



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: SOBRE FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DEL  
ALMACENAJE DE ENERGÍA ELÉCTRICA ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE  
ALMACENAJE PARA LA HIDROELÉCTRICA CUTZÁN PARA SU POSTERIOR  
PARTICIPACIÓN EN EL MERCADO MAYORISTA COMO OFERTANTE DE POTENCIA Y  
RESERVAS DE ENERGÍA**

**Herbert Salvador Figueroa Higueros**

Asesorado por el Ma. Ing. Luis Eduardo Hernández González

Guatemala, agosto de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: SOBRE FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DEL  
ALMACENAJE DE ENERGÍA ELÉCTRICA ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE  
ALMACENAJE PARA LA HIDROELÉCTRICA CUTZÁN PARA SU POSTERIOR  
PARTICIPACIÓN EN EL MERCADO MAYORISTA COMO OFERTANTE DE POTENCIA Y  
RESERVAS DE ENERGÍA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**HERBERT SALVADOR FIGUEROA HIGUEROS**  
ASESORADO POR EL MA. ING. LUIS EDUARDO HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **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: SOBRE FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DEL  
ALMACENAJE DE ENERGÍA ELÉCTRICA ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE  
ALMACENAJE PARA LA HIDROELÉCTRICA CUTZÁN PARA SU POSTERIOR  
PARTICIPACIÓN EN EL MERCADO MAYORISTA COMO OFERTANTE DE POTENCIA Y  
RESERVAS DE ENERGÍA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela Estudio de Postgrado, con fecha 6 de agosto de 2018.

**Herbert Salvador Figueroa Higueros**

Guatemala, 13 de junio de 2018.

Director  
Otto Fernando Andrino González  
Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del (la) estudiante **Herbert Salvador Figueroa Higueros** carné número **201114065**, quien opto 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 Energía y Ambiente**.

Y si 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 Decimo, 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.

Sin otro particular, atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Juan C. Fuentes M.  
M.Sc. Hidrología  
Colegiado No. 2,504

MSc. Luis Eduardo Hernández González  
Asesor (a)

MSc. Ing. Juan Caños Fuentes M.  
Coordinador de Área  
Desarrollo social y energético

Luis Eduardo Hernández González  
Ingeniero Electricista  
Colegiado No. 10397

MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc archivo/LZLA.

**RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA:** Proceso de Graduación aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.



El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística de su Proyecto de Graduación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: DISEÑO DE INVESTIGACIÓN SOBRE FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DEL ALMACENAJE DE ENERGÍA ELÉCTRICA ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE ALMACENAJE PARA LA HIDROELÉCTRICA CUTZÁN PARA SU POSTERIOR PARTICIPACIÓN EN EL MERCADO MAYORISTA COMO OFERTANTE DE POTENCIA Y RESERVAS DE ENERGÍA presentado por el estudiante universitario HERBERT SALVADOR FIGUEROA HIGUEROS, considerando que el protocolo es viable para realizar el Diseño de Investigación procedo aprobarlo, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

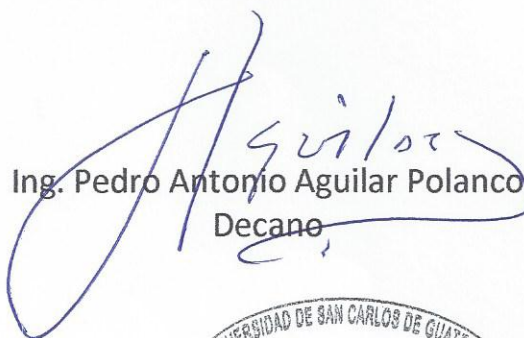
Ing. Otto Fernando Andrino González  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica





El Decano 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: SOBRE FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DEL ALMACENAJE DE ENERGÍA ELÉCTRICA ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE ALMACENAJE PARA LA HIDROELÉCTRICA CUTZÁN PARA SU POSTERIOR PARTICIPACIÓN EN EL MERCADO MAYORISTA COMO OFERTANTE DE POTENCIA Y RESERVAS DE ENERGÍA**, presentado por el estudiante universitario: **Herbert Salvador Figueroa Higueros**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, agosto de 2018

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por su increíble obrar en mi vida, por su instrucción y guía a lo largo de mis días y por el inmenso amor y misericordia que día a día me manifiesta.
- Mi madre** Bernarda del Pilar Higueros Godínez, por su gran esfuerzo en formar un hombre de bien , su apoyo incondicional, sus enseñanzas y consejos, por su arduo trabajo para proveerme todo lo necesario en mi formación, por su amor y cariño.
- Mi padre** Herbert Salvador Figueroa Pérez, por su amor y cariño, su apoyo incondicional, su esfuerzo en proveerme lo necesario a lo largo de mi formación y por siempre creer en mi y hacerme sentir que no había nada imposible de alcanzar.
- Mi hermana** Lisa Maria Figueroa Higueros, por ser un ángel en mi vida, por sus abrazos llenos de amor, por llenar mi vida de alegría y felicidad y recordarme lo linda que es la vida con una sonrisa.



**Mis abuelos**

Alfonso Higueros y Dominga de Higueros y Salvador Figueroa y Aura de Figueroa, por ser siempre tan amorosos, por apoyarme en todo, por sus cuidados, atención y por estar siempre orgullosos de mi.

**Mis hermanos,  
amigos y familiares**

Por siempre apoyarme en todo, por su amor y compartir momentos de alegría, tristeza, adversidades y éxitos.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por abrirme las puertas como a muchos guatemaltecos a la educación superior y la exigencia que ha culminado en formarme como profesional.

**Escuela de Ingeniería  
Mecánica Eléctrica**

Por haberme enseñado y formado a lo largo de mi carrera y por sus altos estándares que demandan lo mejor del alumno para que sea un excelente profesional que no se rinde ante ningún desafío.

**Mis padres**

Por apoyarme en todo momento, por confiar en mi, por darme las herramientas necesarias para alcanzar mis metas y por siempre manifestarme lo orgullosos que estaban de mi.

**Mis tíos y primos**

Por su apoyo en distintos momentos de mi vida , por los recuerdos inolvidables de momentos especiales, por sus consejos y por el privilegio de convivir con ellos.

**Mis hermanos,  
amigos y familiares**

Por los buenos tiempos compartidos, por ser una importante influencia en mi vida y por todo el apoyo brindado a lo largo de nuestra convivencia.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
1. INTRODUCCIÓN .....	VII
2. ANTECEDENTES .....	1
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
3.1. Pregunta principal.....	6
3.2. Preguntas auxiliares .....	6
4. JUSTIFICACIÓN .....	9
5. OBJETIVOS .....	11
5.1. General.....	11
5.2. Específicos .....	11
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	13
7. MARCO TEÓRICO.....	15
7.1. Energía eléctrica.....	15
7.2. Generación de energía eléctrica.....	16
7.3. Generación renovable en Guatemala.....	16
7.3.1. Beneficios de la energía renovable en Guatemala .....	17
7.3.2. Energía hidráulica.....	18

7.3.3.	Energía solar .....	24
7.3.4.	Energía eólica .....	25
7.3.5.	Energía de la biomasa .....	27
7.4.	Principales problemas en la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.....	28
7.5.	Mercado eléctrico de Guatemala .....	33
7.5.1.	Entidades y sus funciones.....	34
7.5.2.	Productos y servicios del mercado.....	34
7.5.3.	Funcionamiento del mercado .....	35
7.6.	Almacenamiento de energía .....	36
7.6.1.	Métodos electroquímicos de almacenamiento .....	38
7.7.	Clases de baterías .....	45
7.7.1.	Baterías de plomo-ácido.....	45
7.7.2.	Baterías de níquel-hierro (Ni-Fe).....	48
7.7.3.	Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd).....	50
7.7.4.	Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH) .....	50
7.7.5.	Baterías de iones de litio (Li-ion) .....	51
7.7.6.	Baterías de polímero de litio (LiPo) .....	52
7.7.7.	Baterías recargables SCiB Ion-Litio-Titánio y óxidos.....	53
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	57
9.	METODOLOGÍA .....	59
9.1.	Tipo de estudio.....	59
9.2.	Fases del estudio .....	59
9.3.	Definición operacional de variables.....	64
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN .....	67

11.	CRONOGRAMA.....	69
12.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	71



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Matriz energética de Guatemala .....	17
2.	Central Hidroeléctrica Chixoy, Guatemala .....	19
3.	Cuencas hidrográficas de Guatemala .....	23
4.	Central Fotovoltáica Horus Energy, Guatemala .....	25
5.	Central eólica viento blanco, Guatemala.....	27
6.	Biomasa para generación, Guatemala .....	28
7.	Dimensiones de cada Celda SCiB .....	54

### TABLAS

I.	Parámetros de la celda SCiB .....	56
II.	Parámetros de operación de distintos tipos de sistemas de almacenaje de energía.....	61
III.	Cronograma de actividades .....	69





## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente se cuenta con nuevas tecnologías para generación de energía eléctrica renovable, gracias a ello, se ha contribuido con el medio ambiente al reducir la cantidad de CO<sub>2</sub>, que se emite año tras año. Estos métodos de generación dependen directamente de factores variables e impredecibles como la irradiación del sol, flujo de agua o la velocidad y dirección del viento; es por ello que resulta complicado generar en todas las horas del día, de igual manera es difícil tener un buen control y manejo de dicha generación, debido a esto, la mayoría de generadores distribuidos renovables GDR'S en Guatemala, únicamente venden energía perdiendo un gran mercado al no participar en la venta de potencia, ya que no pueden garantizar ésta. En Guatemala, el administrador del mercado mayorista (AMM) del sector eléctrico vela, porque la demanda y la generación estén siempre niveladas, y se espera que en unos años la generación renovable sea mayor, la cual tiene que ser regulada para que no haya problemas en la red eléctrica.

La incorporación de sistemas de almacenamiento de energía en generadores distribuidos renovables (GDR'S) ayudaría al almacenar la energía, para luego ser despachada en distintas horas, donde no se cuente con suficiente radiación solar, caudal o viento. También pueden ser utilizados para regular la generación, y de esa manera ofrecer una oferta firme eficiente (OFE) o potencia asegurada al mercado mayorista, así como también participar en la venta de reservas de energía que son de alto costo, ya que son utilizadas cuando el SNE (Sistema Nacional Eléctrico) tiene problemas y colapsa.

Con los resultados de esta investigación, se determinará la mejor opción de sistemas de almacenamiento de energía para la venta de potencia y reservas de energía y se encontrará la factibilidad técnica-económica de la incorporación de dicho sistema en la hidroeléctrica Cutzán.

Se utilizará información técnica de distintos proveedores de sistemas de almacenaje de energía eléctrica, para realizar comparaciones de los principales parámetros y variables como: tiempo de retención, capacidad máxima de almacenaje, dimensiones, vida útil, precio y eficiencia para determinar la mejor tecnología. Se utilizará información publicada por el AMM sobre los precios de potencia, energía y reservas de energía para calcular las ganancias que se obtendrían. También se realizarán distintos gráficos, lineales y exponenciales para determinar la rentabilidad de la incorporación de dicho sistema.

Se calculará el tiempo de retorno de la inversión que tendría que realizar la hidroeléctrica Cutzán, basándose en los precios de potencia, energía y reservas de energía que maneja el mercado eléctrico guatemalteco.

En el capítulo uno, se hará una revisión bibliográfica sobre los fundamentos teóricos de la energía eléctrica y de la regulación de generación con fuentes renovables, describiendo las distintas tecnologías de almacenamiento. En el capítulo dos, se describirá la metodología que se utilizará para la realización de la investigación, la cual facilitará el control de los procesos y pasos a seguir para la recolección y análisis de datos. Después de haber realizado comparaciones, cálculos y análisis de los datos, en el capítulo 3 se darán a conocer los resultados de la investigación. En el capítulo 4, se discutirán dichos resultados, y por último, se realizarán conclusiones y recomendaciones para la hidroeléctrica Cutzán o cualquier GDR`S que vaya a hacer uso de la investigación.

