-dc converter based line frequency inverter for domestic lighting loads. pages 1–6, Sep. 2016.
- [12] Muhammad H. Rashid. *Electrónica de Potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Prentice Hall Hispanoamericana, segunda edición edition, 1995.
- [13] M. A. Mora Barajas and P. Bañuelos Sánchez. Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XI(2):189 – 198, 2010. FI - UNAM.
- [14] Ned Mohan, Tore M Undeland, and William P Robbins. *Electronica de Potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño*. McGraw Hill, 2009.
- [15] Raymond A. Jr Mack. *Demystifying Switching Power Supplies*. Elsevier, 2005.
- [16] Ronald Y Barazarte. La batalla de las corrientes: Edison, tesla y el nacimiento del sistema de potencia. *Prisma Tecnológico*, 4(1):51–53, 2013.
- [17] Gene Adair. *Thomas Alva Edison. Inventing the Electric Age*. Oxford University Press, 1996.

BIBLIOGRAFÍA

- [18] G. AlLee and W. Tschudi. Edison redux: 380 vdc brings reliability and efficiency to sustainable data centers. *IEEE Power and Energy Magazine*, 10(6):50–59, Nov 2012.
- [19] Islam Mumtaz, Faisal; Safak Bayram. Planning, operation and protection of microgrids: An overview. pages 94–100. ICEER, 2016.
- [20] Chitaranjan; Phurailatpam et al. Planning and optimization of autonomous dc microgrids for rural and urban applications in india. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.
- [21] David Wenzhong Gao. *Energy Storage for sustainable microgrid*. Elsevier, 2015.
- [22] Ninoslav; Holjevac et al. Defining key parameters of economics and environmentally efficient residential microgrid operation. *Energy Procedia*, 105:999–1008, Mayo 2017.
- [23] Landy Sánchez Peña. Hogares y consumo energético en México. *Revista Digital Universitaria*, 13(10), Octubre 2012.
- [24] Kevin Martín, María R Rogina, Aitor Vázquez, Diego G.Lamar, Airán Francés, Rafael Asensi, Javier Sebastian, and Javier Uceda. Distribución con nano-redes de corriente continua en el hogar. Julio 2016. [http : //digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/42645/1/SAAEI_Nanoredes_Definitivo.pdf](http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/42645/1/SAAEI_Nanoredes_Definitivo.pdf), Accedido 20-12-2017.
- [25] Sonia Moussa, Manel Jebali-Ben Ghorbal, and Slama-Belkhodja Ilhem. Dc voltage level choice in residential remote area. *The 9th International Renewable Energy Congress*, 2018.
- [26] Antonio Moreno Mu noz, Aurora Gil de Castro, Sarah Ronnberg, Math Bollen, and Enrique Romero Cavadal. Supraharmonics (2 to 150 khz) and multi-level converters. *IEEE*, 2015. 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives.
- [27] J. A. Suarez, G. di Mauro, D. Anaut, and C. Agüero. Analysis of the harmonic distortion and the effects of attenuation and diversity in residential areas. *IEEE Latin America Transactions*, 3(5):53–59, Dec 2005.
- [28] Francisco C. de la Rosa. *Harmonics, power systems and smart grids*. Taylor & Francis Group, second edition, 2015.
- [29] Architectural Energy Corporation. Maintenance and operation of stand-alone photovoltaic systems. Technical report, CENTER, PHOTOVOLTAIC DESIGN ASSISTANCE, 1991.
- [30] Gerencia de Energías No Convencionales. Guía de usuario. sistemas fotovoltaicos interconectados con la red aplicaciones de pequeña escala. Technical report, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, 2010.
- [31] Hasan Erteza Gelani, Mashood Nasir, Faizan Dastgeer, and Haseeb Hussain. Efficiency comparison of alternating current (ac) and direct current (dc) distribution system at residential level with load characterization and daily load variation. *Pakistan Academy of Sciences*, 54(2):111–118, 2017.
- [32] E. Rodriguez-Diaz, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero. Intelligent dc homes in future sustainable energy systems: When efficiency and intelligence work together. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 5(1):74–80, Jan 2016.
- [33] Anuradh Deshpande, Chirag Motiyani, and Akash Sahu. Simulation and realization of dc nano grid. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 6, 2017. ISSN 2319 - 4847.
- [34] Ahmad H Sabry, Abidaoun H Shallal, Hayder Salim Hameed, and Pin Jern Ker. Compatibility of household appliances with dc microgrid for pv systems. *Heliyon*, 6(12):e05699, 2020.
- [35] Miguel Angel Cordova-Fajardo and Eduardo S. Tututi. Criterios técnicos de selección para la incorporación de electrodomésticos en una nanored de cd. *Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación, Michoacán*, 2018. XIII Congreso Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación.
- [36] Miguel Angel Cordova-Fajardo and Eduardo S. Tututi. Incorporating home appliances into a DC home nanogrid. *Journal of Physics: Conference Series*, 1221:012048, jun 2019.
- [37] Q. Zhong and T. Hornik. *Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration*. IEEE, 2012.
- [38] M.L. Garik and C.C. Whipple. *Maquinas de corriente alterna*. McGraw-Hill Interamericana, 1981.

