



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE APLICACIÓN
DE LOS SUPERCAPACITORES COMO FUENTES NECESARIAS PARA GENERAR
ENERGÍA ALTERNATIVA**

Juan José Lopez Silva

Asesorado por el MA. Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz

Guatemala, julio de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE APLICACIÓN
DE LOS SUPERCAPACITORES COMO FUENTES NECESARIAS PARA GENERAR
ENERGÍA ALTERNATIVA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN JOSÉ LOPEZ SILVA

ASESORADO POR EL MA. ING. KENNETH ISSUR ESTRADA RUIZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, JULIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Helmunt Federico Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Sergio Leonel Gómez Bravo
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Tiul Valenzuela
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE APLICACIÓN DE LOS SUPERCAPACITORES COMO FUENTES NECESARIAS PARA GENERAR ENERGÍA ALTERNATIVA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 26 de abril de 2022.

Juan José Lopez Silva



EEPFI-PP-0634-2022
Guatemala, 26 de abril de 2022

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera

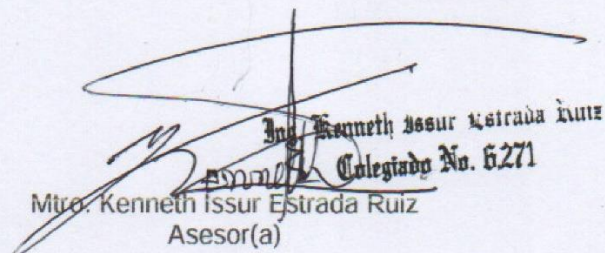
Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE APLICACIÓN DE LOS SUPERCAPACITORES COMO FUENTES NECESARIAS PARA GENERAR ENERGÍA ALTERNATIVA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión y uso eficiente de la energía - Aspectos técnicos, económicos y ambientales en el uso y aprovechamiento de recursos energéticos**, presentado por el estudiante **Juan José Lopez Silva** carné número **201318571**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Energía Y Ambiente.

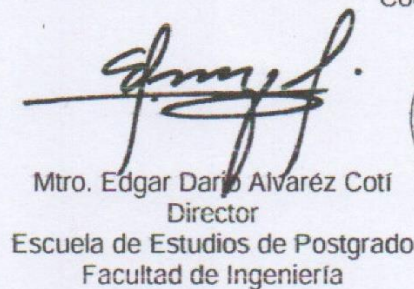
Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Mtro. Kenneth Issur Estrada Ruiz
Asesor(a)
Colegiado No. 6271


Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría


Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-0634-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE APLICACIÓN DE LOS SUPERCAPACITORES COMO FUENTES NECESARIAS PARA GENERAR ENERGÍA ALTERNATIVA**, presentado por el estudiante universitario **Juan José Lopez Silva**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink is written over a circular official stamp. The stamp contains the text: "UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA", "DIRECCIÓN ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA", and "FACULTAD DE INGENIERIA".

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, abril de 2022

LNG.DECANATO.OI.547.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE APLICACIÓN DE LOS SUPERCAPACITORES COMO FUENTES NECESARIAS PARA GENERAR ENERGÍA ALTERNATIVA**, presentado por: **Juan José Lopez Silva**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, julio de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por la vida, sus dones y talentos.
Mis padres	Jorge Alfredo López y Mayra Guadalupe Silva, por su amor y su entrega, mi eterno agradecimiento.
Mis hermanos	Jorge Luis y Laura Sofia López, por su apoyo y compañía.
Mis abuelos	Emilio López, Marta Rebeca Cuevas, Eulalio Silva y Delfina Reynoso quienes descansan en paz, por su ejemplo e inspiración.
Mi familia	A mis tíos y primos por estar en los buenos y malos momentos, con todo mi cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrirme las puertas de la educación superior y guiarme sobre el desarrollo científico, social, humanista y ambiental.
Facultad de Ingeniería	Por nutrirme e impregnarme en el deseo del saber científico.
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica	Al claustro de maestros y auxiliares, por su excelente labor docente.
Mi asesor y revisor	MA. Ing. Kenneth Issur Estrada y MA. Ing. César Ariel Villela Rodas, por aportar sus conocimientos y ser una guía en la elaboración del presente trabajo de graduación.
Mis amigos	Werner Iván Ovalle, Oswaldo Giovani Cáceres y demás compañeros por su apoyo incondicional.
Pueblo de Guatemala	Por creer en una educación superior estatal y autónoma.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
3.1 Descripción del problema	9
3.2 Formulación del problema	10
3.3 Delimitación del problema	11
4. JUSTIFICACIÓN	13
5. OBJETIVOS	15
5.1 General.....	15
5.2 Específicos	15
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	17
7. MARCO TEÓRICO.....	19
7.1 Capacitor	19
7.1.1 Capacitancia.....	20

7.1.2	Almacenamiento de energía.....	22
7.1.3	Dieléctricos.....	24
7.1.4	Capacitancia en serie y en paralelo	26
7.1.5	Supercapacitores	28
7.2	Energía.....	30
7.2.1	Calidad de energía	31
7.3	Electrónica de potencia	33
7.4	Energía renovable	34
7.4.1	Energía solar	36
7.5	Sistemas fotovoltaicos.....	37
7.5.1	Componentes de un subsistema fotovoltaico	40
7.5.2	Topologías de subsistemas de almacenamiento en instalaciones fotovoltaicas.....	40
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	43
9.	METODOLOGÍA	47
9.1	Características del estudio	47
9.2	Unidades de análisis	47
9.3	Variables	48
9.4	Fases del estudio	50
9.4.1	Fase 1: Revisión bibliográfica.....	50
9.4.2	Fase 2: Lectura y registro de la información.....	51
9.4.3	Fase 3: Elaboración de un texto escrito	51
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	53
11.	CRONOGRAMA	55

12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	57
13.	REFERENCIAS.....	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Datos reportados en función de los años para la palabra supercapacitor	6
2.	Capacitor de placas paralelas interconectado a un elemento de circuito eléctrico	19
3.	Capacitores comerciales con valores de capacitancia y materiales de construcción distintos.....	21
4.	Fase de carga y descarga en un circuito resistivo-capacitivo.....	24
5.	Laminas dieléctricas separando laminas conductoras	25
6.	Constantes dieléctricas para distintos materiales a 20°C	26
7.	Red de circuito de n capacitores conectados en paralelo y su equivalente de circuito	27
8.	Red de circuito para n capacitores conectados en serie y su circuito equivalente.....	28
9.	Supercapacitores comerciales	28
10.	Tipos de supercapacitores	29
11.	Comparativa del capacitor convencional y un supercapacitor	30
12.	Aprovechamiento renovable.....	36
13.	Esquema de una instalación fotovoltaica autónoma básica	38
14.	Celda solar de unión p-n	39
15.	Elementos de almacenamiento dispuestos en serie paralelo.....	41
16.	Cronograma	55

TABLAS

I.	Operacionalización de la variable capacitor.....	48
II.	Operacionalización de la variable energía	49
III.	Instrumento de medición.....	50
IV.	Flujo para la elaboración del texto escrito.....	52
V.	Totalidad de las fases de la investigación.....	52
VI.	Recursos necesarios para la investigación.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios o amperes
C	Capacitancia
Q	Carga eléctrica
cm²	Centímetros cuadrados
K	Constante dieléctrica
cd	Corriente directa
C	Culombio o coulomb
V	Diferencia de potencial, voltaje, voltios o volts
F	Faradio o farad
° C	Grados Celsius
Hz	Hercio o Hertz
J	Joules
kg	Kilogramo
m²	Metro cuadrado
%	Porcentaje
R	Resistencia
S	Segundos
TWh	Tera watt-hora
W	Watt
Wh	Watt-hora

GLOSARIO

Atmósfera	Capa gaseosa que envuelve un astro; especialmente, la que rodea la Tierra.
Átomo	Bloques que constituyen la materia ordinaria, cuya estructura se describe en términos de tres partículas: electrón, protón y neutrón.
Carga	Propiedad eléctrica de las partículas atómicas de las que se compone la materia, medida en coulomb.
Circuito eléctrico	Interconexión de elementos eléctricos.
Conductor eléctrico	Material que facilita el desplazamiento de las cargas eléctricas a través de él.
Corriente alterna	Corriente que varía de forma sinusoidal con el tiempo.
Corriente directa	Corriente que permanece constante en el tiempo.
Efecto Joule	Fenómeno irreversible por el cual, si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los constantes choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura de este.

Electrodo	Cota más baja de un complejo hidroeléctrico, punto en donde se regresa el agua al cauce del río. Extremo de un conductor en contacto con un medio, al que lleva o del que recibe una corriente eléctrica
Electrón	Acumulación de agua debido a una presa. Partícula que se encuentra alrededor del núcleo del átomo y que tiene carga eléctrica negativa.
Electrones de valencia	Electrones que se encuentran en la capa más externa y con mayor nivel de energía dentro de la estructura atómica.
Energía potencial	Es la energía que tiene una carga eléctrica debido a su posición en relación con otra u otras cargas eléctricas.
Enlace covalente	Enlace de átomos reforzado por compartir electrones.
Forma de onda	Es la forma de su gráfico en función del tiempo, independientemente de sus escalas de tiempo y magnitud y de cualquier desplazamiento en el tiempo.
Frecuencia	Es el número de ciclos en la unidad de tiempo, y siempre es positiva.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

Inductor	Bobina de alambre conductor que presenta oposición al cambio de la corriente que fluye por él.
Material extrínseco	Un material semiconductor que ha sido sometido al proceso de dopado.
Material intrínseco	Cualquier material semiconductor que haya sido cuidadosamente refinado para reducir el número de impurezas a un nivel muy bajo.
Modo corte	Dispositivo que abre, cierra y direcciona el flujo de agua hacia los cangilones. Modo de operación en donde las uniones base-emisor y colector-base de un transistor se polarizan en inversa.
Modo saturación	Metal Active Gas, soldadura de electrodo continuo que usa un gas activo en su proceso. Modo de operación en donde las uniones base-emisor y colector-base de un transistor se polarizan en directa.
Nodo	Es el punto de conexión entre dos o más elementos, como una fuente de tensión o un resistor.
Onda electromagnética	Consiste en campos eléctricos y magnéticos que se modifican con el tiempo, capaz de propagarse a través del espacio de una región a otra transportando tanto energía como momento lineal.
Potencial	Es la energía potencial eléctrica por unidad de carga.