## 2. ANTECEDENTES

En Guatemala, los trabajos de investigación relacionados a energías renovables se han enfocado más en implementación para generar energía eléctrica y no a la resolución de los problemas que estos conllevan; afortunadamente en otros países ya han empezado a buscar soluciones. A continuación se presentan algunas investigaciones que aportan datos importantes:

En la tesis: “Efecto del almacenamiento de energía en el mercado eléctrico mayorista de Colombia”, López, J. (2013), se describen las distintas tecnologías de almacenamiento, partiendo por el hidro-bombeo con principio mecánico, pasando por capacitores con principio electromagnético, baterías con principio químico hasta térmico que se encuentra en desarrollo. Dentro de la categoría de baterías se desglosan varias subcategorías que varían sus métodos y elementos que las conforman, se analiza la cantidad de energía que pueden almacenar, desventajas, ventajas y vida útil de cada una de ellas; puedan acoplar varios tipos para el almacenaje de generadores distribuidores renovables.

En la publicación: “Impactos de la generación distribuida fotovoltaica en la estabilidad del voltaje de la red eléctrica”, Joakim Widen, Ewa Wackelgard, Jukka Paatero, Peter Lund (2010), se determinó luego de realizar simulaciones en 8 redes eléctricas de baja tensión en Suecia, que todas las redes estudiadas pueden transportar una cantidad significativa de potencia inyectada por los paneles solares de hasta 5 KW por casa, pero se encontró que los beneficios

hablando de mitigar caídas de voltajes, y reducir pérdidas eran mayores si cada casa produce 1 KW.

En la tesis: “Sistemas de almacenamiento de energía”, Tarillo, J. (2012) , se habla de la necesidad de dar a conocer sobre la importancia del almacenamiento de energía, clasifican las diversas formas de almacenar la energía, las compara y concluye que el almacenamiento de energía contribuye a la estabilidad de la red, tanto de distribución como de transmisión, permite tener una capacidad de reserva en cualquier emergencia, reduce la necesidad de instalar nuevas plantas generadoras, permite utilizar la energía en el momento que ésta es más cara y que permite un uso eficiente de la generación existente.

En la publicación: “Efectos de generación distribuida fotovoltaica en el sistema de distribución de California ”, M.A. Cohen, D.S. Callaway (2016), se encontró que los flujos inversos de corriente, los picos de voltaje y variaciones presentes en la red dependen más del clima en el que se encuentran los paneles y la red , que de las características del alimentador en sí. También se determinó que las pérdidas de energía dependían más de las características del alimentador que del clima.

En la publicación: “Investigando el impacto de generación distribuida renovable y requerimiento de almacenaje de energía”, A.A. Solomon, Daniel M. Kammen (2016), se analizó la demanda anual por hora de California y se determinó que la generación solar y eólica son complementarias, presentando ventajas para la red, pero remarcando la necesidad de almacenar energía, se determinó que el almacenaje tiene que proveer una estrategia flexible del despacho de la energía, ya que dependiendo de la época del año la irradiación es distinta, y habrán meses en los que se requiere almacenar más que otros.

En la publicación: “Propiedades y usos del almacenamiento para mejorar la red eléctrica”, D. Faiman, G. Meron (2010), se presentaron resultados y proyecciones que demuestran que si utiliza un buen diseño de almacenaje y correcta sincronización, en un futuro la red eléctrica se podría operar en condiciones ideales con un factor de potencia igual a la unidad.

En la publicación: “Comienzo de operación de un sistema de almacenamiento de energía de gran escala, a través de baterías SCiB para la subestación Nishi-Sendai en Tohoku”, Electric Power Co.(2015), se determinó que el proyecto ayudaría a regular los cambios de frecuencia causados por las fluctuaciones de potencia que ocurren cuando se utilizan fuentes renovables, el proyecto presenta una gran cantidad de ventajas en la estabilización de la generación de electricidad y permite una expansión de los recursos renovables pudo almacenar grandes bloques de energía, Toshiba cumplió con la producción y entrega de las baterías de última generación SCiB llevándole 15 meses la instalación y adaptación del sistema de almacenaje de 40MW.

En la publicación: “Toshiba entrega sistema de almacenamiento de energía de baterías SCiB para regulación de frecuencia en Sardinia, Italia”, Rioji Sato (2015), se publicó que el 02 de julio del 2015 Toshiba T& D Europe S.P.A. completaron las pruebas del sistema de almacenamiento de 1MW, se le entregó al operador del sistema de transmisión italiano, Toshiba fue el primer proveedor de 7 competidores incluidos Samsung SDi y Siemens en instalar satisfactoriamente y completar las pruebas de dicho sistema. La principal aplicación fue regulación primaria y secundaria de frecuencia, regulación de voltaje y balance de potencia, el sistema también es capaz de operar desconectado de la red y arrancar, a partir de un apagón.



### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años, se han buscado nuevos métodos para producir energía sin perjudicar el medio ambiente, buscando la reducción de dióxido de carbono. La generación de energía por medio de fuentes renovables ha sido un gran avance y se vuelve una práctica más común en los hogares, industrias y plantas de generación. Es una forma muy llamativa no solo de contribuir con el ambiente sino de generar ganancias y aprovechar energía que proporciona la naturaleza.

En Guatemala no se han realizado estudios sobre la aplicación de sistemas de almacenaje de energía para regulación de fuentes renovables; es importante hacer estos estudios, debido a que el problema que ya están teniendo otros países consiste en que los usuarios generan más energía de la que consumen y ese excedente lo inyectan a la red, representando una cantidad significativa de energía, que es muy difícil de controlar. La potencia que pueden obtener los generadores distribuidos renovables depende de factores variables por el cambio climático como la velocidad y dirección del viento, radiación solar o caudal de agua. Una planta solar con una situación tan simple y común como una nube que pose sobre sus paneles perdería casi toda su potencia; es por eso que la mayoría de GDR'S en Guatemala junto con la hidroeléctrica Cutzán están perdiendo una oportunidad en el mercado eléctrico mayorista al no ofrecer potencia, energía en distintas bandas horarias y reservas de energía.

El número de usuarios autoprodutores y GDR'S que tiene Guatemala aún no se puede comparar con los que tienen otros países más desarrollados

es por eso que en este momento no alcanza a perjudicar la estabilidad de la red eléctrica del país, pero se espera que la cantidad de personas que utilizarán éstas tecnologías limpias será mayor en unos años, al ser mayor la cantidad de energía que se inyecte en la red, mayor impacto causará en ésta.

La hidroeléctrica Cutzán ubicada en Chicacao Suchitepequez genera 1,95 MW, la cual es una cantidad de potencia significativa que podría ser aprovechada de mejor manera, es por eso que se estudiará la eficiencia de distintos sistemas para almacenar energía que, luego será vendida en distintas bandas horarias (diurna, pico y valle), según lo demande el sistema eléctrico nacional. También para ofertar potencia y reservas de energía.

Esto lleva a plantear la pregunta principal del estudio:

### **3.1. Pregunta principal**

¿Cuál sería la factibilidad técnica económica de la implementación de un sistema de almacenaje de energía eléctrica en la hidroeléctrica Cutzán, para su posterior participación en el mercado mayorista como ofertante de potencia y reservas de energía?

Para responder a ésta interrogante se deberán responder antes las siguientes preguntas auxiliares.

### **3.2. Preguntas auxiliares**

- ¿Qué sistemas de almacenaje de energía eléctrica existen y cuál es la mejor opción con base a sus parámetros de operación?



- ¿Cuál es el área disponible en la hidroeléctrica para la instalación del sistema de almacenaje de energía y qué potencia es posible almacenar con dicha área?
- ¿Cuál sería el costo de la incorporación del sistema de almacenaje de energía en la hidroeléctrica Cutzán?
- ¿Cuál sería la tasa interna de retorno, según la inversión y el precio de la energía, potencia y reservas de energía en el mercado eléctrico guatemalteco y su marco regulatorio?



## 4. JUSTIFICACIÓN

La investigación a realizar se enmarca en la línea de investigación sobre eficiencia energética de la maestría en Energía y Ambiente.

Las pérdidas de energía son inevitables, ya que existen varios tipos de pérdidas por diversos factores. La hidroeléctrica Cutzán, así como la mayoría de generadores distribuidos renovables tiene dificultad para vender potencia en el mercado eléctrico, debido a la intermitencia y baja fiabilidad de las fuentes renovables, pero la incorporación de un sistema de almacenaje de energía permitiría que fuera posible aprovechar la energía y venderla como potencia.

Al finalizar ésta investigación, se tendrán datos que ayudarán a interpretar la viabilidad de la incorporación de un sistema de almacenaje de energía, en la Hidroeléctrica Cutzán.

La instalación de un sistema de almacenamiento de energía eléctrica ayuda y beneficia directamente a la hidroeléctrica Cutzán o cualquier otro generador distribuido renovable abriéndole mercado en la venta de potencia, energía en distintas bandas horarias y reservas de energía.

El administrador de mercado mayorista (AMM), el Ministerio de Energía y Minas (MEM) y la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), son instituciones que se encargan de normar, administrar y monitorear la distribución y transmisión de energía eléctrica y se ven directamente beneficiados, ya que lo que ellos buscan es que la calidad del suministro sea cada vez mejor, y principalmente con el almacenamiento de energía se podrían

hacer nuevos contratos con generadoras solares, eólicas e hidráulicas, ya que estas ofrecen la energía más barata, pero hasta el momento no fueron capaces de venderla en las horas que más se necesita, con esto todos los usuarios del país tendrían un ahorro en el consumo, ya que el precio por KW/h disminuiría. También estas instituciones tendrían más opciones para comprar reservas de energía.

La implementación de las recomendaciones de esta investigación también contribuirá con el medio ambiente, ya que si se reducen las pérdidas disipadas en forma de calor, también se reduce el efecto invernadero.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Definir la factibilidad técnica económica de la implementación de un sistema de almacenaje de energía eléctrica en la hidroeléctrica Cutzán, para su posterior participación en el mercado mayorista como ofertante de potencia y reservas de energía.

### **5.2. Específicos**

- Comparar qué sistemas de almacenaje de energía eléctrica existen y determinar cuál es la mejor opción con base a sus parámetros de operación.
- Definir el área disponible en la hidroeléctrica para la instalación del sistema de almacenaje de energía y determinar la potencia que es posible almacenar con dicha área.
- Determinar el costo de la incorporación del sistema de almacenaje de energía, en la hidroeléctrica Cutzán.
- Calcular la tasa interna de retorno, según la inversión y el precio de la energía, potencia y reservas de energía en el mercado eléctrico guatemalteco y su marco regulatorio.



## **6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

El avance tecnológico con la incorporación de productos nuevos al mercado es responsable de la difícil administración de la energía para fuentes renovables intermitentes, pero el mismo es la solución, ya que conforme se hagan sistemas de almacenaje de energía más eficientes mejor será el control que se podrá tener en la inyección de las fuentes renovables a la red, la investigación ayudará a dar las mejores opciones de almacenamiento basándose en el análisis del comportamiento y rendimiento de dichos sistemas; después de analizar las opciones se establecerá la factibilidad técnica económica de dicha incorporación en la hidroeléctrica Cutzán.

El administrador de mercado mayorista (AMM) podría considerar más opciones para comprar reservas de energía, ya que cuando el Sistema Eléctrico Nacional tiene alguna perturbación o algún generador se desconecta sin previo aviso y hace falta una gran cantidad de potencia, ellos tienen que ver de donde es posible obtener rápidamente dicha potencia, por el momento tienen limitados a ciertos generadores dejando un 3 % de su capacidad total en reserva y como la mayoría de los generadores que vende reservas de energía son de bunker o de combustibles resulta bastante costoso y lento, ya que para que estos generadores puedan ofrecer potencia tardan alrededor de 30 minutos, también tienen reservas rodantes operativas que consiste en que los generadores operan en vacío estando listos para entrar cuando se les necesite, con la incorporación de un sistema de almacenamiento de energía sería posible tomar a muchos generadores de fuentes renovables en cuenta.

