UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Potencial de producción de H2 verde a partir de la electrólisis del agua en la región Piura

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

Daniel Ángel Caravantes Samamé
Juan Diego Carbajal Mauricio

Asesor:
Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana

Piura, octubre de 2022

NOMBRE DEL TRABAJO

Potencial de producción de H2 verde a p artir de la electrólisis del agua en la regió n Piura.pdf

AUTOR

Caravantes-Carbajal

RECUENTO DE PALABRAS

72919 Words

RECUENTO DE CARACTERES

294475 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

158 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

5.7MB

FECHA DE ENTREGA

Oct 27, 2022 8:11 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Oct 27, 2022 8:35 AM GMT-5

11% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base d

- 10% Base de datos de Internet
- 4% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossr

Excluir del Reporte de Similitud

- Base de datos de trabajos entregados

Resumen

Ante la necesidad de reducir las emisiones de gases contaminantes para mitigar el cambio climático, surge la oportunidad de desarrollo ingenieril de la producción de H_2 verde, el cual es considerado el combustible del futuro, gracias a sus características energéticas y a sus distintas aplicaciones industriales. El presente trabajo de investigación se centra en el análisis del potencial de producción de H_2 verde, a partir de la electrólisis del agua en la región Piura. Se consideran a 3 tipos de fuentes renovables: la eólica, la solar y la de biomasa.

Para el análisis referente a la energía eólica se utilizaron datos de velocidad del viento media mensual extraídos de plataforma NASA POWER Data *Access Viewer*, mientras que para el de la energía solar se emplearon los datos de irradiación del programa web del PVGIS (*PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM*) y el software MATLAB® para el cálculo de las Horas Solar Pico (*HSP*). Por último, en el caso de la energía de biomasa se extrajeron datos del anuario agrícola del año 2019, proporcionado por el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI).

El resultado del estudio indica que en Piura se puede obtener una producción de 947,202.28 t H_2 anualmente, de la cual el mayor aporte proviene de la energía solar (94.8%). Además, se determinó cuáles son los distritos con mayor potencial de producción utilizando los tres tipos de fuentes de renovables mencionadas anteriormente.

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Tabla de contenido

Introducción 15

Estado del arte 17

Capítulo 1 El hidrógeno y sus métodos de producción 21

1.1 El hidrógeno 21

1.1.1 Propiedades 21

1.1.2 El hidrógeno como vector energético 23

1.1.3 El hidrógeno verde 24

1.1.4 Estado del mercado 25

1.2 Tecnologías de producción de hidrógeno 27

1.2.1 Tecnologías de descomposición de agua 28

1.2.2 Tecnologías en procesos de biomasa 32

Capítulo 2 Energías renovables en Piura 39

2.1 Las fuentes de energía renovable 39

2.1.1 Energía solar 40

2.1.2 Energía eólica 44

2.1.3 Energía de la biomasa 48

2.2 Beneficios y retos de las energías renovables 50

2.2.1 Beneficios de las energías renovables 50

2.2.2 Retos de las energías renovables 51

2.3 Estado actual de las energías renovables 53

2.3.1 Estado actual de las energías renovables en el mundo 53

Capítulo 3 Potencial de producción de H_2 a partir del uso de energía eólica en Piura 57

3.1 Selección de aerogenerador 57

3.2 Energía generada por la instalación 58

3.2.1 Estudio de la velocidad media mensual del viento 58

3.2.2 Cálculo de la potencia desarrollada por cada aerogenerador 59
3.2.3 Superficie ocupada por cada aerogenerador 61
3.2.4 Cálculo de la energía eléctrica generada por la instalación 62
3.3 Cálculo del H_2 eólico producido a partir de la electrólisis del agua 62
3.3.1 Producción de H_2 eólico por área 62
3.3.2 Cálculo de superficie útil 64
3.3.3 Potencial de producción anual de H_2 eólico 65
Capítulo 4 Potencial de producción de H_2 a partir del uso de energía solar en Piura 67
4.1 Normativa peruana 67
4.2 Selección de paneles fotovoltaicos 67
4.2.1 Características técnicas 67
4.3 Energía generada por la instalación 70
4.3.1 Estudio de la irradiación y cálculo de la hora solar pico (HSP) 70
4.3.2 Cálculo del rendimiento del sistema eléctrico (PR) 72
4.3.3 Cálculo de la potencia pico del generador (P_{mp}) 73
4.3.4 Cálculo de la energía eléctrica generada por la instalación 73
4.4 Cálculo del H_2 solar producido a partir de la electrólisis del agua 73
4.4.1 Producción de H_2 solar por área 73
4.4.2 Potencial de producción anual de H_2 solar 76
Capítulo 5 Potencial de producción de H_2 a partir del uso de energía de biomasa en Piura 79
5.1 Cálculo de la energía eléctrica generada a partir del uso de energía de biomasa y la electrólisis del agua 79
5.1.1 Cálculo de la energía eléctrica generada a partir de residuos de cultivo. 79
5.1.2 Cálculo de la energía eléctrica generada a partir de deyecciones de ganado. 82
5.2 Potencial de producción anual de H_2 de biomasa a partir de la electrólisis 86
5.3 Potencial de producción anual de H_2 de biomasa a partir del reformado de bioetanol 86
Capítulo 6 Discusión de resultados 89
6.1 Potencial de producción de H_2 verde a partir de la electrólisis del agua en Piura 89
6.2 Posibles usos finales del H_2 verde 90
6.2.1 Consumo energético a nivel nacional y comparación con el potencial de H_2 verde 90
6.2.2 Consumo energético en Piura y comparación con el potencial de H_2 verde 95
6.2.3 Impacto ambiental 97

6.3 Potencial de producción de H_2 eólico a partir de la electrólisis del agua en Piura 100
6.3.1 Distritos con mayor potencial 101
6.3.2 Producción en Sechura 103
6.4 Potencial de producción de H_2 solar a partir de la electrólisis del agua en Piura 103
6.4.1 Distritos con mayor potencial 104
6.4.2 Producción en La Brea 106
6.5 Potencial de producción de H_2 de biomasa a partir de la electrólisis y reformado 106
Conclusiones 109
Referencias bibliográficas 113
Apéndices 119
Apéndice A Coordenadas geográficas, superficie y densidad poblacional de cada distrito de Piura 121
Apéndice B Energía eléctrica por área generada a partir del uso de la energía eólica en cada distrito de Piura 123
Apéndice C Superficie útil de cada distrito de la región Piura 124
Apéndice D Radiación media mensual en cada distrito de Piura 125
Apéndice E Código de MATLAB® para el cálculo de la radiación media mensual 127
Apéndice F Energía eléctrica por área generada a partir del uso de la energía solar en cada distrito de Piura 128
Anexos 131
Anexo A Velocidad del viento media mensual en cada distrito de Piura 133
Anexo B Ficha técnica del aerogenerador elegido 135
Anexo C Ficha técnica de los paneles fotovoltaicos elegidos 137
Anexo D Datos mensuales de irradiación global horizontal en Talara 139
Anexo E Datos mensuales de irradiación global horizontal en Sullana 141
Anexo F Datos mensuales de irradiación global horizontal en Paita 144
Anexo G Datos mensuales de irradiación global horizontal en Piura 147
Anexo H Datos mensuales de irradiación global horizontal en Sechura 151
Anexo I Datos mensuales de irradiación global horizontal en Morropón 153
Anexo J Datos mensuales de irradiación global horizontal en Ayabaca 157
Anexo K Datos mensuales de irradiación global horizontal en Huancabamba 161

Anexo L Hora solar pico (HSP) mensual en cada distrito de Piura 164

Lista de figuras

Figura 1. Demanda anual de hidrógeno en el mundo de 1975 al 2018 25

Figura 2. Clasificación del mercado mundial del hidrógeno en 2019 a partir del método de producción 25

Figura 3. Costos de producción del hidrógeno a partir de su fuente de producción en 2018 26

Figura 4. Clasificación de tecnologías de producción a partir de fuentes renovables..... 27

Figura 5. Tecnologías de descomposición del agua y sus fuentes de energía renovable 28

Figura 6. Partes de la electrólisis del agua 29

Figura 7. Flujograma de la producción de H_2 a partir de electrólisis..... 29

Figura 8. Electrolizador PEM..... 30

Figura 9. Flujograma de la producción de H_2 a partir de termólisis indirecta..... 31

Figura 10. Flujograma de la producción de H_2 a partir de la pirólisis de biomasa 33

Figura 11. Flujograma de la producción de H_2 a partir de la gasificación de biomasa 34

Figura 12. Flujograma de la producción de H_2 a partir de la biofotólisis directa 35

Figura 13. Flujograma de la producción de H_2 a partir de la biofotólisis indirecta 36

Figura 14. Flujograma de la producción de H_2 a partir de la fermentación oscura 37

Figura 15. Flujograma de la producción de H_2 a partir de la fotofermentación 37

Figura 16. Principales fuentes de energía renovable y sus correspondientes tecnologías de generación eléctrica..... 39

Figura 17. Formas de radiación solar en nuestro planeta 40

Figura 18. Esquema de un colector solar de placa plana..... 41

Figura 19. Esquema de una central solar de concentración 42

Figura 20. Ejemplo de panel de energía solar fotovoltaica 43

Figura 21. Componentes de un aerogenerador 46

Figura 22. Aerogenerador de eje vertical (izquierda) y de eje horizontal tripala (derecha) 47

Figura 23. Parque eólico *offshore* (izquierda) y *onshore* (derecha) 48

Figura 24. Tipos de biomasa 49

Figura 25. Máximo factor de planta de distintos tipos de centrales en Perú (2018) 52

Figura 26. Evolución de la potencia instalada por recurso energético renovable en el mundo (2010-2019) 53

Figura 27. Evolución de la electricidad generada por recurso energético renovable en el mundo (2010-2019) 54

Figura 28. Distribución de la potencia instalada (izquierda) y de la electricidad generada (derecha) por recurso energético renovable en el mundo (2019) 55

Figura 29. Distribución de la potencia instalada (izquierda) y electricidad generada (derecha) por regiones (2019) 56

Figura 30. Curva de potencia del aerogenerador seleccionado 59

Figura 31. Parámetros del cálculo de la superficie ocupada por cada aerogenerador 62

Figura 32. Producción anual de H_2 eólico por área en cada distrito de Piura 63

Figura 33. Parámetros del cálculo de la distancia entre filas de paneles 69

Figura 34. Parámetros del cálculo de la superficie ocupada por cada panel 69

Figura 35. Irradiación incidente del mes de enero en Piura distrito 71

Figura 36. Hora solar pico (HSP) 71

Figura 37. Producción anual de H_2 solar por área en cada distrito de Piura 76

Figura 38. Mapa de la velocidad media anual del viento en Sudamérica 100

Figura 39. Mapa de la velocidad media anual del viento en Perú 101

Figura 40. Producción anual de H_2 eólico por área en los distritos con más potencial 102