- [39] Adrian Mihai Iuoras, Norbert Csaba Szekely, Liviu Danut Vitan, Mircea Bojan, and Petre Dorrel Teodosescu. Ac home appliances retrofitting for dc microgrids. In *2020 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, pages 1–6. IEEE, 2020.
- [40] Chen Jiang, Diogo Salles, Wilsun Xu, and Walimir Freitas. Assessing the collective harmonic impact of modern residential loads-part ii: Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(4):1947–1955, 2012.
- [41] Diogo Salles, Chen Jiang, Wilsun Xu, Walimir Freitas, and Hooman Erfanian Mazin. Assessing the collective harmonic impact of modern residential loads-part i: Methodology. *IEEE transactions on power delivery*, 27(4):1937–1946, 2012.
- [42] Alexandre B Nassif, Jing Yong, Wilsun Xu, and CY Chung. Indices for comparative assessment of the harmonic effect of different home appliances. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 23(5):638–654, 2013.
- [43] Gheorghe Georgescu and BC Neagu. The pollution with harmonics in public electric energy repartition and distribution system. In *Proc. of ISEEEC*, pages 251–256, 2009.
- [44] Ieee recommended practice for monitoring electric power quality. *IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009)*, pages 1–98, 2019.
- [45] William H. Jr. Hayt, Jack E. Kemmerly, and Steven M. Durbin. *Análisis de circuitos en Ingeniería*. McGrawHill, octava edition, 2012.
- [46] Airan Francés, Rafael Asensi, Oscar García, Roberto Prieto, and Javier Uceda. A black-box modeling approach for dc nanogrids. In *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pages 1624–1631. IEEE, 2016.
- [47] G Arunkumar, D Elangovan, P Sanjeevikumar, Jens Bo Holm Nielsen, Zbigniew Leonowicz, and Peter K Joseph. Dc grid for domestic electrification. *Energies*, 12(11):2157, 2019.
- [48] Miguel Cordova-Fajardo and Eduardo S Tututi. A mathematical model for home appliances in a dc home nanogrid. *Energies*, 16(7):2957, 2023.
- [49] M. Nasir, Z. Jin, H. A. Khan, N. A. Zaffar, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero. A decentralized control architecture applied to dc nanogrid clusters for rural electrification in developing regions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(2):1773–1785, 2019.
- [50] M. Mosayebi, S. M. Sadeghzadeh, J. M. Guerrero, and M. H. Khooban. Stabilization of dc nanogrids based on non-integer general type-ii fuzzy system. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67(12):3108–3112, 2020.
- [51] Vadim Chekh, D Lyapunov, and Alexandra Pravikova. Mathematical model of power supply system for remotely operated underwater vehicle with dc power transmission line and load voltage feedback. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 1019, page 012028. IOP Publishing, 2021.
- [52] Yerasimos Yerasimou, Marios Kynigos, Venizelos Efthymiou, and George E Georghiou. Design of a smart nanogrid for increasing energy efficiency of buildings. *Energies*, 14(12):3683, 2021.
- [53] Dinesh Kumar, Firuz Zare, and Arindam Ghosh. Dc microgrid technology: system architectures, ac grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications, and standardizations aspects. *Ieee Access*, 5:12230–12256, 2017.
- [54] T Castillo-Calzadilla, MA Cuesta, C Olivares-Rodriguez, AM Macarulla, J Legarda, and CE Borges. Is it feasible a massive deployment of low voltage direct current microgrids renewable-based? a technical and social sight. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161:112198, 2022.
- [55] VIAKON. *Manual del Electricista*. VIAKON CONDUCTORES MONTERREY, 2013.
- [56] Manjushree Banerjee, Rakesh Prasad, Ibrahim H Rehman, and Bigsna Gill. Induction stoves as an option for clean cooking in rural india. *Energy Policy*, pages 156–167, 07 2016.
- [57] Miguel Ángel CORDOVA-FAJARDO and Eduardo S TUTUTI. Ac home appliances in a dc home nanogrid. *Journal Electrical Engineering*, pages 5–14, 2021.
- [58] Óscar Lucía, Igor Cvetkovic, Héctor Sarnago, Dushan Boroyevich, Paolo Mattavelli, and Fred C Lee. Design of home appliances for a dc-based nanogrid system: An induction range study case. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1(4):315–326, 2013.