La investigación será de gran utilidad para otros GDR'S que con base en el caso de la hidroeléctrica Cutzán podrán comparar su situación y analizar si les es rentable invertir en un sistema de esta clase, ayudará también a que las redes de distribución en un futuro sean más estables al tener los GDR'S más control sobre la generación proveniente de fuentes renovables.



## **7. MARCO TEÓRICO**

### **7.1. Energía eléctrica**

La energía eléctrica se representa usualmente como corriente eléctrica, en otras palabras, como el desplazamiento de cargas eléctricas negativas, o electrones, a través de un conductor metálico o semimetálico que se conoce como “cable” como consecuencia de la diferencia de potencial o voltaje que un generador esté aplicando en sus extremos.

Cuando se acciona un switch o interruptor, se cierra o se abre un circuito eléctrico y se genera o cesa el movimiento de electrones, a través del conductor. Las cargas eléctricas que se mueven o desplazan forman parte de los átomos de la sustancia del cable, que suele ser metálica, ya que las sustancias metálicas al poseer mayor cantidad de electrones libres que otros materiales o sustancias son los mejores conductores de la electricidad. La mayor parte de la energía eléctrica que se consume en el mundo proviene de uso de los denominados tomacorrientes, éstos se alimentan de la energía suministrada por las compañías eléctricas, a la vez alimentan los distintos aparatos eléctricos: secadoras, lavadoras, electrodomésticos, televisores, etc. que se desean utilizar, a través de las correspondientes transformaciones; por ejemplo, cuando la energía eléctrica llega a una encerradora, ésta se convierte en un tipo de energía mecánica, luego calórica y en algunos casos lumínica, gracias a un motor eléctrico y a las distintas piezas mecánicas del aparato. (Gabarda,1994).

## **7.2. Generación de energía eléctrica**

La energía eléctrica no se pueda encontrar de forma libre en la naturaleza de una manera que pueda ser aprovechable. Se puede observar en las tormentas eléctricas, pero existe una gran dificultad para almacenar y controlar tal cantidad de energía que, prácticamente no se puede aprovechar. (Archer,2010).

Existen diversas formas de generar o producir energía eléctrica que se puede clasificar en renovables o no-renovables. Las formas de generar energía eléctrica renovables son aquellas en que no se utiliza combustible o el combustible es inagotable (energía solar, energía eólica, energía hidroeléctrica, energía geotérmica, etc.). Por otra parte las formas de generar energía eléctrica no-renovable requieren de un combustible que por abundante que sea tiende a agotarse como la energía nuclear, energía térmica (carbón, petróleo, gas...), etc. (Archer,2010).

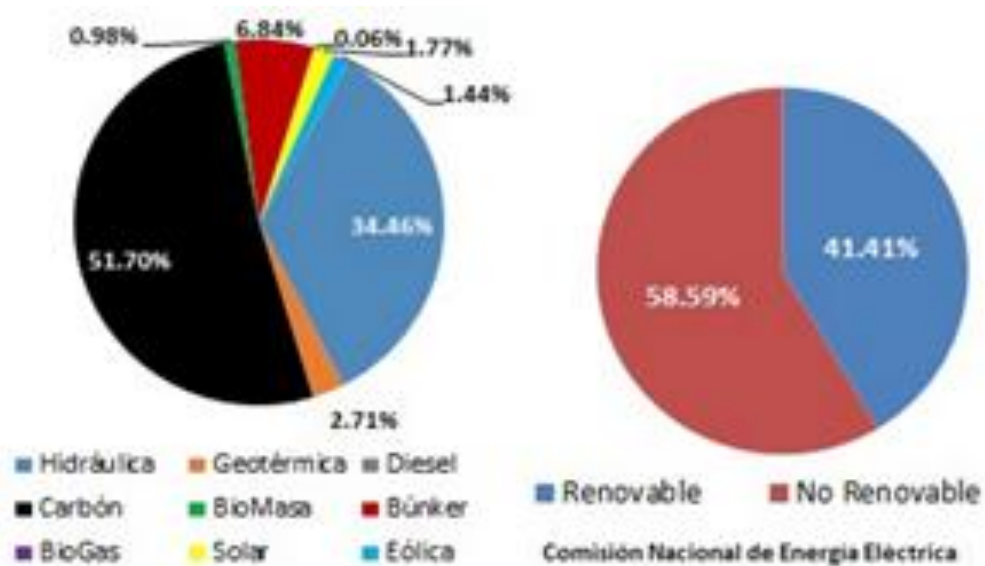
## **7.3. Generación renovable en Guatemala**

Según la AGER (Asociación de Generadores con Energías Renovables,2016) actualmente en Guatemala, la política energética gubernamental, tiene como objetivo diversificar y revertir, en pro de las energías renovables, la matriz energética del país, que en la actualidad depende principalmente de tecnologías contaminantes. Esto es bastante esperanzador, pues Guatemala tiene un potencial enorme de producción de energía renovable, del cual solo estamos aprovechando alrededor del 15 %. Son capaces de producir suficiente energía para cubrir el 100 % de la demanda del país y generar un excedente que podría exportar, creando fuentes de trabajo, dinamizando la economía y cuidando y planeta.

### 7.3.1. Beneficios de la energía renovable en Guatemala

- El más bajo costo de electricidad a largo plazo.
- Estabilidad en la tarifa al usuario final.
- Independencia energética y reducción de la factura petrolera.
- Energía limpia, no emisión de gases de efecto invernadero.
- Inversión, empleo y desarrollo local, rural.
- Importantes ingresos fiscales una vez agotado período de incentivos.
- Aplicación a gran, mediana y baja escala.
- Imagen verde para el país.

Figura 1. **Matriz energética de Guatemala**



Fuente: CNEE, [http://www.cnee.gob.gt/wp/?page\\_id=2436](http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=2436) [Consulta: 04 de febrero de 2018]

### **7.3.2. Energía hidráulica**

Según el MEM (Ministerio de Energía y Minas de Guatemala, 2012), la energía hidráulica es la obtenida del agua en movimiento. La fuerza del agua se transforma en energía mecánica al mover las aspas de una turbina en una central hidroeléctrica, donde se transforma en energía eléctrica. Las presas hidráulicas se destinan a la producción de energía eléctrica o energía mecánica como el caso de beneficios de café y aserraderos de países del norte.

Es la más abundante en Guatemala, debido a la cantidad de ríos con que cuenta y una orografía privilegiada para pequeñas y medianas centrales hidroeléctricas. Una central hidroeléctrica consta de las siguientes partes:

- Embalse: lugar donde se acumula el agua del río. Además regula el caudal del río.
- Presa: muro grueso cuya función es retener el agua del embalse:
  - Aliviaderos: salidas de agua que sirven para regular el volumen de agua almacenada.
  - Tuberías forzadas: enlaza el embalse con la sala de máquinas, y soporta gran presión.
  - Canal de descarga: canal por el que se redistribuye el agua al río.
- Central o sala de máquinas.- Edificio donde se sitúan:
  - Turbinas: máquinas en las que se transforma energía cinética del agua en energía de rotativa.
  - Generador-alternador: dispositivo unido a la turbina que convierte la energía de rotación en energía eléctrica.

- Transformador: transforma la energía que se produce en el generador en una corriente de baja intensidad, para transportarla a largas distancias de la central.

Figura 2. **Central Hidroeléctrica Chixoy, Guatemala**



Fuente: MEM, <http://www.mem.gob.gt/energia/energias-renovables/energia-hidraulica/>  
[Consulta: 04 de febrero de 2018]

Representantes de más de 170 países llegaron a un consenso en la Conferencia de Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible, en Johannesburgo (2002), y en el 3º Foro Mundial del Agua, en Kyoto (2003): toda generación hidroeléctrica es renovable y merecedora de apoyo internacional por las siguientes razones:

- Hidroelectricidad es una fuente renovable de energía:

La hidroelectricidad aprovecha la energía del agua corriente de los ríos para producir electricidad sin reducir la cantidad del agua. Por este motivo, todos los emprendimientos hidroeléctricos, de pequeño o gran porte, al hilo de agua o de almacenamiento, se encuadran dentro del concepto de fuente de energía renovable.

- La hidroelectricidad viabiliza la utilización de otras fuentes renovables:

Las centrales hidroeléctricas con embalses ofrecen flexibilidad operacional incomparable, ya que pueden responder inmediatamente ante las fluctuaciones de la demanda de electricidad. La flexibilidad y capacidad de almacenamiento de las centrales eléctricas las hacen el medio más eficiente y económico para dar soporte al empleo de fuentes intermitentes de energía renovable, como la energía solar o la energía eólica.

- La hidroelectricidad promueve la seguridad energética y la estabilidad de los precios:

El agua de los ríos es un recurso doméstico y, al contrario del combustible o gas natural, no está sujeta a fluctuaciones de mercado. Además, la hidroelectricidad es la única gran fuente renovable de electricidad y su relación costo beneficio, eficiencia, flexibilidad y confiabilidad ayudan a optimizar el uso de las usinas térmicas.

- La hidroelectricidad contribuye al almacenamiento de agua potable:

Los embalses de las centrales hidroeléctricas colectan el agua de la lluvia, que puede entonces ser utilizada para consumo o para irrigación. Al almacenar agua, ellos protegen los acuíferos contra el agotamiento y reducen nuestra vulnerabilidad a inundaciones y sequías.

- La hidroelectricidad ayuda a combatir cambios climáticos:

El ciclo de vida de la hidroelectricidad produce cantidades muy pequeñas de gases del efecto invernadero (GHG – “*green house gases*”). Al emitir menos GHG que centrales movidas a gas, carbón o petróleo, la hidroelectricidad puede ayudar a retardar el calentamiento global. Aunque solamente el 33 % del potencial hidroeléctrico disponible haya sido aprovechado, la hidroelectricidad actualmente evita la emisión de GHG correspondiente a la quema de 4 400,000 de barriles de petróleo diariamente, en ámbito mundial.

- La hidroelectricidad mejora el aire que respira:

Las usinas hidroeléctricas no producen contaminantes del aire. Muy frecuentemente, ellas sustituyen la generación a partir de combustibles fósiles, reduciendo así la lluvia ácida y el humo. Además, los emprendimientos hidroeléctricos no generan subproductos tóxicos.

- La hidroelectricidad ofrece contribución significativa para el desarrollo:

Las instalaciones hidroeléctricas traen electricidad, caminos, industria y comercio para las comunidades, desarrollando así la economía, ampliando el acceso a la salud y a la educación, mejorando la calidad de vida. La

hidroelectricidad es una tecnología conocida y comprobada hace más de un siglo. Sus impactos son bien comprendidos y administrables, mediante medidas de mitigación y compensación de daños. Ofrece un vasto potencial y está disponible donde el desarrollo es más necesario.

