



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

TEMA:

**Estudio de factibilidad del diseño de un sistema generación de energía
fotovoltaica para bombeo de agua Isla de Muisne, de la Provincia de
Esmeraldas**

AUTOR:

Criollo Espantoso, Félix Daniel

**Trabajo de titulación previo a la obtención del grado
académico de Magister en Electricidad con Mención en
Energías Renovables y Eficiencia Energética**

TUTOR:

Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo, M. Sc.

Guayaquil, Ecuador

15 de marzo del 2022



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Ing. **Criollo Espantoso, Félix Daniel** como requerimiento para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN ELECTRICIDAD**.

TUTOR

Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo, M. Sc.

DIRECTOR DEL PROGRAMA

Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo, M. Sc.

Guayaquil, a los 15 días del mes de marzo del año 2022



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Criollo Espantoso, Félix Daniel**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación, **Estudio de factibilidad del diseño de un sistema generación de energía fotovoltaica para bombeo de agua Isla de Muisne, de la Provincia de Esmeraldas**, previo a la obtención del Grado Académico de **Magíster en Electricidad**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis del Grado Académico en mención.

Guayaquil, a los 15 días del mes de marzo del año 2022

EL AUTOR

CRIOLLO ESPANTOSO, FÉLIX DANIEL



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

AUTORIZACIÓN

Yo, **Criollo Espantoso, Félix Daniel**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Maestría: **Estudio de factibilidad del diseño de un sistema generación de energía fotovoltaica para bombeo de agua Isla de Muisne, de la Provincia de Esmeraldas**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 15 días del mes de marzo del año 2022

EL AUTOR

CRIOLLO ESPANTOSO, FÉLIX DANIEL

REPORTE DE URKUND

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
TEMA: Estudio de factibilidad del diseño de un sistema generación de energía fotovoltaica para bombeo de

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de MAGISTER EN ELETRICIDAD TUTOR: Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo, M. Sc.
Guayaquil, Ecuador 6 de Abril del 2021
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
CERTIFICACIÓN Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por
el Ing. Criollo Espantoso, Félix Daniel
como requerimiento para la obtención
del
Grado Académico de MAGÍSTER EN ELECTRICIDAD. TUTOR _____ Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo, M.Sc. DIRECTOR DEL PROGRAMA _____ Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo, M.Sc.

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de INGENIERA EN ELÉCTRICO MECÁNICA TUTOR: Ing. Vallejo Samaniego, Luis Vicente, M.Sc.
Guayaquil, Ecuador 16 de septiembre de 2021
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERIA EN ELÉCTRICO
CERTIFICACIÓN Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por
Crespo Castillo Alejandra
como requerimiento para la obtención del
de Ingeniera
Eléctrico Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial. TUTOR _____ Ing. Vallejo Samaniego, Luis Vicente, M.Sc. DIRECTOR DE CARRERA _____ Ing. Heras Sánchez, Miguel Armando, M.Sc.

Reporte Urkund del Trabajo de Titulación denominado “**Estudio de factibilidad del diseño de un sistema generación de energía fotovoltaica para bombeo de agua Isla de Muisne, de la Provincia de Esmeraldas**” del Ingeniero **Criollo Espantoso Félix Daniel**. Una vez efectuado el análisis anti plagio el resultado indica 4% de coincidencia.

DEDICATORIA

Quiero empezar dedicando el presente trabajo de titulación a Dios que me ha permitido tener salud y finalizar con éxito la Maestría en Electricidad.

A mis padres, PEDRO CRIOLLO TRIANA y NORMA ISABEL ESPANTOSO PERLAZA que siempre me han motivado desde pequeño hasta la presente a que el estudio es la mejor herramienta para progresar en el ámbito profesional.

A mi esposa, KARINA BECERRA CAICEDO y mis hijos

EL AUTOR



CRIOLLO ESPANTOSO, FÉLIX DANIEL

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mis agradecimientos a los docentes de la maestría en especial al M. Sc. Manuel Romero Paz y al director, M. Sc. Bayardo Bohórquez Escobar. Al Ing. José Martillo que estuve presente junto con el director, muchas gracias y descanse en paz.

A mis compañeros de la promoción y en especial a un gran amigo ORLY GUZMÁN que fue una guía en la formación del masterado en electricidad, que descanses en paz amigo eterno.

EL AUTOR



CRIOLLO ESPANTOSO, FÉLIX DANIEL



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f.

ING. BOHÓRQUEZ ESCOBAR, CELSO BAYARDO, M. Sc.

TUTOR

f.

ING. ROMERO PAZ, MANUEL, M. Sc.

REVISOR

f.

ING. BOHÓRQUEZ HERAS, DIANA, M. Sc.

REVISOR

f.

ING. BOHÓRQUEZ ESCOBAR, CELSO BAYARDO, M. Sc.

DIRECTOR DEL PROGRAMA

Índice General

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas	XIII
Resumen	XIV
Capítulo 1: Descripción General	16
1.1. Introducción.....	16
1.2. Antecedentes.	17
1.3. Definición del Problema.....	17
1.4. Justificación del Problema.....	18
1.5. Objetivos del Problema de Investigación.....	18
1.5.1. Objetivo General.....	18
1.5.2. Objetivos Específicos.....	18
1.6. Diseño y Metodología de la Investigación.	19
Capítulo 2: Fundamentos Teóricos	21
2.1. Introducción a las energías renovables.	21
2.2. Opciones tecnológicas de mitigación.	25
2.3. Introducción de sistemas fotovoltaicos.	27
2.4. El efecto fotovoltaico.	27
2.5. Tecnologías de construcción de células fotovoltaicas: material y producción.....	32
2.6. Tipos de celdas	33
2.6.1. Celdas de silicio monocristalino	33
2.6.2. Celdas de silicio policristalino	37
2.6.3. Celdas de silicio amorfo.....	39
2.6.4. Celdas de lámina delgada	43
2.7. Conexiones de las celdas fotovoltaicas.....	43

2.7.1. Conexiones en serie y paralelo.....	44
2.7.2. Diferencias entre los dos modos de conexión.....	46
2.7.3. Las propiedades eléctricas de las células.....	47
Capítulo3: Simulación de sistema fotovoltaico y propuesta de factibilidad	49
3.1. Descripción general de simulación y propuesta de factibilidad.	49
3.2. Diseño e implementación en MatLab/Simulink del sistema fotovoltaico. 49	
3.2.1. Métodos de investigación en la simulación.	49
3.2.2. Modelado del sistema de paneles fotovoltaicos en MatLab/Simulink.	52
3.3. Análisis del número de paneles fotovoltaicos.	57
3.4. El clima promedio en Esmeraldas	59
3.5. Análisis comparativo de bombeo de agua.	61
3.6. Descripción de la propuesta de implementación de sistema fotovoltaico para bombeo de agua.	63
3.7. Presupuesto de la propuesta de implementación del sistema fotovoltaico para extracción de agua.	69
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES.....	72
Bibliografía.....	73

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1: Tipos de residuos utilizados en energía biomásica.	23
Figura 2.2: Aplicación de energías renovables (solar, eólica e hidroeléctrica) en suministro de energía eléctrica a vehículos eléctricos.....	24
Figura 2.3: Proceso de conducción en el silicio dopado con átomos de boro y fósforo.	28
Figura 2.4: Diagrama funcional de una celda fotovoltaica.	30
Figura 2.5: Módulo fotovoltaico monocristalino Suniva OPTimus 270W.....	36
Figura 2.6: (a) Célula y láminas solares policristalinas de 156 mm; y (b) Módulo de células solares de 280 W (a partir de láminas policristalinas).	38
Figura 2.7: Celda de silicio amorfo.....	39
Figura 2.8: Estructura del dispositivo de celda solar de silicio amorfo.....	41
Figura 2.9: Ejemplo de celda fotovoltaica de lámina delgada.....	44
Figura 2.10: Ejemplo de celda fotovoltaica de lámina delgada.....	45
Figura 2.11: Curva característica de una celda fotovoltaica.	47

Capítulo 3

Figura 3.1: Modelado del sistema fotovoltaico utilizando Simulink.	53
Figura .3.2: Conexiones de células solares en el subsistema de paneles fotovoltaicos.....	53
Figura 3.3: Representación de la curva característica de corriente vs tiempo en el panel fotovoltaico.	54
Figura 3.4: Representación de la curva característica del voltaje vs tiempo en el panel fotovoltaico.	55
Figura 3.5: Representación de la curva característica de potencia vs tiempo en el panel fotovoltaico.	55

Figura 3.6: Representación de la curva característica I-V en el panel fotovoltaico.	56
Figura 3.7: Representación de la curva característica P-V en el panel fotovoltaico.	56
Figura 3.8: Representación de la curva característica P-V con relación a la irradiación solar en el panel fotovoltaico.	57
Figura 3.9: Representación de la curva característica P-V con relación a la irradiación solar en el panel fotovoltaico.	57
Figura 3.10: Estimación de temperatura priori y a posteriori en Muisne en el 2021.	60
Figura 3.11: Representación de la temperatura promedio en Muisne en el 2021.	61
Figura 3.12: Tiempo de visibilidad de la luz solar durante el 2021.	61
Figura 3.13: Representación del sistema de extracción de agua en pozos mediante paneles fotovoltaicos.	64
Figura 3.14: Panel solar fotovoltaico EGE-375M-72.	64
Figura 3.15: Inversor onda senoidal 3 kW MUSTPOWER.	67
Figura 3.16: Representación esquemática de funcionalidad del equipo TriStar (a) carga de batería, (b) control de carga y (c) regulación por derivación.	69

Índice de Tablas

Capítulo 2

Tabla 2.1: Listados de aplicaciones de uso final de recurso de energía solar.	25
Tabla 2.2: Listados de aplicaciones de uso final de recurso de energía eólica.	26
Tabla 2.3: Listados de aplicaciones de uso final de recurso de energía biomásica.	26
Tabla 2.4: Balance energético de una célula fotovoltaica.	31

Capítulo 3

Tabla 3.1: Cuadro comparativo de ventajas y desventajas para extracción de agua.	54
Tabla 3.2: Cuadro comparativo de ventajas y desventajas para extracción de agua.	62
Tabla 3.3: Especificaciones técnicas eléctricas en STC.	65
Tabla 3.4: Especificaciones técnicas eléctricas en NOCT.....	65
Tabla 3. 5: Características de temperatura del panel fotovoltaico.	65
Tabla 3.6: Rangos máximos en temperatura, voltaje, corriente y carga del panel fotovoltaico.....	66
Tabla 3.7: Característica técnicas del inversor EP30-3kLV.....	67

Resumen

El presente proyecto de titulación de la maestría se realiza el “estudio de factibilidad del diseño de un sistema generación de energía fotovoltaica para bombeo de agua Isla de Muisne, de la Provincia de Esmeraldas”. La energía solar utiliza células solares o paneles fotovoltaicos para convertir la energía luminosa directamente en electricidad. Hay dos tipos principales de tecnología solar: fotovoltaica y térmica. En los últimos años, la creciente demanda de energía y servicios relacionados está demostrando ser una respuesta al crecimiento de la población y al sano desarrollo económico y social de las personas. En el capítulo 2 se realiza la descripción teórica de energías renovables y de los paneles fotovoltaicos que es la parte fundamental del tema propuesto. En el capítulo 3 se desarrolla una simulación de paneles fotovoltaicos para ver el comportamiento de las curvas características, después se presenta el análisis de los elementos que se utilizarán en la propuesta y finalmente se presenta el costo de implementar en cada hogar la extracción de agua mediante paneles fotovoltaicos.

Palabras claves: ENERGÍA, RENOVABLE, FOTOVOLTAICO, MONOCRISTALINO, POLICRISTALINO, MATLAB

Abstract

This master's degree project is a "feasibility study of the design of a photovoltaic energy generation system for water pumping on Muisne Island, in the Province of Esmeraldas". Solar energy uses solar cells or photovoltaic panels to convert light energy directly into electricity. There are two main types of solar technology: photovoltaic and thermal. In recent years, the growing demand for energy and related services is proving to be an answer to population growth and the healthy economic and social development of people. Chapter 2 provides a theoretical description of renewable energies and photovoltaic panels, which is the fundamental part of the proposed topic. In chapter 3 a simulation of photovoltaic panels is developed to see the behavior of the characteristic curves, then the analysis of the elements that will be used in the proposal is presented and finally the cost of implementing in each home the water extraction by means of photovoltaic panels is presented.

Palabras claves: ENERGY, RENEWABLE, PHOTOVOLTAIC, MONOCRYSTALLINE, POLYCRYSTALLINE, PHOTOVOLTAIC, MATLAB

Capítulo 1: Descripción General

En este capítulo se definen las características fundamentales del trabajo de investigación realizado, sus antecedentes, la definición y justificación del problema, los objetivos general y específicos, la hipótesis y la metodología a aplicarse en la investigación.

1.1. Introducción.

La energía es uno de los candidatos más prometedores, que desempeña un papel importante en el crecimiento económico de las naciones del mundo. Varios factores, como la urbanización, la modernización y el aumento de la población humana, conducen a un fuerte incremento de la demanda de energía en el mundo. En los países desarrollados, el consumo de energía aumenta a un ritmo del 1% anual y del 5% en los países en desarrollo. La tendencia futura de la energía muestra que la cantidad de energía necesaria se duplicará en el 2021, según la Agencia Internacional de la Energía (AIE).

Hoy en día, todos los países del mundo creen que la energía renovable es la solución alternativa en lugar de utilizar los tipos de energía tradicionales. La energía solar considera uno de los tipos más importantes entre todos los tipos de energía renovable que por las ventajas que son limpias, libres de carbono y la disponibilidad. (Al-Najideen & Alwashdeh, 2017)

La conversión de la energía solar en electricidad es una técnica muy prometedora, sabiendo que la fuente es gratuita, limpia y abundante en varios países. Sin embargo, el efecto de la temperatura de las células solares sobre el rendimiento y la vida útil del panel fotovoltaico sigue siendo uno de los principales inconvenientes de esta tecnología. En este trabajo de titulación, se presenta un estudio de factibilidad y experimentación (pruebas de simulación) de un panel fotovoltaico en particular.

En este estudio, se ha considerado el bombeo de agua en la Isla de Muisne de la Provincia de Esmeraldas, para el perfil de carga, el dimensionamiento fotovoltaico y el diseño del sistema. Se seleccionó porque la mayoría de las comunidades remotas de países subdesarrollados como la Isla de Muisne tienen un gran recurso solar. El análisis del sistema, el dimensionamiento y el costo actual por kilovatio hora fomentan las energías renovables y los sistemas fotovoltaicos en otras partes del mundo, concretamente en países de América del Sur, y en otros países del mundo, que son ricos en recursos solares y tienen un suministro eléctrico insuficiente. Por lo tanto, este estudio ayudará a implementar pequeños sistemas fotovoltaicos para satisfacer la demanda de bombeo de agua mediante irradiación solar.

1.2. Antecedentes.

La energía es una necesidad básica para el desarrollo socioeconómico y la mejora del nivel de vida de las personas. A medida que el pueblo se desarrolla, el consumo de energía también aumenta, pero la energía convencional tiene un impacto negativo en el medio ambiente y también está en peligro de agotarse.

El acceso a la energía eléctrica es una de las necesidades básicas del mundo civilizado. Pero muchos habitantes de los países en desarrollo no tienen acceso a la electricidad. En la actualidad, entre 2.000 y 3.000 millones de personas en el mundo no tienen acceso a la electricidad y esta situación continuará hasta 2030 debido al crecimiento de la población. Entre el 70% de la población que vive en las zonas rurales de la región de Ecuador, sólo menos del 20% tiene acceso a la electricidad.

1.3. Definición del Problema.

La necesidad de realizar el estudio de factibilidad y simulación en MatLab/Simulink de un sistema de generación de energía fotovoltaica para bombeo de agua en la Isla de Muisne, de la Provincia de Esmeraldas.

1.4. Justificación del Problema.

Los crecientes problemas políticos y medioambientales relacionados con los combustibles fósiles son los principales inconvenientes de la explotación de esta fuente de energía. Una forma de superar estas dificultades y satisfacer la creciente demanda de electricidad en todo el mundo es el uso de sistemas fotovoltaicos que permiten convertir la energía solar en electricidad a partir de la luz solar. Esta tecnología limpia ha inspirado a muchos investigadores que han estudiado el rendimiento de diferentes sistemas con el objetivo de maximizar la producción fotovoltaica con las menores modificaciones de costes.