Red eléctrica	Es una red interconectada que tiene el propósito de suministrar electricidad.
Resistencia	Capacidad para resistirse al flujo de la corriente eléctrica, medida en ohm.
Semiconductores	Clase especial de elementos cuya conductividad se encuentra entre la de un buen conductor y la de un aislante.
SI	Sistema Internacional de Unidades.
Trabajo	Fuerza sobre una partícula mientras esta experimenta un desplazamiento.
Valor nominal	Valor teórico o ideal.

RESUMEN

Los supercapacitores son dispositivos de conversión y almacenamiento de energía electroquímica. Su uso como una fuente de energía, presenta un sinnúmero de desafíos; ya que en aplicaciones modernas se busca generar energía de manera respetuosa, eficiente y sostenible con el medio ambiente.

Los supercapacitores están atrayendo un interés de investigación considerable como dispositivos de almacenamiento de energía de alto rendimiento; y se espera que se conviertan en dispositivos más competitivos frente a otras opciones existentes en el mercado para el almacenamiento de energía en diversas aplicaciones.

El presente diseño de investigación busca trazar un camino para identificar los aspectos técnicos, económicos y ambientales del uso de los supercapacitores en aplicaciones de energía.

Mediante el planteamiento de objetivos, un diseño y una metodología para el desarrollo y organización de una investigación de tipo documental; que permita incidir en la mejora del almacenamiento de energía solar, en la mejora de la calidad de la energía y como una fuente de energía de respaldo en un entorno industrial.

Formando un interés en conocer los avances o realizar los cambios pertinentes de tecnología en el almacenamiento y conversión de energía; y como nuevas tecnologías impactan de forma positiva en el aprovechamiento de la energía y la sostenibilidad con el medio ambiente.

1. INTRODUCCIÓN

Al generar energía de manera respetuosa, eficiente y sostenible con el medio ambiente se presentan un sinnúmero de desafíos, y estos desafíos propician grandes esfuerzos de investigación a nivel mundial.

Mediante una investigación documental, el presente trabajo, propone la construcción de conocimientos entorno a las aplicaciones que tienen los supercapacitores como dispositivos tecnológicos y su uso como fuentes de energía alternativa.

En este aspecto, en Guatemala, se percibe poco interés en conocer los avances o realizar los cambios pertinentes de tecnología en el almacenamiento y conversión de energía.

Por consiguiente, el país podría estar frenado en: no reducir el desperdicio de energía; no mejorar la eficiencia energética a través de actualizaciones tecnológicas, o bien no mejorar la operación y reducir el mantenimiento de los sistemas para generar y almacenar energía, entre otras.

Los resultados obtenidos serán de utilidad para estudiantes y profesionales de la ingeniería, que, al identificar las distintas áreas de aplicación de los supercapacitores, podrán desarrollar e implementar alguna de estas en sus áreas de ejercicio profesional o bien propiciar nuevas investigaciones relacionadas a distintas áreas de uso de estos dispositivos.

Aportando a empresas, industrias y hogares de Guatemala que deseen mejoras en sus sistemas de calidad de energía, de electrónica de potencia o bien en el almacenamiento de energía renovable de forma respectiva.

Se propone resolver el problema planteado, mediante una revisión bibliográfica que pasará por tres grandes fases: la investigación documental; una lectura y registro de la información; finalizando con la elaboración de un texto escrito, el cual tendrá como propósito, presentar una síntesis de las lecturas realizadas, seguido de conclusiones y una discusión sobre las áreas de aplicación de los supercapacitores como fuentes necesarias para generar energía alternativa.

Respecto a la factibilidad de su realización, se cuenta con el recurso humano, financiero, tecnológico, de acceso a información e infraestructura con una inversión cuantificada de Q 6,594.00.

Ya que los supercapacitores representan una nueva generación de tecnología. Y que, en el almacenamiento y conversión de energía electroquímica, los supercapacitores se consideran los dispositivos complementarios más factibles.

El presente trabajo sigue una la línea investigativa en función de los aspectos técnicos, económicos y ambientales en el uso y aprovechamiento de recursos energéticos, mostrando un panorama para Guatemala, de cómo nuevas tecnologías impactan de forma positiva en el aprovechamiento de la energía y la sostenibilidad con el medio ambiente.

Para finalizar, se describe el contenido de los capítulos del índice propuesto para el informe final:

El primer capítulo lleva como nombre Marco referencial, en el cual se dará a conocer los estudios previos y antecedentes en función del uso de los supercapacitores en aplicaciones de energía.

En el segundo capítulo nombrado Marco teórico, desarrollará la fundamentación teórica y práctica de la temática que sustenta la propuesta de solución en donde se tocan temas como Capacitor, Energía, Electrónica de potencia y Energía renovable.

El tercer capítulo lleva como nombre Desarrollo de la investigación, en donde se describirá las características del estudio, la información recabada de las variables y las nueve fases contempladas para el desarrollo de la investigación en su totalidad, las cuales afectan de manera directa a los objetivos específicos de investigación.

Finalmente, el cuarto capítulo nombrado Presentación y discusión de resultados, describirá por medio de tres subcapítulos: el almacenamiento de energía renovable mediante el uso de supercapacitores, el uso de los supercapacitores para la mejora de la calidad de la energía y el uso de los supercapacitores como una fuente de energía de respaldo en un entorno industrial; en función de los aspectos técnicos, económicos y ambientales que cada uno de estos contempla; para finalizar con un análisis y una discusión de resultados para cada subcapítulo.

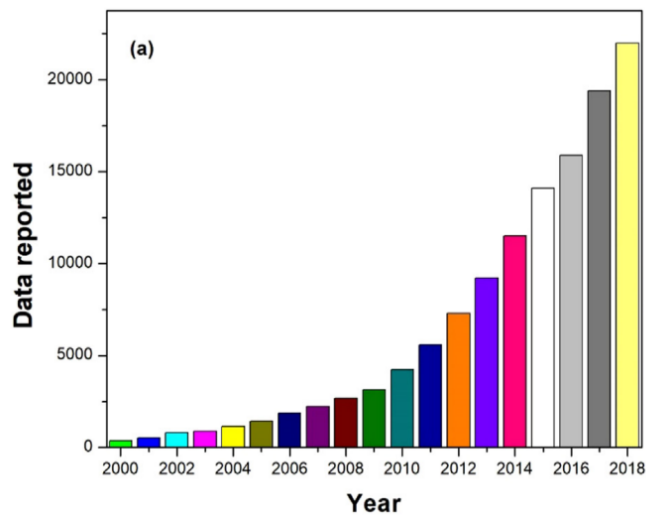
2. ANTECEDENTES

Las fuentes de energía alternativa presentan un sinnúmero de desafíos. Generar energía de manera respetuosa, eficiente y sostenible con el medio ambiente propicia grandes esfuerzos de investigación. Dentro de estos esfuerzos surgen los dispositivos de conversión y almacenamiento de energía electroquímica, como lo son los supercapacitores. A continuación, se mencionan algunos trabajos de investigación que destacan a los supercapacitores como las fuentes necesarias para generar energía alternativa:

Para iniciar, en la obra *Electrochemical supercapacitors for energy storage and delivery* se da a conocer qué; la eficiencia energética es siempre una preocupación primordial en la generación de energía renovable, y los supercapacitores demuestran una mayor eficiencia de carga en comparación a otras tecnologías como las baterías. (Yu et al., 2012)

Adicionalmente, en un artículo científico de la revista *Nano Energy* los autores Raza et al. (2018) señalan que los supercapacitores están atrayendo un interés de investigación considerable como dispositivos de almacenamiento de energía de alto rendimiento; que se están realizando esfuerzos de investigación importantes para hacer de los supercapacitores, dispositivos más competitivos frente a otras opciones existentes en el mercado para el almacenamiento de energía, como las baterías. Además, ilustran el número de publicaciones en Google Académico del año 2000 hasta el año 2018 con la palabra clave “supercapacitor”; siendo evidente el aumento de los datos reportados de documentos, libros, patentes e informes auténticos en función del tiempo, los cuales se ilustrándose a continuación:

Figura 1. Datos reportados en función de los años para la palabra supercapacitor



Fuente: Raza et al. (2018). *Recent advancements in supercapacitor technology*.

Podría pensarse, entonces que los supercapacitores son ventajosos en muchas otras aplicaciones, y como ejemplos de estas se pueden mencionar: mejoras en la calidad de la energía, fuentes de energía portátiles, almacenamiento de energías renovables, mejora en la vida útil de las baterías, vehículos eléctricos híbridos, aplicaciones militares y aeroespaciales entre otras.

Además, en un artículo titulado Supercapacitores como aporte al desarrollo energético eléctrico, análisis comparativo mediante herramientas computacionales de simulación aplicadas publicado en la revista *Espacios* los autores Méndez et al. (2020) mencionan que los supercapacitores aportan innovación al desarrollo de la electrónica y sus aplicaciones en el mundo moderno. Y que es de especial interés el uso de los supercapacitores en la electrónica de potencia, siendo este pilar en el desarrollo de aplicaciones con altos requerimientos energéticos.

Igualmente, en el artículo *Supercapacitors: Electrical Characteristics, Modeling, Applications, and Future Trends* publicado en *IEEE Access* los autores ponen en contexto como los supercondensadores (SC) están ganando terreno debido a su alta densidad de potencia, buen rendimiento y larga vida útil sin mantenimiento. Por esta razón, mencionan que los SC son un tema de investigación novedoso y se están publicando varios artículos sobre ingeniería de materiales, caracterización del rendimiento, modelado y análisis post mortem. (Berrueta et al., 2019)

También, en el libro titulado *Powering autonomous sensors an integral approach with focus on solar and RF energy harvesting* Penella López y Gasulla Forner (2011) señalan que en la última década se ha observado un importante esfuerzo de investigación con el objetivo de diversificar las fuentes de energía y que, al conocer las características eléctricas y modelos de baterías primarias, baterías secundarias y los supercapacitores; proponen el uso de unidades de almacenamiento híbridas ya que reducen el desperdicio de energía y la caída de voltaje provocada por las baterías de alta resistencia.

Asimismo, la fluctuación de energía es un asunto serio que puede afectar gravemente a los dispositivos sensibles; Yu et al. (2012) definen que los supercapacitores se pueden utilizar como dispositivos de almacenamiento de energía en sistemas diseñados para mejorar la confiabilidad y la calidad de la distribución de energía.