- Hidroelectricidad significa energía limpia y barata para hoy y mañana:

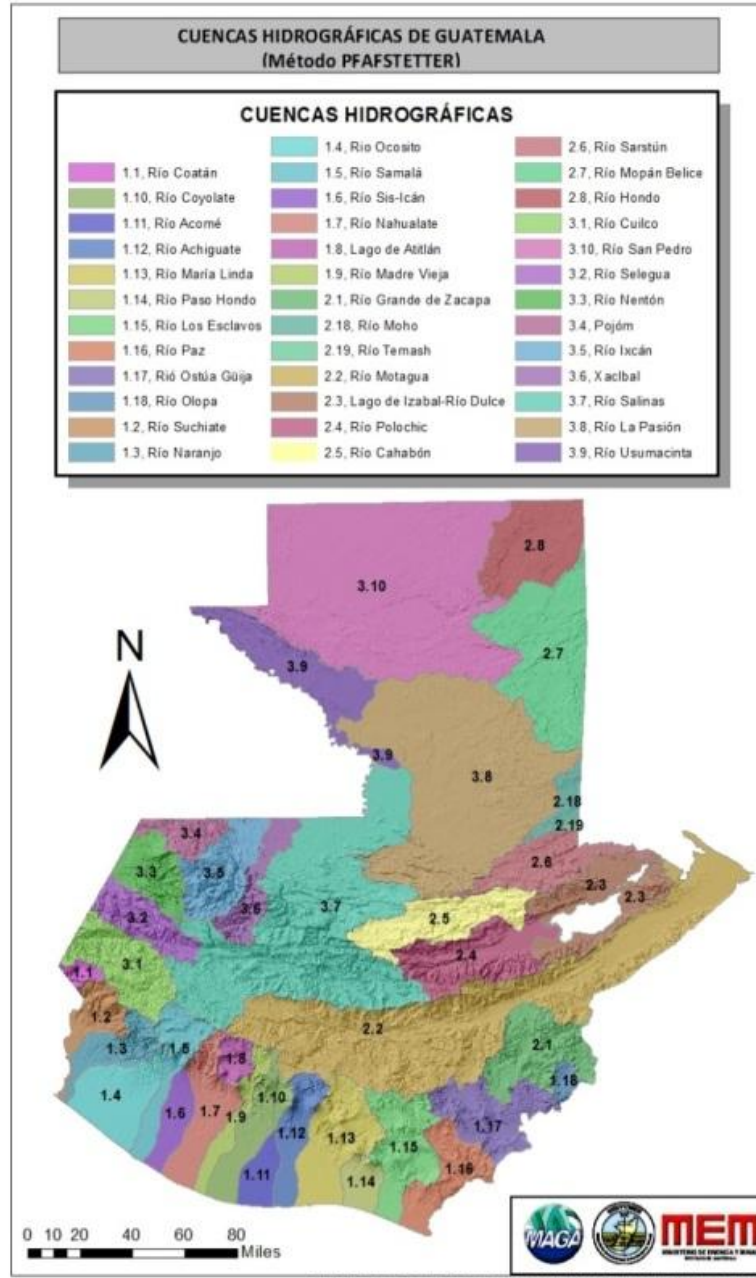
Con un promedio de vida útil de 50 a 100 años, los emprendimientos hidroeléctricos son inversiones de largo plazo que pueden beneficiar a varias generaciones. Se pueden actualizar fácilmente con la incorporación de tecnologías más recientes, y tienen costos muy bajos de operación y mantenimiento.

- La hidroelectricidad es un instrumento fundamental para el desarrollo sostenible:

Los emprendimientos hidroeléctricos que son desarrollados y operados de manera económicamente viable, ambientalmente sensata y socialmente responsable, representan desarrollo sostenible en su mejor concepción. Esto es, “desarrollo que atiende hoy a las necesidades de las personas, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de atender a sus propias necesidades” (Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo, 1987).



Figura 3. Cuencas hidrográficas de Guatemala



Fuente: MEM, <http://www.mem.gob.gt/energia/energias-renovables/energia-hidraulica/>  
 [Consulta: 04 de febrero de 2018].

### **7.3.3. Energía solar**

Según el MEM (2012), la energía solar es la energía del sol que, a través de su radiación produce calor e iluminación. Es una energía que necesita sistemas de captación y de concentración; es constante e intermitente (por lo que se necesita sistemas de almacenamiento). Las aplicaciones más conocidas son para paneles solares que captan la energía del sol con una superficie oscura, y se utiliza para calentar agua, para generar vapor, que luego de un proceso produce electricidad, transforma la energía solar en eléctrica, a través de células fotovoltaicas (formadas por silicio).

Sus ventajas son que es una fuente de energía inagotable, escaso impacto ambiental, no produce residuos perjudiciales para el medio ambiente, distribuida por todo el mundo, y con más intensidad en las zonas tropicales, costos muy reducidos en operación, una vez instalada, no hay dependencia de las compañías suministradoras y su mantenimiento es sencillo.

Sus desventajas son que los paneles fotovoltaicos contienen agentes químicos peligrosos, puede afectar a los ecosistemas por la extensión ocupada por los paneles, el impacto visual es negativo.

Figura 4. **Central Fotovoltáica Horus Energy, Guatemala**



Fuente: MEM, <http://www.mem.gob.gt/energia/energias-renovables/energia-solar/> [Consulta: 04 de febrero de 2018].

#### **7.3.4. Energía eólica**

Según el MEM (2012), la energía eólica es la energía producida por el viento. El viento es producido por el calentamiento de las masas de aire. Al calentarse pesan menos y ascienden, y las masas de aire frío descienden. Las máquinas capaces de convertir el viento en energía se llaman aerogeneradores, y constan de las siguientes partes:

- Sistema de captación o rotor.- Conjunto de palas que captan la energía del viento y la transforman en energía mecánica de rotación.
- Soporte.- Lo constituye una torre que soporta el rotor.

- Sistema de orientación de las palas del rotor.- Capaces de variar su posición para que las palas estén siempre perpendiculares y así aprovechar su energía.
- Sistema de regulación.- Permiten que las aspas del rotor giren siempre a velocidad constante.
- Sistema de transmisión y de almacenamiento.

Las ventajas son que evita la importación de carbón, petróleo y materiales radiactivos (favorece el autoabastecimiento), evita grandes impactos ambientales como la lluvia ácida y el efecto invernadero, es barata y no produce residuos, la tecnología necesaria para instalarla es sencilla, crea puestos de trabajo, los espacios ocupados pueden permitir la actividad agrícola y animal, no depende del cambio del mercado internacional.

Sus desventajas son los impactos sobre la fauna y flora, seguridad para evitar los accidentes provocados al caer los aerogeneradores, impacto visual, ruido a corta distancia.

Figura 5. **Central eólica viento blanco, Guatemala**



Fuente: MEM, <http://www.mem.gob.gt/energia/energias-renovables/energia-eolica/> [Consulta: 04 de febrero de 2018].

### **7.3.5. Energía de la biomasa**

Según el MEM (2012), la energía de la biomasa es la que se proviene de residuos orgánicos de origen animal y vegetal, como bagazo de caña de azúcar, residuos de café, maíz, arroz y otros. Los biocombustibles también están incluidos dentro de la biomasa. Éstos son producto de reacciones químicas de residuos animales o vegetales y de fermentaciones de subproductos vegetales.

Sus ventajas indican que pueden reducir la dependencia de los derivados del petróleo, ahorran divisas, reducen la emisión de CO<sub>2</sub>, el uso de algunos residuos reducen la contaminación ambiental (desechos de ganado porcino y vacuno, por ejemplo).

Entre sus desventajas se tienen que sus grandes extensiones de cultivos pueden desplazar cultivos alimenticios humanos, incrementando o provocando la crisis alimentaria, su precio podría ser mayor a los derivados del petróleo al considerar los agregados ambientales.

Figura 6. **Biomasa para generación, Guatemala**



Fuente: MEM, <http://www.mem.gob.gt/energia/energias-renovables/energia-de-la-biomasa/>  
[Consulta: 04 de febrero de 2018].

#### **7.4. Principales problemas en la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica**

- Apagón eléctrico

Un corte de energía se define como una condición de tensión cero en la alimentación eléctrica que dura más de dos ciclos (40 ms). Puede ser causado

por el encendido de un interruptor, un problema en la instalación del usuario, un fallo en la distribución eléctrica o un fallo de la red comercial. Esta condición puede llevar a la pérdida parcial o total de datos, corrupción de archivos y daño del *hardware* (Gabarda ,1994).

Durante la historia de la humanidad ha habido varios apagones eléctricos en el mundo, por varias causas, ya sean fallas humanas, por desperfectos en los equipos electrónicos, por sobrecarga, por corto circuito o por inclemencias del tiempo, también se han realizado algunos apagones intencionales, en el año 2007 y 2009, en protesta al cambio climático.

Uno de los apagones más recordados de la historia fue el de Nueva York, el 9 de noviembre de 1965, además de haber paralizado a la metrópolis por 24 horas, es también muy recordado, porque después de cumplirse nueve meses del apagón, hubo una cantidad de nacimientos más alta de lo normal. El más reciente ocurrió en Chile, que afectó a casi todo el país, poco después de los terremotos que azotaron a ese país (Gabarda,1994).

- Ruido eléctrico:

El ruido eléctrico de línea se define como la interferencia de radio frecuencia (RFI) e interferencia electromagnética (EMI) y causa efectos indeseables en los circuitos electrónicos de los sistemas informáticos.

Las fuentes del problema incluyen motores eléctricos, relés, dispositivos de control de motores, transmisiones de radiodifusión, radiación de microondas y tormentas eléctricas distantes (Gabarda 1994).

RFI, EMI y otros problemas de frecuencia pueden causar errores o pérdida de datos almacenados, interferencia en las comunicaciones, bloqueos del teclado y del sistema.

Según Gabarda (1994), los picos de alta tensión ocurren cuando hay repentinos incrementos de tensión en pocos microsegundos. Estos picos normalmente son el resultado de la caída cercana de un rayo, pero pueden existir otras causas también. Los efectos en sistemas electrónicos vulnerables pueden incluir desde pérdidas de datos hasta deterioro de fuentes de alimentación y tarjetas de circuito de los equipos. Son frecuentes los equipos averiados por esta causa.

- Tensiones

:

- Una sobretensión tiene lugar cuando la tensión supera el 110 % del valor nominal. La causa más común es la desconexión o el apagado de grandes cargas en la red. Bajo esta condición, los equipos informáticos pueden experimentar pérdidas de memoria, errores en los datos,
- Apagado del equipo y envejecimiento prematuro de componentes electrónicos.
- Una caída de tensión comprende valores de tensión inferiores al 80 % o 85 % de la tensión normal durante un corto período. Las posibles causas son: encendido de equipamiento de gran magnitud o de motores eléctricos de gran potencia y la conmutación de interruptores principales de la alimentación



(interna o de la usina). Una caída de tensión puede tener efectos similares a los de una sobretensión.

- Un transitorio de tensión tiene lugar cuando hay picos de tensión de hasta 150 000 voltios con una duración entre 10 y 100  $\mu$ s. Normalmente son causados por arcos eléctricos y descargas estáticas. Las maniobras de las usinas para corregir defectos en la red que generan estos transitorios, pueden ocurrir varias veces al día. Los efectos de transitorios de este tipo pueden incluir pérdida de datos en memoria, error en los datos, pérdida de los mismos y solicitaciones extremas en los componentes electrónicos.
- Una variación de frecuencia involucra un cambio en la frecuencia nominal de la alimentación del equipo, normalmente estable en 50 o 60 Hz dependiendo esto de la ubicación geográfica. Este caso puede ser causado por el funcionamiento errático de grupos electrógenos o por inestabilidad en las fuentes de suministro eléctrico. Para equipos electrónicos sensibles, el resultado puede ser la corrupción de datos, apagado del disco duro, bloqueo del teclado y fallos de programas.
- Intermittencia en la generación con fuentes renovables:

Las llamadas energías renovables variables presentan intermitencia en la disponibilidad de los recursos. Ello puede condicionar por una parte, la rentabilidad de proyectos que utilizan este tipo de energía. Y por otra, afectar la adecuada operación de los sistemas eléctricos. Cuando se habla de la intermitencia, se referimos a ambos: la variabilidad y la incertidumbre en la disponibilidad de cualquier recurso. Se entiende por variabilidad los cambios de

una cierta condición ocurridos en el transcurso del tiempo. Por otro lado, que una variable tiene asociado un alto grado de incertidumbre cuando existe una gran dificultad en predecirla con precisión.