1.5. Objetivos del Problema de Investigación.

1.5.1. Objetivo General.

Realizar el estudio de factibilidad del diseño de un sistema de generación de energía fotovoltaica para bombeo de agua para la Isla de Muisne, Provincia de Esmeraldas.

1.5.2. Objetivos Específicos.

- Describir el marco teórico de los sistemas de energías renovables y las características técnicas de los paneles fotovoltaicos.
- Diseñar la propuesta del sistema de energía fotovoltaica y su factibilidad económica.
- Implementar el módulo del sistema fotovoltaico sobre la plataforma MatLab/Simulink.
- Analizar los resultados obtenidos del sistema de energía fotovoltaica en MatLab/Simulink.

1.6. Hipótesis de Investigación.

La realización de un estudio de factibilidad del diseño de un sistema de generación de energía fotovoltaica para bombeo de agua para la Isla de Muisne, de la Provincia de Esmeraldas, ayudará a implementar pequeños sistemas fotovoltaicos para satisfacer la demanda de bombeo de agua mediante irradiación solar.

1.7. Diseño y Metodología de la Investigación.

En primer lugar, es necesario aclarar los dos conceptos de diseño de la investigación y metodología de la investigación, con el fin de despejar la confusión que a menudo se asocia a su uso, sobre todo por parte de los investigadores emergentes. Cada uno de estos conceptos se presenta como una palabra compuesta, con los conceptos diseño y metodología unidos al sustantivo investigación.

Conviene responder primero a la pregunta: ¿Qué es la investigación? Diversos estudiosos e investigadores han propuesto varias definiciones de la investigación en distintos ámbitos. Según el Oxford Advanced Learners' Dictionary of Current English (2021), la investigación se define como "investigación sistemática realizada para descubrir nuevos hechos, obtener información adicional". Saunders et al., (2019) definen la investigación como "...algo que la gente emprende para averiguar cosas nuevas de forma sistemática, aumentando así sus conocimientos...".

De las definiciones de investigación expuestas anteriormente se desprende que la investigación es una actividad planificada, destinada a establecer nuevos hechos e información sobre un fenómeno concreto. El proceso de investigación implica la identificación de un problema particular o un área de interés, la traducción de ese problema en un problema de investigación, la recopilación de datos, el análisis de los datos y la presentación de los resultados de la investigación.

Leedy et al., (2019) define el diseño de la investigación como un plan para un estudio que proporciona el marco general para la recogida de datos. McMillan & Schumacher, (2014) lo definen como un plan de selección de sujetos, lugares de investigación y procedimientos de recogida de datos para responder a la(s) pregunta(s) de la investigación. Además, indican que el objetivo de un buen diseño de investigación es proporcionar resultados que se consideren creíbles. En general, el diseño de la investigación es un marco estratégico de actuación que sirve de puente entre las preguntas de la investigación y la ejecución o aplicación de la estrategia de investigación.

Capítulo 2: Fundamentos Teóricos

A continuación, se desarrollará un análisis de algunos de los recursos naturales que hoy se denominan energías renovables, como la biomasa, la energía solar, la energía eólica, entre otras, caracterizándolas por sus ventajas y aplicaciones.

2.1. Introducción a las energías renovables.

La energía ha estado profundamente ligada a la historia de la humanidad y vinculada a su desarrollo. Algunos de los recursos naturales que hoy se denominan energías renovables, como la biomasa, la energía solar, la energía eólica, las mareas y las olas, se conocen desde hace siglos. Entre todas las fuentes de energía, las energías renovables fueron las primeras en utilizarse para satisfacer las necesidades humanas.

Actualmente para los más pobres, la oportunidad de superar la brecha de desarrollo depende en gran medida de la posibilidad de acceder a la energía para transformar sus productos y desarrollar la economía local. En este contexto, las energías renovables, en particular mediante la generación distribuida, representan una oportunidad para que las poblaciones locales cubran sus necesidades energéticas, creen empleo y generen ingresos sin destruir el medio ambiente.

Las energías renovables permiten una industrialización inclusiva y sostenible que impulsa el desarrollo humano; desde la generación de empleo hasta la competitividad económica, desde el fortalecimiento de la seguridad hasta el empoderamiento de la mujer. Ahora más que nunca, el mundo necesita garantizar que los beneficios de la energía estén al alcance de todos y que el suministro de energía sea lo más limpio, seguro y eficiente posible.

En el contexto de la actual crisis climática y de la obligación de proporcionar desarrollo económico y acceso a la energía a una cuarta parte

de la población mundial, aunque no es el enfoque de este trabajo de titulación, es primordial la necesidad de una política energética clara, estable y predecible que se centre en una energía renovable de baja emisión de carbono, el mejor uso de los recursos locales y una industrialización sostenible.

Es necesario promover el uso productivo de la energía para la generación de ingresos con el fin de romper el círculo vicioso de los bajos ingresos que conducen a un escaso acceso a los servicios energéticos modernos, lo que a su vez pone graves limitaciones a la capacidad de generar mayores ingresos. (Colombo et al., 2013)

Enfrentadas a frecuentes cortes de energía y a la baja calidad de la energía de la red nacional o simplemente situadas lejos de la limitada red nacional de la mayoría de los países en desarrollo, muchas industrias del mundo en desarrollo producen parte o la totalidad de sus necesidades de electricidad con generadores diésel in situ. En muchos casos, éstos dependen del gasóleo o del petróleo pesado, utilizados como fuente de alimentación primaria o como respaldo automático cuando falla la red nacional o regional.

Las fuentes de energía renovable han sido importantes para el ser humano desde el comienzo de la civilización. Durante siglos y de muchas maneras, la biomasa se ha utilizado para la calefacción, la cocina, la producción de vapor y la generación de energía, así como la energía hidroeléctrica y la eólica, para el movimiento y más tarde para la producción de electricidad.

Las fuentes de energía renovable dependen generalmente de los flujos de energía a través del ecosistema terrestre procedentes de la insolación del sol y de la energía geotérmica de la Tierra. Se puede distinguir:

- a. Energía de la biomasa: crecimiento de las plantas impulsado por la radiación solar (Griffa & Marcó, 2018). La figura 2.1 muestra los tipos de residuos que se utilizan en la energía de biomasa.
- b. Energía eólica (masas de aire en movimiento impulsadas por la energía solar). La figura 2.2 muestra una aplicación de diferentes tipos de energías renovables incluida la eólica.
- c. Aprovechamiento directo de la energía solar (como en la producción de calefacción y electricidad).
- d. Energía hidroeléctrica.
- e. Energía marina (como la energía de las olas, la energía de las corrientes marinas y la energía de las presas de marea).
- f. Energía geotérmica (a partir del calor almacenado en la roca por el flujo de calor natural de la Tierra).

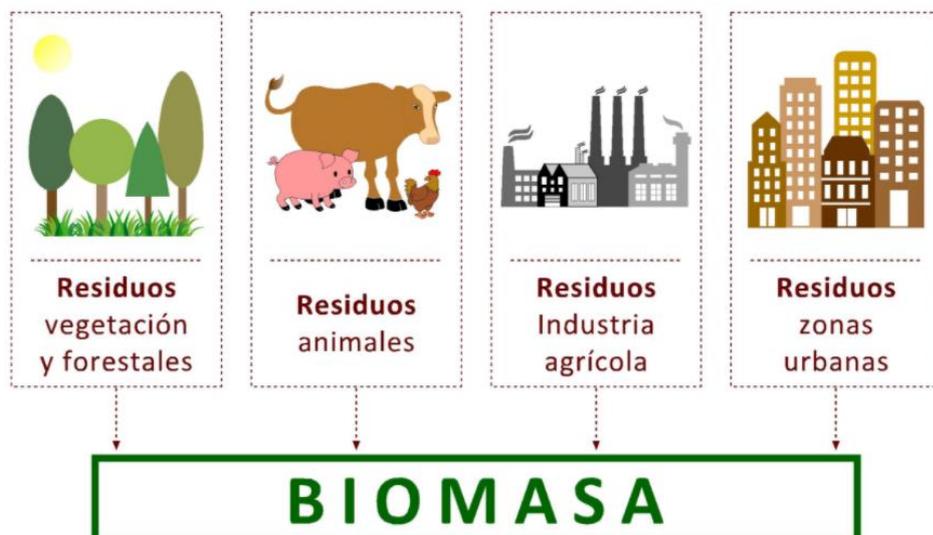


Figura 2.1: Tipos de residuos utilizados en energía biomásica.
Fuente: (Pinochet, 2013)

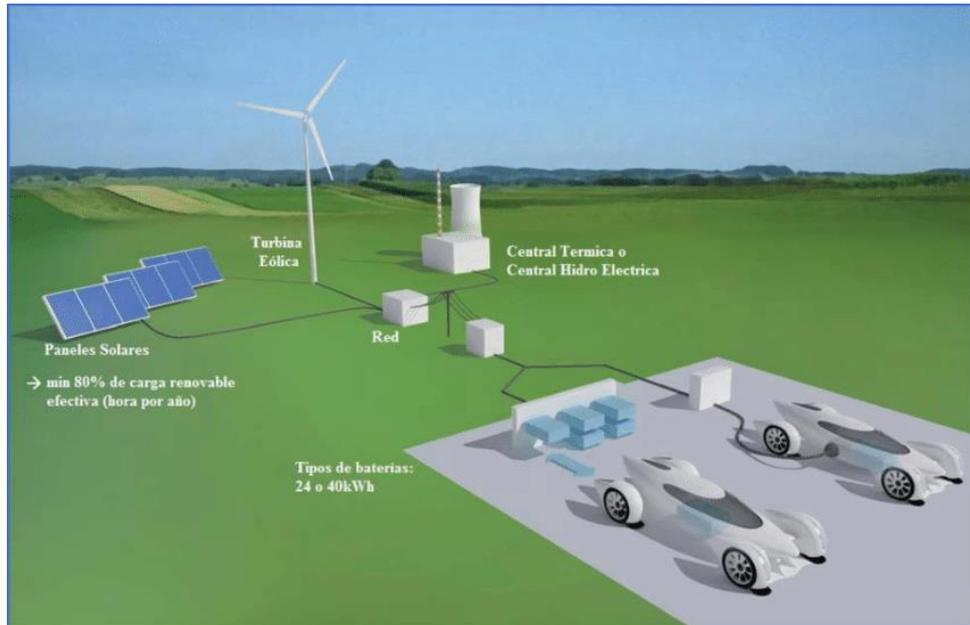


Figura 2.2: Aplicación de energías renovables (solar, eólica e hidroeléctrica) en suministro de energía eléctrica a vehículos eléctricos.
Fuente: (Ponce Jara et al., 2017)

Si se aplican de forma moderna, se considera que las fuentes de energía renovable (o renovables) responden muy bien a las directrices generales de la política energética y a los objetivos medioambientales, sociales y económicos:

- Diversificar los vectores energéticos para la producción de calor, combustibles y electricidad.
- Mejorar el acceso a fuentes de energía limpias.
- Equilibrar el uso de los combustibles fósiles, reservándolos para otras aplicaciones y para las generaciones futuras.
- Aumentar la flexibilidad de los sistemas de energía a medida que cambia la demanda de electricidad.
- Reducir la contaminación y las emisiones de los sistemas energéticos convencionales.

- Reducir la dependencia y minimizar el gasto en combustibles importados.

2.2. Opciones tecnológicas de mitigación.

Los suministros de energía renovable abarcan una amplia gama de recursos y pueden utilizarse numerosas tecnologías para aprovechar esos recursos. En las tablas 2.1 a 2.3 se enumeran las principales tecnologías de energías renovables (solar, eólica y biomasa) y sus aplicaciones. Aunque muchas de estas tecnologías están todavía en fase de desarrollo, la mayoría han entrado en los mercados comerciales de todo el mundo en algún nivel.

Tabla 2.1: Listados de aplicaciones de uso final de recurso de energía solar.

Tecnología	Aplicación de uso final			
	Electricidad	Industria	Edificios	Transporte
Energía fotovoltaica – paneles planos				
Energía fotovoltaica – concentradores				
Energía solar térmica de colectores cilindro- parabólicos				
Placa solar térmica				
Receptor central de energía solar térmica				
Vivero solar				
Calefacción pasiva				
Calefacción activa				
Sistema de Iluminación natural				

Elaborado por: Autor

Tabla 2.2: Listados de aplicaciones de uso final de recurso de energía eólica.

Tecnología	Aplicación de uso final			
	Electricidad	Industria	Edificios	Transporte
Turbina de eje horizontal				
Turbina de eje vertical				

Elaborado por: Autor

Tabla 2.3: Listados de aplicaciones de uso final de recurso de energía biomásica.

Tecnología	Aplicación de uso final			
	Electricidad	Industria	Edificios	Transporte
Combustión directa				
Gasificación / Pirólisis				
Derivación anaeróbica				
Fermentación				

Elaborado por: Autor

Algunas, como las tecnologías hidroeléctricas y de biomasa, han logrado una considerable penetración en el mercado, mientras que otras (por ejemplo, la fotovoltaica) se utilizan hoy en día en aplicaciones importantes, pero relativamente limitadas. Las actividades de investigación y desarrollo continúan mejorando todos estos sistemas para aumentar su capacidad de satisfacer las futuras necesidades energéticas y los nuevos sistemas que aún se encuentran en las primeras fases de desarrollo pueden ofrecer nuevas oportunidades adicionales.

2.3. Introducción de sistemas fotovoltaicos.

Los sistemas fotovoltaicos (PV) convierten la luz solar en electricidad. La energía fotovoltaica, que antes era una tecnología exótica utilizada casi exclusivamente en los satélites espaciales, ha bajado a la tierra para encontrar mercados energéticos en rápida expansión. Se han instalado miles de sistemas fotovoltaicos en todo el mundo. Los dispositivos fotovoltaicos pueden fabricarse con muchos materiales diferentes y en muchos diseños distintos. La diversidad de materiales fotovoltaicos y sus diferentes características y potencialidades demuestran la riqueza de esta tecnología en crecimiento exponencial.

La principal unidad del sistema fotovoltaico es la célula solar, que se conoce como célula fotovoltaica. El efecto FV fue observado en 1839 por el científico francés Edmund Becquerel. La mayoría de las células fotovoltaicas que se utilizan hoy en día están basadas en el silicio; se espera que las células fabricadas con otros materiales semiconductores superen a las células fotovoltaicas de silicio en cuanto a rendimiento y coste y se conviertan en competidores viables en el mercado fotovoltaico. La tecnología fotovoltaica utiliza los materiales semiconductores para diseñar el sistema fotovoltaico. La célula solar es la unidad básica del sistema fotovoltaico, las células solares se organizan colectivamente en módulos y los módulos se organizan juntos para formar paneles o conjuntos

2.4. El efecto fotovoltaico.

La luz solar se convierte directamente en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Para que esta transformación se produzca, se necesitan semiconductores como el silicio (Si), el arseniuro de galio (GaAs), el telurio de cadmio (CdTe), el seleniuro de indio (InSe) y el cobre (Cu). El semiconductor más utilizado es el silicio cristalino, un elemento químico muy extendido en la tierra (en la arena) y que se considera casi inagotable. Los semiconductores utilizados para fabricar células fotovoltaicas deben ser

extremadamente puros, por lo que, históricamente, los fabricantes de módulos se han centrado en el uso de residuos de la industria electrónica.

Aunque se caracterizan por una pureza (y, en consecuencia, por un coste) muy superior a la requerida para el silicio de grado solar, los residuos de la industria electrónica (bien establecidos y extendidos) siguen siendo la fuente preferida desde el punto de vista técnico y económico. Cada átomo de silicio tiene cuatro electrones de valencia en el orbital más externo a través de los cuales forma cuatro enlaces covalentes con otros cuatro átomos de silicio formando una red cristalina muy estable. Si los electrones de valencia reciben una cierta cantidad de energía en forma de luz o calor son capaces de "saltar" de la banda de valencia a la banda de conducción, dejando un hueco en la red cristalina del hueco (Boro), tal como se muestra en la figura 2.3.