Finalmente, los principales aportes de la literatura revisada direccionan la presente investigación a enfocarse en tres áreas de aplicación y estas son: sobre el almacenamiento de energía de fuentes renovables, como una mejora en la calidad de la energía eléctrica y sobre las fuentes de respaldo de energía eléctrica en un entorno industrial.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Guatemala, existe un rezago en el conocimiento, en el entendimiento y en la adaptación de nuevas tecnologías. El resultado de estos esfuerzos, buenos o malos repercuten en la forma de enfrentar los problemas que se suscitan en nuestra sociedad cambiante. En este sentido, se propone mediante una investigación documental, la construcción de conocimientos entorno a las aplicaciones que tienen los supercapacitores como dispositivos tecnológicos.

3.1 Descripción del problema

La fluctuación de energía eléctrica puede afectar, resultar en daño o en un mal funcionamiento de los equipos eléctricos o electrónicos instalados ya sea en aplicaciones residenciales, empresariales o industriales. En este sentido, es de interés mejorar la confiabilidad y la calidad de la distribución de la energía.

Particularmente, en aplicaciones industriales, donde se tengan instalados motores eléctricos, el mal funcionamiento de estos, en ocasiones es provocado por la desconexión momentánea de los mismos frente a variaciones en los niveles de energía de la red eléctrica a la cual se encuentran interconectados.

Sobre los particulares, nace la necesidad de sustituir o mejorar las tecnologías de almacenamiento de energía convencionales, como media para reducir la susceptibilidad a fluctuaciones e interrupciones de energía que se presentan.

Además, el almacenamiento de energía de fuentes intermitentes (radiación solar) representa un enorme desafío, sin embargo, a nivel mundial existe el interés en desarrollar y presentar al mundo tecnologías de próxima generación.

En este aspecto, en Guatemala, se percibe poco interés en conocer los avances o realizar los cambios pertinentes de tecnología en el almacenamiento y conversión de energía.

Por consiguiente, el país podría estar frenado en: no reducir el desperdicio o pérdidas de energía; no mejorar la eficiencia energética a través de actualizaciones tecnológicas o bien en no mejorar la operación y reducir el mantenimiento de los sistemas para generar y almacenar energía alternativa, entre otras. Razón por la cual, se definen las siguientes preguntas.

3.2 Formulación del problema

A continuación, se formula la interrogante central asociada con el problema, así como tres interrogantes auxiliares que orientaran el desarrollo del presente trabajo:

- Pregunta central

¿Cuáles son los aspectos técnicos, económicos y ambientales del uso de los supercapacitores en aplicaciones de energía?

- Preguntas auxiliares
 - ¿Cómo se puede mejorar el almacenamiento de energía renovable mediante el uso de supercapacitores?
 - ¿Qué efecto tiene el uso de los supercapacitores como dispositivo para mejorar la calidad de la energía?
 - ¿Cuál es el impacto de usar supercapacitores como fuente de energía de respaldo en un entorno industrial?

3.3 Delimitación del problema

Según Alfonso (1995) la investigación documental es un procedimiento científico, un proceso sistemático de indagación, recolección, organización, análisis e interpretación de información o datos en torno a un determinado tema.

En función de lo anterior, se propone realizar una investigación de esta índole. Con libros, artículos y revistas científicas en donde sus autores posean un grado académico de maestría o superior; que las fechas de publicación de sus obras sean de periodos recientes o bien se consideren obras fundamentales y que estas estén alojadas en bibliotecas y repositorios reconocidos a nivel nacional e internacional.

4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo tiene como línea de investigación los aspectos técnicos, económicos y ambientales en el uso y aprovechamiento de recursos energéticos sobre la gestión y uso eficiente de la energía del área energética de la Maestría en Energía y ambiente. Con esta investigación se aportará a la identificación de las áreas de aplicación de los supercapacitores como fuentes necesarias para generar energía alternativa y el uso de energía siendo respetuosos con el medio ambiente, eficientes y sostenibles.

Mediante la revisión de la literatura, se obtendrá un conocimiento general de los avances y de los estudios realizados sobre el uso de supercapacitores para la mejora de la calidad de la energía. En donde este tipo de aplicaciones, requieren una potencia de funcionamiento instantánea confiable, y el uso de baterías tradicionales es perjudicial para las mismas. De no atender esta problemática las desviaciones y fluctuaciones de voltaje en la energía eléctrica pueden ocasionar daños o mal funcionamiento de equipos eléctricos o electrónicos.

Se obtendrá también, una síntesis del uso de los supercapacitores en un entorno industrial, debido a que está ganando gran atención en el área de la eficiencia energética, además que los supercapacitores pueden encontrarse como opciones sobresalientes para aplicaciones donde se requieran altas densidades de potencia, respuestas transitorias rápidas y un volumen reducido.

Asimismo, conocimientos relevantes en el almacenamiento de energía renovable mediante supercapacitores. Ya que estos dispositivos demuestran una

mayor eficiencia de carga que las baterías y que pueden operar en una amplia gama de temperaturas sin necesidad de sistemas auxiliares que representen un costo y un consumo de energía adicional. Además, el ciclo de vida de estos dispositivos se relaciona en buena medida a la vida útil de un panel fotovoltaico, reduciendo así, costos al eliminar el mantenimiento frecuente en estos sistemas.

Los productos obtenidos serán de utilidad para estudiantes y profesionales de la ingeniería, que, al identificar las distintas áreas de aplicación de los supercapacitores, podrán desarrollar e implementar alguna de estas en sus áreas de ejercicio profesional o bien propiciar nuevas investigaciones relacionadas a distintas áreas de uso de estos dispositivos.

Además, resultará beneficioso a las empresas, industrias y los hogares de Guatemala ya que se busca incidir en áreas que demandan altos niveles de energía y áreas en las que se utilicen dispositivos de conversión y almacenamiento de energía electroquímica.

En Guatemala no se ha realizado una revisión bibliográfica de las áreas de aplicación de los supercapacitores. Por tanto, esta investigación es relevante debido a que se muestra un panorama de como nuevas tecnologías impactan de forma positiva en el aprovechamiento de la energía y la sostenibilidad con el medio ambiente.

5. OBJETIVOS

5.1 General

Identificar los aspectos técnicos, económicos y ambientales del uso de los supercapacitores en aplicaciones de energía.

5.2 Específicos

- Describir como se puede mejorar el almacenamiento de energía renovable mediante el uso de supercapacitores.
- Analizar qué efecto tiene el uso de los supercapacitores para la mejora de la calidad de la energía.
- Especificar el uso de los supercapacitores como una fuente de energía de respaldo en un entorno industrial.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Las necesidades laborales que el presente trabajo pretende cubrir se relacionan a tres áreas en específico:

- Para la mejora de la calidad de la energía; utilizando los supercapacitores como parte de un sistema diseñado para mejorar la confiabilidad y la calidad de la distribución de energía.
- Como fuente de energía de respaldo; en un industrial mediante supercapacitores.
- Y sobre el almacenamiento de energía renovable; mediante supercapacitores de una fuente intermitente como la radiación solar.

Soluciones que pueden incidir en empresas, industrias y hogares de Guatemala que deseen mejoras en sus sistemas de calidad de energía, de electrónica de potencia o bien en el almacenamiento de energía renovable respectivamente.

Se propone resolver el problema planteado mediante una revisión bibliográfica que pasará por tres grandes fases:

- La investigación documental.
- La lectura y registro de la información.
- La elaboración de un texto escrito.

Las cuales tendrán como propósito, presentar una síntesis de las lecturas realizadas, seguida de unas conclusiones o bien una discusión sobre las áreas

de aplicación de los supercapacitores como fuentes necesarias para generar energía alternativa.

Ya que los supercapacitores representan una nueva generación de tecnología entre los otros dispositivos de almacenamiento de energía; se busca construir conocimiento mediante una revisión bibliográfica, que permita a distintos sectores puedan identificar y aplicar esta tecnología.

Además, la maestría al encontrarse entre el marco de energía y ambiente, se busca mostrar un panorama de como nuevas tecnologías impactan de forma positiva el aprovechamiento de la energía y la sostenibilidad con el medio ambiente.

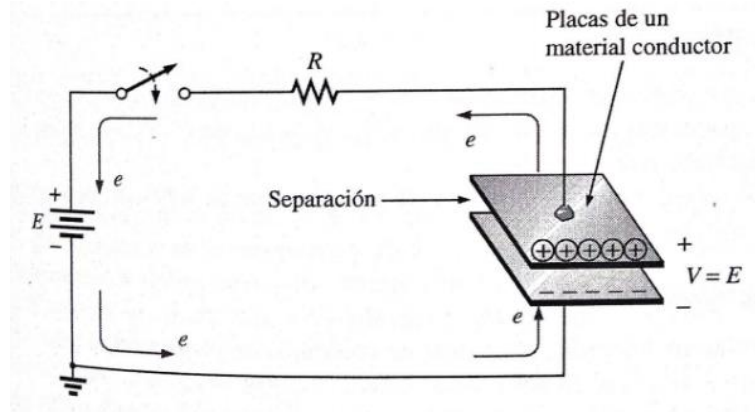
Finalmente, en el almacenamiento y conversión de energía electroquímica, los supercapacitores se consideran los dispositivos complementarios más factibles. Su utilización puede impactar en aplicaciones en las que se busque la generación y el uso de energía respetuosos con el medio ambiente, eficientes y sostenibles.

7. MARCO TEÓRICO

7.1 Capacitor

Un capacitor visto desde un enfoque físico describe a un dispositivo compuesto por dos placas paralelas construidas de un material conductor eléctrico, las cuales se encuentran separadas por espacio vacío o por cierta estructura mecánica que recibe el nombre de material dieléctrico, estas placas conductoras son capaces de almacenar y liberar cargas eléctricas en forma de energía eléctrica siempre y cuando se encuentren conectadas como dispositivo a un circuito eléctrico o electrónico.

Figura 2. **Capacitor de placas paralelas interconectado a un elemento de circuito eléctrico**



Fuente: Boylestad. (2011). *Introducción al análisis de circuitos*.