En este contexto, se debe entender que cualquier tipo de tecnología de generación está sujeta a variabilidad (paro por mantención programada) e incertidumbre (paro por falla del sistema). No obstante, en el caso de proyectos eólicos y solares, la generación con dichos recursos renovables se caracteriza por tener una alta intermitencia asociada a las condiciones climáticas. Por ejemplo, si se comparan los datos de la velocidad del viento entre diferentes días de un mes determinado lo más probables es que tengamos una gran variabilidad de los datos. A su vez, la velocidad del viento presenta una gran incertidumbre dado que es muy difícil de predecir con exactitud.

Cabe destacar que la intermitencia es diferente entre la energía eólica y solar, puesto que queda determinada por las condiciones climáticas del lugar. Por ejemplo, en el caso del norte de Chile, dado que las condiciones climáticas permiten disponer de días despejados durante casi todo el año, la radiación solar puede ser predicha con mayor precisión. A diferencia de la velocidad del viento.

Si estos fallos son repetidos pueden ocasionar pérdidas dinerarias muy altas en empresas e industrias. Un elemento que puede ayudar a suplir este tipo de fallos eléctricos y ofrecer un suministro eléctrico seguro es con la instalación de un sistema de alimentación Ininterrumpida(Gabarda,1994).

## **7.5. Mercado eléctrico de Guatemala**

La reforma del Sector Eléctrico en Guatemala, se inició con la emisión de su Marco Legal establecido en la Ley General de Electricidad (Decreto 93-96 del Congreso de la República de Guatemala) promulgada el 15 de noviembre de 1996). Posteriormente se emitieron el Reglamento de la Ley General de Electricidad (Acuerdo 256-97 del 2 de abril de 1997) y el Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista –AMM- (Acuerdo 299-98 del 1 de junio de 1998).

A partir de esas fechas se han emitido normas técnicas de transmisión y distribución, normas de coordinación comercial y operativa y procedimientos técnicos que complementan el marco regulatorio (CNEE, 1997).

Los principios generales de la Ley General establecen la libertad de la instalación de centrales generadoras, las cuales no requieren de autorizaciones por parte del Estado, salvo las establecidas en la Constitución de la República y las Leyes del País, incluyendo las referidas a medio ambiente, protección a las personas, a sus derechos y sus bienes. Así mismo, el uso de bienes del Estado requerirá la respectiva autorización del Ministerio de Energía y Minas-MEM- cuando la potencia de la hidroeléctrica sea mayor de 5 Mw.

El transporte y la distribución de electricidad son regulados y sujetos a autorización cuando utilizan bienes de dominio público (CNEE, 1997).

En relación a las tarifas de peaje son reguladas cuando no hay acuerdo entre las partes y las tarifas de distribución final están sujetos a regulación y son calculadas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

### **7.5.1. Entidades y sus funciones**

La reforma redefinió y separó las funciones en: normativas, regulatorias, administrativas y empresariales del Subsector Eléctrico. El Ministerio de Energía y Minas (MEM) es el órgano del Estado responsable de formular y coordinar las políticas, planes del estado, programas indicativos relativos al subsector eléctrico y aplicar esta Ley y su Reglamento (AMM, 1998).

Las funciones regulatorias y normativas son funciones de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), el cual es un órgano técnico del MEM con independencia funcional para el ejercicio de sus atribuciones. La CNEE además determina los precios y calidad de la prestación de los servicios de transporte y distribución sujetos a autorizaciones y debe asegurar las condiciones de competencia en el Mercado Mayorista de Electricidad.

La administración y operación del Sistema Nacional Interconectado está a cargo del Administrador del Mercado Mayorista de Electricidad – AMM-, el cual es un ente de carácter privado y cuyas funciones son la coordinación de la coordinación y despacho del Sistema Eléctrico Interconectado, el establecimiento de precios de mercado de corto plazo, llevar a cabo las transacciones de compra y venta en el mercado mayorista y garantizar la seguridad y el abastecimiento de Energía Eléctrica (CNEE, 1997).

### **7.5.2. Productos y servicios del mercado**

Los productos y servicios que se compran y se venden en el Mercado Mayorista son Potencia Eléctrica, Energía Eléctrica, Servicios de Transporte de Energía Eléctrica y Servicios complementarios para el buen funcionamiento y calidad del Sistema Eléctrico (AMM, 1998).

Derivado de la Reforma se estableció una nueva estructura a partir de la segmentación de la industria eléctrica en cuatro actividades principales: generación, transmisión, comercialización y distribución. Con la reforma se privatizó la mayoría de la distribución y en forma parcial la generación.

Por el lado de la oferta (producción) la apertura es total; mientras que por el lado de la demanda (consumidores), la apertura está limitada a los grandes usuarios. En consonancia con los cambios mencionados anteriormente, se establece la apertura de las redes de transmisión, subtransmisión y distribución, así como la conformación del Mercado Mayorista, al cual concurren compradores y vendedores para realizar operaciones de corto plazo y conciliar las transacciones efectuadas (AMM, 1998).

### **7.5.3. Funcionamiento del mercado**

El diseño y concepción del mercado rige su intercambio mediante el mercado de contratos a término o de futuros y el mercado de oportunidad o spot. Los agentes tienen libertad de adquirir sus requerimientos de potencia y energía (o la colocación de su producción) con todos los otros agentes. Las distribuidoras deben de garantizar en el mercado a término el suministro a sus usuarios regulados (AMM, 1998).

La reforma llevada a cabo y la estructura implementada en el subsector eléctrico tienen por objetivo promover la participación privada, fomentar la competencia y los mecanismos de mercado, estimular el incremento del sector eléctrico, aumentando la oferta, la demanda y la cobertura eléctrica, al tiempo que se reduce la participación del Estado en el subsector. De esta forma, el Mercado de Electricidad ha evolucionado desde un sistema centralizado dominado por un monopolio estatal hacia un sistema de Mercado Mayorista

abierto. De acuerdo a datos del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala, el índice de cobertura eléctrica a nivel nacional al 31 de diciembre del 2012 es del 85,7 % (AMM, 1998).

El Sistema de Generación está conformado por: centrales hidroeléctricas, turbinas de vapor, turbinas de gas, motores de combustión interna y centrales geotérmicas. El sistema de transporte está conformado por el sistema principal y el sistema secundario. estando el sistema principal compartido por los generadores y las interconexiones a otros países, y operando básicamente en tres niveles de voltaje: 230, 138, y 69 kV. El sistema secundario es el medio de interconexión de un generador a la red principal (AMM, 1998).

El sistema de distribución está integrado por la infraestructura de distribución – líneas, subestaciones y las redes de distribución – que opera en tensiones menores a 34.5 kV. Las principales empresas distribuidoras, coordinadas por la Asociación del Mercado Mayorista, son: Empresa Eléctrica de Guatemala, Distribuidora de Electricidad de Occidente, Distribuidora de Electricidad de Oriente y Empresas Eléctricas Municipales (AMM, 1998).

## **7.6. Almacenamiento de energía**

El almacenamiento de energía es un proceso complejo que se lleva haciendo por la naturaleza desde miles de millones de años - por ejemplo, la energía presente en la creación inicial del universo fue puesta en libertad en forma de estrellas como el Sol, y ahora está siendo utilizada directamente por los seres vivos (a través de la energía solar), o indirectamente (por ejemplo, por el aumento de los cultivos o de la conversión en electricidad en las células solares). Los sistemas de almacenamiento de energía en el uso comercial de la actualidad se traducen en términos generales, en sistemas de almacenamiento

mecánicos, eléctricos, químicos, biológicos, nucleares y térmicos (Oliveira, 2016).

El almacenamiento de energía se convirtió en un factor dominante en el desarrollo económico con la introducción generalizada de electricidad y químicos combustibles refinados, como la gasolina, el queroseno y el gas natural en 1800. A diferencia de otros métodos comunes de almacenamiento de energía utilizadas empleados anteriormente, como la madera o el carbón, la electricidad debe emplearse, ya que se genera y no puede ser almacenada en otra cosa que no sean dispositivos de menor escala. La electricidad se transmite por medio de un circuito cerrado, para emplearse en cualquier propósito práctico, y no puede ser almacenada como energía eléctrica. Esto significa que los cambios de la demanda no pueden tener cabida, sin corte de los suministros, ya sea (por ejemplo, a través de brownouts o apagones) o disponer de una técnica de almacenamiento fiable, algo imposible en la actualidad (Oliveira, 2016).

Se espera que el almacenamiento de energía en el hogar esté cada vez más presente, debido a la creciente importancia de energía distribuida (especialmente procedente de la energía solar fotovoltaica) y el aumento del consumo de energía. Un hogar equipado con energía fotovoltaica puede asegurar hasta un 40 % de sus necesidades energéticas. Sin embargo, para alcanzar una mayor autosuficiencia, es necesario contar con un sistema de almacenamiento de energía, debido a las diferencias entre el consumo de energía y la energía producida a partir de la fotovoltaica.

Según Oliveira (2016), los combustibles petroquímicos se han convertido en la forma dominante de almacenamiento de energía, tanto en la generación eléctrica y el transporte de energía. Los combustibles petroquímicos de uso

común se procesan del carbón, la gasolina, el gasóleo, el gas natural, gas licuado de petróleo (GLP), el propano, el butano, etanol, biodiésel y el hidrógeno. Todos estos productos químicos son fácilmente convertidos a energía mecánica y luego energía quizás en eléctrica a los motores que utiliza el calor (o de otras turbinas de los motores de combustión interna, o calderas u otros motores de combustión externa) que se utiliza para generación de energía eléctrica. Los generadores de calor y los generadores de potencia del motor son casi universales, que van desde los pequeños motores de la producción de sólo unos pocos kilovatios de utilidad a escala generadores con puntuaciones de hasta 800 megavatios.

#### **7.6.1. Métodos electroquímicos de almacenamiento**

Se denomina batería, batería eléctrica, acumulador eléctrico o simplemente acumulador, al dispositivo que consiste en una o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada, en electricidad. Cada celda consta de un electrodo positivo, o cátodo y un electrodo negativo, o ánodo y electrolitos que permiten que los iones se muevan entre los electrodos, facilitando que la corriente fluya fuera de la batería para llevar a cabo su función.

Las baterías vienen en muchas formas y tamaños, desde las celdas en miniatura que se utilizan en audífonos y relojes de pulsera, a los bancos de baterías del tamaño de las habitaciones que proporcionan energía de reserva a las centrales telefónicas y ordenadores de centros de datos (Oliveira, 2016).



- Principios de funcionamiento

El principio de funcionamiento de un acumulador está basado esencialmente en un proceso químico reversible llamado reducción-oxidación (también conocida como redox), un proceso en el cual uno de los componentes se oxida (gana electrones) y el otro se reduce (pierde electrones); es decir, un proceso cuyos componentes no resulten consumidos ni se pierdan, sino que meramente cambian su estado de oxidación y, que a su vez pueden retornar a su estado original en las circunstancias adecuadas. Estas circunstancias son, en el caso de los acumuladores, el cierre del circuito externo, durante el proceso de descarga, y la aplicación de una corriente, igualmente externa, durante la carga. (Oliveira, 2016).

Resulta que procesos de este tipo son bastante comunes en las relaciones entre los elementos químicos y la electricidad durante el proceso denominado electrólisis, y en los generadores voltaicos o pilas. Los investigadores del siglo XIX dedicaron numerosos esfuerzos a observar y a esclarecer este fenómeno, que recibió el nombre de polarización.

Un acumulador es, así, un dispositivo en el que la polarización se lleva a sus límites alcanzables, y consta, en general, de dos electrodos, del mismo o de distinto material, sumergidos en un electrolito.