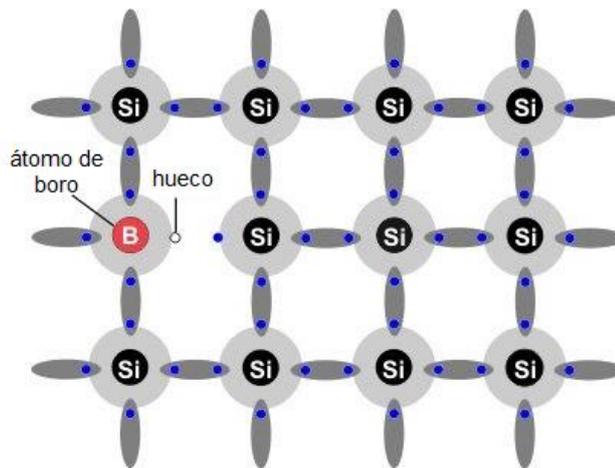


Figura 2.3: Proceso de conducción en el silicio dopado con átomos de boro y fósforo.

Fuente: (Ponce Jara et al., 2017)

Este fenómeno carece de una dirección privilegiada para el movimiento de las cargas y representa un flujo tanto de electrones como de huecos (en realidad el hueco no se mueve, sino que es ocupado por el electrón más externo de un átomo adyacente, que a su vez deja un hueco en el espacio anteriormente ocupado por él, como si el hueco se hubiera movido). En condiciones normales, este movimiento desordenado de cargas de signo contrario se ve obstaculizado por continuos fenómenos de recombinación entre electrones y huecos y tiene como único efecto la producción de calor.

Para limitar los fenómenos de recombinación de electrones en el cristal de silicio y producir un efecto útil desde el punto de vista eléctrico, es necesaria la presencia, dentro del propio cristal, de un campo eléctrico que sea capaz de dar una orientación preferente al movimiento de los electrones; se puede obtener un campo permanente superponiendo dos capas de silicio "dopado" con otros elementos químicos. En particular, al enriquecer una de las dos capas con átomos de fósforo, que tienen cinco electrones de valencia, se produce un exceso de electrones débilmente ligados al átomo porque no participan en los enlaces de valencia. Luego, al añadir algunos átomos de boro (con tres electrones de valencia), se crea una zona con exceso de huecos.

Si ahora estas dos capas, llamadas N y P respectivamente, se superponen (obteniendo así una unión p-n), se genera un movimiento de electrones hacia la zona P, que en equilibrio crea una situación de no neutralidad eléctrica. En la zona P, de hecho, se concentran más electrones y, en la región de contacto donde se produjo el flujo, la capa tiene una carga negativa; la zona N está, en cambio, cargada positivamente. Se obtiene así un campo eléctrico de baja magnitud, pero estable dentro del cristal del material semiconductor.

Cuando una célula de silicio dopado se expone a la luz solar, los electrones de valencia, al absorber fotones, adquieren la energía necesaria para saltar a la banda de conducción y migrar a la zona N: paralelamente, los huecos se "mueven" hacia la zona P. Este fenómeno se denomina efecto fotovoltaico. La figura 2.4 muestra una representación esquemática de una célula solar fotovoltaica típica. La estrategia básica del mecanismo de generación de electricidad a través de una célula fotovoltaica radica en el hecho de que cuando estas radiaciones intensas inciden sobre el panel solar que conducen a la movilización de electrones generando así una diferencia de potencial que se manifiesta en forma de corriente eléctrica corriente eléctrica directa obtenida.

Tanto en la superficie superior como en la inferior, la célula se caracteriza por la presencia de contactos metálicos con la función de recoger los contactos con la función de recoger el flujo de electrones, y conducirlos al extremo superior de la célula hasta el extremo superior de la propia célula, donde se mide la tensión. Si el circuito está abierto, es decir, la célula no está conectada a ninguna carga eléctrica, la cantidad medida es voltaje en circuito abierto (VCA), en caso contrario, si el circuito está cerrado la corriente eléctrica puede circular.

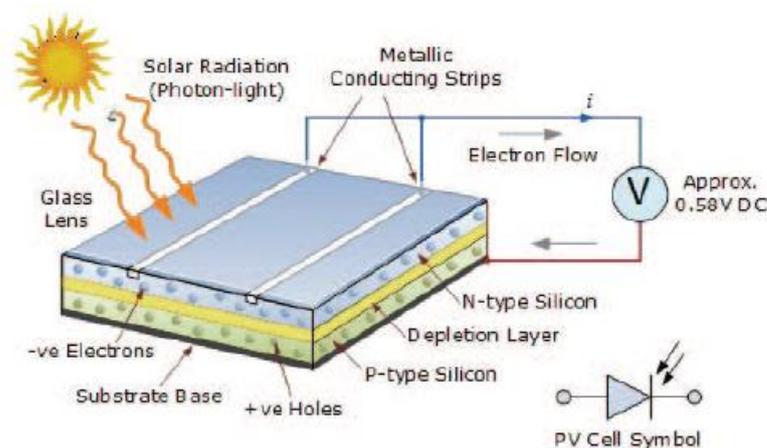


Figura 2.4: Diagrama funcional de una celda fotovoltaica.
Fuente: (Sainthiya & Beniwal, 2017)

En algunos casos, los electrones no pueden llegar a los contactos metálicos y se dirigen directamente hacia un hueco de signo contrario, llenándolo (fenómeno de recombinación). La distancia de difusión se define como la distancia que debe recorrer un electrón dentro de la red cristalina para unirse a un átomo. A medida que aumenta esta distancia, aumenta la probabilidad de que las cargas que circulan libremente por la banda de conducción alcancen los contactos metálicos y den lugar a un efecto útil. Esta distancia depende de la composición de la célula: para un semiconductor dopado con un átomo diferente por cada 10.000 millones de átomos de silicio, es de unos 0,5 mm.

En las inmediaciones de la unión, la probabilidad de que las cargas permanezcan separadas y contribuyan así a aumentar el flujo de los

contactos metálicos. y así contribuir al aumento del flujo de corriente eléctrica es suficientemente alto. Fuera de esta zona, la probabilidad de éxito disminuye a medida que aumenta la distancia a la misma. fuera de esta zona, la probabilidad de éxito disminuye a medida que aumenta la distancia de esta zona.

En la parte superior e inferior de la célula hay contactos metálicos que recogen el flujo eléctrico; mientras que el contacto de la cara posterior se extiende a toda la célula, el de la cara anterior, expuesta a la luz, se dispone en forma de rejilla o con finas ramificaciones, como compromiso entre la necesidad de minimizar la resistencia eléctrica y asegurar una transparencia suficiente de la capa anterior a la luz. Los fenómenos de reflexión se reducen aplicando en la superficie frontal una fina capa antirreflejante a base de nitruro de silicio o dióxido de titanio.

La tabla 2.4 representa esquemáticamente el balance energético de una célula fotovoltaica. La radiación solar induce una separación de cargas y finalmente una corriente eléctrica que va a abastecer a un determinado consumidor. Los fenómenos de recombinación, la reflexión y la presencia de contactos metálicos en la superficie frontal pueden afectar negativamente a la eficiencia de la célula. Además, gran parte de la radiación solar (de onda corta y de onda larga) no puede utilizarse para el efecto fotovoltaico. Finalmente, parte de esta radiación se disipa en forma de calor.

Tabla 2.4: Balance energético de una célula fotovoltaica.

Fenómenos	% de irradiación solar
Reflexión y presencia de contactos metálicos	3
Fotón de energía baja	23
Fotón de energía excesiva	34
Radiación eléctrica en la célula	20

Pérdidas térmicas debidas a las resistencias en los contactos	0.5
Energía eléctrica utilizable	13
RADIACIÓN TOTAL	100

Elaborado por: Autor

2.5. Tecnologías de construcción de células fotovoltaicas: material y producción.

Ya se ha dicho que el silicio, que es, entre otras cosas, uno de los elementos más comunes de la Tierra (aunque no exista en la naturaleza en estado puro), es el material más utilizado en la producción de celdas fotovoltaicas; de hecho, actualmente es el que ofrece las mejores prestaciones en relación calidad/coste. Su fácil disponibilidad es un incentivo más para su uso, aunque todavía existen costes de producción bastante elevados, especialmente asociados al tratamiento del material en la fábrica.

Para que se pueda explotar plenamente, debe caracterizarse por una estructura molecular adecuada (estructura molecular monocristalina, policristalina o amorfa en orden decreciente con respecto a las eficiencias alcanzables) así como un alto grado de pureza, entendida como la ausencia de sustancias extrañas, ambas propiedades no presentes en el elemento en su estado bruto.

Las diferentes configuraciones moleculares están determinadas por la disposición de los átomos del elemento: en la estructura monocristalina los átomos están orientados en la misma dirección y unidos uniformemente; en la estructura policristalina los átomos están agregados en pequeños granos monocristalinos orientados al azar; en la estructura amorfa, los átomos están orientados aleatoriamente, como en un líquido, pero conservando las cualidades típicas de los sólidos. Además, según el grado de pureza, se distinguen diferentes tipos de silicio:

- a) Silicio metalúrgico, con impurezas de alrededor del 1-2% de la masa total;
- b) Silicio de grado solar, con impurezas del 0,01%;
- c) Silicio de grado electrónico, con impurezas del 0,000001%.

Para su uso en el campo fotovoltaico, la calidad del primer tipo es inadecuada, el segundo tipo es adecuado, mientras que, aunque claramente utilizable, el tercer tipo es excesivamente sofisticado, y por tanto caro. El material de partida del proceso de fabricación de El silicio está representado por la sílice común (SiO_2) a partir de la cual, por reducción con carbón en alta temperatura En hornos de arco a alta temperatura (unos 2.000 °C) se obtiene silicio metalúrgico a partir de este último.

Mediante tratamiento con ácido clorhídrico y destilación fraccionada, se obtiene un compuesto gaseoso muy puro, el triclorosilano (SiHCl_3) que, a su vez, se reduce con hidrógeno a alta temperatura (alrededor de 1.100°C), dando lugar a un material policristalino de grado electrónico. El método que se acaba de describir se denomina "proceso Siemens" y, desde el punto de vista energético, es bastante intensivo, con un consumo de unos 200 kWh por cada kilogramo de material producido. Para conseguir la estructura cristalina perfecta requerida (por ejemplo, aplicaciones en la industria electrónica), el silicio así obtenido debe hacerse monocristalino mediante tratamientos posteriores.

2.6. Tipos de celdas

2.6.1. Celdas de silicio monocristalino

Para obtener silicio monocristalino para la industria electrónica, se utiliza el llamado "método Czochralski" (CZ), en el que los cristales individuales de silicio crecen a partir de material fundido. Durante este procedimiento, los cristales de silicio, convenientemente orientados, se

funden a 1414 °C en un crisol de grafito recubierto de cuarzo de gran pureza.

El silicio se somete a un enfriamiento controlado para obtener un monocristal una vez extraído del baño de fusión; la solidificación progresiva en la interfaz entre el sólido y el líquido genera un gran monocristal. Al final de este proceso, la pieza así obtenida tiene la forma de un cilindro gris, cuyo diámetro oscila entre 13 y 20 cm, con una longitud que puede alcanzar los 200 cm.

Los cilindros así obtenidos, antes de ser cortados en finas láminas (obleas), (s = de 0,25 a 0,35 mm), se perfilan de nuevo para obtener celdas con una forma más parecida a la del cuadrado, para llenar mejor el espacio útil del módulo que constituirán. Por último, se alisa la superficie de la rebanada. El silicio monocristalino de mayor pureza puede obtenerse mediante un segundo método, el proceso float-zone (FZ), que permite producir células fotovoltaicas más eficientes que el proceso CZ (1-2% de aumento); sin embargo, este proceso es muy caro.

El material en estado monocristalino se moldea en barras cilíndricas y se fusiona localmente con una bobina mediante la aplicación de un campo de alta frecuencia. La bobina, y por tanto la zona donde se produce la fusión, se desliza (incluso varias veces) a lo largo de la barra; a partir de los núcleos de silicio de la parte superior de la barra, se produce silicio monocristalino puro mediante un proceso de enfriamiento. De este modo, el silicio asume la estructura cristalográfica deseada sin entrar en contacto con elementos extraños; las impurezas se separan, depositándose en el baño de fusión.

A continuación, los monocristales obtenidos (en lingotes) se cortan en finas láminas con una sierra circular con disco de diamante y se pulen, como ocurre durante el proceso Czochralski. Durante estas operaciones es esencial evitar la introducción de defectos en el interior del cristal como resultado de las tensiones mecánicas aplicadas a la superficie. El corte de lingotes monocristalinos, como es el caso del "método Czochralski", hace

que, durante esta fase, se desperdicia alrededor del 50% del material, lo que provoca un aumento del coste de aproximadamente un factor 3.

Por último, tanto en el método CZ como en el FZ, la conversión de las láminas en células fotovoltaicas se realiza en dos fases:

- 1) Tejido químico de la superficie (llamado proceso de texturización): Utilizado para producir pirámides microscópicas en la superficie frontal de la célula, con el fin de reducir el coeficiente de reflexión del silicio en aproximadamente un tercio, llegando así al 10%; formación de una unión p-n mediante la exposición de las células a las impurezas deseadas, a alta temperatura. La creación del sustrato p tiene lugar en la fase de fusión en todo el lingote, mediante la adición de una pequeña cantidad de boro, con el fin de crear un silicio p dopado. Tras el corte de la lámina, ésta, recubierta en la cara p con un material inhibidor, se pasa al interior de un horno saturado de vapores de fósforo durante un tiempo suficiente para permitir la difusión, hasta una profundidad de $0,4 \div 0,5 \mu\text{m}$.
- 2) Diseño de los contactos eléctricos: El diseño de la rejilla dispuesta en la cara expuesta a la luz solar (metalización) debe representar un compromiso entre el valor de la resistencia eléctrica, que debe ser lo más bajo posible implicando una alta superficie metalizada, y una baja reflexión de la radiación incidente obtenida con una baja extensión de la superficie metalizada.

La superficie posterior de la célula, que no se ve afectada por este tipo de problemas, está totalmente metalizada. La conexión eléctrica entre las células fotovoltaicas se realiza mediante dos contactos metálicos, uno colocado en la cara expuesta a la radiación solar y el otro en la opuesta. Estos contactos se obtienen normalmente mediante la evaporación al vacío de metales de baja resistencia eléctrica y la realización de tratamientos térmicos posteriores para garantizar la adherencia necesaria a la superficie de la célula.

Para reducir el coeficiente de reflexión, se aplica una capa antirreflectante de óxido de titanio, capaz de reducir unas 10 veces el coeficiente de reflexión; del grosor de la capa de óxido de titanio depende el color de la célula (desde el azul hasta el negro), lo que permite a los fabricantes obtener diferentes colores, capaces de integrarse de la mejor manera con la estructura en la que se instalarán los paneles.

Sin embargo, en general, la superficie de la célula de silicio monocristalino ($s = 0,25$ a $0,35$ mm) es azul, homogénea y de forma circular, cuadrada o pseudocuadrada. Las células fotovoltaicas fabricadas mediante el uso de silicio monocristalino se encuentran entre las células con mayor eficiencia de conversión, es decir, en las que es mayor el porcentaje de energía contenida en la radiación solar transformada en electricidad y disponible en los terminales.

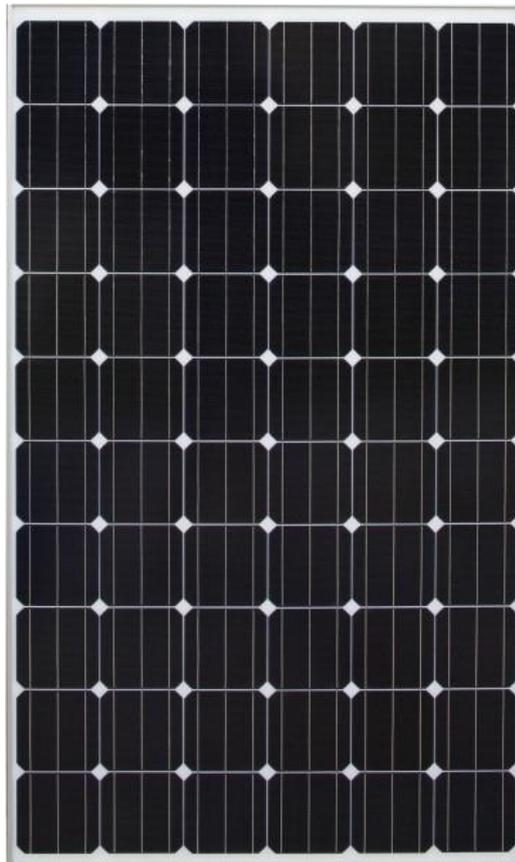


Figura 2.5: Módulo fotovoltaico monocristalino Suniva OPTimus 270W.
Fuente: (Plante, 2014)

De hecho, las células de silicio monocristalino convierten entre el 14 y el 17% de la radiación solar en energía eléctrica (en aplicaciones especiales de laboratorio se han alcanzado valores del 34%) y además tienen la ventaja de ser muy duraderas. El principal inconveniente del silicio monocristalino radica en el elevado coste de producción, dando lugar a un tiempo de amortización energética (periodo de tiempo en el que el dispositivo fotovoltaico debe funcionar para producir la energía que fue necesaria para su realización) de unos tres años; de hecho, el crecimiento cristalográfico, y posteriormente el corte en láminas finas (0,25-0,35 mm) de la pieza producida, es un proceso lento y costoso.