Para Young y Freedman (2013):

La energía potencial eléctrica almacenada en un capacitor cargado es exactamente igual a la cantidad de trabajo requerido para cargarlo, es decir para separar cargas opuestas y colocarlas en conductores diferentes. Cuando el capacitor se descarga, esta energía almacenada se recupera en forma de trabajo realizado por las fuerzas eléctricas. (p. 796)

Las aplicaciones modernas de los capacitores están en función de su capacidad de almacenamiento de energía, por consiguiente, el objetivo de este capítulo es dar a conocer los factores importantes que los describen, por medio de una breve explicación su funcionamiento y clasificación.

7.1.1 Capacitancia

Se puede entender como capacitancia, a la relación que existe de carga eléctrica Q depositada en un capacitor y la diferencia de potencial V entre las placas que lo componen.

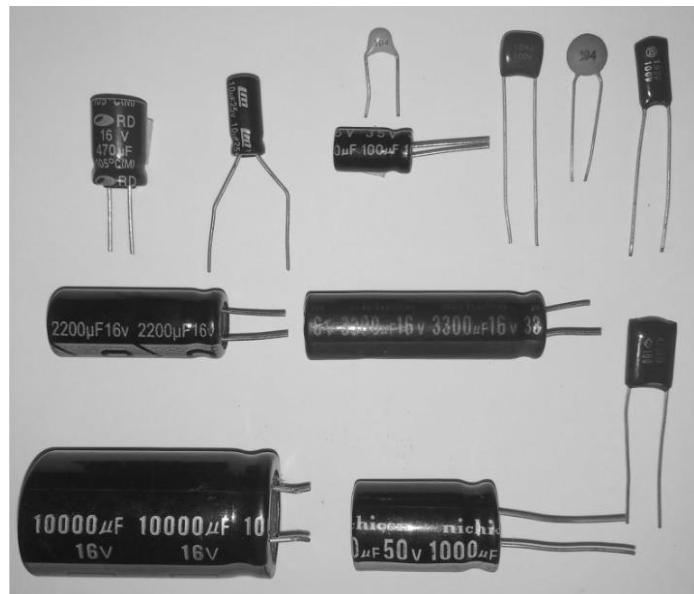
Según Boylestad (2011), "La capacitancia es la medida de la capacidad de un capacitor de almacenar carga en sus placas; en otras palabras, su capacidad de almacenamiento" (p. 188).

Por lo anterior, al mantener una diferencia de voltaje V en las placas de un capacitor, las cargas eléctricas Q almacenadas pueden incrementar o disminuir en función de un valor de capacitancia C , cuya unidad de medición en el SI corresponde al farad F .

Además, "... un capacitor tiene una capacitancia de 1 F si se deposita 1 C de carga (6.242×10^{18} electrones) en las placas, por una diferencia de potencial de 1 V a través de sus placas" (Boylestad, 2011, p. 188).

En capacitores convencionales los valores de capacitancia se encuentran entre los valores de microfaradios (10^{-6}) o picofaradios (10^{-12}). Como se ilustra continuación:

Figura 3. **Capacitores comerciales con valores de capacitancia y materiales de construcción distintos**



Fuente: elaboración propia, realizado con Clear Scanner.

Por el contrario, en los supercapacitores podemos encontrar valores de varios cientos de faradios.

7.1.2 Almacenamiento de energía

Para almacenar energía en un capacitor es necesario que se realice un trabajo para llevar la carga de un valor inicial de 0 coulomb a un valor final de carga Q , a este proceso se le puede llamar fase de carga.

Como indica Boylestad (2011):

... la batería extrae electrones de la placa superior y los deposita en la placa inferior, y el resultado es una carga neta positiva en la placa superior y una carga negativa en la placa inferior. La transferencia de electrones es muy rápida al principio, y se hace más lenta a medida que el potencial a través de las placas se aproxima al voltaje aplicado de la batería. (p. 203)

Es importante describir los valores que desarrolla un capacitor en la fase de carga en función del voltaje, la corriente y el tiempo en una red de circuito de corriente directa.

Respecto al voltaje se conoce que, “el voltaje a través de un capacitor de una red de cd es en esencia igual al voltaje aplicado después de que han pasado cinco constantes de tiempo de la fase de carga” (Boylestad, 2011, p. 205).

Respecto a la corriente se conoce que, “la corriente de una red de cd capacitiva es en esencia cero amperes después de que han pasado cinco constantes de tiempo de la fase de carga” (Boylestad, 2011, p. 206).

Es costumbre referirse a la constante de tiempo con la letra griega tau. El factor tau se mide en segundos, y corresponde al producto entre R y C , valores

que corresponde a la resistencia y capacitancia en la red de circuito de carga. En otras palabras:

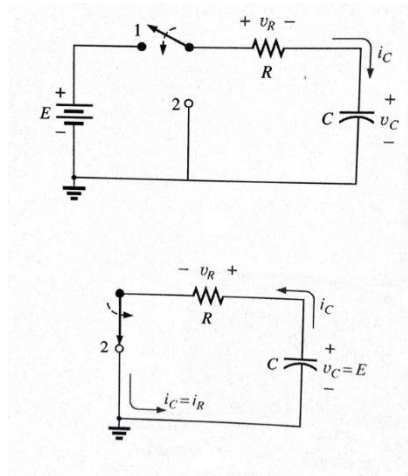
A mayor capacitancia, mayor constante de tiempo, y el voltaje que pasa a través del capacitor tardará más en alcanzar el valor aplicado. Esto puede ser muy útil cuando se diseñan pararrayos y supresores de picos para proteger equipo contra altos picos de voltaje inesperados. (Boylestad, 2011, p. 208)

Además, el proceso de carga de un capacitor, así como el proceso de descarga, los valores de corriente y voltaje en el dispositivo describen una función exponencial.

Finalmente, en el proceso de descarga, el capacitor se encontrará completamente descargado pasadas cinco constantes de tiempo, manteniendo el valor de capacitancia constante para tau y sustituyendo el valor de resistencia, por la resistencia que describe el nuevo circuito de descarga.

Es decir que, al conectar el capacitor previamente cargado a un circuito que posea un elemento que consuma energía eléctrica, el capacitor entregara su energía almacenada a dicha carga en un periodo aproximadamente igual a cinco veces tau, hasta encontrarse completamente descargado, como se muestra en la figura:

Figura 4. Fase de carga y descarga en un circuito resistivo-capacitivo



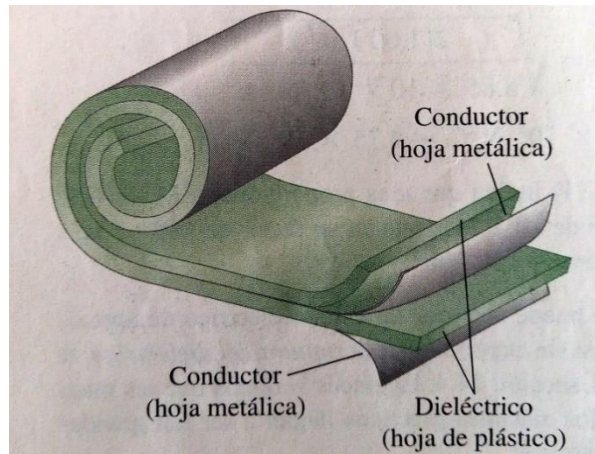
Fuente: Boylestad. (2011). *Introducción al análisis de circuitos*.

7.1.3 Dieléctricos

Dieléctrico o material no conductor eléctrico, puede ser construido de varios tipos de materiales, la función principal de este material es elevar los valores de capacitancia y por consiguiente el número de cargas que un capacitor es capaz de almacenar en sus placas conductoras.

Ballou (2000) expresa que la constante dieléctrica de un material determina la energía electrostática que se puede almacenar en ese material por unidad de volumen para un voltaje dado. Y que la constante dieléctrica expresa la relación de un capacitor en el vacío a uno que usa un dieléctrico dado. El dieléctrico del aire es 1, la unidad de referencia empleada para expresar la constante dieléctrica. A medida que aumenta o disminuye la constante dieléctrica, la capacitancia aumenta o disminuye, respectivamente.

Figura 5. **Laminas dieléctricas separando laminas conductoras**



Fuente: Young y Freedman. (2013). *Física universitaria con física moderna*.

La constante dieléctrica se suele representar con la letra mayúscula K , y expresa el cociente entre una capacitancia dada y la capacitancia del espacio vacío. Otro aspecto para considerar es que cuando la carga del capacitor permanece constante el voltaje entre las placas se ve reducido por el mismo factor K y por consiguiente la capacitancia se ve incrementada.

Ya que la constante dieléctrica es una propiedad que varía en función del material, a continuación, se lista una tabla de los valores que toma una variedad de estos:

Figura 6. **Constantes dieléctricas para distintos materiales a 20°C**

Material	<i>K</i>	Material	<i>K</i>
Vacío	1	Cloruro de polivinilo	3.18
Aire (a 1 atm)	1.00059	Plexiglás®	3.40
Aire (a 100 atm)	1.0548	Vidrio	5–10
Teflón	2.1	Neopreno	6.70
Polietileno	2.25	Germanio	16
Benceno	2.28	Glicerina	42.5
Mica	3–6	Agua	80.4
PET	3.1	Titanato de estroncio	310

Fuente: Young y Freedman. (2013). *Física universitaria con física moderna*.

7.1.4 Capacitancia en serie y en paralelo

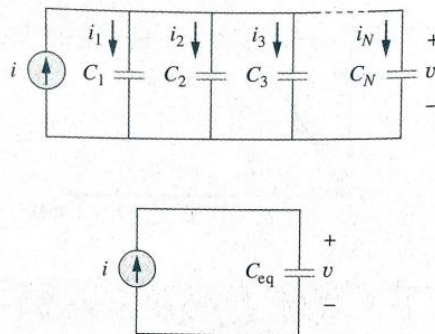
Como herramienta de análisis es útil poder obtener un valor de capacitancia global en un arreglo de circuito, este arreglo puede estar dispuesto en serie, paralelo o una combinación serie-paralelo de capacitores, como dicta la teoría de circuitos:

“La capacitancia equivalente de *N* capacitores conectados en paralelo es la suma de las capacitancias individuales” (Alexander y Sadiku, 2013, p. 190).