- Principales parámetros

- Tensión

Según Balocchi (1996), la tensión o potencial (en voltios) es el primer parámetro a considerar, pues es el que suele determinar si el acumulador

conviene al uso al cual se le destina. Viene fijado por el potencial de reducción del par redox utilizado; suele estar entre 1 V y 4 V por elemento.

Se obtiene de calcular el trabajo,  $W$ , requerido para transferir una cantidad de carga que, a través de una sección transversal de un elemento (el conductor o cable) contra la fuerza eléctrica que producen las otras cargas del conductor. La unidad de voltaje es el voltio. Matemáticamente:

$$V = \frac{dW(t)}{dq(t)}$$

Donde:

$V$  : voltaje

$W$  : trabajo

$q$  : carga

$t$  : tiempo

Simplificando mucho, el voltaje es como la altura de una cascada de agua, mientras más alta sea la cascada, mayor será su fuerza para mover una noria. Una cascada de agua de altura pequeña moverá poco la rueda, hará poco trabajo. Una cascada de gran altura moverá mucho la rueda, hará gran trabajo. Por ello si se quiere obtener más trabajo se necesita una pila de voltaje superior. Por ejemplo, en autos radio controlados cuanto más voltaje tenga la batería será mayor la potencia que mueve el automóvil (Balocchi, 1996).

- Corriente

Es la tasa de cambio neta de la carga  $Q$  (medido en culombios) transferida a través de una sección transversal de un conductor.

$$I = \frac{dq(t)}{dt}$$

Donde:

$I$  : corriente

$q$  : carga

$t$  : tiempo

Siguiendo la analogía anterior la corriente es como el agua de una cascada que se desplaza y que mueve la noria. En motores de corriente continua mientras mayor es la corriente más torque se puede realizar con el motor. Siendo simplista más fuerza podrá hacer dicho motor (Balocchi, 1996).

- Capacidad de carga

La capacidad de carga o capacidad del acumulador es la carga que puede almacenar el elemento. Se mide en amperios-hora (Ah) y es el segundo parámetro a considerar. En las baterías de baja capacidad de carga, suele expresarse en miliamperios-hora (mAh). Una capacidad de carga de 1 amperio-hora significa que la batería puede suministrar una intensidad de corriente de 1 A durante 1 hora antes de agotarse. Entre una batería o pila de 1 200 mAh y otra de 2 400 mAh, la segunda durará más tiempo (el doble) porque tiene mayor cantidad de carga eléctrica almacenada. En cualquier equipo eléctrico se puede colocar cualquier pila con cualquier mAh, ya que tan solo influye en la duración de funcionamiento (Balocchi, 1996).

Especial importancia tiene en algunos casos la intensidad de corriente máxima que puede suministrar la batería, medida en amperios (A); p. ej., los motores de arranque de los automóviles, cuando se ponen en funcionamiento, exigen intensidades de corriente muy grandes a la batería (centenas de A) durante un breve tiempo (Balocchi, 1996).

- Carga eléctrica

La carga eléctrica se mide en la práctica por referencia a los tiempos de carga y de descarga en amperios (A). La unidad SI es el culombio (C) (Balocchi, 1996).

$$Q = I \cdot t = I \cdot (t_h \cdot 3600)$$

Donde:

$Q$  : carga eléctrica

$I$  : intensidad

$t$  : tiempo (en segundos)

$t_h$  : tiempo en horas

Por tanto, la carga eléctrica en las distintas unidades es:

$$1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C} \quad \text{y} \quad 1 \text{ C} = 0,278 \text{ mAh}$$

- Energía

La energía que puede suministrar una batería depende de su capacidad y de su voltaje, se mide habitualmente en Wh (vatios-hora); la unidad SI es el jule.

$$W = P \cdot t = P \cdot (t_h \cdot 3600)$$

Donde:<sup>3</sup>

$W$  : energía

$P$  : potencia

$t$  : tiempo (en segundos)

$t_h$  : tiempo (en horas)

Por tanto las equivalencias entre unidades son:<sup>3</sup>

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J} \quad \text{y} \quad 1 \text{ J} = 0,278 \text{ mWh}$$

Como  $P = i \cdot V$

Donde:<sup>3</sup>

$P$  : potencia

$i$  : intensidad

$V$  : diferencia de potencial

La equivalencia de unidades se puede expresar como:

$$1 \text{ Wh} = 1 \text{ AhV}$$

Téngase en cuenta, que, cuando le den indicaciones en el cuerpo de las baterías o en sus envases, como «Cárguese a 120 mA durante 12 horas», el producto resultante excederá la capacidad del acumulador, el exceso de carga se disipa dentro de la batería en forma de calor a causa de su resistencia interna. Si la capacidad del acumulador fuesen 1200 mAh y se le aplicará una corriente de carga de 120 mA durante 12 horas,  $120 \cdot 12 = 1440$  mAh, por lo que 240 mAh será la carga convertida en calor dentro de la batería y 1200 mAh la efectivamente almacenada en ella. Para calcular la energía perdida bastaría multiplicar los 240 mAh de exceso de carga por la tensión de carga (Balocchi, 1996).

- Resistencia

Según Balocchi (1996), la resistencia de las baterías es muy inferior a la de las pilas, lo que les permite suministrar intensidades de corriente más intensas que las de éstas, sobre todo de forma transitoria. Por ejemplo, la resistencia interna de una batería de plomo-ácido es del orden de  $0,006 \Omega$  (ohm), y la de otra de Ni-Cd, de  $0,009 \Omega$ .

- Masa

Otra de las características importantes de una batería es su masa, y la relación entre ella y la capacidad eléctrica (Ah/kg) o la energía (Wh/kg) que puede suministrar. En algunos casos puede ser también importante el volumen que ocupe (Ah/m<sup>3</sup>) o (Ah/litro), (Saga, 2010).

- Rendimiento

De acuerdo a *Le Système international d'unités* (8ª edición, 2006), el rendimiento es la relación porcentual entre la energía eléctrica recibida en el proceso de carga y la que el acumulador entrega durante la descarga. La batería de plomo-ácido tiene un rendimiento de más del 90 %. las baterías Ni-Cd un 83 % .

### Constante de carga/descarga C

C es una constante creada por los fabricantes que depende de los miliamperios-hora especificados en la batería y que se usa para señalar más fácilmente la intensidad a la que debe cargarse o descargarse una batería sin que ésta sufra daños. Se calcula como sigue:

$$C = \frac{X}{1000}$$

Donde:

$C$  : constante de carga o descarga

$X$  : capacidad en mAh de la batería

## 7.7. Clases de baterías

### 7.7.1. Baterías de plomo-ácido

Según Balocchi (1996), está constituida por dos electrodos de plomo, de manera que, cuando el aparato está descargado, se encuentra en forma de sulfato de plomo (II) ( $\text{PbSO}_4$ ) incrustado en una matriz de plomo metálico en el elemento metálico (Pb); el electrolito es una disolución de ácido sulfúrico.

Su funcionamiento es el siguiente:

- Carga

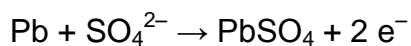
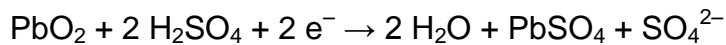
Durante el proceso de carga inicial, el sulfato de plomo (II) pierde electrones o se reduce a plomo metal en el polo negativo (cátodo), mientras que en el ánodo se forma óxido de plomo (IV) ( $\text{PbO}_2$ ). Por lo tanto, se trata de un proceso de dismutación. No se libera hidrógeno, ya que la reducción de los protones a hidrógeno elemental está cinéticamente impedida en la superficie de plomo, característica favorable que se refuerza incorporando a los electrodos pequeñas cantidades de plata.

El desprendimiento de hidrógeno provocaría la lenta degradación del electrodo, ayudando a que se desmoronasen mecánicamente partes del mismo,

alteraciones irreversibles que acortarían la duración del acumulador (Balocchi,1996).

- Descarga

Durante la descarga se invierten los procesos de la carga. El óxido de plomo (IV), que ahora funciona como cátodo, se reduce a sulfato de plomo (II), mientras que el plomo elemental se oxida en el ánodo para dar igualmente sulfato de plomo (II). Los electrones intercambiados se aprovechan en forma de corriente eléctrica por un circuito externo. Se trata, por lo tanto, de una conmutación. Los procesos elementales que trascurren son los siguientes:



En la descarga baja la concentración del ácido sulfúrico, porque se crea sulfato de plomo (II) y aumenta la cantidad de agua liberada en la reacción. Como el ácido sulfúrico concentrado tiene una densidad superior a la del ácido sulfúrico diluido, la densidad del ácido puede servir de indicador para el estado de carga del dispositivo (Balocchi,1996).

- Ciclos y vida

No obstante, este proceso no se puede repetir indefinidamente, porque, cuando el sulfato de plomo (II) forma cristales, ya no responden bien a los procesos indicados, con lo que se pierde la característica esencial de la reversibilidad. Se dice entonces que la batería se ha «sulfatado» y es necesario sustituirla por otra nueva. Las baterías de este tipo que se venden actualmente



utilizan un electrolito en pasta, que no se evapora y hace mucho más segura y cómoda su utilización (Balocchi,1996).

- Ventajas
  - Bajo costo
  - Fácil fabricación
  
- Desventajas
  - No admiten sobrecargas ni descargas profundas, viendo seriamente disminuida su vida útil.
  - Altamente contaminantes.
  - Baja densidad de energía: 30 Wh/kg.
  - Peso excesivo, al estar compuesta principalmente de plomo; por esta razón su uso en automóviles eléctricos se considera poco lógico por los técnicos electrónicos con experiencia. Su uso se restringe por esta razón.
  
- Características
  - Voltaje proporcionado: 2 V/elemento

Cuando varias celdas se agrupan para formar una batería comercial, reciben el nombre de vasos, que se conectan en serie para proporcionar un mayor voltaje. Dichos vasos se contienen dentro de una caja de polipropileno copolímero de alta densidad con compartimientos estancos para cada celda. La tensión suministrada por una batería de este tipo se encuentra normalizada en 12 voltios si posee 6 elementos o vasos para vehículos ligeros y 24 voltios para vehículos pesados con 12 vasos. En algunos vehículos comerciales y agrícolas antiguos todavía se utilizan baterías de 6 voltios, de 3 elementos o vasos (Balocchi,1996).

- Densidad de energía: 30 Wh/kg.
- Usos

Este tipo de acumulador se sigue usando aún en muchas aplicaciones: en los automóviles, para el arranque, sistemas fotovoltaicos y en aplicaciones estacionarias como acumuladores para fuentes de alimentación ininterrumpidas para equipos médicos, informáticos, equipos de seguridad, etc.

### **7.7.2. Baterías de níquel-hierro (Ni-Fe)**

La batería de níquel-hierro, también denominada de ferroníquel, fue inventada por Waldemar Jungner en 1899, posteriormente desarrollada por Thomas Alva Edison, y patentada en 1903. En el diseño original de Edison, el cátodo estaba compuesto por hileras de finos tubos formados por láminas enrolladas de acero niquelado, estos tubos están rellenos de hidróxido de níquel u oxi-hidróxido de níquel (NiOOH). El ánodo se componía de cajas perforadas delgadas de acero niquelado que contienen polvo de óxido ferroso (FeO). El electrolito es alcalino, una disolución de un 20 % de potasa cáustica (KOH) en agua destilada (Balocchi,1996).

- Carga y descarga

Segun Balocchi(1996), los electrodos no se disuelven en el electrolito, las reacciones de carga/descarga son completamente reversibles y la formación de cristales de hierro preserva los electrodos por lo cual no se produce efecto memoria lo que confiere a esta batería gran duración. Las reacciones de carga y descarga son las siguientes:

Cátodo:  $2 \text{NiOOH} + 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \leftrightarrow 2 \text{Ni(OH)}_2 + 2 \text{OH}^-$

Ánodo:  $\text{Fe} + 2 \text{OH}^- \leftrightarrow \text{Fe(OH)}_2 + 2 \text{e}^-$

(Descarga se lee de izquierda a derecha y carga de derecha a izquierda.)