Aunque el costo del silicio monocristalino es elevado para la industria fotovoltaica, para fabricar una célula fotovoltaica, se necesita un trozo mucho menos puro que para la requerida para los componentes electrónicos convencionales. De hecho, la industria de las células solares utiliza sustancialmente los residuos de producción de silicio para la industria electrónica.

2.6.2. Celdas de silicio policristalino

La industria fotovoltaica también utiliza el silicio policristalino como material de menor coste de producción, en el que los cristales siguen estando agregados entre sí, pero con formas y orientaciones diferentes, tal como se observa en la figura 2.6. La mejora del proceso de producción de este tipo de células permite obtener un rendimiento eléctrico sólo ligeramente inferior al del silicio monocristalino.

Esta tecnología utiliza una aglomeración de pequeños cristales, en lugar de utilizar un único gran cristal de silicio. Esta tecnología utiliza una aglomeración de pequeños cristales, en lugar de utilizar un único gran cristal de silicio, lo que implica una producción ciertamente menos delicada, y, por lo tanto, menos costoso. El proceso de producción del silicio policristalino es independiente de los sistemas CZ y FZ. Los sistemas CZ y FZ y la técnica más utilizada es el vaciado, que consiste en calentar el silicio impuro hasta

una temperatura de 1.500 °C, enfriarlo y solidificarlo hasta una temperatura de 1.500 °C. solidificar hasta una temperatura de unos 800 °C.



Figura 2.6: (a) Célula y láminas solares policristalinas de 156 mm; y (b) Módulo de células solares de 280 W (a partir de láminas policristalinas).

Fuente: (Fisher et al., 2012)

El proceso de solidificación se realiza con un gradiente de temperatura vertical controlado, para obtener un bloque con capas horizontales de silicio cristalino desde la parte inferior, hasta la superior. Aquí los átomos no tienen una dirección preferida de crecimiento, por lo que se dispondrán en una al azar dentro de la estructura cristalina. Los bloques se dividen en lingotes y luego en láminas de 0,3 mm de espesor; incluso en este caso, alrededor del 50% del silicio se pierde durante la fase de corte.

En cuanto al proceso de difusión de las zonas p y n, y posterior son completamente análogas a las observadas en las celdas de silicio monocristalino. Durante la fase de solidificación, se depositan impurezas

entre un grano y otro que obstruye el flujo de corriente, lo que disminuye la eficiencia de la conversión fotovoltaica, las celdas tienen, de hecho, una eficiencia que es entre el 12 y 14% inferior a las de silicio monocristalino, sin embargo, son los más populares al tener la mayor proporción "Rendimiento aceptable"/precio.

2.6.3. Celdas de silicio amorfo.

Aunque obviamente se compone del mismo elemento, difiere significativamente en su característica estructural y propiedades electrónicas del silicio cristalino. Dado que los átomos de silicio se agregan según restricciones variables (caracterizadas, es decir, de diferencias en las distancias interatómicas y los ángulos de enlace) y a menudo incompleta, para que la estructura de la materia sea irregular.

A finales de los años 1960 se descubrió que la incorporación de átomos de hidrógeno en el silicio amorfo mejoraba significativamente su calidad para los fines de la conversión fotovoltaica. Las celdas solares que se suelen ver en calculadoras y relojes están hechas de silicio amorfo. En la figura 2.7 se muestra la forma que tiene una celda fotovoltaica de silicio amorfo.

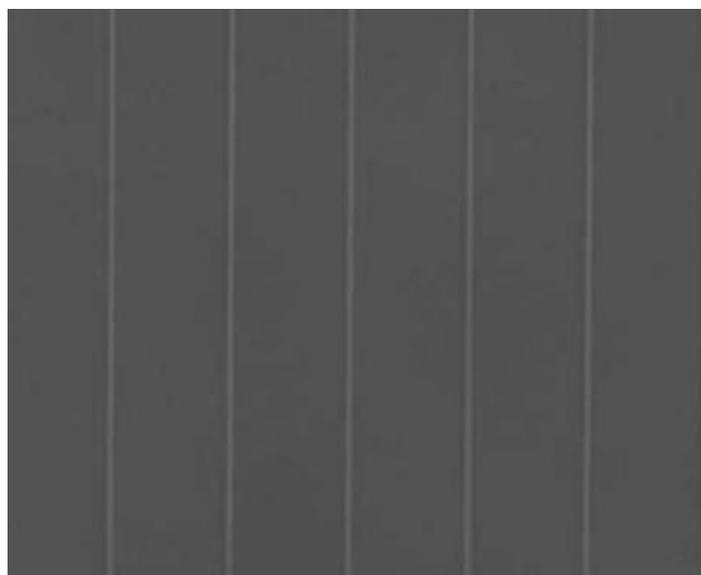


Figura 2.7: Celda de silicio amorfo.
Fuente: (Bayod-Rújula, 2019)

El hidrógeno, de hecho, es capaz de terminar la mayoría de los enlaces covalentes insaturados que los átomos de silicio presentan en la estructura amorfa. Los enlaces insaturados actúan como trampas que capturan electrones o huecos en el material, apartándolos de la conducción y acelerando su recombinación.

La disminución del número de estos defectos, que se consigue en el silicio amorfo hidrogenado, permite que el material sea extremadamente sensible a la iluminación, que esté efectivamente dopado y que tenga un tiempo de recombinación suficientemente largo de los pares electrón-electrón fotogenerados. Todo esto, en una célula solar, significa que las cargas liberadas por la radiación pueden ser extraídas y su energía utilizada en un circuito externo.

Por esta razón, en el campo fotovoltaico, se utiliza silicio amorfo sustancialmente hidrogenado. El proceso de producción comienza, al igual que para la sustancia cristalina, a partir del triclorosilano (SiHCl_3), del que se obtiene el silano (SiH_4 , llamado también hidruro de silicio IV) o el disilano (Si_2H_6). La descomposición de estos compuestos gaseosos tiene lugar mediante una descarga luminosa generada por un campo eléctrico de radiofrecuencia, se obtiene la deposición de películas muy finas ($1 \mu\text{m}$) de silicio amorfo sobre soportes adecuadamente elegidos. Durante este proceso se introducen hidruros gaseosos de boro y fósforo, obteniéndose el dopaje de la capa depositada, que formará el componente básico de la célula fotovoltaica. La figura 2.8 se muestra la estructura de capas de celdas fotovoltaicas de silicio amorfo.

Los costos de producción del proceso son bastante bajos y tienen una influencia positiva en el coste final de las celdas. Este factor compensa la eficiencia de conversión relativamente baja del silicio amorfo (aproximadamente la mitad de la del cristalino). A decir verdad, hay que denunciar un factor crítico en detrimento de esta tecnología: a pesar de los alentadores resultados experimentales, el grave problema de la inestabilidad

a la radiación luminosa sigue sin resolverse. El silicio amorfo, de hecho, presenta una importante degradación como resultado de la iluminación solar prolongada. La eficiencia de conversión, por tanto, disminuye significativamente con el tiempo (efecto Staebler-Wronski), reduciéndose hasta un 30-40% en los primeros meses de exposición y estabilizándose después.

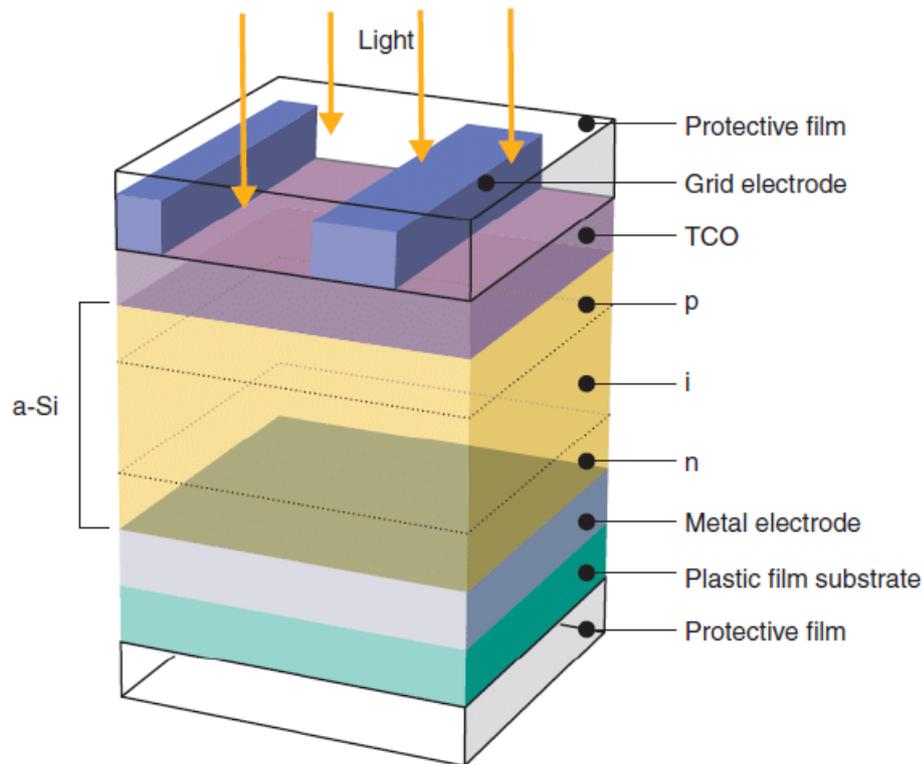


Figura 2.8: Estructura del dispositivo de celda solar de silicio amorfo
Fuente: (Fraas, 2014)

El elevado coeficiente de absorción de la radiación solar, el consumo muy limitado de material debido a la deposición en láminas delgadas y el relativo abaratamiento de los procesos de producción, hacen del silicio amorfo un material especialmente adecuado para la producción de celdas fotovoltaicas (de hecho, celdas de lámina delgada). A esto hay que añadir la posibilidad de fabricar con un solo proceso un módulo fotovoltaico completo de superficie igual o superior a un metro cuadrado, eliminando por completo las etapas intermedias de fabricación de células individuales y su correspondiente conexión eléctrica.

La configuración más sencilla para las celdas de silicio amorfo es la de tipo de unión simple, que consiste principalmente en una superposición de 3 capas del material con diferentes propiedades electrónicas (véase la figura 2.8). La primera está fuertemente dopada con boro y es, por tanto, de tipo p; la segunda es de tipo intrínseco; la tercera está ligeramente dopada con fósforo y pasa a ser de tipo n. Las dos capas dopadas exteriores son la unión de los semiconductores y generan el campo eléctrico, mientras que la capa intermedia realiza principalmente la función de absorbente de la radiación solar.

La celda real se configura, empezando por el lado que estará orientado al Sol:

1. un sustrato de vidrio o material transparente con buenas características de transmisión de la radiación solar;
2. una película muy fina de material conductor y transparente (generalmente óxido de estaño), que constituirá el contacto eléctrico frontal y que puede ser tratada para aumentar el coeficiente de absorción y transmisión de la radiación incidente;
3. una capa de silicio amorfo, como se ha descrito anteriormente (nótese que, a diferencia de las celdas de silicio cristalino, la cara expuesta al sol es de tipo p);
4. un contacto posterior formado por un metal con buenas características de conducción y reflexión eléctrica (plata, aluminio, aleaciones de aluminio), capaz, además de actuar como electrodo, de hacer rebotar hacia la celda la parte de la radiación que la ha atravesado sin ser convertida.

Debido a los problemas de inestabilidad anteriormente mencionados, la tipología de celda que se describió es especialmente adecuada para

realizaciones en el campo de la electrónica de consumo de baja potencia (calculadoras, gadgets, etc.), pero poco competitiva para instalaciones al aire libre, caracterizadas por fuertes valores de irradiación. Sin embargo, el efecto Staebler-Wronski puede mitigarse utilizando la configuración de celdas de unión múltiple, que se analizará con más detalle en la sección 2.6.4. En esencia, la absorción de la radiación solar se distribuye entre dos o más celdas superpuestas, mitigando el efecto de la degradación. Sobre este concepto se basan, de hecho, celdas y módulos de reciente producción, destinados principalmente a su uso en el ámbito arquitectónico.

2.6.4. Celdas de lámina delgada

Se trata de una tecnología que pretende crear células fotovoltaicas formadas por láminas muy finas (de un grosor aproximado de 1 μm) utilizando silicio amorfo y otros semiconductores compuestos policristalinos. En la figura 2.9 se muestra una aplicación de celda fotovoltaica de lámina delgada.

La transformación directa de la energía solar en energía eléctrica se produce a través de capas de silicio amorfo depositadas, en espesores micrométricos, sobre una fina lámina flexible de acero inoxidable. La triple unión permite aumentar la eficiencia de conversión y la estabilidad del rendimiento a lo largo del tiempo incluso con niveles bajos de radiación solar incidente. Esta tecnología permite reducir el peso y la degradación de la conversión con el aumento de la temperatura de funcionamiento en comparación con el uso de células de silicio cristalino.

2.7. Conexiones de las celdas fotovoltaicas.

En esta sección se describen los tipos de conexiones típicas de las celdas fotovoltaicas.



Figura 2.9: Ejemplo de celda fotovoltaica de lámina delgada.
Fuente: (Valavanidis, 2016)

2.7.1. Conexiones en serie y paralelo.

Dado que las celdas proporcionan individualmente sólo una pequeña fracción de la potencia requerida, es necesario conectarlas respectivamente en serie y en paralelo (yendo a obstruir, como se verá más adelante, el módulo fotovoltaico) para obtener el voltaje y la intensidad de corriente deseadas. Las celdas idénticas conectadas en serie proporcionan una diferencia de potencial igual a la suma de las diferencias de potencial proporcionadas por las celdas individuales (ventaja), mientras que para las celdas idénticas conectadas en paralelo las corrientes son aditivas, es decir, proporcionan una corriente global igual a la suma de las corrientes producidas por las celdas individuales.

La figura 2.10 muestra cómo se debe realizar la conexión en serie y paralelo de celdas.