Figura 41. Producción anual de H_2 eólico en los distritos con más potencial 102

Figura 42. Producción mensual de H_2 eólico por área en Sechura 103

Figura 43. Mapa de la irradiación global horizontal por año en Sudamérica 104

Figura 44. Mapa de la irradiación global horizontal por año en Perú 104

Figura 45. Producción anual de H_2 solar por área en los distritos con más potencial 105

Figura 46. Producción anual de H_2 solar en los distritos con más potencial.....105

Figura 47. Producción mensual de H_2 solar por área en La Brea 106

Figura 48. Producción anual de H_2 de biomasa por área en Piura y en provincias de Ecuador 107

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Lista de tablas

Tabla 1. Valores de la densidad y el peso específico del hidrógeno 21

Tabla 2. Comparación del hidrógeno con combustibles de uso común de acuerdo con su temperatura de autoignición y su rango de inflamabilidad 22

Tabla 3. Comparación del hidrógeno con combustibles de uso común de acuerdo con su energía específica y densidad energética 23

Tabla 4. Comparación del hidrógeno con combustibles de uso común (en estado líquido y gaseoso) de acuerdo con su densidad 24

Tabla 5. Los 10 países con la mayor potencia instalada (2019) 56

Tabla 6. Características técnicas del aerogenerador elegido 57

Tabla 7. Velocidad del viento media mensual en los distritos seleccionados 58

Tabla 8. Potencia desarrollada por aerogenerador en los distritos seleccionados de Piura 60

Tabla 9. Velocidad media del viento vs potencia desarrollada 61

Tabla 10. Producción mensual de H_2 eólico por área en cada distrito de Piura 64

Tabla 11. Producción anual de H_2 eólico en la región Piura 66

Tabla 12. Características técnicas del panel fotovoltaico elegido 68

Tabla 13. Rendimientos de la instalación 72

Tabla 14. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Talara 74

Tabla 15. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Paita 74

Tabla 16. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Piura 74

Tabla 17. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Huancabamba 74

Tabla 18. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Sullana 75

Tabla 19. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Morropón 75

Tabla 20. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Ayabaca 75

Tabla 21. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Sechura 75

Tabla 22. Producción anual de H_2 solar en la región Piura 77

Tabla 23. Producción mensual de los cultivos con potencial de biomasa en Piura en 2019 80

Tabla 24. Superficie cosechada mensual de los cultivos con potencial de biomasa en Piura en 2019 80

Tabla 25. Estimación de residuos de cultivo con potencial de biomasa en Piura en 2019 ... 81

Tabla 26. Población de ganado vacuno en la región Piura 82

Tabla 27. Población de ganado porcino en la región Piura 83

Tabla 28. Población de aves de corral en cada provincia de la región Piura 83

Tabla 29. Deyecciones y rendimiento de metano producido según el tipo de animal 84

Tabla 30. Estimación de la producción anual de metano en la región Piura 85

Tabla 31. Potencial de producción anual de H_2 de biomasa a partir de la electrólisis en la región Piura 86

Tabla 32. Potencial de producción de bioetanol a partir de la fermentación de residuos lignocelulósicos de las cosechas de banano 87

Tabla 33. Producción anual de H_2 verde a partir de la electrólisis en la región Piura 89

Tabla 34. Consumo final de energía por fuentes en el Perú (2019) 91

Tabla 35. Consumo final de energía por sectores económicos en el Perú (2019) 92

Tabla 36. Comparación del potencial de hidrógeno verde en Piura con el consumo energético nacional (2019) 93

Tabla 37. Estimación del consumo energético por sectores en la región Piura 95

Tabla 38. Comparación del potencial de hidrógeno verde con el consumo energético de la región Piura (2019) 96

Tabla 39. Emisiones de gases contaminantes por consumo final de energía (2019) 98

Tabla 40. Relación de cantidad de emisiones por consumo energético en cada sector económico 99

Tabla 41. Emisiones de gases contaminantes del sector transporte terrestre por combustible utilizado en Piura 99

Introducción

El hidrógeno es considerado el combustible del futuro gracias a constituir gran parte de la materia del universo, sus capacidades como vector energético, el agotamiento de los combustibles tradicionales y, sobre todo, por la necesidad de reducir las emisiones de gases contaminantes para mitigar el cambio climático. No obstante, el 96% del hidrógeno consumido en el mundo proviene de fuentes no renovables (IRENA, 2018), por lo que resulta necesario invertir en tecnologías de producción amigables con el medio ambiente.

Esta oportunidad de desarrollo ingenieril está presente a nivel mundial, y Piura, por sus características climáticas y geográficas, tiene un gran potencial para producir hidrógeno, por lo que en el presente estudio se estimó y analizó el potencial de producción de H_2 verde a partir de la electrólisis del agua en la región Piura y sus distritos. Además, se determinó cuáles son el o los distritos más idóneos para la instalación de una hipotética planta de producción de H_2 solar, eólico o de biomasa.

Este trabajo se divide en cinco capítulos, cuyo contenido se resume a continuación:

En el primer capítulo, se realizó una introducción al hidrógeno y una revisión de las principales tecnologías empleadas para la producción de H_2 a partir de fuentes renovables. Además, se especifican sus principales propiedades relacionadas a su uso como combustible, sus capacidades como vector energético y su relevancia en el mercado mundial y nacional.

En el segundo capítulo, se trató el tema de las energías renovables, detallando aquellas utilizadas para el presente estudio: la solar, la eólica y la de biomasa. Además, se especificaron sus tecnologías de aprovechamiento, componentes básicos, beneficios, retos y estado actual de cada una.

En el tercer capítulo, se estimó el potencial de producción de H_2 eólico que se podría tener a lo largo de un año, a partir de la utilización de la electrólisis del agua y aerogeneradores en la región Piura. Para realizar este análisis se utilizaron los valores de la velocidad media mensual del viento de los distritos de la región, los cuales fueron extraídos de la plataforma NASA POWER Data *Access Viewer*.

En el cuarto capítulo, se determinó el potencial de producción de H_2 solar en el periodo de un año, a partir de la utilización de la electrólisis del agua y paneles fotovoltaicos en Piura. Para ello se emplearon dos programas: el programa web del PVGIS (*PHOTOVOLTAIC*

GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM) y el software MATLAB®, el primero para la obtención de los datos de irradiación, y el segundo, para el cálculo matemático y la representación gráfica.

En el quinto capítulo, se estimó el potencial de producción de H_2 de biomasa a lo largo de un año, a partir de la electrólisis del agua en Piura y, adicionalmente, del reformado de bioetanol. Para ello se utilizó como principal referencia el trabajo realizado por Saavedra, Marcelo, Alamo y Arrieta (2017), y del cual se actualizaron los datos de producción a partir del anuario agrícola del año 2019, proporcionado por el MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego).

En el sexto capítulo, se realizó la discusión de resultados. Se empieza ofreciendo un resumen del potencial de hidrógeno verde a partir de las tres fuentes renovables consideradas. Además, se realiza una comparación detallada del potencial de hidrógeno de la región Piura, con el consumo energético del país y de la región. Finalmente, se presenta también una comparación del resultado obtenido en esta investigación, con los estimados obtenidos en otras regiones y países de Sudamérica.

Finalmente, la presente investigación está enmarcada en el proyecto “Diseño, fabricación y test de una planta de alta eficiencia de producción de hidrógeno a partir de agua usando radiación solar como fuente de energía para la producción de energía limpia”, financiado por el Programa Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica – FONDECYT (Prociencia), bajo el contrato 159-2020-FONDECYT.

Estado del arte

El primer paso en el proceso de transición a una economía de hidrógeno es la estimación del potencial existente de este recurso en una determinada región, para así, evaluar su factibilidad. En la literatura existen diversos estudios que se han realizado para estimar el potencial de producción de hidrógeno a partir de fuentes de energía renovables en diferentes partes del mundo. Por ello, esta revisión de la literatura se ha dividido según la región de procedencia de los estudios realizados, obteniéndose así las siguientes categorías: estudios en países fuera y dentro de América Latina, y los realizados en Perú y la región Piura.

A. Estudios en países fuera de América Latina

Touili, Merrouni, Azouzoute, El Hassouani y Amrani (2018) realizaron una evaluación técnico-económica del potencial de producción de hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaica en Marruecos. Para el estudio, utilizaron inicialmente información satelital de radiación solar, la cual compararon con mediciones hechas in situ. Ellos obtuvieron como resultado un promedio anual de 3.3 x 10^9 t H_2 producido en todo el país. Adicionalmente, encontraron que en el verano se podía alcanzar una producción de 2364 tH_2/km^2, mientras, que la producción mínima en invierno era de 1289 tH_2/km^2. Finalmente, el costo del hidrógeno fue determinado en el rango de $4.64 – $5.79/kg.

Gondal, Masood y Khan (2018) evaluaron el potencial de producir hidrógeno verde en Pakistán, y concluyeron que el recurso renovable más viable para la producción de hidrógeno en el país es la biomasa (6.6 x 10^6 tH_2/año), seguido de la energía solar fotovoltaica (2.8 x 10^6 t H_2/año), y por la generada a partir de los residuos sólidos urbanos (1.1 x 10^6 t H_2/año).

Rahmouni, Negrou, Settou, Dominguez y Gouareh (2017) realizaron un estudio del potencial de producción de hidrógeno en Argelia, a partir de la energía solar fotovoltaica y energía eólica. Para esto usaron datos espaciales georreferenciados de radiación solar y velocidad de viento. El potencial de producción de H_2 se obtuvo por electrólisis del agua. Sus resultados arrojaron una producción anual total de 2.4 x 10^5 t H_2/km^2 a partir de energía solar fotovoltaica, y 2.1 x 10^5 t H_2/ km^2 a partir de energía eólica.

Connelly *et al.* (2020) realizaron un estudio del potencial de producción de hidrógeno en los Estados Unidos, a partir de fuentes de energía tradicionales y de fuentes renovables,

como la energía solar (5.1 x 10^9 t H_2/año), la energía eólica (7 x 10^8 t H_2/año), la energía geotérmica (4.84 x 10^8 t H_2/año) y la biomasa (5 x 10^7 t H_2/año).