De lo anterior se entiende que, si en un circuito los capacitores que lo conforman se encuentran conectados en paralelo, es decir terminales positivas con terminales positivas y terminales negativas con terminales negativas (capacitores con polaridad), la capacitancia total vista desde fuera de la red de circuito es un valor mayor que cualquier capacitancia individual, de manera precisa es la suma de las capacitancias individuales de los capacitores que conforman la red de circuito.

Con el objetivo de poder visualizar de una mejor forma la red de circuito anteriormente descrita, se ilustra en la siguiente figura una red de n capacitores conectados en paralelo y su circuito equivalente:

Figura 7. **Red de circuito de N capacitores conectados en paralelo y su equivalente de circuito**



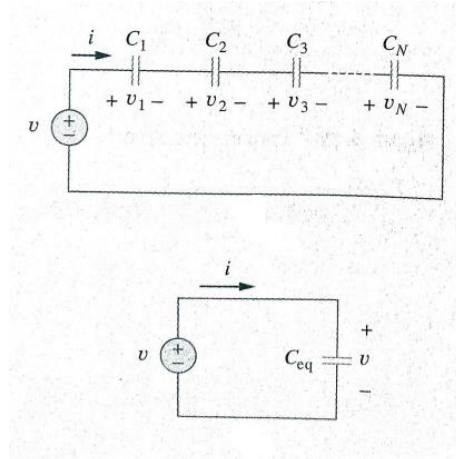
Fuente: Alexander y Sadiku. (2013). *Fundamentos de circuitos eléctricos*.

Además, “La capacitancia equivalente de capacitores conectados en serie es el recíproco de la suma de los recíprocos de las capacitancias individuales” (Alexander y Sadiku, 2013, p. 190).

En este sentido, la capacitancia total o equivalente vista desde fuera de la red de circuito, como si estuviera constituida únicamente por un solo capacitor, se ve reducida en un valor igual al recíproco de la suma de los recíprocos de las capacitancias individuales, en consecuencia, la capacitancia equivalente es menor a cualquier valor de capacitancia individual del circuito.

Con el objetivo de poder visualizar de mejor forma la red de circuito anteriormente tratada se ilustra un arreglo de n capacitores conectados en serie, así como su equivalente se circuito en la siguiente figura:

Figura 8. **Red de circuito para N capacitores conectados en serie y su circuito equivalente**



Fuente: Alexander y Sadiku. (2013). *Fundamentos de circuitos eléctricos*.

7.1.5 Supercapacitores

Con anterioridad se describieron las características fundamentales de un capacitor, que permiten comprender en buena medida el funcionamiento de los supercapacitores. A continuación, se ilustran supercapacitores comerciales:

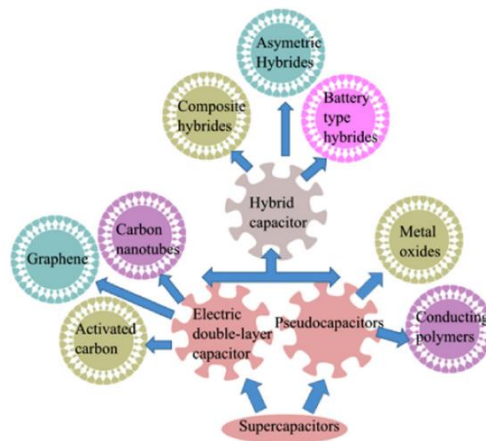
Figura 9. **Supercapacitores comerciales**



Fuente: Maxwell Technologies. *Ultracapacitor Overview*., Consultado el 31 de marzo de 2022.
Recuperado de <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/>.

La capacitancia del dispositivo es la característica eléctrica principal para evaluar el rendimiento del supercapacitor. En función del material de construcción es posible aumentar la capacitancia y por consiguiente el número de cargas que es capaz de almacenar en sus placas conductoras, a continuación, se presenta un esquema de los posibles tipos de supercapacitores en función de sus materiales de construcción:

Figura 10. **Tipos de supercapacitores**



Fuente: Raza et al. (2018). *Recent advancements in supercapacitor technology*.

En palabras de Penella López y Gasulla Forner (2011) los supercapacitores de doble capa, cuentan con electrodos de carbón activado que tienen áreas de superficie muy grandes y que pueden estar separados por distancias tan cortas como en el rango molecular. Estas características permiten mayores capacidades por unidad de área que las de los condensadores regulares. Además, a diferencia de los capacitores normales, los supercapacitores no tienen un dieléctrico entre sus dos electrodos.

Para finalizar, se compara mediante una tabla las características de un capacitor convencional y un supercapacitor:

Figura 11. **Comparativa del capacitor convencional y un supercapacitor**

Característica	Capacitor	Supercapacitor
Energía específica (Wh 1/kg)	< 0.1	Hasta 1091
Potencia específica (W 1/kg)	> 10,000	Hasta 196000
Tiempo de descarga	$10^{-6} - 10^{-3}$ s	s a min
Tiempo de carga	$10^{-6} - 10^{-3}$ s	s a min
Eficiencia Culombica (%)	Sobre 100	Hasta 99
Ciclo de vida	Casi infinito	> 500,000
Determinantes del almacenamiento de carga	Área del electrodo y dieléctrico	Microestructura de electrodo y electrolito

Fuente: Adaptado de Raza et al. (2018). Recent advancements in supercapacitor technology.

7.2 Energía

El objetivo de este capítulo es dar a conocer la energía asociada con las interacciones eléctricas:

“Energía es la capacidad para realizar trabajo, medida en joules (J)” (Alexander y Sadiku, 2013, p. 10).

En función de lo anterior, se puede hacer un análisis dimensional para expresar las unidades de energía en unidades equivalentes y así develar otras cantidades asociadas a este término.

Es común observar, en el recibo de servicio eléctrico, que las compañías cobran la energía en watts-hora, 1 Wh es igual a 3600 J, en donde watts es una unidad de medida asociada a la potencia y se define como:

“Potencia es la variación respecto del tiempo de gasto o absorción de energía, medida en watts (W)” (Alexander y Sadiku, 2013, p. 9).

Para circuitos, la potencia, es determinada al multiplicar la corriente y tensión eléctrica que alimentan a un circuito con carga, siendo sus definiciones las siguientes:

“Tensión (o diferencia de potencial) es la energía requerida para mover una carga unitaria a través de un elemento, medida en volts (V)” (Alexander y Sadiku, 2013, p. 8).

“Corriente eléctrica es la velocidad de cambio de la carga respecto al tiempo, medida en amperes (A)” (Alexander y Sadiku, 2013, p. 6).

Por consiguiente, el ampere puede expresarse como coulomb/segundo y el volt como joule/coulomb. La potencia por consiguiente en joule/segundo, que define una variación en el tiempo de la energía eléctrica.

7.2.1 Calidad de energía

El término calidad de energía se refiere a “una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan el voltaje y la corriente en un momento dado y en una ubicación determinada de un sistema de potencia” (Transmission and distribution committee of the IEEE power and energy society, 2019, p. 12).

Fenómenos electromagnéticos asociados a las cantidades de campo eléctrico y magnético presentes en dispositivos resistivos, capacitivos e inductivos; los cuales pueden afectar el funcionamiento de: computadoras que controlan procesos importantes, equipos médicos, motores en pleno funcionamiento en un proceso industrial entre otros.

Sin embargo, en la vida real es inevitable que las tensiones se desvíen de manera significativa de la condición ideal debido a las perturbaciones de la red eléctrica.

Respecto a las perturbaciones en los niveles de tensión, que varían los valores de diferencia de voltaje entre dos puntos de los cuales se alimentan a un dispositivo, se pueden definir los siguientes:

“Sobretensión. La magnitud de tensión es sustancialmente más alta que su valor nominal para un periodo sostenido de unos cuantos ciclos” (Mohan et al., 2009, p. 311).

“Tensión insuficiente (brownout). La tensión es sustancialmente más baja que su valor nominal para unos cuantos ciclos” (Mohan et al., 2009, p. 311).

“Apagón (blackout). La tensión del sistema de suministro de energía colapsa para unos cuantos ciclos o más” (Mohan et al., 2009, p. 311).

Respecto a las perturbaciones en la forma de la señal de alimentación, que introduce comportamientos extraños en el funcionamiento a los dispositivos que alimentan, se pueden definir los siguientes:

“Pulsos parásitos de voltaje. Estos pulsos están superpuestos sobre las formas normales de ondas de 60 Hz y ocurren ocasionalmente (no en forma repetitiva). Pueden ser del tipo de modo de línea (modo diferencial) o del modo común” (Mohan et al., 2009, p. 311).

“Forma de onda de voltaje truncado. Esto se refiere al truncado repetitivo de la forma de onda del voltaje y las llamadas asociadas” (Mohan et al., 2009, p. 311).

“Armónicos. Una forma de onda de voltaje distorsionado que contiene componentes de voltaje armónicos en frecuencias armónicas (por lo general, múltiplos debajo orden de la frecuencia de línea). Estos armónicos existen en forma sostenida” (Mohan et al., 2009, p. 312).

Finalmente, en función de los campos eléctricos y magnéticos y sus cantidades asociadas:

“Interferencia electromagnética. Esto se refiere al ruido de alta frecuencia que llega por la línea de la red eléctrica o radiado desde su fuente” (Mohan et al., 2009, p. 312).

Se puede concluir de lo anterior, que las fuentes de perturbación son muy diversas, por tal razón la energía suministrada a equipos debe cumplir con ciertas características, que permita operar de manera continua, sin que se afecte el desempeño o se incurra en fallas sobre los componentes, considerando las perturbaciones definidas.

7.3 Electrónica de potencia

La expresión electrónica de potencia se utiliza para diferenciar el tipo de aplicación que se les da a los dispositivos electrónicos, es decir:

“En términos generales, la tarea de la electrónica de potencia es procesar y controlar el flujo de energía eléctrica mediante el suministro de voltajes y

corrientes en una forma óptima para las cargas de los usuarios” (Mohan et al., 2009, p. 3).