- Ventajas
  - Bajo costo.
  - Fácil fabricación.
  - Admite sobrecargas, repetidas descargas totales e incluso cortocircuitos sin pérdida significativa de capacidad.
  - No es contaminante, no contiene metales pesados y el electrolito diluido se puede usar en aplicaciones agrícolas.
  - Muy larga vida útil, algunos fabricantes hablan de más de 100 años de esperanza de vida en los electrodos y 1 000 ciclos de descarga 100 % en el electrolito. El electrolito se debe cambiar cada 20 años, según instrucciones de uso redactadas por el propio Edison.
  - Compuesta de elementos abundantes en la corteza de la tierra (hierro, níquel, potasio).
  - Funciona en un mayor rango de temperaturas, entre  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $46 \text{ }^\circ\text{C}$ .
  
- Desventajas
  - Solo posee una eficiencia del 65 %.
  
- Características
  - Voltaje proporcionado: 1,2 ~ 1,4 V
  - Densidad de energía: 40 Wh/kg
  - Energía/volumen: 30 Wh/l
  - Potencia/peso: 100 W/kg

### **7.7.3. Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd)**

Utilizan un cátodo de hidróxido de níquel y un ánodo de un compuesto de cadmio. El electrolito es de hidróxido de potasio. Esta configuración de materiales permite recargar la batería una vez está agotada, para su reutilización. Sin embargo, su densidad de energía es de tan sólo 50 Wh/kg, lo que hace que tengan poca capacidad (Balocchi,1996).

- Ventajas
  - Admiten un gran rango de temperaturas de funcionamiento.
  - Admiten sobrecargas, se pueden seguir cargando cuando ya no admiten más carga, aunque no la almacena.
  
- Desventajas
  - Efecto memoria muy alto
  - Densidad de energía baja
  
- Características
  - Voltaje proporcionado: 1,2 V
  - Densidad de energía: 50 Wh/kg
  - Capacidad usual: 0,5 a 1,0 A (en pilas tipo AA)
  - Efecto memoria: muy alto

### **7.7.4. Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH)**

Utilizan un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de una aleación de hidruro metálico (Balocchi,1996).

- Ventajas
  - Este tipo de baterías se encuentran menos afectadas por el llamado efecto memoria.
- Desventajas
  - No admiten bien el frío extremo, reduciendo drásticamente la potencia eficaz que puede entregar.
- Características
  - Voltaje proporcionado: 1,2 V
  - Densidad de energía: 80 Wh/kg
  - Capacidad usual: 0,5 a 2,8 A (en pilas tipo AA)
  - Efecto memoria: bajo

#### **7.7.5. Baterías de iones de litio (Li-ion)**

Las baterías de iones de litio (Li-ion) utilizan un ánodo de grafito y un cátodo de óxido de cobalto, trifilina ( $\text{LiFePO}_4$ ) u óxido de manganeso. Su desarrollo es más reciente, y permite llegar a altas densidades de capacidad. No admiten descargas y sufren mucho cuando éstas suceden; por lo que suelen llevar acoplada circuitería adicional para conocer el estado de la batería, y evitar así, tanto la carga excesiva como la descarga completa (Balocchi, 1996).

- Ventajas
  - Apenas sufren el efecto memoria y pueden cargarse sin necesidad de estar descargadas completamente, sin reducción de su vida útil.
  - Altas densidades de capacidad.

- Desventajas
  - No admiten bien los cambios de temperatura.
  - No admiten descargas completas y sufren mucho cuando éstas suceden.
  
- Características
  - Voltaje proporcionado:
    - A plena carga: entre 4,2 V y 4,3 V dependiendo del fabricante.
    - A carga nominal: entre 3,6 V y 3,7 V dependiendo del fabricante.
    - A baja carga: entre 2,65 V y 2,75 V dependiendo del fabricante (este valor no es un límite, se recomienda).
  - Densidad de energía: 115 Wh/kg
  - Capacidad usual: 1,5 a 2,8 A (en pilas tipo AA)
  - Efecto memoria: muy bajo.

#### **7.7.6. Baterías de polímero de litio (LiPo)**

Son una variación de las baterías de iones de litio (Li-ion). Sus características son muy similares, pero permiten una mayor densidad de energía, así como una tasa de descarga bastante superior. Estas baterías tienen un tamaño más reducido respecto a las de otros componentes. Cada celda tiene un voltaje nominal de 3,7 V, voltaje máximo 4,2 V y mínimo 3,0 V. Este último debe respetarse rigurosamente, ya que la pila se daña irreparablemente a voltajes menores a 3 voltios. Se suele establecer la siguiente nomenclatura XSYP que significa X celdas en serie, e Y en paralelo. Por ejemplo, 3s2p son 2 baterías en paralelo, donde cada una tiene 3 celdas o

células. Esta configuración se consigue conectando ambas baterías con un cable paralelo (Balocchi,1996).

- Ventajas
  - Mayor densidad de carga, por tanto tamaño reducido.
  - Buena tasa de descarga, bastante superior a las de iones de litio.
  
- Desventajas
  - Quedan casi inutilizadas si se descargan por debajo del mínimo de tres voltios.
  
- Tipos

Las baterías LiPo se venden generalmente de 1S a 4S lo que significa:

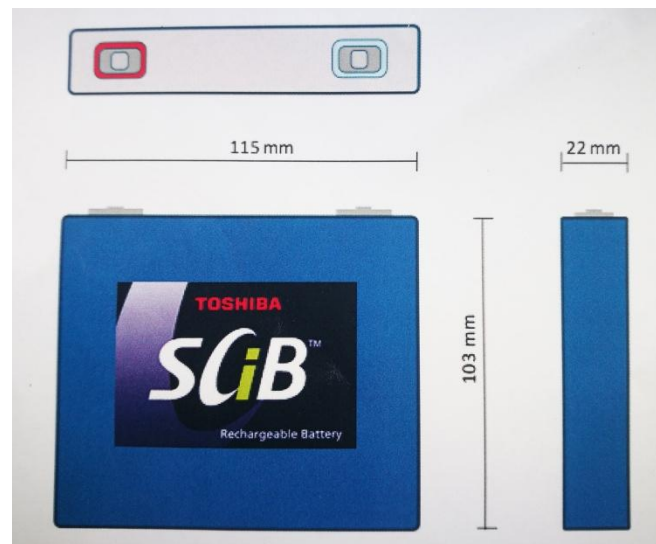
- Li-PO 1S: una celda, 3,7 V
- Li-PO 2S: dos celdas, 7,4 V
- Li-PO 3S: tres celdas, 11,1 V
- Li-PO 4S: cuatro celdas, 14,8 V

#### **7.7.7. Baterías recargables SCiB Ion-Litio-Titánio y óxidos**

SCiB es una batería recargable de última generación de alto nivel de seguridad desarrollada por Toshiba Corporation. Al utilizar materiales como titánio y óxidos únicos principalmente en sus ánodos ha demostrado una alta resistencia hacia los efectos térmicos negativos que tienen las distintas clases de baterías, evitando así los cortocircuitos causados por estrés físico.

Estas baterías son una excelente opción de almacenamiento, ya que características como larga vida con mínima pérdida de capacidad (Potencia) fue demostrada, incluso después de 6 000 ciclos completos de carga y descarga esta batería aún tiene la capacidad de carga rápida a un 80 % de su capacidad inicial en aproximadamente 6 minutos. Posee una alta salida de potencia con alto desempeño equivalente al de capacitores eléctricos de doble capa.

Figura 7. Dimensiones de cada celda SCiB



Fuente: Toshiba, <http://www.scib.jp/en/product/cell.htm> [Consulta: 06 de febrero de 2018].

- Ventajas
  - Inherentemente segura: los materiales utilizados en estas baterías aseguran seguridad de operación. El avanzado descubrimiento de Toshiba con la tecnología de litio y titanio evitan el deterioro térmico.



- Alto desempeño en temperatura extremas: scib ofrecen capacidad de carga y descarga en un amplio rango de temperaturas desde estado de congelamiento a  $-30^{\circ}\text{c}$  hasta  $55^{\circ}\text{c}$  haciéndolo ideal para distintas aplicaciones.
- Larga vida: la vida de las baterías scib ha alcanzado resultados excepcionales al utilizar materiales con bases oxidadas. La capacidad o potencia que se pierde después de 10 000 ciclos de carga y descarga es del 20 %.
- Carga rápida: únicamente se necesitan 6 minutos para cargar las baterías de un 0 % hasta un 80 %, incrementando así la productividad y permitiendo el eficiente almacenamiento de la energía generada.
- Alto desempeño de salida: las baterías scib ofrecen una densidad de potencia equivalente a la de los ultra capacitores, esto asegura suficiente potencia de salida (160 a continuos) para aplicaciones y necesidades que requieran dicha potencia.
- Producción masiva: para asegurar que el cliente obtenga una batería de alta calidad y cumplirle en entregas a clientes que tienen aplicaciones de alta demanda, Operaciones Kashiwazaki produce en masa estas baterías creando una capacidad de almacenaje de aproximadamente 6 000 MWH/año. Cumpliendo con las certificaciones ISO9001 e ISO14000.

Tabla I. **Parámetros de la celda SCiB**

<b>Especificaciones de las Celdas</b>	
Capacidad Nominal	20 Ah
Voltaje Nominal	2,3 V
Peso	510 g
Energía/Peso	90 Wh/kg
Energía/Volumen	177Wh/L
Impedancia(AC, 1kHz)	0,53mΩ
Voltaje de Operación	1.5 a 2.7 V
Temperatura de Operación	-30 °C a 55 °C
Método de Carga	CC-CV

Fuente: Toshiba, <http://www.scib.jp/en/product/cell.htm> [Consulta: 06 de febrero de 2018]

## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE TABLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

### 1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1.1. Energía eléctrica

1.2. Generación de energía eléctrica

1.3. Generación renovable en Guatemala

1.3.1. Beneficios de la energía renovable en Guatemala

1.3.2. Energía hidráulica

1.3.3. Energía solar

1.3.4. Energía eólica

1.3.5. Energía de la biomasa

1.4. Principales problemas en la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica

1.5. Mercado eléctrico de Guatemala

1.5.1. Entidades y sus funciones

1.5.2. Productos y servicios del mercado

1.5.3. Funcionamiento del mercado

- 1.6. Almacenamiento de energía
  - 1.6.1. Métodos electroquímicos de almacenamiento
  - 1.6.2. Principios de funcionamiento
  - 1.6.3. Principales parámetros
- 1.7. Clases de baterías
  - 1.7.1. Baterías de plomo-ácido
  - 1.7.2. Baterías de níquel-hierro (Ni-Fe)
  - 1.7.3. Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd)
  - 1.7.4. Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH)
  - 1.7.5. Baterías de polímero de litio (LiPo)
  - 1.7.6. Baterías recargables SCiB Ion-Litio-titánio y óxidos

## 2. MÉTODOS Y TÉCNICAS

- 2.1. Metodología
  - 2.1.1. Tipo de estudio
  - 2.1.2. Fases de estudio
- 2.2. Técnicas

## 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

ANEXOS

## **9. METODOLOGÍA**

### **9.1. Tipo de estudio**

El presente estudio se considera de tipo cuantitativo descriptivo, pues busca especificar los parámetros eléctricos de diversos sistemas de almacenaje de energía eléctrica para analizarlos y así determinar la mejor opción técnica económica, para que la hidroeléctrica Cutzán y los GDR'S que implementen dichos sistemas de almacenaje puedan participar en el mercado mayorista ofreciendo potencia y energía en cada banda horaria (diurna-pico-valle), así como también puedan ofrecer reservas de energía.