B. Estudios en países de América Latina

Posso, Sánchez, Espinoza y Siguencia (2016) realizaron un estudio preliminar sobre el potencial de producción de hidrógeno en Ecuador, a partir de distintas fuentes de energía renovables. Las fuentes que consideraron son: solar fotovoltaica, eólica, geotérmica e hidráulica. La cantidad de hidrógeno producido a partir de estas fuentes fue calculada considerando un electrolizador PEM con una eficiencia de 75%, y se obtuvo un potencial de 4.55 x 10^8 kgH_2/año. Así mismo, en este estudio comparan la cantidad de hidrógeno producido para dos usos específicos: el transporte automovilístico y como combustible en zonas rurales.

En otro estudio, Posso y Zambrano (2014) realizaron una estimación del potencial de producción de hidrógeno en Venezuela a partir de tres fuentes de energía renovables: solar, eólica y minihidráulica. El método de producción de hidrógeno asumido es por electrólisis PEM con una eficiencia de 75%. Obtuvieron un estimado total de 2.073 x 10^{10} kg H_2/año, de los cuales, el 95% provenía de energía solar fotovoltaica. En este estudio también se concluyó que esta cantidad de hidrógeno sería suficiente para abastecer la totalidad de los requerimientos energéticos de las zonas rurales que no cuenta con acceso a energía, quedando un sobrante.

Sigal, Leiva y Rodríguez (2014) estudiaron el potencial de producción de hidrógeno en Argentina, a partir de tres fuentes de energía renovables: solar, eólica y biomasa. Encontraron que se podría producir casi mil millones de t de H_2 por año en todo el territorio argentino. Además, destacan que, dentro de cada provincia, existe al menos un departamento en el que el potencial de hidrógeno supera en 10 veces el requerimiento de combustible en tal departamento.

Da Silva *et al.* (2005) estudiaron en el noreste de Brasil el potencial de producción de hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaica, eólica e hidráulica. Para los datos solares y de vientos, se utilizaron el atlas solar y atlas de potencial de viento; mientras que, para los de energía hidráulica, se utilizaron los de una central hidráulica localizada en el noreste del país. El estimado anual obtenido fue de 56.26 x 10^6 m^3 de H_2, destinado para exportaciones.

La metodología general utilizada en la mayoría de estos trabajos revisados se basa en el uso de Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés), los cuales permiten visualizar y analizar información geográfica de diversos recursos (como la radiación solar, velocidad de viento, etc.) en forma de mapas. Esto, a su vez, permite evaluar y seleccionar las ubicaciones con mejores cualidades para un mayor estudio.

Para el cálculo de la producción de hidrógeno a partir de energía solar o eólica, el método más común es por electrólisis PEM. Para este caso, todos los trabajos revisados asumen una eficiencia del electrolizador de 75%, y se usa como factor de conversión energético el Poder Calorífico Superior (HHV, por sus siglas en inglés) del hidrógeno.

C. Estudios en Perú

En cuanto al potencial de producción de hidrógeno en el Perú, pocos estudios se han realizado. El principal estudio pionero fue publicado recientemente por la Asociación Peruana de Hidrógeno (H_2 Perú), fundada a inicios del 2021, y fue realizado por su socio Engie Impact (2021). En este se analizó el potencial desarrollo del mercado de hidrógeno en el Perú, y se consideró tanto al hidrógeno verde, como al azul.

Por un lado, se identificó que, la zona central y sur del país destacan por su potencial de demanda de este recurso, pues aquí se concentra más del 90% de los consumos energéticos industriales.

Otro punto es que se ha identificado que, las regiones norte y sur son los principales potenciales centros de producción de hidrógeno verde, debido a su abundancia de recursos renovables. Se especifica que, la zona norte destaca por su potencial eólico (hasta 5 MWh/m^2/año en Piura), además de sus bajos precios de electricidad. Mientras que, en la zona sur destaca el potencial solar (hasta 5.6 kWh/m^2/año en Arequipa), aunque también presenta un buen potencial eólica en la costa.

El estudio también concluyó que el Perú tiene un gran potencial para desarrollar el mercado de hidrógeno verde de manera competitiva a nivel internacional, en el mediano y largo plazo. Para esto se realizó el análisis de costos nivelados de hidrógeno (LCOH) verde para los horizontes de 2030, 2040 y 2050, obteniéndose valores de 2.6, 1.9 y 1.3 USD/kg H_2, respectivamente.

Finalmente, el estudio prevé que las aplicaciones de mayor demanda de hidrógeno en el país serán: transporte (principalmente, camiones de alto tonelaje del sector minero) e industria (amoníaco, cemento, aceros, químicos, etc.).

D. Estudios en la región Piura

En cuanto al potencial de producción de hidrógeno verde en la región Piura, no se ha encontrado ningún estudio que trate directamente el tema. La escasez de investigaciones sobre este tema en la región es, justamente, lo que ha motivado la presente tesis. Por lo tanto, hasta donde tienen conocimiento los autores, esta es el primer trabajo que busca estimar el potencial de hidrógeno en Piura a partir de tres fuentes de energía renovables: solar, eólica y biomasa.

Sin embargo, en la región Piura se han realizado otros estudios que han servido como base y punto de partida para la presente tesis. Uno de ellos fue realizado por Saavedra *et al.* (2017). En este estudio se presenta una estimación del potencial energético a partir de biomasa por procesos de digestión anaerobia en el departamento de Piura.

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Capítulo 1

El hidrógeno y sus métodos de producción

1.1 El hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia visible, no obstante, no es frecuente encontrar átomos aislados (H) de este en la naturaleza. En el caso más probable, aunque tampoco frecuente, se puede encontrar al hidrógeno como una molécula diatómica (H_2) (Suárez, 2019). Lo usual es encontrar al hidrógeno formando parte de distintos compuestos químicos como ácidos, sales, polímeros, etc. Es por ello por lo que la producción de hidrógeno suele provenir de su extracción de compuestos, entre los procesos más conocidos se encuentran a la electrólisis y a la quema de hidrocarburos (World Bank, 2020).

Además, en su forma molecular diatómica (H_2) es un gas ampliamente utilizado en la industria, con aplicaciones en la transición energética, y gracias a su tendencia natural a formar enlaces moleculares con otros elementos mediante procesos químicos o de combustión, se puede considerar al hidrógeno como un gas capaz de almacenar grandes cantidades de energía (World Bank, 2020). A continuación, se presentan las principales propiedades del hidrógeno por las que se le considera como el combustible del futuro.

1.1.1 Propiedades

El hidrógeno es el elemento con menor peso atómico de la tabla periódica (1.00794), por lo que es el menos denso de todos (ver *Tabla 1*), con una densidad de 70.8 kg/m^3 en estado líquido y 0.0899 kg/m^3 en estado gaseoso. Además, de acuerdo con sus pesos específicos (ver *Tabla 1*), se puede decir que es más ligero que el aire y el agua (peso específico menor a 1) en función del estado en que se encuentra el H_2: gaseoso y líquido respectivamente.

Tabla 1. Valores de la densidad y el peso específico del hidrógeno

Parámetro	Valor para el H_2
Densidad en estado líquido	70.8 kg/m^3
Densidad en estado gaseoso	0.0899 kg/m^3
Peso específico del gas	0.0696
Peso específico del líquido	0.0708

Nota: **Adaptado de Cordero (2018)**

En cuanto a un átomo de hidrógeno (H), este está conformado únicamente por un protón y un electrón orbitando alrededor de su núcleo, lo que da como resultado el ser muy reactivo. Por esta razón, se le suele encontrar como componente de un compuesto o en su fórmula molecular diatómica (H_2). Al ser H_2 la molécula más pequeña, tiene la capacidad de atravesar materiales considerados normalmente herméticos o impermeables a otros gases y dispersarse rápidamente.

Sin embargo, si el hidrógeno se compara con otros combustibles de uso común (ver *Tabla 2*) se puede visualizar que posee una temperatura de autoignición más alta, por lo que resulta muy difícil que una mezcla entre el hidrógeno y el aire provoque fuego sin alguna fuente de ignición adicional. Es importante recordar que la temperatura de autoignición es la mínima temperatura a la que una sustancia arde al estar en contacto solo con aire, a una presión de 1 atm. Aunque al ser altamente reactivo, atravesar materiales con facilidad, dispersarse rápidamente y tener un rango de inflamabilidad más amplio (ver *Tabla 2*), el hidrógeno puede crear compuestos que pueden llegar a ser inflamables, por lo que resulta necesario una correcta manipulación del gas y ciertas medidas de seguridad (Cordero, 2018).

Tabla 2. Comparación del hidrógeno con combustibles de uso común de acuerdo con su temperatura de autoignición y su rango de inflamabilidad

Compuesto	Temperatura de autoignición [°C]	Límite inferior de inflamabilidad	Límite superior de inflamabilidad
Hidrógeno	585	4%	75%
Metano	540	5.3%	15%
Propano	490	2.2%	9.6%
Gasolina	385	1%	7.6%

Nota: **Adaptado de Cordero (2018)**

Para sus cambios de fase, el hidrógeno a una presión de 1 atm tiene una temperatura de fusión de -259.20°C y una temperatura de ebullición de -252.77°C (Cordero, 2018). De estos dos valores, el más relevante para su transportabilidad es el de fusión, debido a que, en su mayoría, los combustibles líquidos son más fáciles de manejar gracias a que ocupan menos espacio y, por lo tanto, determina la temperatura a la que se deberá mantener durante todo el proceso de transporte y almacenamiento. Por lo señalado anteriormente, se puede decir que el hidrógeno al tener una temperatura de ebullición muy baja necesita de un aumento de presión para su mayor transportabilidad.

Esta acción se puede realizar hasta cierto valor pico, debido a que, al ser una sustancia pura, así se le aplicara una mayor presión, su temperatura de ebullición permanecería constante, dando como resultado una temperatura de -240°C a 13 bar (Cordero, 2018). Estos datos del hidrógeno confirman el complejo proceso a seguir para el transporte de este en estado líquido y la necesidad de aislar sus contenedores.

1.1.2 El hidrógeno como vector energético

Un vector energético es aquel dispositivo o sustancia con la capacidad de almacenar energía y, posteriormente, tener la capacidad de liberar esta de manera controlada. Además, este debe ser extraído previamente mediante procesos de manufactura. Ejemplos de vectores energéticos son las pilas, condensadores y depósitos de aire comprimido.

El vector energético que más atención está ganando es el hidrógeno, y se le llama así debido a la dificultad por encontrar este elemento de manera libre o aislada en la naturaleza y, por lo tanto, es necesario un proceso de transformación para su obtención. Asimismo, el hidrógeno resulta ser muy eficaz para almacenar energía, debido a que posee la energía específica más alta (142.0 MJ/kg) entre los combustibles de uso común, como se puede visualizar en la *Tabla 3*, aunque al tener el valor más bajo de densidad energética, se hace necesario un proceso de licuefacción o presurización para su utilidad como combustible.