De lo anterior, al procesar y controlar el flujo de electricidad, es posible incidir en aplicaciones sobre convertidores de corriente que son de utilidad en sistemas fotovoltaicos; variadores de velocidad para motores que son de sumo interés en aplicaciones industriales; regular los niveles de energía que requieren ciertas aplicaciones evitando el desperdicio de esta y otras muchas. Como ejemplo:

Se necesita una interfaz de electrónica de potencia para conectar fuentes de energía renovable (fotovoltaicas, de viento o de agua) al sistema de suministro de energía. Lo mismo sucede con la interconexión de sistemas de almacenamiento de energía para nivelar las cargas del sistema público (que también se llama ahorro de pico de carga), como baterías, celdas de combustible e inductores superconductores de almacenamiento de energía. (Mohan et al., 2009, p. 418)

En conclusión, el objetivo de la electrónica de potencia es el manejo y la transformación de energía de manera eficiente, evitando el uso de componentes con características resistivas, los cuales sufren de pérdidas por efecto Joule; razón por la cual, los principales dispositivos que se utilizan son: capacitores, inductores o bien semiconductores trabajando en modo de corte o saturación.

7.4 Energía renovable

En palabras de Twidell y Weir (2006) es la energía obtenida de flujos naturales y persistentes de energía que ocurren en el entorno inmediato.

O bien la energía renovable representa un “flujo energético que se restablece al mismo ritmo al que se utiliza” (González Velasco, 2012, p. 47).

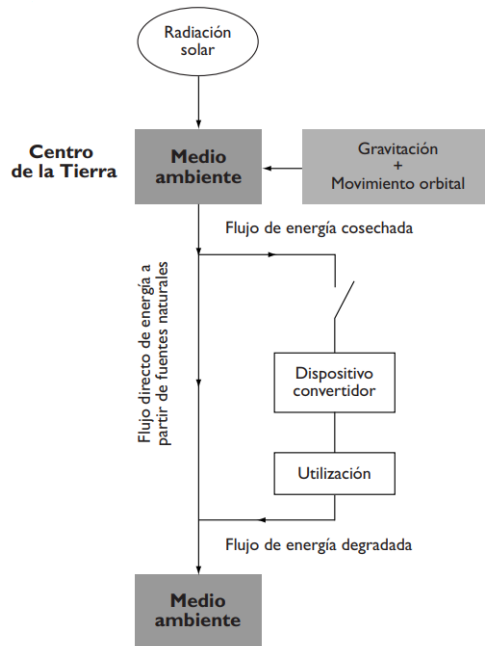
En este sentido, la energía renovable se puede obtener de tres fuentes que son: el sol, la intervención gravitatoria de la tierra con la luna y del magma caliente.

De la energía solar “actual”, por medio de la fotosíntesis podemos obtener energía de biomasa; a través de la luz directa podemos obtener energía solar fotovoltaica o bien térmica; en función del calor en el agua podemos obtener energía hidráulica o maremotérmica; y derivado del calentamiento del aire podemos obtener energía del viento y del oleaje.

Además, de la fuerza gravitatoria, acorde al movimiento del agua de los océanos podemos obtener la energía mareomotriz.

Finalmente, del magma caliente podemos obtener la energía geotérmica. A continuación, se ilustra mediante un diagrama de bloques lo anteriormente descrito:

Figura 12. **Aprovechamiento renovable**



Fuente: Gonzáles Velasco. (2012). *Energías renovables*.

7.4.1 Energía solar

La energía solar, es una onda electromagnética que viaja desde el sol hasta la tierra, cuya propagación en el espacio vacío es la velocidad de la luz. Las ondas electromagnéticas inciden en nuestro planeta, y cierta cantidad de la energía ingresa a él y otra cantidad es absorbida por la atmosfera. La energía incidente es la que permite la vida, y en los últimos años se ha aprovechado para generar energía eléctrica.

Para Carta Gonzáles et al. (2009):

La energía que llega del Sol a la Tierra (una ínfima parte de la que éste irradia al espacio) da lugar a una serie de fenómenos sobre la atmosfera,

el agua y la propia tierra, que finalmente conforman los diversos tipos de energías que los humanos podemos usar.

Sobre la Tierra incide una energía solar de 1.559.280 TWh en un año, lo cual es aproximadamente 15.000 veces más que la consumida (en la actualidad) en todo el planeta en ese mismo periodo de tiempo. (p. 27)

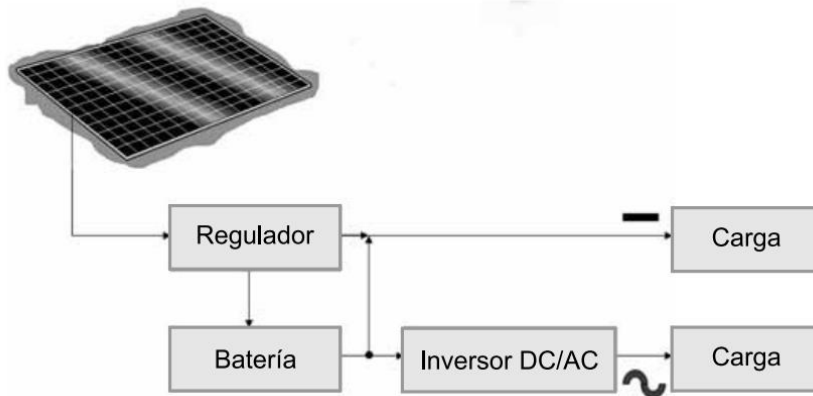
En este sentido, sobre el aprovechamiento de la energía que disponemos del sol, se pone de manifiesto que “La energía solar fotovoltaica se basa en la utilización de células solares o fotovoltaicas, fabricadas con materiales semiconductores cristalinos que, por efecto fotovoltaico, generan corriente eléctrica cuando se los mismos incide la radiación solar” (Carta Gonzáles et al., 2009, p. 236).

Por lo cual, es necesario analizar un sistema fotovoltaico.

7.5 Sistemas fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico está constituido por: paneles solares, un regulador o controlador de carga, un inversor de corriente directa a corriente alterna, un sistema de almacenamiento de energía electroquímica como lo son las baterías o los supercapacitores y bloques de carga como se ilustra a continuación:

Figura 13. **Esquema de una instalación fotovoltaica autónoma básica**



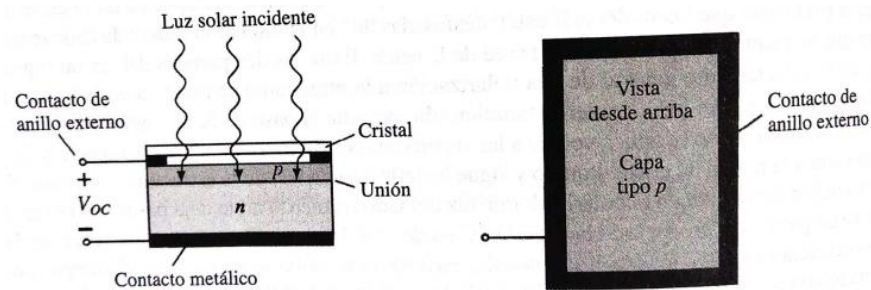
Fuente: Carta Gonzáles et al. (2009). *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables.*

Según Boylestad y Nashelsky (2009):

En años recientes se ha estado incrementando el interés en la celda solar como fuente alternativa de energía. Cuando consideramos que la densidad de potencia recibida del sol al nivel del mar es aproximadamente de 100 kW/cm² (1kW/m²), ciertamente es una fuente de energía que requiere más investigación y desarrollo para incrementar al máximo la eficiencia de conversión de energía solar en energía eléctrica. (p. 822)

Una celda solar es un dispositivo electrónico construido a partir de la unión de dos materiales extrínsecos, estos materiales que se unen reciben el nombre de material tipo p y material tipo n.

Figura 14. Celda solar de unión p-n



Fuente: Boylestad y Nashelsky. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*.

La fabricación de un material tipo n es a partir de un material intrínseco como el Silicio, material que posee cuatro electrones de valencia en su orbital más externo (tetavalente) y al doparse o bien contaminarse con un elemento con cinco electrones de valencia (pentavalente) como antimonio, arsénico o el fósforo, se forma una estructura atómica conocida como enlace covalente. Cuatro de los electrones de cada átomo se encuentran enlazados, quedando así electrones libres en su movimiento a través de la estructura atómica. Las impurezas difundidas con cinco electrones de valencia se conocen como átomos donadores y se dice que un material tipo n, los electrones son los portadores mayoritarios.

La fabricación de un material tipo p, de igual forma es a partir de un material intrínseco como el Silicio, y al doparse con un elemento de tres electrones de valencia (trivalente) como boro, galio e indio, se origina un enlace covalente. Tres de los electrones de cada átomo se encuentran enlazados, quedando así espacios libres en la estructura atómica conocidos como huecos. Las impurezas difundidas con tres electrones de valencia se conocen como átomos aceptores y se dice que un material tipo p, los huecos son los portadores mayoritarios.

Con anterioridad se mencionó la construcción de una celda solar de silicio, es importante indicar que: “El selenio y el silicio son los materiales que más se usan para las celdas solares, aunque también se utilizan el arseniuro de galio, el arseniuro de indio y sulfuro de cadmio, entre otros” (Boylestad y Nashelsky, 2009, p. 823).

7.5.1 Componentes de un subsistema fotovoltaico

De forma general un sistema fotovoltaico está integrado por subsistemas como lo es el subsistema de captación, de almacenamiento, de regulación y convertidor de corriente, los cuales se definen de la siguiente forma:

El subsistema de captación está formado por el panel fotovoltaico, cuya función es la de convertir la radiación solar incidente en energía eléctrica; el subsistema de almacenamiento formado por elementos de almacenamiento como las baterías cuya función principal es la de almacenar la energía eléctrica generada; el subsistema de regulación formado por circuitos de electrónica de potencia que tienen como función evitar que los elementos de almacenamiento reciban más energía de la que son capaces de almacenar y finalmente el subsistema convertidor de corriente encargado de adaptar la energía producida por el panel fotovoltaico o la almacenada, que es de tipo continuo a alterna. (Carta Gonzáles et al., 2009)

7.5.2 Topologías de subsistemas de almacenamiento en instalaciones fotovoltaicas

Los sistemas de almacenamiento en instalaciones fotovoltaicas se pueden disponer en una configuración serie, paralelo o bien serie-paralelo. Como indica las teorías desarrolladas de circuitos:

Dos o más elementos están en serie si comparten exclusivamente un solo nodo y conducen en consecuencia la misma corriente.