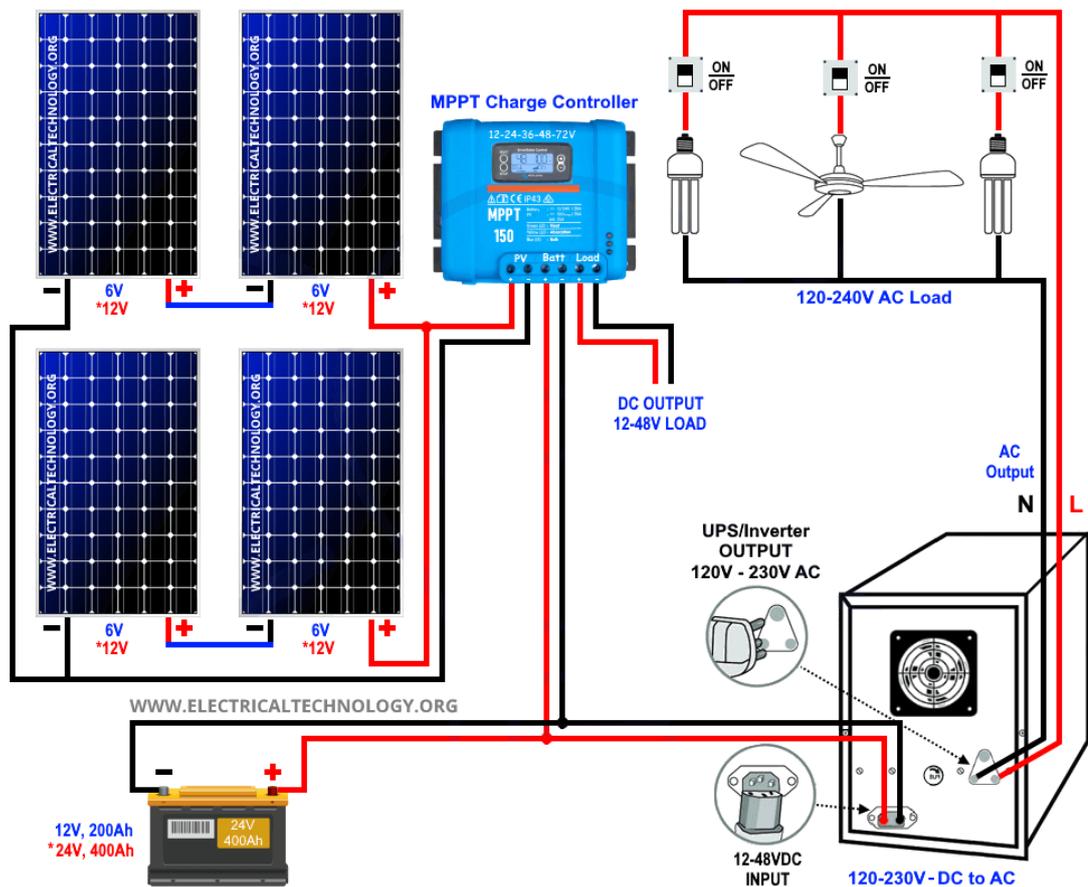


Figura 2.10: Ejemplo de celda fotovoltaica de lámina delgada.
Fuente: (Electrical, 2020)

En el caso de más de una celda en serie se tendrá:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

Sin embargo, en el caso de varias celdas en paralelo, se tendrá:

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

En este punto es posible elegir la combinación adecuada de celdas que se conectarán a la carga, y la característica eléctrica será la combinación de las dos que se acaba de describir. El dimensionamiento del sistema se basa

en la potencia necesaria, un parámetro que depende de las propias celdas; las celdas del mercado se definen en función de la potencia máxima, es decir, la potencia disponible en las mejores condiciones de irradiación que se dan durante unos pocos días al año. Por lo tanto, conociendo la potencia que se quiere generar con la instalación fotovoltaica, el número de celdas viene dado, y en función del voltaje nominal de la carga se puede valorar cuántas se conectarán en serie. A nivel macroscópico, pues, la disposición de los módulos fotovoltaicos en serie o en paralelo aumentará el voltaje y la corriente respectivamente.

2.7.2. Diferencias entre los dos modos de conexión

Si se conectan celdas de diferentes características en serie, el rendimiento de toda la fila de celdas estará limitado por el comportamiento de la celda de menor rendimiento, mientras que, si las celdas se conectan en paralelo, el rendimiento será la media de los rendimientos de las celdas individuales. Las configuraciones en paralelo, junto con la limitación del número de celdas en serie, tienen las siguientes ventajas:

- a. limitan la probabilidad de que se dañen las células y los módulos;
- b. minimizan los efectos de los fallos aleatorios en la potencia global desarrollada por el sistema;
- c. minimizan las pérdidas (llamadas desconexión) debido a que los módulos, producidos industrialmente, no tienen todas las mismas características eléctricas.

Para las instalaciones medianas y grandes, se tiende a favorecer el número de celdas conectadas en paralelo (alta corriente) en detrimento del número de celdas conectadas en serie (por tanto, bajo voltaje de salida).

2.7.3. Las propiedades eléctricas de las células

La tendencia de la corriente de la celda se describe mediante una curva en función de su voltaje, llamada curva característica (véase la figura 2.11) y muestra el comportamiento de la celda tanto en la oscuridad como en la luz. Aplicando una diferencia de potencial en la oscuridad, hay un paso de corriente sólo si el valor supera un determinado umbral, en cambio exponiendo la celda a la luz se genera en cualquier caso energía eléctrica; si la unión está en condiciones de cortocircuito ($V=0$) la corriente generada es máxima (IOC), mientras que en circuito abierto será el voltaje máximo que se determina en los dos extremos (VCA).

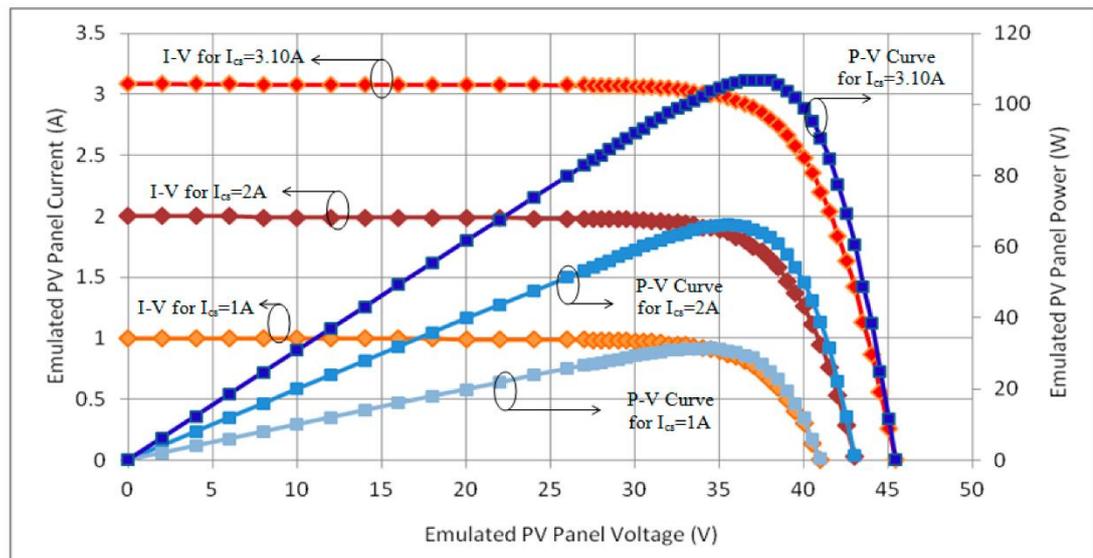


Figura 2.11: Curva característica de una celda fotovoltaica.
Fuente: (Zhou & Macaulay, 2017)

Para las celdas comerciales estándar ($10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$) de silicio, la ICC es 3 A , mientras que el VCA es 0.6 V . Dado que la potencia de un generador es el producto de su voltaje por la corriente generada, en los dos casos descritos la potencia será nula y a partir de la curva característica se puede identificar el punto en el que el aparato proporciona la máxima potencia.

La curva característica de una celda depende de sus propiedades intrínsecas (por ejemplo, el material), la intensidad de la radiación luminosa y

la temperatura de la propia celda. Un aumento de la temperatura dificulta el paso de los electrones en el semiconductor porque aumenta la amplitud y la frecuencia de oscilación de los átomos. Por lo tanto, la consecuencia del calentamiento del material semiconductor es, por tanto, un decaimiento.

Capítulo3: Simulación de sistema fotovoltaico y propuesta de factibilidad

Ahora se realizará la parte experimental de este trabajo mediante la simulación del sistema fotovoltaico propuesto utilizando el software MatLab/Simulink lo cual va a permitir demostrar la funcionalidad de este.

3.1. Descripción general de simulación y propuesta de factibilidad.

En el presente capítulo se desarrolla primero la simulación de un sistema fotovoltaico utilizando el software MatLab/Simulink que va a permitir demostrar la funcionalidad de este. Se escogió al software MatLab/Simulink ya que es una herramienta. Posterior a esto, se desarrolla la propuesta de factibilidad para la implementación del sistema fotovoltaico. En la sección 3.2 se realiza el diseño e implementación en MatLab/Simulink de un sistema fotovoltaico para electrificación en zonas rurales. En la sección 3.3 se analizan los resultados de la simulación propuesta. En la sección 3.4 en adelante se realiza la propuesta de factibilidad del sistema fotovoltaico.

3.2. Diseño e implementación en MatLab/Simulink del sistema fotovoltaico.

3.2.1. Métodos de investigación en la simulación.

Según Goldfield (2017), un método es un conjunto de procedimientos, reglas y principios de operaciones intelectuales para hacer un análisis que permita alcanzar un resultado mediante un análisis científico. En este sentido, se trata de un conjunto de principios que dirigen toda la investigación organizada y que permiten seleccionar y coordinar la investigación.

A. Fuentes electrónicas

En esta investigación se utilizaron las fuentes electrónicas visitando sitios web. Internet fue un buen instrumento para obtener la información que se necesitaba. A través de las fuentes electrónicas se accedió a diferentes revistas y libros en línea que desempeñaron un papel más importante para mejorar la idea que se tenía relacionada con el presente estudio.

B. Método de diseño

Los métodos de diseño son procedimientos, técnicas, ayudas o herramientas para diseñar. Ofrecen un número de diferentes tipos de actividades que un diseñador puede utilizar dentro de un proceso de diseño global. En este estudio se muestran todos los pasos necesarios para el diseño de un sistema fotovoltaico autónomo. El diseño del sistema fotovoltaico es el proceso de determinar el tamaño de cada componente del sistema de energía fotovoltaica autónomo con el fin de satisfacer las necesidades de carga.

El diseño se realiza mediante los siguientes pasos:

Paso 1 – Inspección del sitio: es el aspecto más importante del diseño porque ayuda a determinar si un sistema autónomo es viable o no. Los factores que influyen en la generación de energía del sistema fotovoltaico son la irradiación y la temperatura. A temperatura constante, la generación de energía del sistema fotovoltaico aumenta con el incremento de la irradiación, por lo que debe inspeccionarse la ubicación del sitio para conocer el número de días de sol al año.

Paso 2 – Determinación de los requisitos de carga: también es un punto importante en el diseño de la instalación fotovoltaica, ya que ayuda a conocer la potencia necesaria para satisfacer la demanda de los clientes. La carga se determina haciendo una lista de todos los electrodomésticos con

sus potencias y horas de funcionamiento, y sumándola para obtener la demanda media total de energía en vatios-hora o kilovatios-hora.

Paso 3 – Dimensionamiento de los módulos fotovoltaicos: una vez determinada la carga, el siguiente paso es conocer el número de módulos fotovoltaicos necesarios para la fiabilidad del sistema. En este paso se tiene que calcular lo siguiente: (a) uso total de la energía por día = uso total de los aparatos en vatios por día, (b) consumo total de energía por día = uso total de los aparatos en vatios-hora por día, (c) la energía total requerida del panel = consumo total de energía por día \times 1,3 donde 1,3 es el factor de pérdida de energía en el sistema. El mínimo de módulos fotovoltaicos necesarios es igual al total de energía requerida del módulo fotovoltaico dividido por el producto de la generación de energía y los vatios-pico del módulo fotovoltaico disponible. Las ecuaciones 2.1 a 2.7 explican este paso con un ejemplo de cálculo.

Paso 4 – Dimensionamiento del controlador de carga: en este paso se selecciona el controlador de carga adecuado para adaptar la tensión del conjunto fotovoltaico y la batería. El valor del regulador de carga es igual al producto del número de baterías en paralelo, la corriente de cortocircuito del módulo FV disponible y el factor de seguridad.

Paso 5 – Dimensionamiento del banco de baterías: este paso también es muy importante para la fiabilidad del sistema, ya que durante la noche y los días nublados se necesita suficiente energía para hacer funcionar los aparatos. La ecuación 2.8 se ha utilizado para determinar la capacidad de la batería del sistema.

Paso 6 – Dimensionamiento del inversor: el inversor es necesario para convertir la corriente continua en corriente alterna. Si la potencia nominal del inversor es inferior a la potencia total de la carga eléctrica, el sistema se sobrecargará, por lo que la potencia nominal del inversor debe ser un 25%-30% superior a la potencia de los aparatos. La ecuación 2.8 se ha utilizado para determinar la potencia del inversor.

Paso 7 – Tamaño de los cables: el propósito de este paso es hacer coincidir el tipo de cable que hay que utilizar con la corriente que pasará por él para mantener la fiabilidad y el rendimiento del sistema. Para determinar la sección transversal del cable se ha utilizado la ecuación 2.9.

Paso 8 – Estimación de costes: ahora que se tiene un proyecto también hay que calcular el dinero necesario para el funcionamiento del proyecto. En el sistema fotovoltaico, la estimación de costes es igual a la suma del coste de los componentes, el coste del equilibrio del componente del sistema y el coste de mantenimiento del sistema fotovoltaico por año. Las tablas 3.1 y 3.2 muestran los resultados de la estimación de costes del sistema propuesto.

3.2.2. Modelado del sistema de paneles fotovoltaicos en MatLab/Simulink.

En esta sección se presenta el modelado de paneles fotovoltaicos para trazar las características del módulo fotovoltaico. El modelado propuesto en la figura 3.1 representa un conjunto de células fotovoltaicas conectado a una resistencia variable. Esta resistencia tiene una rampa de entrada que sólo varía linealmente la resistencia en circuito cerrado hasta alcanzar los 30 pasos.

Dentro del subsistema del arreglo o conjunto de células se tiene 8 filas de células solares fotovoltaicas conectadas en serie, formadas por la librería SimElectronics® (véase la figura 3.2). Esta estructura puede construirse en cualquier configuración conectando varias filas de células solares en serie o en paralelo. La ventaja de utilizar este alto nivel de implementación es crear un circuito equivalente simple, que tiene parámetros mucho más complejos, incluyendo el efecto de la temperatura en el dispositivo que es muy importante para el comportamiento de este tipo de sistema. El modelado del panel fotovoltaico se valida mediante la simulación a un valor de irradiancia de 1 kW/m^2 y una temperatura de 25°C .

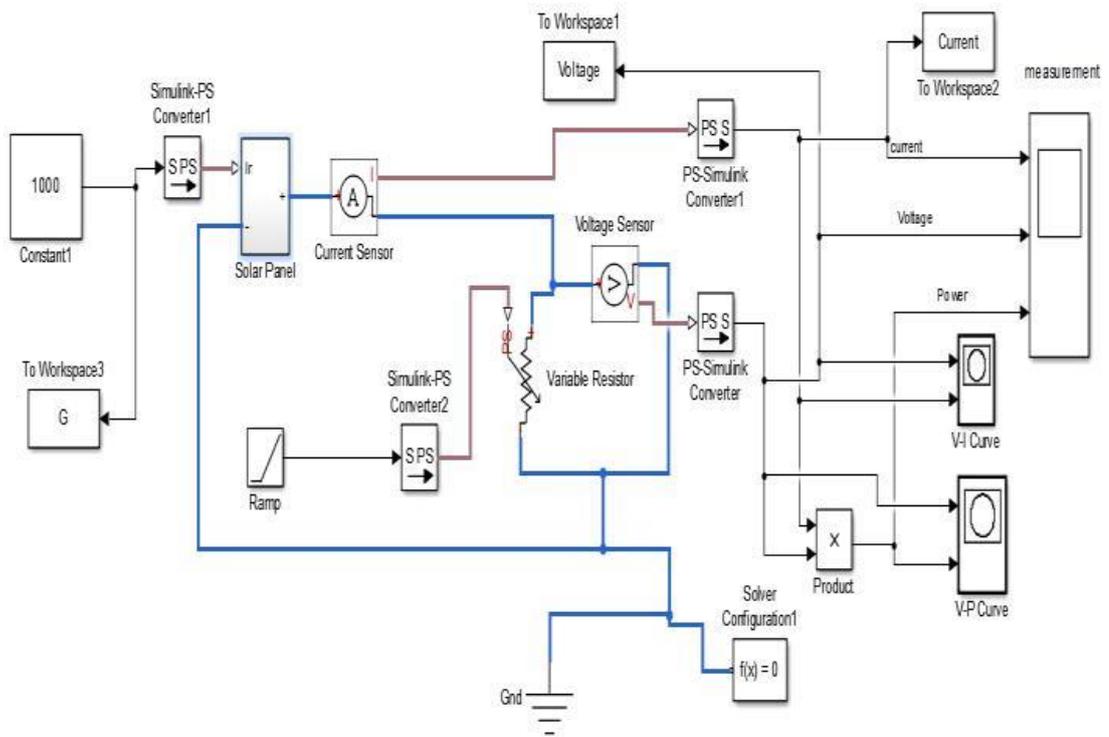


Figura 3.1: Modelado del sistema fotovoltaico utilizando Simulink.
Elaborado por: Autor.