Tabla 3. Comparación del hidrógeno con combustibles de uso común de acuerdo con su energía específica y densidad energética

Combustible	Energía específica [MJ/kg]	Densidad energética [MJ/L]
Hidrógeno	142.0	0.01 a 1 atm; 7.10 a 1000 bar y 10.00 en estado líquido
Metanol	20.0	15.90
Amoníaco	22.5	15.60
Gasolina	47.1	35.00
Diesel	42.8	40.40
Combustible de aceite pesado	42.4	40.70
Biodiesel	42.2	33.00
Gas natural	50.0	0.04
GNL (Gas natural licuado)	50.0	22.20

Nota: **Adaptado de World Bank (2020)**

En términos de masa, se conoce que aproximadamente 1 kg de este gas tendría una energía equivalente a 2.75 kg de gasolina. Además, se conoce que una pila de combustible en base al proceso químico de combinar hidrógeno con oxígeno tiene una eficiencia del 55%, mientras que un motor de combustión interna en óptimas condiciones tiene una eficiencia cercana al 33% (Suárez, 2019).

Al ser mucho más eficiente en términos energéticos y al ser un combustible limpio (si se utilizan fuentes renovables para su obtención), el hidrógeno se postula como el futuro reemplazo de los combustibles fósiles o tradicionales. Aunque presenta como inconveniente el ser menos denso comparado con otros combustibles tradicionales (ver *Tabla 4*), siendo aproximadamente 7.23 veces más ligero que el metano en estado gaseoso y aproximadamente 9.89 veces más ligero que la gasolina en estado líquido, dificultando su almacenaje (Cordero, 2018).

Tabla 4. Comparación del hidrógeno con combustibles de uso común (en estado líquido y gaseoso) de acuerdo con su densidad

Compuesto	Densidad del líquido a 253°C y 1 atm [kg/m^3]	Densidad del gas a 20°C y 1 atm [kg/m^3]
Hidrógeno	0.0899	70.8
Metano	0.65	422.8
Gasolina	4.4	700

Nota: **Adaptado de Cordero (2018)**

1.1.3 El hidrógeno verde

El hidrógeno producido con fines energéticos se puede clasificar por colores, los cuales hacen referencia a que tan limpia o no (cantidad de CO_2 liberada) es la tecnología empleada para su generación. En esta clasificación se cuenta con:

- Hidrógeno negro o marrón: producido a partir de la gasificación del carbón y el que más huella de carbono genera.
- Hidrógeno gris: producido a partir del reformado de metano por vapor usando gas natural.
- Hidrógeno azul: producido a partir de la misma tecnología que el gris, aunque con el acople de un sistema CCUS (Siglas en inglés de captura, uso y almacenamiento de carbono), el cual se encarga de capturar grandes cantidades del CO_2 liberado, sin embargo, no desaparece estas emisiones por completo.
- Hidrógeno verde: producido a partir de fuentes renovables totalmente limpias. Adicionalmente, la tecnología más empleada para su producción es la electrólisis.

Como se mencionó antes, el hidrógeno verde es producido a partir de fuentes renovables y totalmente limpias. Además, empieza a tomar protagonismo en el campo energético, ante la necesidad de un cambio drástico en el sistema mundial para cumplir los compromisos climáticos globales en el Acuerdo de París. Con el uso del hidrógeno verde como suministro energético en la industria, el transporte y edificios, se podrían reducir las emisiones anuales de CO_2 en 6 Gt en comparación con lo producido por las tecnologías actuales. Esto contribuiría aproximadamente con el 20% de la reducción adicional de emisiones necesaria para limitar el calentamiento global en 2 °C (Hydrogen Council, 2017).

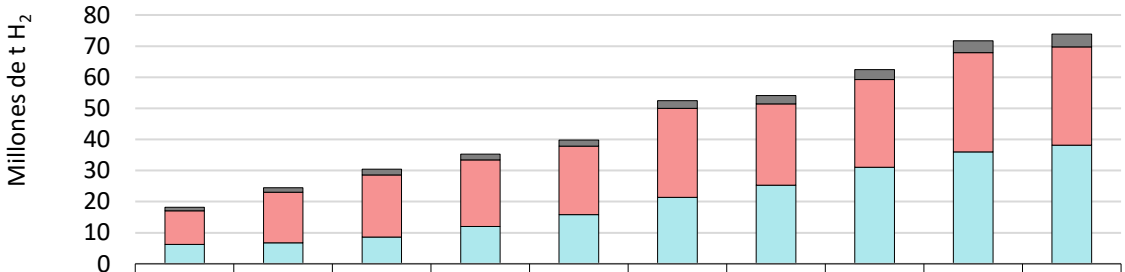
Es importante señalar que el hidrógeno verde podría volverse competitivo en costos frente al producido mediante fuentes no renovables, gracias a que el precio de la producción de este ha disminuido drásticamente con el pasar de los años. La popularización de las plantas de energía eólica y solar fotovoltaica ha producido que el costo nivelado de la energía (LCOE) alcance un precio por debajo a los 25 USD/MWh en países como Chile, Arabia Saudita, Estados Unidos y Portugal (World Bank, 2020). Además, los electrizadores y las pilas de combustible en base a hidrógeno ahora tienen una vida útil más longeva y un precio inferior a los de sus

predecesores, lo que genera una secuencia de costes a la baja en la producción de hidrógeno verde y soluciones más atractivas para los clientes finales.

1.1.4 Estado del mercado

En la actualidad, el hidrógeno es uno de los gases industriales más producidos en el mundo. Su mercado se encuentra bien establecido en el mundo, con una demanda entre los 8 y 10 EJ, de los cuales, el mayor porcentaje va a parar al sector químico (IRENA, 2018). Como se puede visualizar en la *figura 1*, la demanda anual de hidrógeno en el mundo ha aumentado en aproximadamente 4 veces lo requerido en 1975. En aquel año solo se requirió de 18.2 millones de t H_2, mientras que en 2018 fueron necesarios 73.9 millones (IEA, 2019). Además, se pronostica que para el año 2050, la demanda anual de hidrógeno podría multiplicarse por 10, lo equivalente a satisfacer la demanda energética actual del mundo por dos meses y medio (Hydrogen Council, 2017).

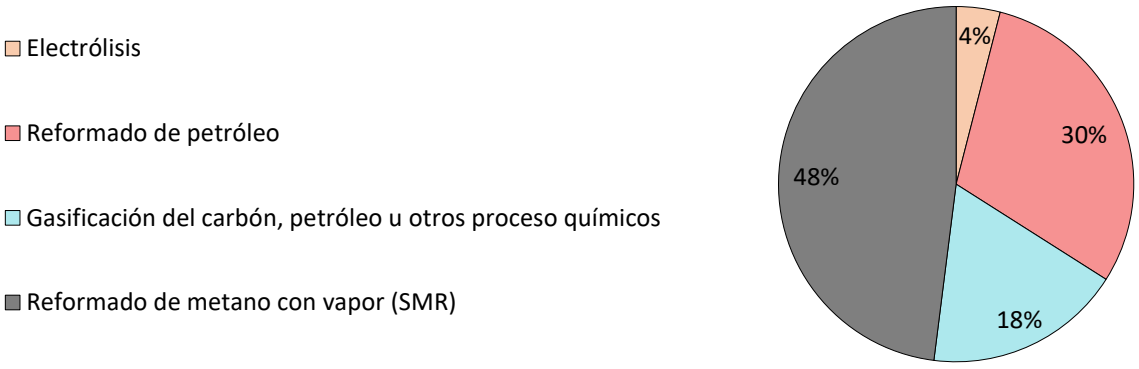
Figura 1. Demanda anual de hidrógeno en el mundo de 1975 al 2018



	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018e
Otro	1.1	1.5	1.8	1.9	2	2.5	2.7	3.1	3.8	4.2
Amoníaco	10.9	16.2	20	21.4	22	28.6	26.1	28.3	31.9	31.5
Refinado	6.2	6.8	8.6	12	15.8	21.4	25.3	31	36	38.2

Nota: **Adaptado de IEA (2019)**

Figura 2. Clasificación del mercado mundial del hidrógeno en 2019 a partir del método de producción



Nota: **Adaptado de Ajayi-Oyakhire (2012) e IRENA (2018)**

En 2018, el mercado global del hidrógeno fue valuado en 135.5 mil millones de dólares, a una tasa de crecimiento compuesta anual (CAGR)[1] de 8% y se estima que para el 2023, este valor aumente a los 199.1 mil millones de dólares (Markets and Markets, 2018), producto de los mayores requerimientos de hidrógeno como materia prima en el mundo.

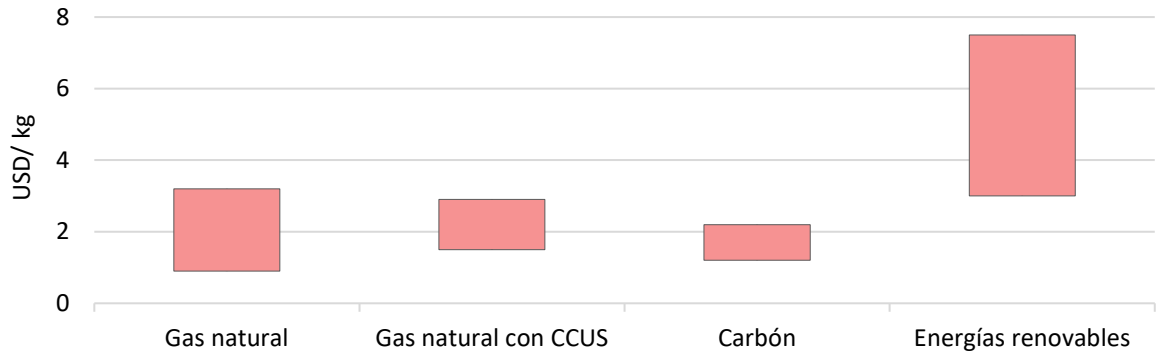
En 2019, aproximadamente el 96% de la producción correspondía a hidrógeno proveniente de fuentes no renovables (ver *figura 2*): el reformado de petróleo (30%), la gasificación del carbón, petróleo u otros procesos químicos (18%) y el reformado de metano con vapor o SMR (48%), resultando en una gran cantidad de emisiones de CO_2 (IRENA, 2018). Ante este problema, la producción de hidrógeno verde podría resultar en una alternativa comercial al producido con combustibles fósiles, los cuales generan alrededor de 830 millones de t CO_2 por año (IEA, 2019).