BIBLIOGRAFÍA

- [59] Miguel Angel Cordova-Fajardo and Eduardo S. Tututi. Harmonics emission into a dc home nanogrid for incorporating of induction stove and blender for preparation and cooking of food. *unpublished*.
- [60] A Sivakumar and T Muthamizhan. Harmonic reduction in single boost converter fed dc motor with emi input filter. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 9(2):914, 2018.
- [61] M. A. Cordova-Fajardo and E. S. Tututi. How the fluorescent and led lamps affect the dc home nanogrids. In *2020 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, pages 1–5, 2020.
- [62] Budi Sudiarto, Aji Nur Widyanto, and Holger Hirsch. Current distortion characteristics of some home appliances in distorted voltage environment for frequency range of 2-150 khz. *Renew Energy Power Qual J*, pages 344–348, 2014.
- [63] Hongtao Li, Yifan Song, Mingxing Zhu, and Yadong Jiao. Experimental interharmonic sensitivity evaluation of led lamps based on the luminous flux flicker model. *Energies*, 15(9):2990, 2022.
- [64] Fajar Abdul Karim, Mohamad Ramdhani, and Ekki Kurniawan. Low pass filter installation for reducing harmonic current emissions from led lamps based on emc standard. In *2016 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC)*, pages 132–135. IEEE, 2016.
- [65] Victor George, Aayush Bagaria, Prakash Singh, Sankalp Rajeev Pampattiwar, and Swati Perwal. Comparison of cfl and led lamp-harmonic disturbances, economics (cost and power quality) and maximum possible loading in a power system. In *2011 International Conference & Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues and Prospects for Asia (ICUE)*, pages 1–5. IEEE, 2011.
- [66] J. C. Das. Ieee press series on power engineering. In *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*. IEEE, 2015.
- [67] Salvatore Di Mauro, Salvatore Musumeci, Angelo Raciti, and Gaetano Vasta. Analysis of the current harmonics injected into the power grid by dimmable led lamps. In *2016 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- [68] Piotr Oramus, D Smugala, and P Zydrón. Modeling of specific harmonics source in emtp/atp—case study of compact fluorescent lamp. *Przeglad Elektrotechniczny*, 89(8):320–324, 2013.
- [69] Muhammad Usman, Farhad Shahnia, GM Shafiullah, Ali Arefi, and Daming Zhang. Technical and non-technical juxtaposition of domestic lighting bulbs of the australian market. In *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- [70] Natthanon Phannil, Chaiyan Jettanasen, and Atthapol Ngaopitakkul. Harmonics and reduction of energy consumption in lighting systems by using led lamps. *Energies*, 11(11):3169, 2018.
- [71] Aman Jha and Manoj Kumar. Smart led driver with improved power quality and high efficiency for household application. In *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, pages 248–253. IEEE, 2018.
- [72] Jianquan Liao, Niancheng Zhou, and Qianggang Wang. Design of low-ripple and fast-response dc filters in dc distribution networks. *Energies*, 11(11):3128, 2018.
- [73] Jiucan Zhang, Song Ci, Hamid Sharif, and Mahmoud Alahmad. Modeling discharge behavior of multicell battery. *IEEE transactions on energy conversion*, 25(4):1133–1141, 2010.
- [74] M. N. Bhukya, V. R. Kota, and S. R. Depuru. A simple, efficient, and novel standalone photovoltaic inverter configuration with reduced harmonic distortion. *IEEE Access*, 7:43831–43845, 2019.
- [75] M. Amin, Y. Arafat, S. Lundberg, and S. Mangold. Low voltage dc distribution system compared with 230 v ac. In *2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference*, pages 340–345, Oct 2011.
- [76] Tiffany J. Hager and Ruben Morawicki. Energy consumption during cooking in the residential sector of developed nations: A review. *Food Policy*, 40:54–63, 2013. DOI:10.1016/j.foodpol.2013.02.003.