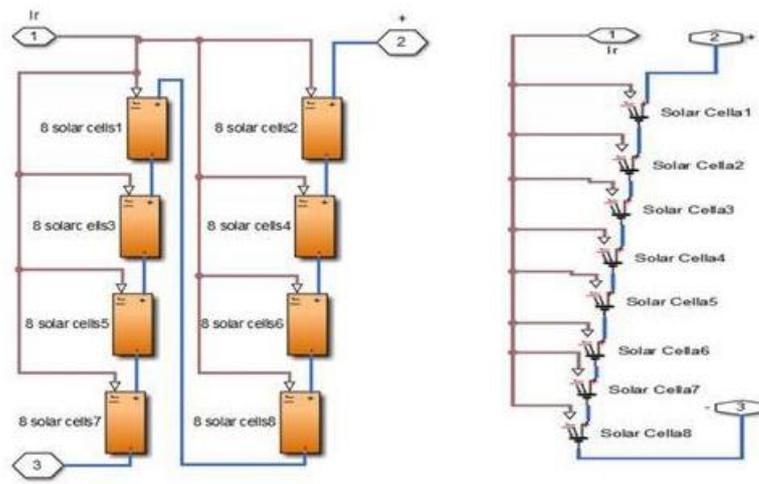


Figura 3.2: Conexiones de células solares en el subsistema de paneles fotovoltaicos.
Elaborado por: Autor.

En la tabla 3.1 se muestran los parámetros de simulación que se utilizan en Simulink para obtener las curvas características de corriente, voltaje y potencia del panel fotovoltaico.

Tabla 3.1: Cuadro comparativo de ventajas y desventajas para extracción de agua.

Parámetros	Datos
Corriente I_{sc} [A]	7.34
Voltaje V_{oc} [V]	0.6
Factor de calidad	1.5
Temperatura fija del circuito [°C]	25

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.3 se muestra la curva característica de la corriente, la figura 3.4 muestra la curva característica del voltaje y la figura 3.5 muestra la curva característica de la potencia que son obtenidas a la salida del arreglo del panel fotovoltaico. Es decir, que estas son las curvas de corriente, voltaje y potencia en función del tiempo. Cuando la resistencia varía, la corriente y voltaje también varían en función de la relación voltaje-tiempo que da la correspondiente curva de potencia.

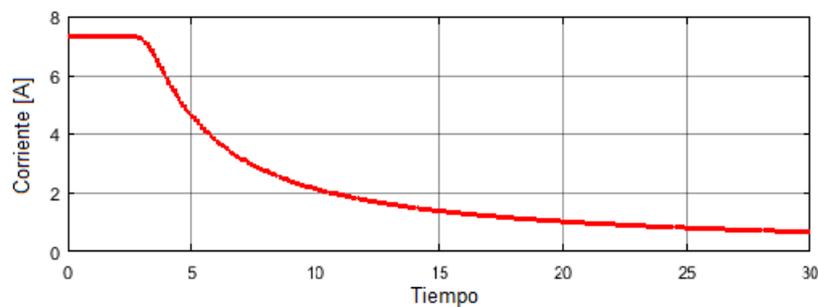


Figura 3.3: Representación de la curva característica de corriente vs tiempo en el panel fotovoltaico.

Elaborado por: Autor.

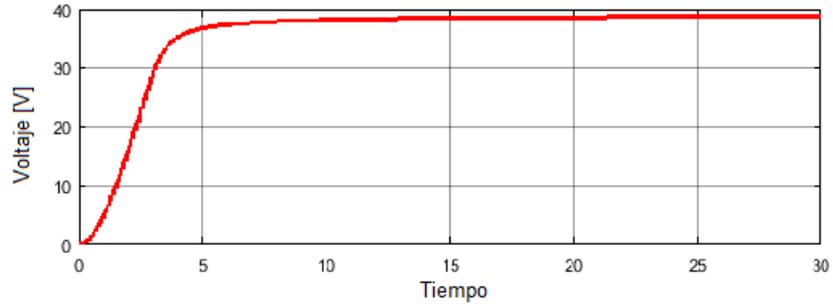


Figura 3.4: Representación de la curva característica del voltaje vs tiempo en el panel fotovoltaico.
Elaborado por: Autor.

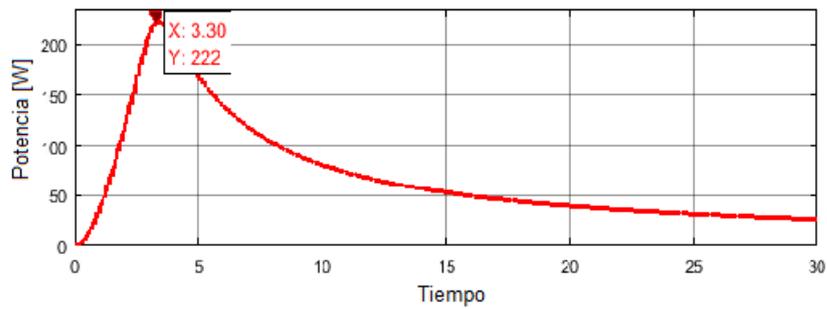


Figura 3.5: Representación de la curva característica de potencia vs tiempo en el panel fotovoltaico.
Elaborado por: Autor.

Las curvas características de voltaje-corriente (V-I) y voltaje-potencia (V-P) del conjunto (matriz) fotovoltaico se muestran en las figuras 3.6 y 3.7. La curva característica V-I representa el comportamiento estándar de la célula fotovoltaica y del arreglo fotovoltaico respectivamente. En el centro de esta característica se encuentra el punto de máxima potencia. Este punto es muy crítico para este tipo de sistema para la máxima extracción de potencia de la matriz fotovoltaica. El resultado es que el objetivo principal es tratar de operar alrededor de este punto máximo para hacer que las células fotovoltaicas trabajen con la máxima eficiencia.

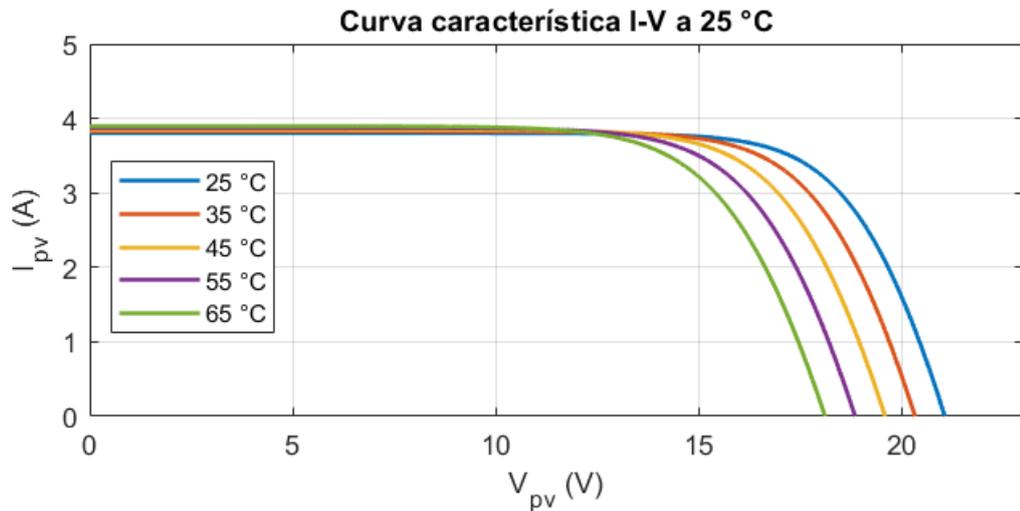


Figura 3.6: Representación de la curva característica I-V en el panel fotovoltaico.
Elaborado por: Autor.

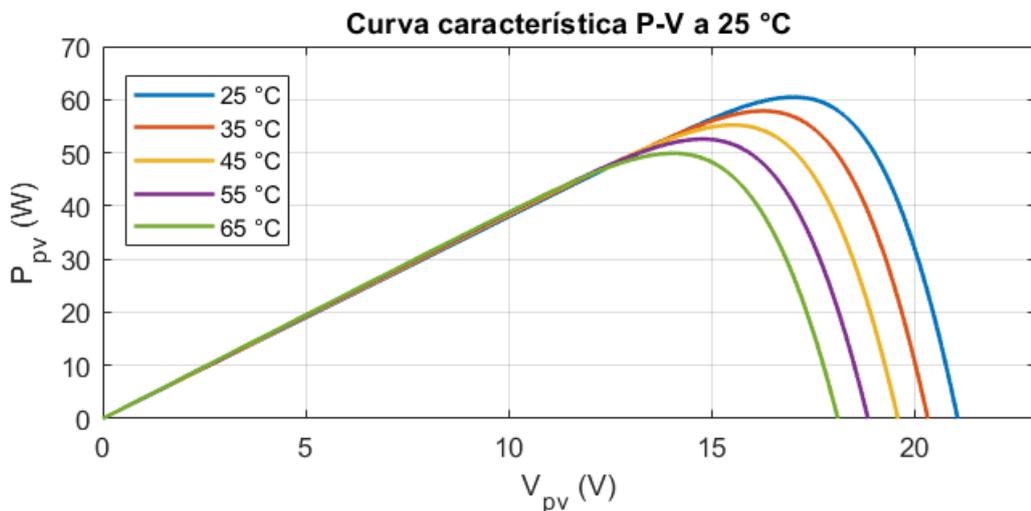


Figura 3.7: Representación de la curva característica P-V en el panel fotovoltaico.
Elaborado por: Autor.

La curva característica V-I de la radiación solar que incide sobre las células fotovoltaicas se modifica en la figura 3.8. Si la irradiación disminuye, la corriente fotovoltaica generada disminuye proporcionalmente, y la variación del voltaje en vacío es muy pequeña. La figura 3.9 muestra la curva característica P-V de la radiación solar. Si la irradiación disminuye, la potencia fotovoltaica generada disminuye proporcionalmente.

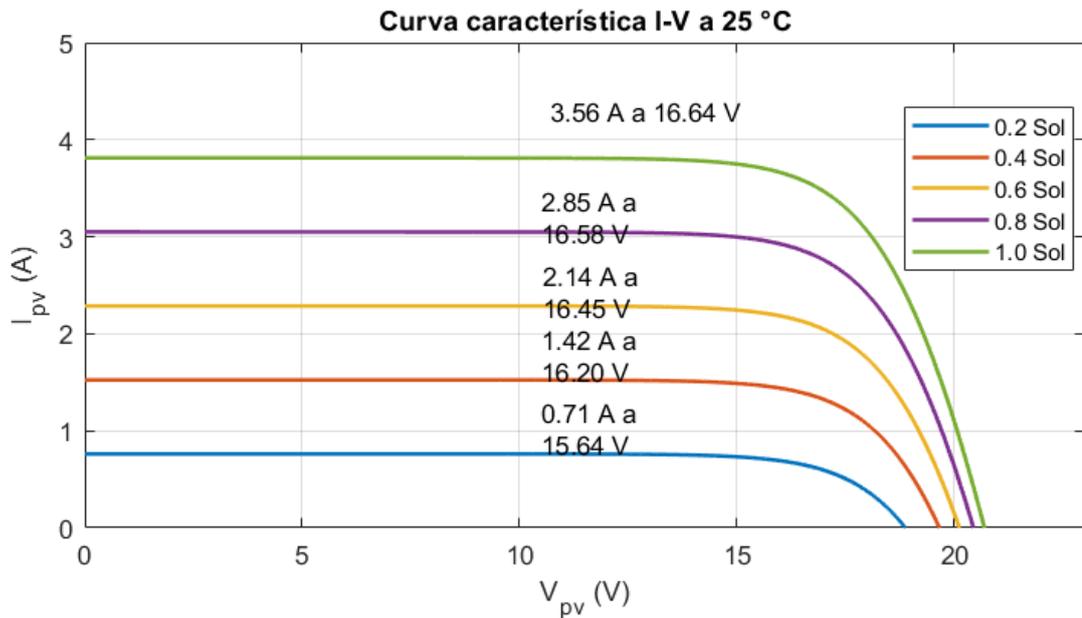


Figura 3.8: Representación de la curva característica P-V con relación a la irradiación solar en el panel fotovoltaico.
Elaborado por: Autor.

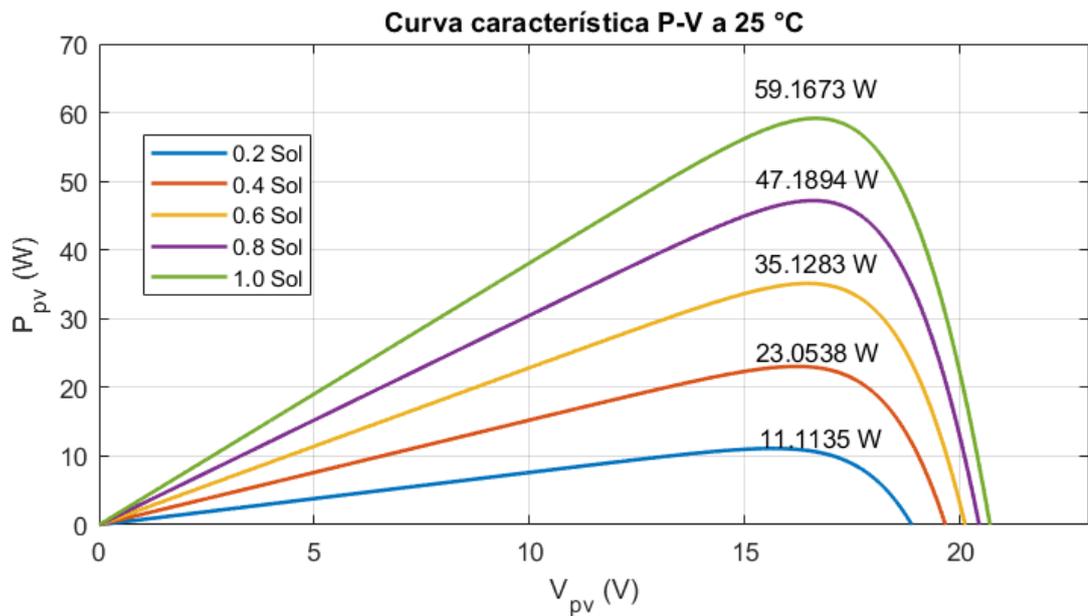


Figura 3.9: Representación de la curva característica P-V con relación a la irradiación solar en el panel fotovoltaico.
Elaborado por: Autor.

3.3. Análisis del número de paneles fotovoltaicos.

Para saber cuántos paneles solares necesita la bomba de agua, primero se debe conocer la potencia de la bomba de agua. La potencia de la

bomba depende de la necesidad de agua. Aunque, a parte de los paneles solares fotovoltaicos que es de uso doméstico se podría combinar con turbinas eólicas domésticas, pero no es parte del estudio sino más bien podría ser una ampliación del presente proyecto.

Además, también se debe considerar la altura de la cisterna o tanque, la profundidad del pozo y el flujo de agua requerido. Se puede conocer fácilmente la altura del depósito y la profundidad del pozo. Aunque también se debe conocer la caída de presión debida a las tuberías que llevan el agua. Aunque realizar los cálculos de flujo o caudal resulta ser complicado. Se sabe, que una persona a diario utiliza en promedio 30 litros de agua. Los animales grandes como las vacas consumen 40 litros de agua todos los días. Los más pequeños, como las ovejas, consumen solo 10 litros de agua al día. En un clima cálido como Muisne, estos valores pueden subir, especialmente en verano.

A continuación, se especifica brevemente los tipos de potencia requeridos de las bombas de agua con:

- a. Baja potencia: pueden bombear de 350 a 500 litros/hora a plena potencia y mediante un funcionamiento óptimo entre 5 y 8 horas, se puede bombear un máximo de 5.000 litros/día. Es decir, que, por su potencia, solo se necesitan 1 o 2 paneles fotovoltaicos con potencia de 160 W.
- b. Potencia media: con estas características pueden bombear hasta 20.000 litros de agua al día. Para este tipo de bombas se necesitan de 4 a 8 paneles fotovoltaicos con una potencia total de 1 kW o 1.5 kW.
- c. Alta potencia: tiene la capacidad de bombear 12.000 litros por hora a una altura de 100 metros. Para este tipo de bombas se requieren de 16 paneles fotovoltaicos de 340 W cada uno.

Estos cálculos del número de paneles fotovoltaicos son un aproximado en condiciones óptimas, como el de Isla de Muisne. La figura muestra la temperatura mínima y máxima promedio en Muisne, Esmeraldas para el año 2021. Si la instalación está ubicada en un área con menos luz solar, es posible que deba agregar más paneles fotovoltaicos.