De la *figura 3* se pueden deducir los siguientes rangos de coste:

- Gas natural: entre 0.9 y 3.2 USD/kg.
- Gas natural con CCUS: entre 1.5 y 2.9 USD/kg.
- Carbón: entre 1.2 y 2.2 USD/kg.
- Energías renovables: entre 3 y 7.5 USD/kg.

Las energías renovables son las fuentes de producción de hidrógeno con el costo más elevado, sin embargo esta diferencia podría desaparecer ante la disminución de los costos de generación de energía eólica y solar fotovoltaica, así como, el creciente interés del mundo por el hidrógeno electrolítico.

Figura 3. Costos de producción del hidrógeno a partir de su fuente de producción en 2018



Nota: **Adaptado de IEA (2019)**

Con respecto al ámbito nacional, se puede señalar que el Perú no es un país productor de hidrógeno, la mayor parte de la electricidad requerida se produce a partir de la energía

[1] Es un indicador que muestra el incremento anual de una variable durante un periodo de tiempo determinado (mayor a un año). En este caso, la variable es el valor del mercado global del hidrógeno.

hidroeléctrica, obtenida a partir de la caída de nivel del agua en ríos y la energía térmica, generada por motores de combustión. No obstante, se considera un país con el potencial para exportar este gas a futuro, gracias su pujante industria de gas natural y su alto potencial para energía eólica y solar en el norte y sur del país, respectivamente.

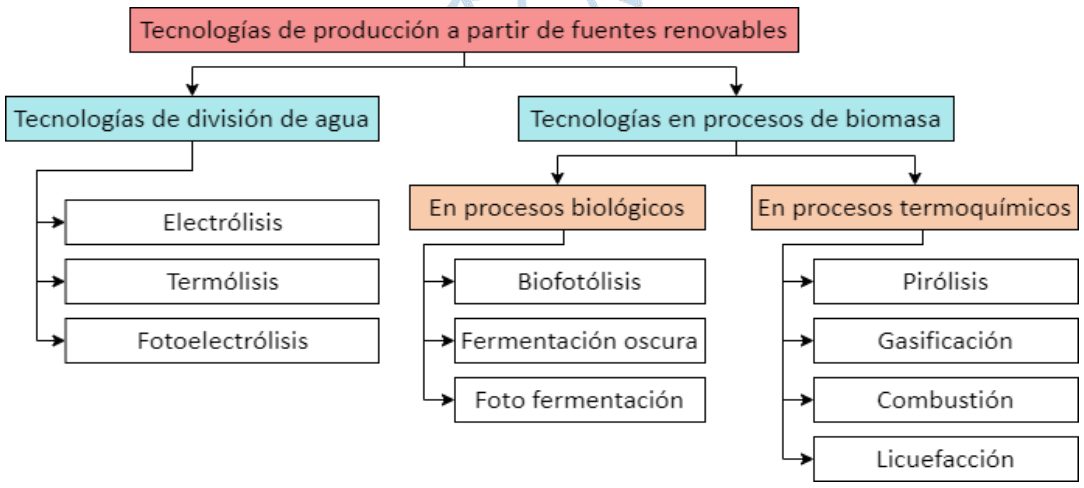
En el 2019, el consumo energético total alcanzó los 2777 TJ/día en el Perú, de los cuales el 80% correspondieron al sector hidrocarburos (Espinoza, 2020) y el principal actor fue el gas natural, con una producción promedio de 36.8 millones de m^3/día (Perúpetro, 2020). Este combustible posee una gran sinergia con el hidrógeno, al poder compartir aplicaciones e infraestructura. Por último, es importante señalar que el conocimiento del hidrógeno verde como un vector de energía en los países en desarrollo (como Perú) es bajo, por lo que resulta necesario invertir en investigación, desarrollo y despliegue de infraestructura de hidrógeno verde.

1.2 Tecnologías de producción de hidrógeno

En la actualidad, las fuentes no renovables mantienen un papel predominante en el suministro de hidrogeno, con un dominio del 96% de la producción mundial (Ajayi-Oyakhire, 2012). Además, su amplio uso se debe a su viabilidad económica, la cual está estrechamente relacionada con los bajos precios de la mayoría de los combustibles fósiles. No obstante, se prevé que esta situación cambie en los próximos años, gracias a la mayor atención que recibe la contaminación por gases de efecto invernadero en el mundo (Nikolaidis & Poullikkas, 2017).

Existen muchos procesos para obtención de hidrógeno a partir de fuentes renovables, sin embargo, estos pueden dividirse en dos grandes grupos: los procesos en los que se descompone el agua en oxígeno e hidrógeno, y los procesos en los que se usa la biomasa como fuente de energía primaria (Nikolaidis & Poullikkas, 2017). A continuación, se hará una revisión de cada una de las tecnologías desarrolladas hasta la actualidad (ver *figura 4*).

Figura 4. Clasificación de tecnologías de producción a partir de fuentes renovables



Nota: **Adaptado de Nikolaidis & Poullikkas (2017)**

1.2.1 Tecnologías de descomposición de agua

El agua es uno de los compuestos más abundantes en la Tierra, y al estar su molécula (H_2O) conformada por oxígeno (O_2) e hidrógeno (H_2), constituye una de las fuentes más inagotables de hidrógeno en el planeta (Nikolaidis & Poullikkas, 2017). La ecuación química que representa la descomposición del agua (en estado líquido) se muestra en (1.1), y se observa que por cada mol de agua líquida que se descompone, se forma un mol de hidrógeno molecular gaseoso y media mol de oxígeno molecular gaseoso.

Además, al ser una reacción endotérmica y debido a que el agua es un compuesto estable, es necesario proporcionar energía suficiente para romper los enlaces de la molécula. La estimación de la energía mínima necesaria para la descomposición del agua se obtiene a partir de la ecuación de la energía de Gibbs (1.2). Por lo tanto, al aplicar esta y conociendo el valor de la entalpía estándar de formación de (286.03 kJ/mol) y la entropía de gas ideal ($0.163\ kJ/mol * K$) del agua gaseosa, se obtiene (Greig & Cronin, 2017):

$$H_2O_{(l)} \rightarrow H_{2(g)} + {}^{1}/_{2}\, O_{2(g)} \tag{1.1}$$

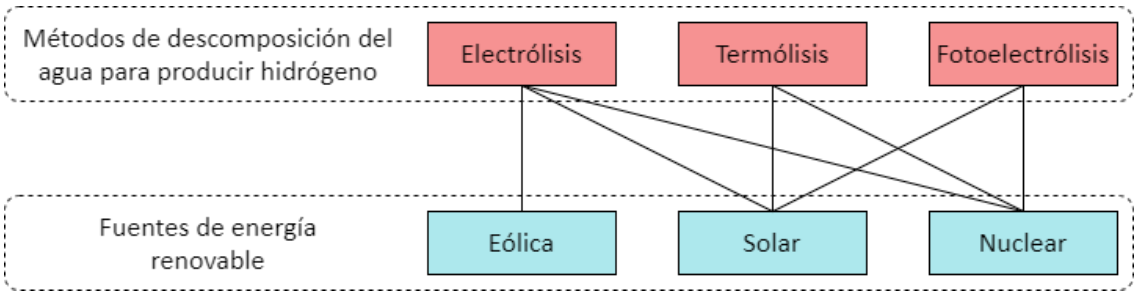
$$\Delta G° = \Delta H - T\Delta S°$$

$$\Delta G° = 286.03\ \frac{kJ}{mol} - (298\ K\ *\ 0.163 \frac{kJ}{mol * K}) = 237.46\ \frac{kJ}{mol} \tag{1.2}$$

A partir de (1.2), se puede deducir que para separar un mol de agua es necesario suministrar un mínimo de 237.46 kJ. Este es el principio básico detrás de todos los distintos métodos de obtención de hidrógeno a partir de la descomposición del agua.

En los siguientes apartados se verán 3 de los métodos más generalizados para producción de hidrógeno que se basan en la descomposición del agua: electrólisis, termólisis o descomposición termoquímica del agua y fotólisis o descomposición foto-catalítica del agua. Cada uno de estos métodos, debido a que tienen distintos requerimientos energéticos, serán compatibles con distintas fuentes de energía renovable (ver *figura 5*).

Figura 5. Tecnologías de descomposición del agua y sus fuentes de energía renovable

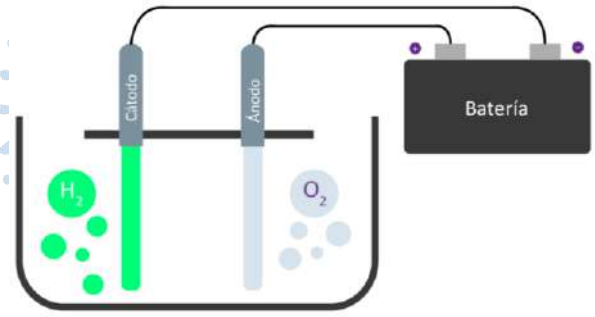


Nota: **Adaptado de Wang et al. (2019)**

1.2.1.1 Electrólisis. La electrólisis es la tecnología más utilizada para la producción de hidrógeno verde y la más eficaz para la descomposición del agua. Su proceso (ver *figura 6*) consta de sumergir a dos electrodos conectados a corriente continua (CC), en agua (electrolito): al polo positivo va el ánodo y al polo negativo va el cátodo. Ambos electrodos tienen la función de atraer a los iones opuestos, el ánodo atrae a los negativos, por lo que a su lado se forma el oxígeno y el cátodo atrae a los positivos, por lo que a su lado se forma el hidrógeno. (Rondán, 2016)

Los pasos para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis se muestran en la *figura 7* y, a continuación, se procederá con su descripción. Primero, se le realiza al agua un pretratamiento de desionización, con la finalidad de obtener un fluido compuesto en su mayoría de hidrógeno. A su vez, se tiene un convertidor AC/DC para hacer funcionar los módulos de electrólisis o electrolizadores, con la energía del sistema eléctrico, la cual es proporcionada en alterna (AC) y la electrólisis requiere de corriente continua (CC). Es importante señalar que el convertidor no sería necesario si la fuente fueran baterías o paneles solares. Finalmente, se separa al hidrógeno del oxígeno y se almacenan ambos gases.