BIBLIOGRAFÍA

- [77] Esteban Carnevale, E; Perez. Life cycle assessment of solar energy systems: Comparison of photovoltaic and water thermal heater at domestic scale. *Energy*, 2014.
- [78] D. Xu, Q. Liu, W. Yan, and W. Yang. Adaptive terminal sliding mode control for hybrid energy storage systems of fuel cell, battery and supercapacitor. *IEEE Access*, 7:29295–29303, 2019.
- [79] Aminy E Ostfeld and Ana Claudia Arias. Flexible photovoltaic power systems: integration opportunities, challenges and advances. *Flexible and Printed Electronics*, 2(1):013001, mar 2017.
- [80] Ruwan P.S. Chandrasena, Farhad Shahnia, Arindam Ghosh, and Sumedha Rajakaruna. Operation and control of a hybrid ac-dc nanogrid for future community houses. *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2014.
- [81] Mohammad Hamid Shwehdi and Sumsudeen Rajamohamed. Proposed smart dc nano-grid for green buildings - a reflective view. *3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, 2014. Milwaukee, USA.
- [82] Farhad Shahnia. Hybrid nanogrid systems for future small communities. *Sustainable Development in energy systems*, XIV, 2017. DOI 10.1007/978-3-319-54808-1_2.
- [83] Rajesh M Pindoriya, Naran M Pindoriya, and S Rajendran. Simulation of dc/dc converter for dc nano-grid integrated with solar pv generation. In *2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA)*, pages 1–6. IEEE, 2015.
- [84] Nicolas Patin. *Power Electronics Applied to Industrial Systems and Transports: Volume 5: Measurement Circuits, Safeguards and Energy Storage*. Elsevier, 2016.
- [85] Daniel Villanueva, Moisés Cordeiro, Andrés Feijóo, Edelmiro Míguez, and Antonio Fernández. Effects of adding batteries in household installations: Savings, efficiency and emissions. *Applied Sciences*, 10(17):5891, 2020.
- [86] Nina Munzke, Bernhard Schwarz, Felix Büchle, and Marc Hiller. Evaluation of the efficiency and resulting electrical and economic losses of photovoltaic home storage systems. *Journal of Energy Storage*, 33:101724.
- [87] Peng Fang, Brian White, Christopher Fiorentino, and Yan-Fei Liu. Zero ripple single stage ac-dc led driver with unity power factor. In *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pages 3452–3458. IEEE, 2013.
- [88] Adrienne M Ohler, David G Loomis, and Kadi Ilves. A study of electricity savings from energy star appliances using household survey data. *Energy Policy*, 144:111607, 2020.
- [89] Jonathan P Ore and Eckhard A Groll. Analysis of a residential house for the design and implementation of a dc nanogrid. In *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, pages 749–753. IEEE, 2020.