A continuación, se describen para que fines se utiliza el bombeo de agua mediante paneles fotovoltaicos:

- a. Utilizado para agua de consumo doméstico: para que la gente pueda beber, ducharse y limpiar la casa. Debido a la necesidad de poca potencia, una pequeña bomba y un panel fotovoltaico son suficientes. Sin embargo, si hay una piscina, es posible que se requieran varios paneles fotovoltaicos adicionales.
- b. Utilizado para agua de consumo agrícola: requieren de mayor potencia y tener grandes tanques de agua para gestionar la extracción de agua. En este caso, se pueden requerir hasta 30 paneles fotovoltaicos.

3.4. El clima promedio en Esmeraldas

En Muisne, los veranos son cortos, lluviosos y nublados. Los inviernos son cortos y secos, con mucho viento y corrientes localizadas. Hace calor y está cargado todo el año. Las temperaturas durante todo el año suelen oscilar entre los 23°C y los 28°C, rara vez por debajo de los 22°C o por encima de los 29°C tal como se muestra en la figura 3.10. Según las puntuaciones de las playas/piscinas, la mejor época para ir a Muisne a realizar actividades termales es de principios de junio a finales de octubre.

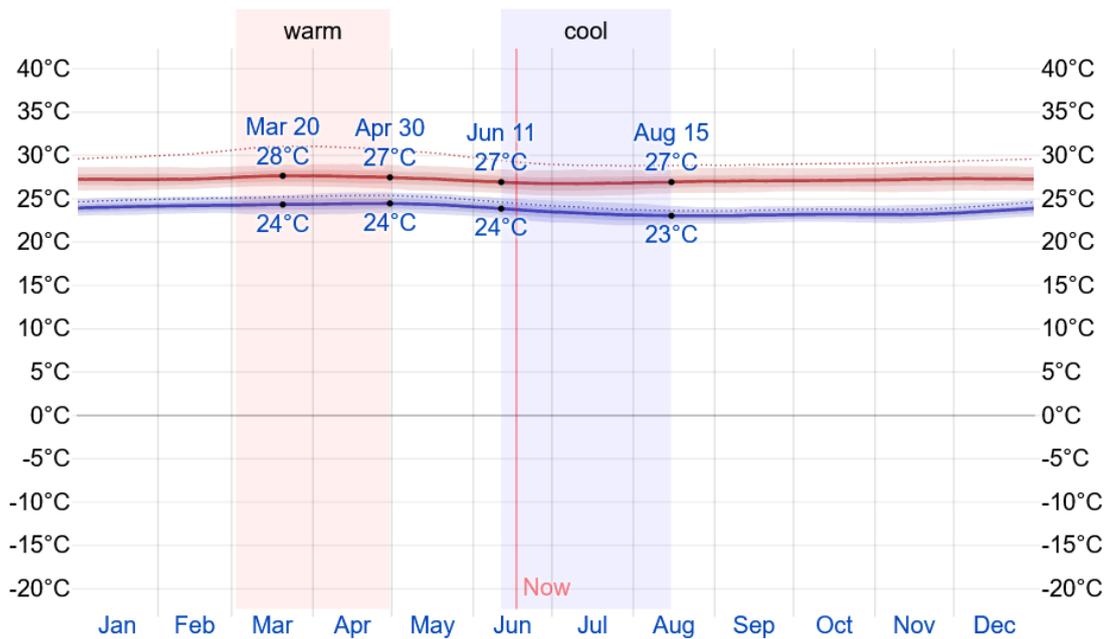


Figura 3.10: Estimación de temperatura priori y a posteriori en Muisne en el 2021.
Fuente: (Weather, 2021).

En general los valores observados indican que la temperatura durante casi todo el año favorece a la operatividad de los paneles fotovoltaicos. La línea roja representa la temperatura diaria alta (máxima) promedio y la línea azul representa la temperatura baja (mínima), con bandas de percentil 25 a 75 y 10 a 90. Las líneas finas de puntos son las correspondientes temperaturas medias percibidas. En la figura 3.11 se muestran las características breves de la temperatura promedio horaria a lo largo del año. Los ejes horizontal y vertical representan los meses (días) del año y la hora, respectivamente. El color representa a la temperatura promedio de esa hora y ese día.

La figura 3.12 muestra el tiempo (en horas) en la que es Sol es visible (línea negra). Las bandas de color amarillo (parte inferior) y color gris (parte superior) representan la luz diurna total, el crepúsculo (residencial, turístico y astronómico) y la noche.

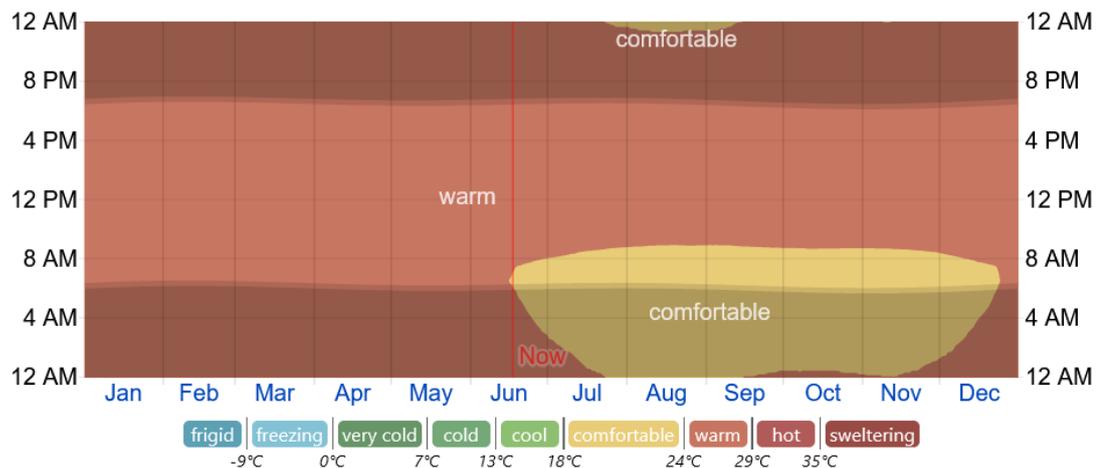


Figura 3.11: Representación de la temperatura promedio en Muisne en el 2021.
Fuente: (Weather, 2021).



Figura 3.12: Tiempo de visibilidad de la luz solar durante el 2021.
Fuente: (Weather, 2021).

3.5. Análisis comparativo de bombeo de agua.

La extracción de agua mediante el uso de paneles fotovoltaicos (FV) es una aplicación particularmente interesante en sistemas únicos o aislados. Desde hace mucho tiempo se ha comprobado que esta tecnología (FV) es una forma eficaz de proporcionar agua potable a la ciudadanía, tanto en sectores urbanos como comunidades rurales. También, muy utilizado en despliegue de riego por goteo o aspersion en el sector agrícola y suministra agua en el sector ganadero.

Desde que se realizaron las primeras instalaciones de bombas con paneles fotovoltaicos en el año 1978, la cantidad de sistemas

implementados a nivel mundial ha crecido drásticamente, y algunas investigaciones indicaban que más de 10000 funcionaban en el año de 1994 y otros predicen que para el 2025 cerca de 1 millón funcionarán en 2025.

Tabla 3.2: Cuadro comparativo de ventajas y desventajas para extracción de agua.

Sistema	Ventajas	Desventajas
Manual	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Precio bajo. ➤ Técnica sencilla. ➤ Fácil de mantener. ➤ No requiere de energía eléctrica. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Inspección periódica. ➤ Hay poco caudal de agua. ➤ Dedicar tiempo y energía que se pueden utilizar de otra manera más eficiente en otras actividades.
Fotovoltaico	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bajo nivel de mantenimiento. ➤ Fácil de instalar. ➤ Vida estable. ➤ El sistema modular se puede combinar según sus necesidades. ➤ No es inflamable. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ El costo inicial es relativamente alto. ➤ Producción de agua a partir de la radiación solar.
Diesel	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Inversión adecuada. ➤ Totalmente portátil (puedes llevarlo a cualquier sitio). ➤ Fácil de instalar. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ El mantenimiento inadecuado y muy frecuente lo que acortará su vida útil. ➤ Alto costo del combustible, y el suministro es intermitente. ➤ Problemas de ruido, polvo y humo.

Elaborado por: Autor.

En comparación con otras fuentes de energía, la elección del sistema de extracción de agua mediante paneles fotovoltaicos se basa sobre todo en factores de naturaleza geopolítica y económica. La práctica demuestra que un proyecto es financieramente viable cuando el ciclo hidráulico no supera los 1.500 m⁴. Cuando se requiere un ciclo hidráulico superior al indicado, los sistemas de bombeo a diesel o eléctrico son más rentables. En la tabla 3.2 se muestra la comparativa entre bombeo de agua manual, panel fotovoltaico y a diesel. Se puede observar los beneficios de utilizar paneles fotovoltaicos para la extracción de agua. La siguiente sección se realiza la descripción de

los materiales a utilizar en una implementación del sistema de extracción de agua mediante paneles fotovoltaicos.

3.6. Descripción de la propuesta de implementación de sistema fotovoltaico para bombeo de agua.

El sistema de extracción de agua mediante energía solar consiste principalmente en panel fotovoltaico, motor, pozo, sistema de tuberías y tanque de almacenamiento, tal como se muestra en la figura. Para el funcionamiento de extracción de agua mediante paneles fotovoltaicos se requiere del acondicionamiento de energía (controladores, inversores DC/AC u otros componentes electrónicos) que se conecta entre el panel fotovoltaico y el motor. Este dispositivo permite la operatividad del motor AC (bomba) y también mejora la eficiencia diaria promedio del sistema. Se debe incluir un sensor de nivel de agua de pozo y un tanque para garantizar que el sistema esté correctamente instalado y protegido de modo que se desperdicien las operaciones de succión y vacío, tal como se observa en la figura 3.13. De la figura 3.13 se va a considerar el panel fotovoltaico, controlador, inversor y batería, para lo cual el resto de los elementos no son considerados en la factibilidad del proyecto.

En la figura 3.14 se muestra el panel fotovoltaico monocristalino ECOGREEN ENERGY modelo EGE-375M-72 (potencia 375 W y 24 V) elegido para la implementación del sistema de extracción de agua y que es muy utilizado para suministro de energía residencial. En la tabla 3.3 se muestra las especificaciones técnicas eléctricas en STC y NOCT (véase la tabla 3.4). En el anexo 1 se muestra el datasheet del panel fotovoltaico elegido.

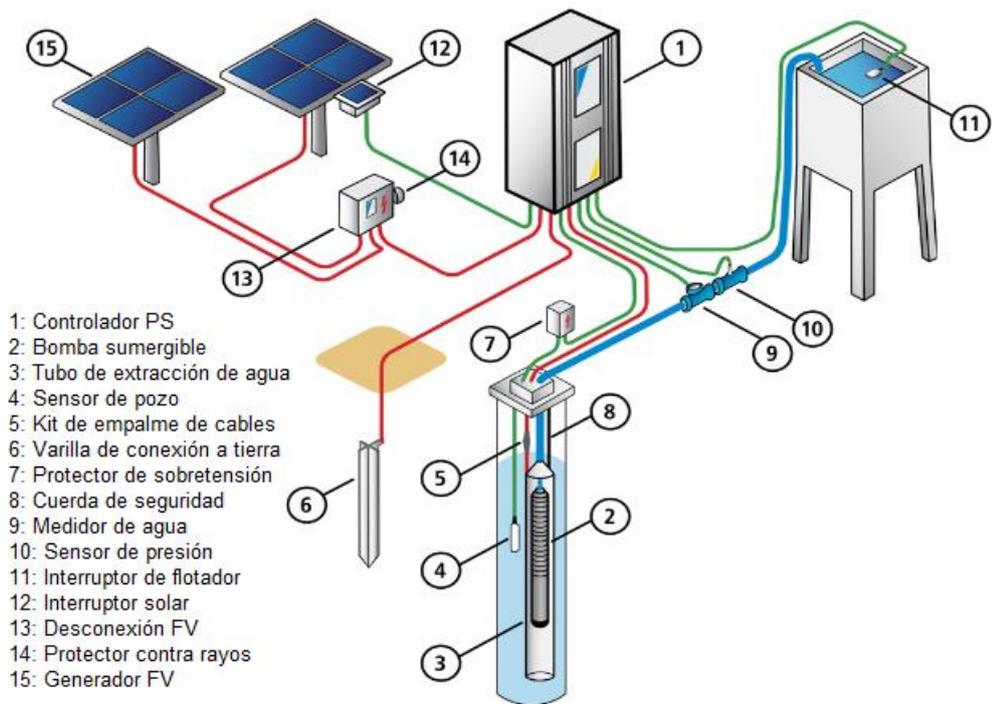


Figura 3.13: Representación del sistema de extracción de agua en pozos mediante paneles fotovoltaicos.
 Elaborado por: Autor.



Figura 3.14: Panel solar fotovoltaico EGE-375M-72.
 Elaborado por: Autor.

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas eléctricas en STC.

INFORMACIÓN ELÉCTRICA EN STC*

Potencia máxima (Pmax)	375 W
Tolerancia de potencia	0~+5 W
Eficiencia del módulo	19.33 %
Máxima capacidad de voltaje (Vmp)	39.77 V
Máxima capacidad de corriente (Imp)	9.43 A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	47.65 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	9.80 A

*Condiciones Estándar de Medida:Radiación:1000 W/m² · Temperatura de las celdas:25°C · AM:1.5

Elaborado por: Autor.

Tabla 3.4: Especificaciones técnicas eléctricas en NOCT.

INFORMACIÓN ELÉCTRICA EN NOCT*

Potencia máxima de salida (Pmax)	279.61 W
Capacidad máxima de voltaje (Vmp)	37.28 V
Capacidad máxima de corriente (Imp)	7.49 A
Voltaje de Circuito Abierto (Voc)	44.19 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	7.97 A

*Temperatura Nominal de Operación de la Celda:Irradiación:800W/m² · Temperatura ambiente:20°C · AM:1.5 · Velocidad del viento:1m/s

Elaborado por: Autor.

En las tablas 3.5 y 3.6 se muestran los valores característicos de temperatura y de los rangos máximos (temperatura, voltaje, corriente y carga) del panel fotovoltaico, respectivamente.

Tabla 3.5: Características de temperatura del panel fotovoltaico.

CARACTERÍSTICAS DE TEMPERATURA

NOCT	45 °C ±2 °C
Coefficiente de temperatura de Pmax	-0.396%/°C
Coefficiente de temperatura de Voc	-0.31%/°C
Coefficiente de temperatura de Isc	+0.06%/°C

Elaborado por: Autor.

Ahora hay que considerar la elección del inversor, la capacidad de producción y la frecuencia de funcionamiento, esta frecuencia se determina según los estándares de cada país. Por ejemplo, en Ecuador, la frecuencia de operación eléctrica es de 60 Hz y las necesidades del proyecto son aproximadamente 2.3 kW, para cual se selecciona el inversor MUST POWER modelo EP30-3kLV (véase la figura 3.15) con una potencia de procesamiento de 3 kW (ver datasheet en Anexo 2).

Tabla 3.6: Rangos máximos en temperatura, voltaje, corriente y carga del panel fotovoltaico.

RANGO MÁXIMO	
Rango de temperatura de operación	-45°C ~+85 °C
Máximo voltaje del sistema	1500 V
Rango máximo de capacidad del fusible	15 A
Máxima carga frontal (ejem. nieve)	5400 Pa
Máxima carga posterior (ejem. viento)	2400 Pa

Elaborado por: Autor.

En la tabla 3.7 se muestran las características técnicas del inversor elegido, específicamente para la salida del inversor, entrada en corriente alterna y batería. Dado que el sistema que se ha establecido es un sistema independiente, es necesario transferir la energía generada por los paneles solares fotovoltaicos que no se consume directamente en la casa para cargar el paquete de baterías. Por lo tanto, es necesario instalar un sistema de control de corriente, es decir, el uso de un inversor. Este modelo de inversor se dispone de un sistema de control de carga que no requiere la instalación de un sistema de derivación de carga.