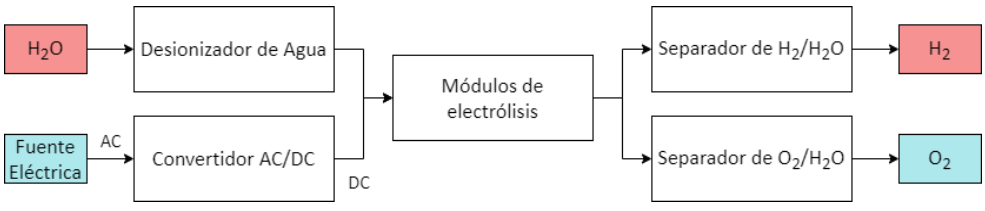
Figura 6. Partes de la electrólisis del agua



Nota: **Adaptado de Rondán (2016)**

Según los materiales de los que se encuentran hechos, los electrolizadores comerciales se pueden clasificar en: electrolizador alcalino convencional y electrolizador PEM (Membrana de intercambio de protones). Es importante mencionar que existe un tercer tipo: el electrolizador AEM (Membrana de intercambio de aniones), el cual combina las ventajas de ambos, sin embargo, su uso actualmente se encuentra limitado a la industria.

Figura 7. Flujograma de la producción de H_2 a partir de electrólisis



Nota: **Adaptado de Nikolaidis & Poullikkas (2016)**

1.2.1.1.1 Electrolizador alcalino convencional. Los electrolizadores alcalinos convencionales son los más conocidos en la industria y los más empleados por su bajo coste y mantenimiento sencillo. Son dispositivos que emplean una solución alcalina como electrolito, mayormente hidróxido de potasio (KOH), para la descomposición del agua, y en (1.3) y (1.4) se pueden ver las reacciones químicas que ocurren en sus ánodos y cátodos, respectivamente. Para estos tipos de electrolizadores existen dos configuraciones: la monopolar, en la cual las celdas se encuentran conectadas eléctricamente en paralelo y la bipolar, en la cual se encuentran conectadas en serie (Rondán, 2016).

1.2.1.1.2 Electrolizador PEM. Los electrolizadores PEM (Membrana de intercambio de protones) son dispositivos que empiezan a darse a conocer en la industria, sobre todo si se busca emplear fuentes de energía renovables (como la energía solar o eólica), sin embargo presentan una comercialización a menor escala que los alcalinos, por su mayor coste. Estos tienen como corazón del sistema al ensamble membrana-electrodos, compuesto principalmente por ambos electrodos: ánodo (1.5) y cátodo (1.6), y una membrana polimérica sólida como electrolito, la cual tiene como propiedad especial a la permeabilidad frente a los protones, sin embargo, no a los gases como el oxígeno y el hidrógeno, impidiendo que se mezclan y favoreciendo el proceso (Rondán, 2016).

$$4OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^- \quad (1.3)$$

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2 \quad (1.4)$$

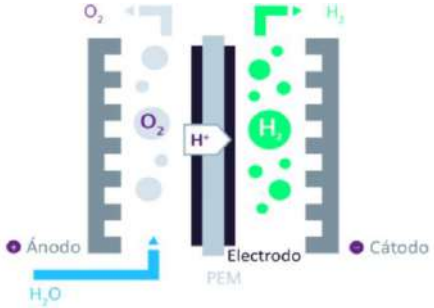
$$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^- \quad (1.5)$$

$$4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2 \quad (1.6)$$

En la *figura 8* se puede apreciar un esquema de un electrolizador PEM, para la descomposición de la molécula de agua en H_2 y O_2. Por último, es importante señalar las principales características que presentan los electrolizadores PEM, las cuales son:

- Capacidad para trabajar a altas densidades de corriente.
- No presenta impurezas ni productos químicos.
- Alta calidad del gas producido, incluso a carga parcial.
- Requiere bajo mantenimiento (SIEMENS ENERGY).

Figura 8. Electrolizador PEM



Nota: **Adaptado de SIEMENS ENERGY**

1.2.1.2 Termólisis. La termólisis del agua o descomposición termoquímica del agua es un método de descomposición de la molécula de H_2O a partir de energía en forma de calor, la cual suele proceder de la energía solar. Según el número de etapas en las que se lleva a cabo, la termólisis puede dividirse en dos tipos: termólisis directa y termólisis indirecta. A continuación, se detalla cada una.

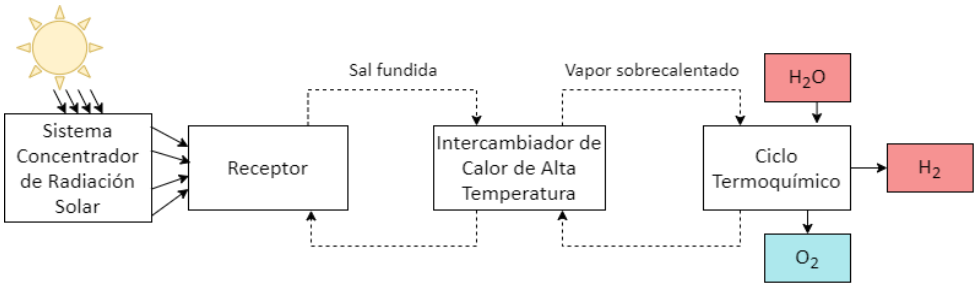
1.2.1.2.1 Termólisis directa. En la termólisis directa, el agua es calentada hasta que alcanza una temperatura de descomposición, en la que parte del agua empieza a descomponerse en hidrógeno y oxígeno gaseosos. Este proceso puede parecer muy sencillo de describir, sin embargo, es muy difícil llevarlo a cabo. En primer lugar, la temperatura necesaria para que ocurra la reacción de descomposición del agua es muy alta (1.7), tanto que, para obtener porcentajes de disociación aceptables, es necesaria una temperatura mínima de 2500 K (Subramani, Basile, & Veziroglu, 2015). En segundo lugar, si la fuente es energía solar, la concentración de radiación solar necesaria deberá ser extremadamente alta.

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 \quad T > 2500\ K \tag{1.7}$$

Debido a estas limitaciones asociadas con las altas temperaturas requeridas y la necesidad de separar eficientemente el hidrógeno de la mezcla gaseosa de productos, es difícil lograr que la termólisis directa sea un método práctico para la producción de hidrógeno en el futuro cercano.

1.2.1.2.2 Termólisis indirecta. Una alternativa a la termólisis directa es la termólisis indirecta, la cual emplea ciclos termoquímicos, es decir, múltiples reacciones químicas en serie. Cada reacción es una etapa del ciclo termoquímico, y cada etapa se lleva a cabo a una temperatura diferente, sin embargo, las máximas temperaturas requeridas en el ciclo son menos elevadas que las requeridas para termólisis directa: las máximas temperaturas varían entre 1100 y 2300 K, mientras que las mínimas temperaturas suelen estar por debajo de los 1100 K. Estas temperaturas, si bien siguen siendo elevadas, son posibles de alcanzar con fuentes de energía renovables, como la solar. Sin embargo, se necesitan sistemas concentradores de radiación capaces de alcanzar temperaturas de varios cientos de grados centígrados, por lo que se usan las torres solares, las cuales concentran la luz solar en un área reducida, llamada receptor (ver *figura 9*).

Figura 9. Flujograma de la producción de H_2 a partir de termólisis indirecta



Nota: **Adaptado de Nikolaidis & Poullikkas (2016)**

1.2.1.2.3 Fotoelectrólisis. Es un proceso muy similar a la electrólisis y como este, tiene como objetivo el descomponer la molécula de agua en H_2 y O_2 (1.8). Sin embargo la diferencia radica en que esta tecnología utiliza como fuente a la energía luminosa del sol de forma directa (sin el proceso de transformación a electricidad). Este tipo de energía se absorbe mediante celdas fotoelectroquímicas, las cuales están compuestas por:

- Electrolito: sustancia por descomponer, en este proceso es el agua.
- Fotocátodo: electrodo encargado de la recombinación de los iones de hidrógeno (H^+).
- Fotoánodo: electrodo encargado de la recombinación de los iones de oxígeno. (O^-)
- Membrana: estructura permeable, la cual permite el paso de ambos tipos de iones.

$$2H_2O + energía\ luminosa \rightarrow 2H_2 + O_2 \quad (1.8)$$

1.2.2 Tecnologías en procesos de biomasa

Se puede considerar como biomasa a cualquier material conformado principalmente por hidrógeno, carbono, oxígeno y nitrógeno. Además, la biomasa es una fuente de energía atractiva frente a los combustibles de uso común, gracias a que se puede encontrar en distintas variedades (residuos de cultivo, aserrín, leña, papel, etc.), y las tecnologías que la emplean como materia prima, producen una menor emisión de gases en comparación con las tecnologías de reformado (reformado con vapor y oxidación parcial). Las tecnologías para convertir biomasa en H_2 pueden clasificarse en dos grupos de acuerdo con el proceso que emplean para su funcionamiento: en procesos termoquímicos y biológicos.

1.2.2.1 En procesos termoquímicos. Las tecnologías en procesos termoquímicos son aquellas que utilizan un conjunto de reacciones endotérmicas y/o exotérmicas para la producción de H_2 y se pueden separar en dos subgrupos de acuerdo con su relevancia: el primero, constituido por la pirólisis y la gasificación, y el segundo, conformado por la combustión y la licuefacción.

La pirólisis y la gasificación son los más relevantes en los procesos termoquímicos, pues con ellos se tiene la posibilidad de producir más hidrógeno que con los procesos del segundo grupo. En cuanto a la combustión y la licuefacción, estas son tecnologías menos usadas, debido a que la primera produce contaminación indirecta con sus subproductos, y la segunda necesita condiciones de operación difíciles de obtener, por lo que no se expondrán en este trabajo de investigación (Nikolaidis & Poullikkas, 2016).