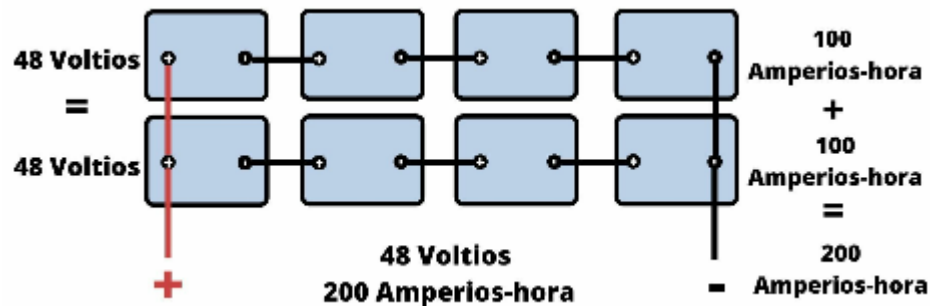
Dos o más elementos están en paralelo si están conectados a los dos mismos nodos y tienen en consecuencia la misma tensión entre sus terminales. (Alexander y Sadiku, 2013, p. 31)

Es decir, una disposición tipo serie permite que los niveles de corriente medidos en amperios se mantengan constantes y sus valores de voltaje irán en aumento a medida que se agreguen nuevos dispositivos.

En comparación, una disposición tipo paralelo permite que los niveles de voltaje medidos en voltios se mantengan constantes y sus valores de corriente irán en aumento a medida que se agreguen otros dispositivos.

Para finalizar, se ilustra a continuación un esquema de conexión para ocho elementos de almacenamiento:

Figura 15. **Elementos de almacenamiento dispuestos en serie paralelo**



Fuente: Vasyliv. (2019). *Energía solar autónoma*.

En la extrema izquierda, de la anterior figura, se observa dos de los elementos conectados por sus terminales positivas (conexión en rojo) y en la extrema derecha dos de los elementos conectados por sus terminales negativas (conexión en negro). El voltaje medio entre estas dos terminales corresponde a 48 voltios, es decir que la contribución individual de voltaje de los elementos del primer bloque corresponde a 12 voltios por elemento. Además, los elementos del primer bloque están dispuestos en una conexión en serie, por tal razón la corriente en este bloque es de igual magnitud; y lo anterior se aplica de igual forma para el segundo bloque.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Contexto general

Descripción del problema

Formulación del problema (deberá incluir su árbol del problema)

Delimitación del problema

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 Estudios previos

1.2 Antecedentes

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Capacitor

2.1.1. Capacitancia

2.1.2. Almacenamiento de energía

2.1.3. Dieléctricos

2.1.4. Capacitancia en serie y en paralelo

2.1.5. Supercapacitores

- 2.2. Energía
 - 2.2.1. Calidad de la energía
- 2.3. Electrónica de potencia
- 2.4. Energía renovable
 - 2.4.1. Energía solar
- 2.5. Sistemas fotovoltaicos
 - 2.5.1. Componentes de un subsistema fotovoltaico
 - 2.5.2. Topologías de subsistemas de almacenamiento en instalaciones fotovoltaicas

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

- 3.1. Características del estudio
 - 3.1.1. Diseño
 - 3.1.2. Enfoque
 - 3.1.3. Alcance
 - 3.1.4. Unidad de análisis
- 3.2. Variables
- 3.3. Fases del desarrollo de la investigación
 - 3.3.1. Fase 1
 - 3.3.2. Fase 2
 - 3.3.3. Fase 3
 - 3.3.4. Fase 4
 - 3.3.5. Fase 5
 - 3.3.6. Fase 6
 - 3.3.7. Fase 7
 - 3.3.8. Fase 8
 - 3.3.9. Fase 9

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 4.1. Almacenamiento de energía renovable mediante el uso de supercapacitores
 - 4.1.1. Aspectos técnicos
 - 4.1.2. Aspectos económicos
 - 4.1.3. Aspectos ambientales
 - 4.1.4. Discusión de resultados
- 4.2. Uso de los supercapacitores para la mejora de la calidad de la energía
 - 4.2.1. Aspectos técnicos
 - 4.2.2. Aspectos económicos
 - 4.2.3. Aspectos ambientales
 - 4.2.4. Discusión de resultados
- 4.3. Uso de los supercapacitores como una fuente de energía de respaldo en un entorno industrial
 - 4.3.1. Aspectos técnicos
 - 4.3.2. Aspectos económicos
 - 4.3.3. Aspectos ambientales
 - 4.3.4. Discusión de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1 Características del estudio

El enfoque del estudio propuesto es cualitativo, ya que se basa en una lógica y un proceso inductivo. Es decir, se comenzará examinando los hechos en sí y en el proceso se desarrollará una teoría coherente para representar lo que se observa. (Esterberg, 2002, citado por Sampieri et al., 2014)

Al explorar y describir a los supercapacitores para luego generar perspectivas teóricas de sus usos como fuentes necesarias para generar energía alternativa; el alcance es descriptivo dado que se busca especificar propiedades y características importantes del fenómeno anterior mente descrito.

El diseño adoptado será no experimental, pues la información de las características y propiedades del uso de los supercapacitores en aplicaciones de energía se analizará en su estado original sin ninguna manipulación.

9.2 Unidades de análisis

La población en estudio será la aplicación de los supercapacitores como fuentes necesarias para generar energía alternativa, la cual se encuentra dividida en subpoblaciones dadas por: el almacenamiento de energía renovable, la mejora de la calidad de la energía y las fuentes de energía de respaldo en un entorno industrial; de las cual se extraerán muestras de forma no probabilística discrecional, que serán estudiadas en su totalidad.

9.3 Variables

Las variables en estudio se describen mediante la transición de las variables a sus dimensiones, luego a los indicadores y finalmente a los ítems, como se muestra a continuación:

Tabla I. **Operacionalización de la variable Capacitor**

Variable	Definición teórica	
Capacitor	Elemento compuesto simplemente con dos superficies conductoras separadas por un aislante o un vacío.	
Dimensión	Indicadores	Ítems
Capacitancia	Medida de la capacidad de un capacitor de almacenar carga en sus placas; en otras palabras, su capacidad de almacenamiento, medida en faradios (F).	Para un supercapacitor comercial, ¿Cuáles son sus valores de capacitancia?
Dieléctrico	Material no conductor entre las placas conductoras de un capacitor, constante dieléctrica (k) es adimensional.	Para un supercapacitor comercial, ¿Qué tipo de materiales se emplean y cuál es su valor de constante dieléctrica asociada?
Circuito eléctrico	Interconexión de elementos eléctricos, conexión serie, paralelo o serie-paralelo.	Para un circuito supercapacitivo, ¿Qué modelos de interconexión se emplean?
Almacenamiento de energía	La energía potencial eléctrica almacenada en un capacitor cargado es exactamente igual a la cantidad de trabajo requerido para cargarlo, es decir para separar cargas opuestas y colocarlas en conductores diferentes. Cuando el capacitor se descarga, esta energía almacenada se recupera en forma de trabajo realizado por las fuerzas eléctricas. Voltaje (V), Corriente (A) y Constante de tiempo (tau).	Para un supercapacitor comercial, ¿Cuáles son sus condiciones de operación respecto a niveles de voltaje y corriente así como sus tiempos de carga y descarga?

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla II. **Operacionalización de la variable Energía**

Variable	Definición teórica	
Energía	Energía es la capacidad para realizar trabajo, medida en Joules.	
Dimensión	Indicadores	Ítems
Potencia eléctrica	Variación respecto del tiempo de gasto o absorción de la energía, medida en watts (W).	¿Cuál es el gasto o absorción de la energía en función del tiempo para una aplicación de: calidad de energía, almacenamiento de energía renovable y en una fuente de energía de respaldo en un entorno industrial?
Tensión eléctrica	Energía requerida para mover una carga unitaria a través de un elemento, medida en volts (V).	¿Cuáles son los valores típicos de tensión eléctrica en aplicaciones de: calidad de energía, almacenamiento de energía renovable y en una fuente de energía de respaldo en un entorno industrial?
Corriente eléctrica	Velocidad de cambio de la carga respecto al tiempo, medida en amperes (A).	¿Cuáles son los valores típicos de corriente eléctrica en aplicaciones de: calidad de energía, almacenamiento de energía renovable y en una fuente de energía de respaldo en un entorno industrial?

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Para realizar esta medición se tomarán datos en una condición discrecional para cada uno de los escenarios y se llenará la siguiente tabla para documentar los resultados:

Tabla III. **Instrumento de medición**

Elemento	Descripción	
Tipo de aplicación: 1. Calidad de energía (X) 2. Almacenamiento de energía renovable () 3. Fuente de energía de respaldo en un entorno industrial ()		
Capacitor	Descripción	Cantidad
Tipo de capacitor:	Supercapacitores	
Capacitancia (F):		
Material Dieléctrico:		
Constante dieléctrica (k):		
Arreglo de circuito (serie-paralelo):		
Voltaje de capacitor (V):		
Corriente de capacitor (A):		
Constante de tiempo (s):		
Energía	Descripción	Cantidad
Potencia eléctrica (W):		
Tensión eléctrica (V):		
Corriente eléctrica (A):		

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

9.4 Fases del estudio

A continuación, se describirán las fases del estudio. Se describirá el proceso por medio del cual se realizará, se indicará las técnicas que aplicarán y las actividades que se realizarán.

9.4.1 Fase 1: Revisión bibliográfica

En la primera fase se realizará una búsqueda y selección de fuentes de información que respondan a la primera pregunta de investigación: ¿Cómo se puede mejorar el almacenamiento de energía renovable mediante el uso de supercapacitores?

Esta fase implica tener acceso a libros, artículos y revistas científicas en donde sus autores posean un grado académico de maestría o superior; que las fechas de publicación de sus obras sean de periodos recientes o bien se consideren obras fundamentales sobre la temática y que estas estén alojadas en bibliotecas y repositorios reconocidos a nivel nacional e internacional.

9.4.2 Fase 2: Lectura y registro de la información

En la segunda fase, de las fuentes de información seleccionadas con anterioridad, se extraerá y recopilará información relevante y necesaria para describir: cómo se puede mejorar el almacenamiento de energía renovable mediante el uso de supercapacitores.

En esta fase se hará la lectura y elaboración de registros escritos, con el fin de describir y guardar una memoria de las ideas centrales de los textos consultados. El subrayado u otras formas de marcar los textos, al igual que la toma de notas, serán las dos estrategias más utilizadas por el investigador para seleccionar la información clave durante la lectura.