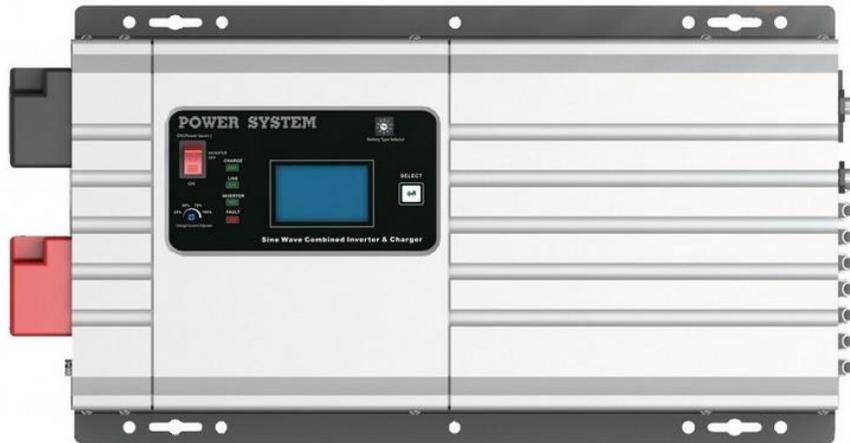


Figura 3.15: Inversor onda senoidal 3 kW MUSTPOWER.
Elaborado por: Autor.

Para la elección de la batería en el sistema propuesto, se debe recordar que las baterías emplean diferentes sistemas de carga debido a la energía eléctrica constante que proporcionan el panel fotovoltaico. Dado que la batería utiliza un sistema de carga progresivo, es necesario estimar la cantidad de corriente necesaria para satisfacer la demanda. Si se decide instalar una batería de 150 A porque actualmente es de 90 A, es de esperar que se necesite mayor corriente para satisfacer las necesidades de las casas residenciales (incluir más dispositivos para reducir los costos de planillas en CNEL). La batería requerida es una de Li-Ion (LiFePO4)

Tabla 3.7: Característica técnicas del inversor EP30-3kLV.

Parámetros		EP30-3kLV
Salida del inversor	Potencia nominal	3 kW
	Capacidad de sobretensión (20ms)	9 kW
	Potencia para arrancar un motor eléctrico	2 HP
	Tensión nominal de salida RMS	100V/110V/120VAC ($\pm 10\%$ RMS)
	Frecuencia de salida	50Hz/60Hz ± 0.3 Hz
	Eficiencia del inversor (pico)	>88%
	Eficiencia del modo de línea	>95%
	Factor de potencia	1.0

	Transferencia típica	10 ms (máx.)
Entrada AC	Voltaje	120 V _{AC}
	Rango de voltaje seleccionable	80~135 V _{AC} (para PCs)
	Rango de frecuencia	50Hz/60Hz (detección automática) 40~80 Hz
Batería	Voltaje mínimo de arranque	10 V _{DC} /10.5 V _{DC} para modo 12 V _{DC} (*2 para 24 V _{DC} , *4 para 48 V _{DC})
	Alarma de batería baja	10.5 V _{DC} ± 0.3 V para modo 12 V _{DC} (*2 para 24 V _{DC} , *4 para 48 V _{DC})
	Corte de batería baja	10.0 V _{DC} ± 0.3 V para modo 12 V _{DC} (*2 para 24 V _{DC} , *4 para 48 V _{DC})
	Alarma de alta tensión	16 V _{DC} ± 0.3 V para modo 12 V _{DC} (*2 para 24 V _{DC} , *4 para 48 V _{DC})
	Recuperación de alto voltaje de la batería	15.5 V _{DC} ± 0.3 V para modo 12 V _{DC} (*2 para 24 V _{DC} , *4 para 48 V _{DC})

Elaborado por: Autor.

Finalmente, se debe considerar en la implementación el controlador del sistema propuesto. El controlador elegido es de la marca TriStar modelo PWM 60A / 12-24-48. Este equipo es un controlador de tres funciones (véase la figura 3.16) que proporciona (a) carga de batería solar confiable, (b) control de carga o (c) regulación por derivación. El controlador opera en uno de estos modos a la vez y se pueden usar dos o más controladores para proporcionar múltiples funciones. En Anexo 3 se puede revisar el datasheet del controlador PWM 60 A.

El equipo PWM 60 A de la marca TriStar utiliza tecnología avanzada y producción automatizada para brindar nuevas y emocionantes características a un costo competitivo. El medidor TriStar opcional es el medidor controlador más sofisticado e informativo del mercado. El controlador está listado por certificación UL y está diseñado tanto para sistemas solares domésticos como para aplicaciones profesionales.

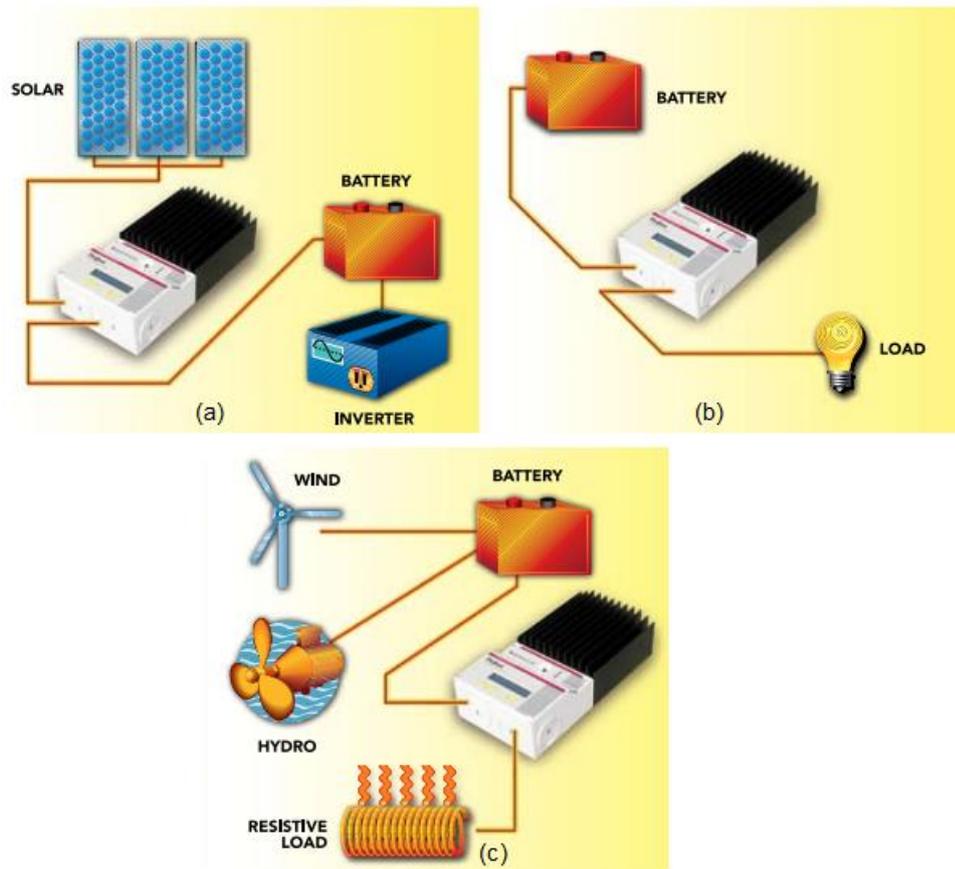


Figura 3.16: Representación esquemática de funcionalidad del equipo TriStar (a) carga de batería, (b) control de carga y (c) regulación por derivación.

Elaborado por: Autor.

3.7. Presupuesto de la propuesta de implementación del sistema fotovoltaico para extracción de agua.

En esta sección se presenta el costo aproximado de implementar la extracción de agua en pozos utilizando paneles solares fotovoltaicos. En la tabla 3.8 se muestra el presupuesto de implementación. El costo del sistema no es muy alto sin embargo para sectores rurales como la Isla de Muisne sería significativamente una inversión alta. La ventaja es que el sistema a mediano plazo puede representar un ahorro de consumo de energía eléctrica convencional (planillas de CNEL). Esto sucede porque el sistema propuesto puede abastecer de energía a iluminarias del hogar. El sistema propuesto es para cada hogar de la zona rural de Isla de Muisne, aunque el municipio podría realizar un sistema de bombeo a gran escala para

extracción y distribución del agua, pero en esta propuesta no fue considerado.

Tabla 3.8: Presupuesto de implementación.

Ítem	Precio (USD)
Panel Solar 375Wp /24VDC Monocristalino FULL BLACK	180.00
Inversor/cargador Onda Senoidal Pura 3kW MUST POWER	672.00
Controlador PWM 60A/12-24- 48VDC MORNINGSTAR	295.68
Batería 150 Ah	403.20
TOTAL (USD)	1550.88

Elaborado por: Autor.

CONCLUSIONES

- Este trabajo describe una nueva implementación de la célula solar mediante el uso de MATLAB®/Simulink® de matrices fotovoltaicas y el modelado con datos experimentales. Para construir el panel fotovoltaico se utilizó el bloque Solar Cell y la potencia producida por un conjunto fotovoltaico se ve afectada por el cambio de la irradiación. El modelo implementado fue validado mediante simulación.
- Este tipo de sistema de energía solar se puede modelar cerca de los clientes, lo que reduce el costo de transmisión, las pérdidas y el costo de transporte. Por lo tanto, el sistema de energía fotovoltaica descentralizada es la solución de la demanda de energía a bajo costo sin degradación del medio ambiente, es muy importante instalar un sistema de energía fotovoltaica para generar electricidad en las zonas rurales.
- La propuesta presentada es factible de implementar en zonas rurales como es el caso de Isla de Muisne y también permite conectar iluminaria e inclusive permite la carga de dispositivos electrónicos. El presente trabajo sirve para a futuro expandir el estudio de implementar energía renovable solar fotovoltaica en sectores rurales donde no pueda llegar el servicio de energía eléctrica pública.

RECOMENDACIONES.

- El gobierno debería animar y facilitar a los inversores privados para que aumenten y amplíen sus inversiones en proyectos de sistemas de energía solar mediante paneles fotovoltaicos. El gobierno debería promover el proyecto de sistema de energía solar a través de la educación y la formación para estar en condiciones de suministrar la energía producida por el sistema de energía solar. El gobierno debería instalar sistemas fotovoltaicos en las aldeas para generar electricidad.
- Incrementar el número de proyectos experimentales (simulación y laboratorio) y abarcar otras fuentes renovables que complementen aún más lo que se cubrió anteriormente. La experiencia práctica de los proyectos va a proporcionar a los maestrantes la oportunidad de demostrar los conocimientos adquiridos en las clases.
- Realizar el diseño e implementación de un sistema fotovoltaico de 1kW como infraestructura de un laboratorio de energía solar renovable en la maestría en electricidad.

Bibliografía

- Al-Najideen, M. I., & Alwashdeh, S. S. (2017). Design of a solar photovoltaic system to cover the electricity demand for the faculty of Engineering-Mu'tah University in Jordan. *Resource-Efficient Technologies*, 3(4), 440–445. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2017.04.005>
- Bayod-Rújula, A. A. (2019). Solar photovoltaics (PV). En *Solar Hydrogen Production* (pp. 237–295). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00008-4>
- Colombo, E., Masera, D., & Bologna, S. (2013). Renewable Energies to Promote Local Development. En E. Colombo, S. Bologna, & D. Masera (Eds.), *Renewable Energy for Unleashing Sustainable Development* (pp. 3–25). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00284-2_1
- Electrical, T. (2020). *Series-parallel connection of solar panels*. <https://www.electricaltechnology.org/2020/09/series-parallel-connection-of-solar-panels.html>
- Fisher, G., Seacrist, M. R., & Standley, R. W. (2012). Silicon Crystal Growth and Wafer Technologies. *Proceedings of the IEEE*, 100(Special Centennial Issue), 1454–1474. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2189786>
- Fraas, L. M. (2014). The Dream of Thin Film PV. En L. M. Fraas, *Low-Cost Solar Electric Power* (pp. 73–79). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07530-3_6
- Griffa, B., & Marcó, L. (2018). Producir electricidad con biomasa: Beneficios, experiencias y actualidad en Argentina. *RFCE*, 19. <https://doi.org/10.30972/rfce.0192858>
- Leedy, P. D., Ormrod, J. E., & Johnson, L. R. (2019). *Practical research: Planning and design* (Twelfth edition). Pearson.

- McMillan, J. H., & Schumacher, S. (2014). *Research in education: Evidence-based inquiry*. Pearson.
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlabk&db=nlabk&AN=1418110>
- Pinochet, P. (2013, octubre 26). Biocombustibles de 2ª Generación. *Plataforma Tecnológica*.
<https://tecnologiaschile.com/2013/10/26/biocombustibles-de-2a-generacion-chile-new-technologies/>
- Plante, R. H. (2014). Solar Photovoltaic Systems. En *Solar Energy, Photovoltaics, and Domestic Hot Water*. (pp. 75–92). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420155-2.00005-0>
- Ponce Jara, M., Alvarado, M., & Arcentales, A. (2017). *As redes eléctricas inteligentes y su importancia para mitigar los alcances de los desastres naturales*. II Congreso Internacional de Electromecánica y Eléctrica, Latacunga, Ecuador.
- Sainthiya, H., & Beniwal, N. S. (2017). Different types of cooling systems used in photovoltaic module solar system: A review. *2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 1500–1506.
<https://doi.org/10.1109/WiSPNET.2017.8300012>
- Saunders, M. N. K., Lewis, P., & Thornhill, A. (2019). *Research methods for business students* (Eighth Edition). Pearson.
- Valavanidis, A. (2016). Renewable and Environmentally Sustainable Energy Sources. The Role of Chemistry and New Technological Developments. *WEBSITE: www.chem.uoa.gr, Scientific Reports*, 1, 1–56.
- Weather, S. (2021). *Average Weather in Muisne, Ecuador, Year Round—Weather Spark*. <https://weatherspark.com/y/18306/Average-Weather-in-Muisne-Ecuador-Year-Round>

Zhou, Z., & Macaulay, J. (2017). An Emulated PV Source Based on an Unilluminated Solar Panel and DC Power Supply. *Energies*, 10(12), 2075. <https://doi.org/10.3390/en10122075>



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Criollo Espantoso, Félix Daniel** con C.C: # 2000054805 autor del Trabajo de Titulación: **Estudio de factibilidad del diseño de un sistema generación de energía fotovoltaica para bombeo de agua Isla de Muisne, de la Provincia de Esmeraldas**, previo a la obtención del título de **Magister en Electricidad** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 15 de marzo del 2022

f. _____

Nombre: Criollo Espantoso, Félix Daniel

C.C: 2000054805

REPOSITARIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Estudio de factibilidad del diseño de un sistema generación de energía fotovoltaica para bombeo de agua Isla de Muisne, de la Provincia de Esmeraldas		
AUTOR(ES)	Criollo Espantoso, Félix Daniel		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	MSc. Manuel Romero Paz; MSc. Diana Bohórquez Heras / MSc. Celso Bayardo Bohórquez Escobar		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
CARRERA:	Maestría en Electricidad		
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Electricidad con mención en Energías renovables y Eficiencia Energética		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	15 de marzo del 2022	No. DE PÁGINAS:	75
ÁREAS TEMÁTICAS:	Energías renovables, Modelado de simulaciones		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Energía, Renovable, Fotovoltaico, Monocristalino, Policristalino, Matlab		
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>El presente proyecto de titulación de la maestría se realiza el “estudio de factibilidad del diseño de un sistema generación de energía fotovoltaica para bombeo de agua Isla de Muisne, de la Provincia de Esmeraldas”. La energía solar utiliza células solares o paneles fotovoltaicos para convertir la energía luminosa directamente en electricidad. Hay dos tipos principales de tecnología solar: fotovoltaica y térmica. En los últimos años, la creciente demanda de energía y servicios relacionados está demostrando ser una respuesta al crecimiento de la población y al sano desarrollo económico y social de las personas. En el capítulo 2 se realiza la descripción teórica de energías renovables y de los paneles fotovoltaicos que es la parte fundamental del tema propuesto. En el capítulo 3 se desarrolla una simulación de paneles fotovoltaicos para ver el comportamiento de las curvas características, después se presenta el análisis de los elementos que se utilizarán en la propuesta y finalmente se presenta el costo de implementar en cada hogar la extracción de agua mediante paneles fotovoltaicos.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: 0992587497	E-mail: daniel_criollo@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:	Nombre: Bohórquez Escobar, Celso Bayardo		
COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Teléfono: 0995147293		
	E-mail: celso.bohorquez@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			