### **9.2. Fases del estudio**

- Fase 1: exploración bibliográfica

En esta primera fase, se revisará toda la bibliografía pertinente para la explicación del tema de estudio con todos sus componentes. En esta primera fase, se revisará toda la bibliografía pertinente para la explicación del tema de estudio con todos sus componentes.

Con esta información se formará la base para la explicación de los problemas que se pueden resolver, mediante la instalación de un sistema de almacenaje de energía eléctrica en la hidroeléctrica Cutzán.

- Fase 2: recolección de datos y casos

Para la recolección de datos de casos de estudio se obtendrán diversas investigaciones de aplicación de sistemas de almacenamiento de energía y regulación de fuentes renovables de generación. Se seguirán varios pasos en la búsqueda de datos:

- Tabular los parámetros de operación de distintos sistemas de almacenaje de energía, para luego unificar la información y crear un cuadro comparativo:

Se utilizarán estudios realizados en otros países para aprovechar la información que se haya encontrado; pero principalmente se buscarán diversos proveedores que ofrezcan experiencia y confiabilidad.

Los principales parámetros que se compararán son: capacidad de almacenamiento, máximo tiempo de retención, eficiencia, precios, tecnología, dimensiones y vida útil que serán datos que proporcionará cada proveedor.

Tabla II. **Parámetros de operación de distintos tipos de sistemas de almacenaje de energía**

Tecnología	Potencia	Tiempo	Eficiencia	Vida útil	Área	Precio
Plomo-ácido						
NaS						
Ni-Cd						
Litio						
Ni/Fe						
Ni/MH						
SCiB						

Fuente: elaboración propia.

- Solicitar un plano detallado de las dimensiones de la hidroeléctrica Cutzán, para definir el área disponible para instalar el sistema de almacenamiento.

El área que tiene disponible la hidroeléctrica Cutzán para la instalación del sistema de almacenamiento de energía eléctrica es sumamente importante, ya que este determina la potencia que será posible almacenar.

- Recolectar información sobre los precios de la energía eléctrica, reservas de energía y potencia eléctrica.

El Administrador del Mercado Mayorista (AMM) publica en su sitio *web* distinta información histórica acerca de las transacciones, precios y despachos de la energía eléctrica. Evaluar los precios que maneja el mercado eléctrico mayorista es muy importante ya que esto va determinar el tiempo de retorno de la inversión y sí es factible económicamente la instalación del sistema de almacenamiento de energía eléctrica, en la hidroeléctrica Cutzán.

- Fase 3: análisis de datos:

Con la información obtenida, se procede a realizar distintos tipos de análisis y cálculos:

- Escoger el mejor proveedor de sistemas de almacenaje de energía con base en sus parámetros de operación:

Se analizará el cuadro comparativo propuesto en la recolección de datos para determinar la mejor relación beneficio-costos, mediante la fórmula:

$$\text{Beneficio} = \frac{P * Ef * t * Vu}{Pr * A}$$

Donde:

P: potencia (kilowatts)

Ef: eficiencia (adimensional)

t: tiempo de retención (horas)

Vu: vida útil (años)

Pr: precio (quetzales)

A: área (metros cuadrados)



El mayor valor obtenido representará la mejor opción.

- Calcular la potencia que es posible almacenar con el área disponible.

Los distintos sistemas de almacenamiento de energía eléctrica necesitan determinado espacio para adecuar bien el sistema, una vez elegido el mejor sistema, es necesario corroborar que la hidroeléctrica Cutzán cuenta con el espacio suficiente para dicha instalación; esto se realizará por medio de una proporción directa mediante la expresión:

$$\text{Área Requerida} = \frac{\text{Potencia de hidroeléctrica} * \text{área módulo}}{\text{Potencia módulo}}$$

Luego se procede a evaluar si la hidroeléctrica cuenta con el área requerida.

- Calcular la tasa interna de retorno del proyecto en la hidroeléctrica Cutzán, para determinar si es factible como generador invertir en un sistema de almacenamiento de energía eléctrica para posteriormente vender energía en las distintas bandas horarias, así como potencia eléctrica y reservas de energía.

Se encontrará el tiempo de retorno de la inversión, mediante varios pasos:

- Calcular la cantidad de módulos de sistemas de almacenamiento necesaria, mediante la expresión:

$$\text{Número de módulos necesarios} = \frac{\text{Potencia Total Generada por Hidroeléctrica Cutzán}}{\text{Potencia por Módulo}}$$

- Calcular el monto de la inversión inicial mediante la expresión:

Inversión inicial = Número de módulos necesarios \* Precio por módulo + costos de montaje, + costo de traslado + costos varios

- Proyectar las ganancias con los precios establecidos de la energía, potencia y reservas de energía.
  - Realizar una gráfica ganancia vs tiempo donde se pueda determinar la intersección del valor de la inversión inicial con las ganancias, a través del tiempo.
- Fase 4: Propuesta de implementación

Según lo que se ha analizado en las fases anteriores, se hará una propuesta a la hidroeléctrica Cutzán de cómo incrementar las ganancias de la generadora, por medio de la incorporación de un sistema capaz de almacenar energía por un tiempo considerable.

Los resultados de la investigación pueden ser utilizados por la hidroeléctrica Cutzán o por cualquier generador distribuido renovable que desee evaluar si le es rentable la instalación de un sistema de almacenamiento de energía eléctrica.

### **9.3. Definición operacional de variables**

Potencia (P): en kilowatts, cantidad de energía transmitida por un equipo por unidad de tiempo.

Energía eléctrica (E): en KW/h , forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos que permite establecer una corriente eléctrica, entre ambos cuando se les pone en contacto con un conductor.

Voltaje (V): en voltios, trabajo necesario para mover una carga de un punto a otro, a través de un campo eléctrico.

Corriente (I): en amperios, flujo de electrones que circulan por un conductor.

Tiempo de almacenamiento (t): tiempo total que un dispositivo puede retener potencia. Conocido también como “máximo tiempo de retención”.

Precio de energía: Valor monetario asignado al KW/h.

Precio de potencia: Valor monetario asignado al KW.

Dimensiones: valores de altura, profundidad y ancho útiles para calcular el espacio necesario para ubicar el banco de baterías.

Capacidad de almacenamiento: Valor máximo de potencia que puede ser almacenado.

Precio de módulo: Valor monetario asignado a un módulo de almacenamiento de energía eléctrica.

Todas estas variables serán datos teóricos obtenidos por diversos proveedores de los distintos equipos.



## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

La información de los datos recolectados serán catalogados de acuerdo a los distintos parámetros de los diversos sistemas de almacenamiento, objeto de estudio para así realizar posteriormente el proceso de análisis.

A continuación se muestra las herramientas a utilizar:

- Tablas de los siguientes parámetros de sistemas de almacenamiento:
  - Potencia
  - Vida útil
  - Tiempo máximo de almacenamiento
  - Dimensiones
  - Eficiencia
  - Precios
  
- Listado de proveedores de sistemas de almacenamiento para regulación de fuentes renovables.
- Gráficos históricos del Administrador de Mercado Mayorista.
- Gráficos de demanda de potencia y energía eléctrica.

Para el análisis de los datos obtenidos durante la cuantificación, se utilizará la estadística descriptiva, para facilitar la comprensión del comportamiento de algunas variables.

- Diagrama de máximos y mínimos: para mostrar los valores representativos de la generación de precios de la energía eléctrica, potencia y reservas de energía.
- Medidas de tendencia central (promedios y desviaciones estándar): para mostrar los valores esperados de los distintos parámetros de los sistemas de almacenamiento.
- Diagrama de Pareto: para representar el aumento de las ganancias que tendría la hidroeléctrica Cutzán al implementar el sistema de almacenamiento.

## 11. CRONOGRAMA

Tabla III. Cronograma de actividades

Mes	Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio			
Año	2018				2018				2018				2018				2018				2018			
Semana	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Fase I: exploración bibliográfica	■	■	■	■	■	■																		
Fase II: recolección de datos y casos							■	■	■	■	■	■												
Fase III: análisis de datos y propuesta de métodos y usos													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Fuente: elaboración propia.





## 12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A. A. Solomon, Daniel M. Kammen (2016) *Investigando el impacto de generación distribuida renovable y requerimiento de almacenaje de energía.*
2. Alfonso, J. A. (2012) *Récord mundial de Producción Foto-Voltáica, Energías renovables.*
3. Asociación de Generadores con Energías Renovable (2016) *Tipos de generación de Energía Renovable en Guatemala.*
4. Balocchi, E. (1996) *Química General (3° edición).*
5. Bowman, A.W., Adelchi Azzalini (1997) *Técnicas aplicadas para el análisis de datos.* Oxford, Clarendon.
6. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (1997) *Marco Regulatorio y Ley General de Electricidad de Guatemala.*
7. D. Faiman, G. Meron (2010) *Propiedades y usos del almacenamiento para mejorar la red eléctrica.*
8. Farahat .M.A. (2004) *Mejorando el proceso termo eléctrico en células fotovoltaicas por procesos con técnicas de concentración de enfriamiento.* Universidades Conferencia de ingeniería de potencia UEPAC 39th Internacional, doi:10.1109/UEPAC.2004.192424 ,

Recuperado de  
URL:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1492095&isnumber=32068>

9. Fernández & Robles. (2005). *Centrales de generación de energía eléctrica miento para mejorar la red eléctrica*. Publicación Univsersidad de Cantabria. Recuperado de <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/centrales-de-generacion-de-energia-electrica/materiales/bloque-energia-IV.pdf>
10. Islam M., Omole. A. , Domijan .A *Batería programable Li-FePO<sub>4</sub>* Conferencia y exhibción EnergyCon, IEEE Internacional, vol., no., pp.594-599, 18-22 doi:10.1109 ENERGYCON.2010.5771751  
Recuperado de :  
URL:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5771751&isnumber=5771653>
11. Joakim Widen, Ewa Wackelgar, Jukka Paatero, Peter Lund (2010) *Impactos de la generación distribuida fotovoltaica en la estabilidad del voltaje de la red eléctrica*.
12. Fernando López J. (2013) *Efecto del almacenamiento de energía en el mercado eléctrico mayorista de Colombia*. Colombia
13. Tarillo J. (2012) *Sistemas de almacenamiento de energía*.
14. Knowlton, Archer (2010) *Manual Standard del Ingeniero electricista, Tomo II*.

15. LaCommare, K.H., and J.H. Eto. ( 2004) *Comprendiendo el costo de las interrupciones de potencia*, LBNL-55718, Berkeley, Lawrence.Berkeley National Laboratory.
16. Le Système international d'unités (8ª edición, 2006).
17. Ley General de Electricidad ( Acuerdo 256-97 del 02 de abril de 1997) y *el Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista-AMM (Acuerdo 299-98 del 01 de junio de 1998)*.
18. Luis Pérez Gabarda (1994) *NTP 400 Corriente eléctrica efectos al atravesar el organismo humano*.
19. Martin Next Generation Solar Energy Center (2011). *Energía limpia para la siguiente generación*. Recuperado de:URL <http://www.fpl.com/environment/solar/martin.shtml>
20. M.A. Cohen, D.S. Callaway (2016) *Efectos de generación distribuida fotovoltaica en el sistema de distribución de california*. California, Estados Unidos.
21. Ministerio de Energía y Minas de Guatemala (2012) *Política Energética (2013-2027)*.
22. Oliveira e Silva, Guilherme, Hendrick, Patrick (2016) *Lead - Acid Batteries coupled with photovoltaics for increased electricity self-sufficiency in households*. *Applied Energy* 178:856-967.

23. Tom Hund (2000) Pérdida de capacidad en baterías *fotovoltaicas*, *Proceso de recuperación*, Sandia National Laboratories, Estados Unidos.
  
24. Wysocki Joseph, Rappaport, Paul, (1960). *Efecto de temperatura en energía solar fotovoltaica* , Diario de física aplicada, vol 31., No 3, pp571-578. Recuperado de URL:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5123556&isnumber=5123531>