9.4.3 Fase 3: Elaboración de un texto escrito

La tercera fase culminara con la elaboración de un texto escrito, en el que se presenta una síntesis del recorrido que hizo el investigador por los textos, seguido de unas conclusiones o una discusión.

Tabla IV. **Flujo para la elaboración del texto escrito**

Etapa. Mecanismo	Descripción
1.0	Contextualización del capítulo en función del objetivo específico
2.0	Referenciación a otras investigaciones
2.1	Citas textuales
2.2	Paráfrasis
2.3	Resúmenes de las partes esenciales de un texto, artículo o revista científica
3.0	Escritura de un texto coherente
3.1	Elaboración de un esquema que permita visualizar el esqueleto o la estructura del texto
3.2	Interconexión de los planteamientos de diferentes autores
3.3	Vinculación entre los apartados, los párrafos y las oraciones, mediante conectores u otro tipo de dispositivos textuales
4.0	Redacción de una valoración crítica de la información
5.0	Redacción de conclusiones

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Es importante mencionar que la investigación en su totalidad comprende nueve fases, anteriormente se describieron tres de las fases en función del objetivo específico número uno, estas fases de investigación son igualmente válidas para el objetivo específico dos y el objetivo específico tres, como se detalla a continuación:

Tabla V. **Totalidad de las fases de la investigación**

Objetivo	Fases del estudio
Específico 1	Fase 1
Específico 1	Fase 2
Específico 1	Fase 3
Específico 2	Fase 1
Específico 2	Fase 2
Específico 2	Fase 3
Específico 3	Fase 1
Específico 3	Fase 2
Específico 3	Fase 3
Número total de fases	9

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Ya que el enfoque del estudio propuesto es cualitativo, no se contempla el uso de técnicas de la estadística descriptiva o inferencial. El tipo de datos recogidos serán expresados en forma de cadenas verbales y no mediante valores numéricos.

Respecto a la disposición y transformación de los datos, se planea considerar el uso de diagramas y matrices descriptivas.

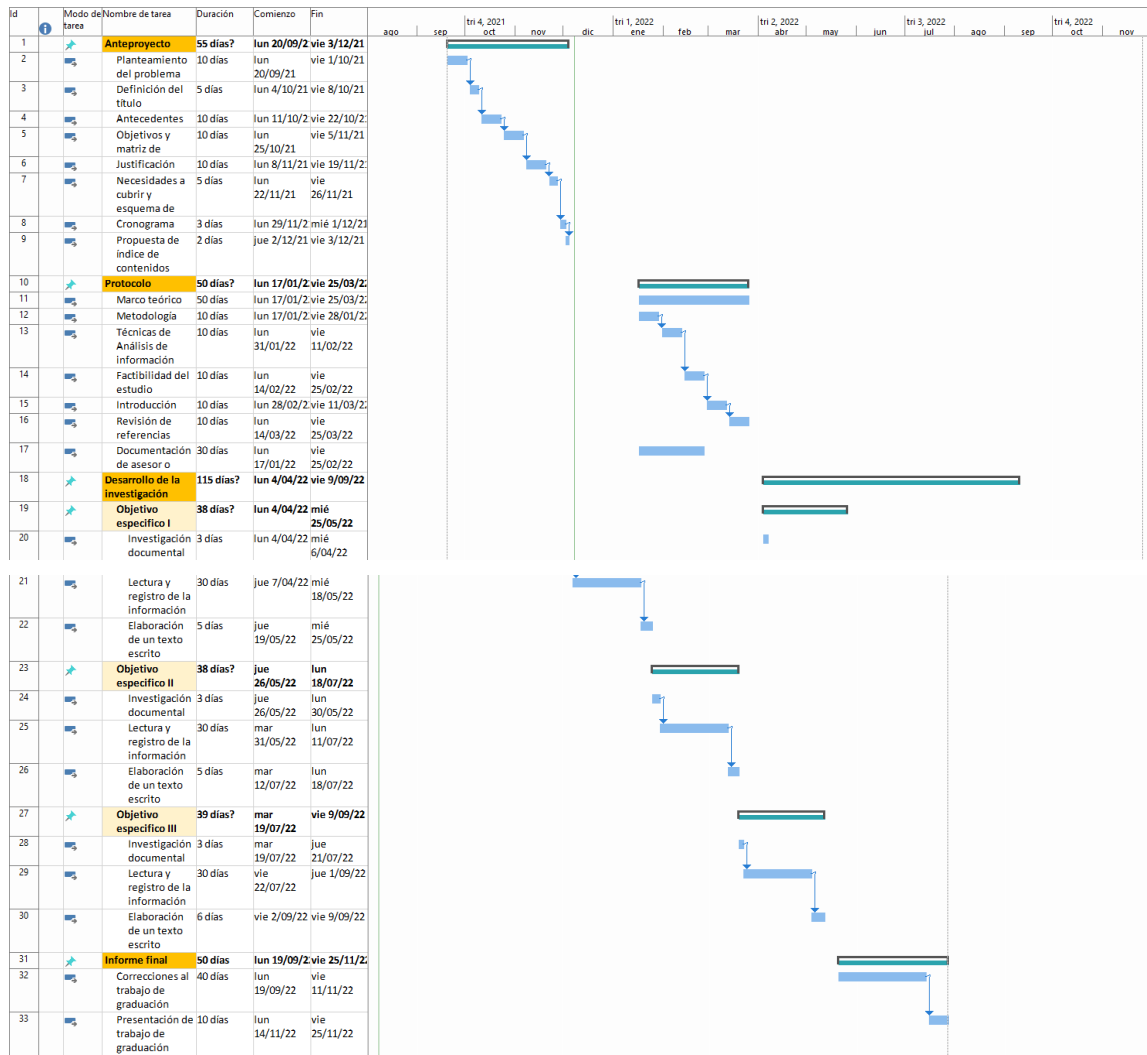
Los diagramas descriptivos, serán representaciones que describen el contexto o la evolución de las áreas de aplicación de los supercapacitores, mediante esquemas contextuales y diagramas de evolución.

Las matrices descriptivas, consistirán en tablas que contengan información cualitativa sobre las aplicaciones objetivo del presente estudio, con el fin de obtener una visión holística de los datos, ayudando de esta forma en su análisis al combinarlos y vincularlos mediante listas de control y matrices ordenadas cronológicamente.

Con el fin de alcanzar un mayor conocimiento de la realidad estudiada y avanzar mediante su descripción y comprensión hacia la elaboración de modelos conceptuales descriptivos del uso de los supercapacitores en aplicaciones energéticas.

11. CRONOGRAMA

Figura 16. Cronograma



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Project.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente trabajo de investigación se realizará con recursos propios del estudiante de maestría. Siendo la investigación descriptiva, se tendrán en cuenta los siguientes recursos

Tabla VI. **Recursos necesarios para la investigación**

Recurso	Fuente de financiamiento	Frecuencia de la inversión	Costo	Total
Humano				
Asesor	Ad honorem	0	Q5,000.00	Q0.00
Investigador	Ad honorem	0	Q3,000.00	Q0.00
Financiero				
	No aplica			
Recurso Tecnológico				
Computadora laptop	Investigador	0	Q4,300.00	Q0.00
Internet	Investigador	6	Q199.00	Q1,194.00
Acceso a la información				
Libros	Investigador	1	Q3,000.00	Q3,000.00
Artículos	Investigador	1	Q1,000.00	Q1,000.00
Revistas	Investigador	1	Q500.00	Q500.00
Permisos				
	No aplica			
Equipo				
	No aplica			
Infraestructura				
Oficina	Investigador	0	Q1,500.00	Q0.00
Servicio de luz eléctrica	Investigador	6	Q150.00	Q900.00
Total				Q6,594.00

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Siendo los recursos aportados suficientes para la investigación, se considera que es factible la realización del estudio.

13. REFERENCIAS

1. Alexander, C., & Sadiku, M. (2013). *Fundamentos de circuitos eléctricos*. McGraw-Hill.
2. Alfonzo, I. (1995). *Técnicas de investigación bibliográfica*. Contexto Ediciones.
3. Ballou, G. (2000). *The electrical engineering handbook*. CRC Press LLC.
4. Berrueta, A., Ursúa, A., San Martín, I., Eftekhari, A., & Sanchis, P. (2019). *Supercapacitors: electrical characteristics, modeling, applications, and future trends*. IEEE Access, 7, 50869-50896. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908558>
5. Boylestad, R. (2011). *Introducción al análisis de circuitos*. Pearson Educación.
6. Boylestad, R., & Nashelsky, L. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. Pearson Educación.
7. Carta Gonzáles, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., & Castro Gil, M. A. (2009). *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. Pearson Educación.
8. González Velasco, J. (2012). *Energías renovables*. Editorial Reverté.

9. Maxwell Technologies. (31 de Marzo de 2022). <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/>
10. Méndez, E., Arrobo, E., & Morocho, A. (2020). *Supercapacitores como aporte al desarrollo energético eléctrico, análisis comparativo mediante herramientas computacionales de simulación aplicadas*. Espacios, 41(14), 29. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/341031026_Supercapacitores_como_aporte_al_desarrollo_energetico_electrico_analisis_comparativo_mediante_herramientas_computacionales_de_simulacion_aplicadas
11. Mohan, N., Undeland, T., & Robbins, W. (2009). *Electrónica de potencia: convertidores, aplicaciones y diseño*. Mc Graw Hill.
12. Penella López, M. T., & Gasulla Forner, M. (2011). *Powering autonomous sensors an integral approach with focus on solar and RF energy harvesting*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1573-8>
13. Raza, W., Ali, F., Raza, N., Luo, Y., Kim, K.-H., Yang, J., . . . Kwon, E. (2018). *Recent advancements in supercapacitor technology*. Nano Energy, 52, 441-473. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.08.013>
14. Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Baptista, M. d. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
15. Transmission and distribution committee of the IEEE power and energy society. (2019). *IEEE Recommended practice for monitoring electric*

power *quality.* IEEE.
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8796486>

16. Twidell, J., & Weir, T. (2006). *Renewable energy resources*. Taylor & Francis.
17. Vasyliv, V. (2019). *Energía solar autónoma*. Independently published.
18. Young, H., & Freedman, R. (2013). *Física universitaria con física moderna*. PEARSON.
19. Yu, A., Chabot, V., & Zhang, J. (2013). *Electrochemical supercapacitors for energy storage and delivery*. CRC Press.