1.2.2.1.1 Pirólisis. Consiste en la descomposición de esta materia prima en ausencia de un medio oxidante (el más común es el oxígeno), para la producción de hidrógeno. Castro (2015) señala que a partir de esta tecnología se pueden obtener tres productos:

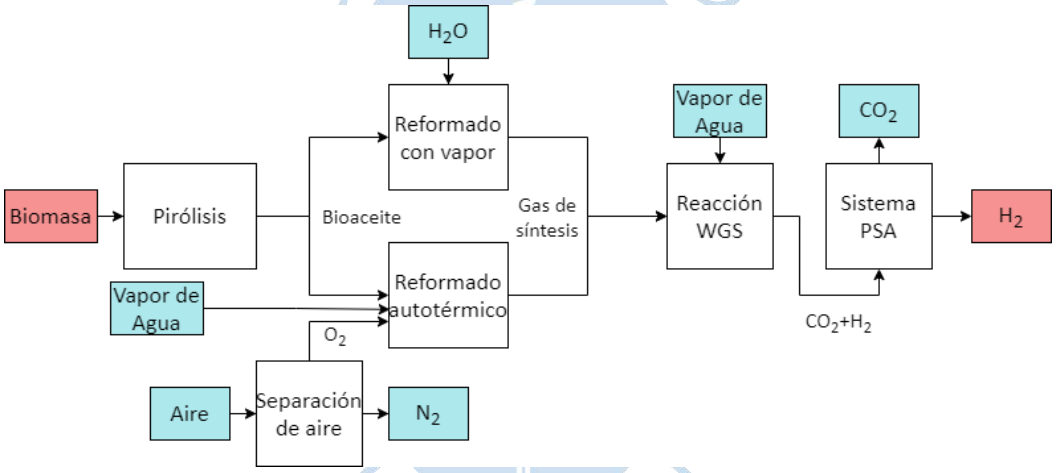
- *Char* (sólidos): coque o carbón vegetal y astillas.
- *Tar* (líquidos): alquitrán, alcoholes, cetonas, aceites, aldehídos y ácidos orgánicos.

- Compuestos gaseosos: biogás (compuesto principalmente por CH_4 y CO_2) e hidrógeno.

Debido a que existen diferentes tipos de pirólisis, es necesario operar cada uno con distintas condiciones (aunque mayormente se trabaja en ausencia de oxígeno, entre 650 y 800 K y a una presión entre 0.1 y 0.5 MPa) (Nikolaidis & Poullikkas, 2016), lo que implica una generación de diferentes porcentajes en la composición de los productos resultantes.

Los pasos para la producción de hidrógeno a partir de la pirólisis de biomasa se muestran en la *figura 10* y, a continuación, se procederá con su descripción. Primero, se realiza el proceso de pirólisis (1.9) y se obtiene el bioaceite. A partir de aquí para producir el gas de síntesis o syngas, el biocombustible puede ser procesado mediante el reformado catalítico con vapor (1.10) o el autotérmico (1.11). Luego, el syngas es redirigido al reactor WGS para aumentar la concentración de hidrógeno, en este lugar se hace reaccionar al CO con el vapor de agua (1.12). Como último paso, se realiza una absorción y eliminación del CO_2.

Figura 10. Flujograma de la producción de H_2 a partir de la pirólisis de biomasa



Nota: **Adaptado de Nikolaidis & Poullikkas (2016)**

La pirólisis presenta dos grandes ventajas frente a la gasificación. La primera es la transportabilidad del bioaceite, por lo que el proceso de reformado con vapor podría realizarse en otra planta ubicada cerca de donde se vaya a distribuir el hidrógeno. La segunda, es la posibilidad de recuperar un subproducto del bioaceite, como pueden ser el carbón activado o los adhesivos, disminuyendo los costos de producción (Fernández-Bolaños, 2005).

$$biomasa \rightarrow H_2 + CO + CO_2 + hidrocarburos + compuestos\ gaseosos + tar + char \quad (1.9)$$

$$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (n + \frac{m}{2})H_2 \quad (1.10)$$

$$C_nH_m + \frac{n}{2}H_2O + \frac{n}{4}O_2 \rightarrow nCO + (\frac{n}{2} + \frac{m}{2})H_2 \quad (1.11)$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (1.12)$$

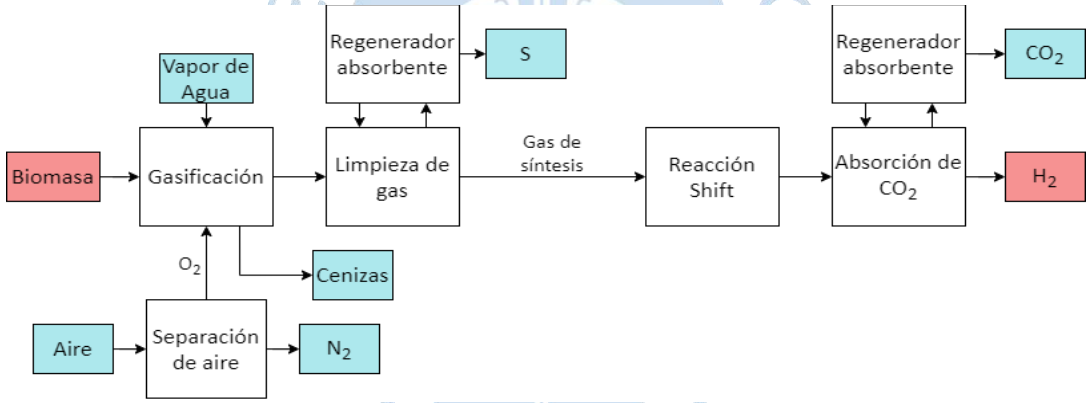
1.2.2.1.2 Gasificación. Se puede definir como la tecnología con la que se puede descomponer a esta materia prima, empleando un medio de gasificación como aire, oxígeno (1.13) y/o vapor (1.14), con la finalidad de obtener un combustible gaseoso llamado gas de síntesis o syngas, del cual se puede obtener hidrógeno. Además, es un proceso en el que no es necesario utilizar catalizador y, mayormente, se suele trabajar entre 500 y 1400°C, y a una presión entre la atmosférica y 33 bar (Nikolaidis & Poullikkas, 2016).

$$biomasa + O_2 \rightarrow H_2 + CO_2 + CO + CH_4 + otros\ CHs + tar + H_2O + char \quad (1.13)$$

$$biomasa + H_2O \rightarrow H_2 + CO + CO_2 + otros\ CHs + gases + tar + char \quad (1.14)$$

Los pasos para la producción de hidrógeno a partir de la gasificación de biomasa se muestran en la *figura 11* y, a continuación, se procederá con su descripción. Primero, se realiza el proceso ya mencionado de gasificación; luego, la mezcla de gases deberá ser purificada mediante un conjunto de reacciones secundarias donde se absorbe todo el contenido posible de azufre. Después, el syngas es redirigido al reactor WGS (1.12) y, finalmente, se realiza una absorción y eliminación del CO_2 mediante reacciones secundarias.

Figura 11. Flujograma de la producción de H_2 a partir de la gasificación de biomasa



Nota: **Adaptado de Nikolaidis & Poullikkas (2016)**

1.2.2.2 En procesos biológicos. Las tecnologías en procesos biológicos también son una opción atractiva para evitar el uso de combustibles fósiles, gracias a que pueden producir H_2 mediante la acción combinada de organismos fotoautótrofos y la energía luminosa del sol. La principal ventaja frente a los procesos termoquímicos es que funcionan a temperatura y presión ambiental. Sin embargo, los procesos biológicos poseen una baja eficiencia de conversión de energía luminosa a química.

1.2.2.2.1 Biofotólisis. Es una tecnología que consiste en la separación de la molécula de agua para obtener H_2 y O_2 (1.15), a partir de la fotosíntesis de algas verdes y cianobacterias (algas verdeazuladas). Se divide en 2 tipos: la biofotólisis directa y la indirecta. En la realización de este proceso, juegan un papel importante las enzimas: la hidrogenasa (en las algas verdes solo se encuentra este tipo de enzima) y la nitrogenasa, las cuales son las encargadas de catalizar o acelerar la velocidad con que ocurren las reacciones químicas en las células.

Además, con este proceso se tienen como ventajas la no necesidad del uso de sustratos adicionales como nutrientes y que emplea fuentes abundantes para la producción de hidrógeno: el agua y la energía del sol (Fatima, Kumar, & Singh, 2018).

La biofotólisis directa se da mediante la fotosíntesis de algas verdes y cianobacterias, las cuales deben pasar un tiempo de incubación anaeróbica en oscuridad, con la finalidad de activar las enzimas involucradas en el metabolismo del hidrógeno (Bedoya, Castrillón, Ramírez, & Vásquez, 2007). El proceso para obtener H_2 a partir de la biofotólisis directa se puede visualizar en la *figura 12*, este se encuentra dividido en dos pasos: la fase aeróbica o producción de iones de hidrógeno gracias al sistema fotosintético, y la fase anaeróbica o producción de H_2 a partir de la participación de las enzimas.

$$2H_2O + energía\ luminosa \rightarrow O_2 + 2H_2 \quad (1.15)$$

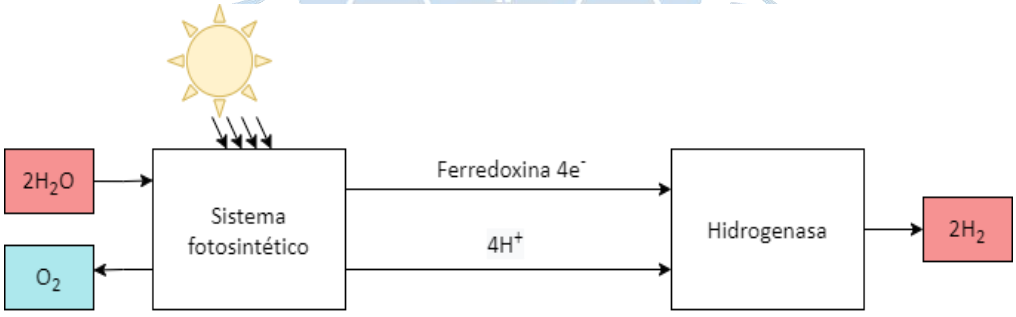
$$2H_2O \rightarrow 4H^+ + 4e^- + O_2 \quad (1.16)$$

$$4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2 \quad (1.17)$$

$$N_2 + 8H^+ + 8e^- + 16ATP \rightarrow 2NH_3 + H_2 + 16ADP + 16P_i \quad (1.18)$$

En la fase aeróbica participa el sistema fotosintético: el Fotosistema I (PSI) y el Fotosistema II (PSII). Ambos necesitan de la energía luminosa del sol para poder realizar sus tareas respectivas: mientras que PSII emplea esta energía para separar las moléculas de agua y generar electrones, O_2 e iones de hidrógeno (H^+) (1.16), PSI utiliza la energía luminosa para transportar los electrones hacia las enzimas (Fatima, Kumar, & Singh, 2018).

Figura 12. Flujograma de la producción de H_2 a partir de la biofotólisis directa

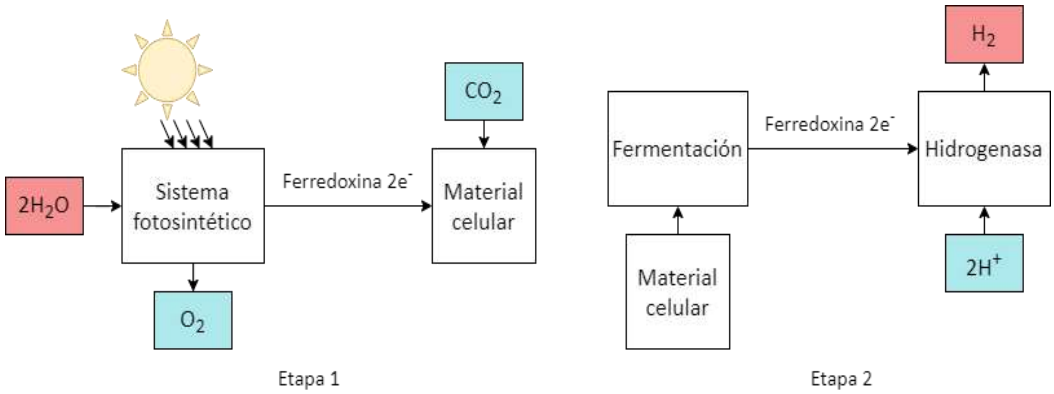


Nota: **Adaptado de Fatima, Kumar, & Singh (2018)**

En la fase anaeróbica intervienen las dos enzimas: la hidrogenasa transforma los iones de hidrógeno en gas de H_2 (1.17), mientras que la labor de la nitrogenasa es intervenir como catalizador en el proceso de fijación de nitrógeno (1.18), el cual da como compuestos principales al amoníaco (NH_3) y al hidrógeno (Bedoya, Castrillón, Ramírez, & Vásquez, 2007).

Otro punto es que la biofotólisis indirecta es una tecnología de producción biológica de hidrógeno que también emplea algas verdes y cianobacterias y, a diferencia de la biofotólisis directa, no presenta el problema de la sensibilidad ante el oxígeno, debido a que separa espaciotemporalmente la producción de hidrógeno de la obtención de oxígeno.

Figura 13. Flujograma de la producción de H_2 a partir de la biofotólisis indirecta



Nota: **Adaptado de Fatima, Kumar, & Singh (2018)**

El proceso para obtener H_2 a partir de la biofotólisis indirecta se puede visualizar en la *figura 13*, este se encuentra constituido por dos etapas: la producción de biomasa rica en carbohidratos por el sistema fotosintético, y la utilización de la biomasa producida para la obtención de hidrógeno a través de la fermentación (Fatima, Kumar, & Singh, 2018).

$$6H_2O + 6CO_2 + energía\ luminosa \rightarrow C_6H_{12}0_6 + 6O_2 \quad (1.19)$$

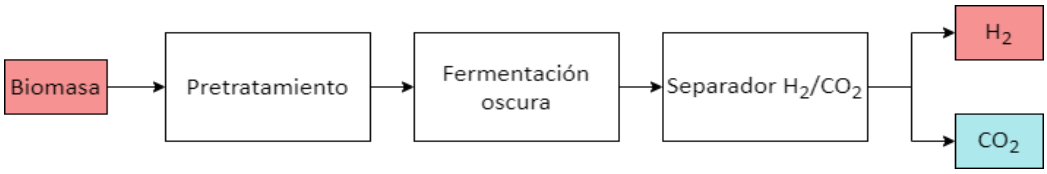
$$C_6H_{12}0_6 + 6H_2O + energía\ luminosa \rightarrow 12H_2 + 6CO_2 \quad (1.20)$$

La primera etapa está constituida por un funcionamiento similar al de toda la biofotólisis directa, aunque con el agregado de la fijación de CO_2 (1.19) para dar como resultado O_2 y biomasa rica en carbohidratos, del cual el substrato modelo es la glucosa ($C_6H_{12}O_6$). La segunda etapa está constituida por algún tipo de fermentación (1.20) aplicada a la biomasa resultante de la primera etapa, con la finalidad de obtener el H_2 en forma de gas (Fatima, Kumar, & Singh, 2018).

1.2.2.2.2 Fermentación oscura. Es un proceso biológico que utiliza el metabolismo de bacterias para la ruptura de la molécula del substrato rico en carbohidratos (en su mayoría se utiliza a la glucosa) y, por lo tanto, para la obtención de H_2. Para este proceso, las bacterias se desarrollan en ausencia de luz y en condiciones anaeróbica y anóxica, es decir, sin oxígeno (Nikolaidis & Poullikkas, 2016). Además, entre las especies bacterianas más empleadas se tienen a los géneros *Enterobacter, Bacillus* y *Clostridium* (Bedoya, Castrillón, Ramírez, & Vásquez, 2007).

Los pasos para la producción de hidrógeno a partir de la fermentación oscura se muestran en la *figura 14* y, a continuación, se procederá con su descripción. Primero, se le realiza un pretratamiento fisicoquímico a la materia prima empleada; luego, se realiza la fermentación oscura, la cual está constituida por dos etapas: la conversión de la molécula inicial en piruvato o glucólisis (si el substrato modelo es la glucosa) y la fase anaeróbica.

Figura 14. Flujograma de la producción de H_2 a partir de la fermentación oscura



Nota: **Adaptado de Nikolaidis & Poullikkas (2016)**

En la primera etapa de la fermentación oscura se degrada a la glucosa para obtener en su mayoría a los ácidos acético (1.21) y butírico (1.22), los cuales constituyen aproximadamente el 80% de los subproductos. En la segunda etapa ocurre la fase anaeróbica, en la cual las enzimas se encargan de transformar los iones de hidrógeno en H_2 (Nikolaidis & Poullikkas, 2016). Después del proceso de fermentación oscura, se separa al H_2 del CO_2 y se debe realizar una expulsión rápida de hidrógeno, debido a que a medida que aumenta la presión de este gas, su producción tiende a disminuir.

$$C_6H_{12}0_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 4H_2 + 2CO_2 \quad (1.21)$$

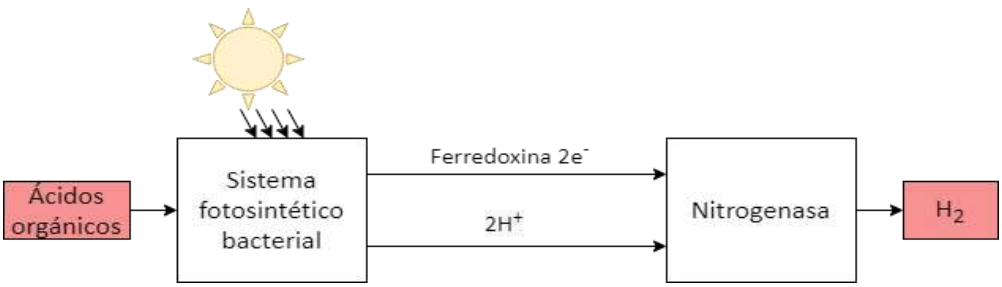
$$7C_6H_{12}0_6 + 6H_2O \rightarrow 6CH_3CH_2CH_2COOH + 24H_2 + 18CO_2 \quad (1.22)$$

1.2.2.2.3 Fotofermentación. La fotofermentación es un proceso biológico que consiste en la transformación de ácidos orgánicos (usualmente subproductos de la fermentación oscura) en gas de H_2 y CO_2 (1.23). Esta reacción se realiza gracias a la acción de algunas bacterias fotosintéticas anoxigénicas (no producen O_2), las cuales requieren de la presencia de la energía luminosa del sol, y se lleva a cabo bajo condiciones anaeróbicas (Subramani, Basile, & Veziroglu, 2015). En la fotofermentación participan ambas enzimas, aunque el protagonismo lo tiene la nitrogenasa.

$$CH_3COOH + 2H_2O + energía\ luminosa \rightarrow 4H_2 + 2CO_2 \quad (1.23)$$

El proceso para obtener H_2 a partir de la fotofermentación se puede visualizar en la *figura 15*, y es similar al de la biofotólisis directa. Al igual que esta tecnología, el proceso se realiza en dos etapas: la fase aeróbica o producción de iones de hidrógeno gracias al sistema fotosintético bacterial (compuesto solamente por el Fotosistema I) y la fase anaeróbica o producción de H_2 a partir de la participación de las enzimas (Fatima, Kumar, & Singh, 2018).

Figura 15. Flujograma de la producción de H_2 a partir de la fotofermentación



Nota: **Adaptado de Fatima, Kumar, & Singh (2018)**

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Capítulo 2

Energías renovables en Piura

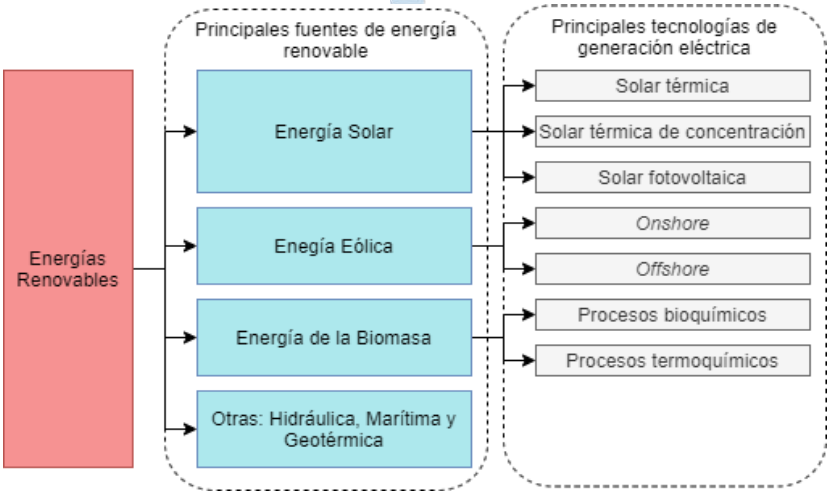
En el capítulo anterior se mencionó que el hidrógeno verde es aquel que se obtiene únicamente de fuentes de energía limpias y renovables. Por esta razón se ha dedicado el presente capítulo a hacer una revisión de las principales fuentes de energía renovables disponibles, así como, describir el estado actual de tales energías en el marco mundial, en el Perú y en la región Piura.

2.1 Las fuentes de energía renovable

Las energías renovables son aquellas que se producen de manera continua y, por lo tanto, son inagotables a escala humana. Las principales fuentes de energía renovables son: solar, eólica, biomasa, hidráulica, marítima y geotérmica (ver *figura 16*). Además, para cada una de estas fuentes existen distintas tecnologías para la generación de energía eléctrica.

Para limitar el alcance del presente trabajo, se han considerado únicamente la energía solar, eólica y de biomasa, las cuales presentan un gran potencial en el país y la región. En los siguientes apartados se expondrán los conceptos básicos de cada una, así como, las distintas tecnologías que existen para su aprovechamiento.

Figura 16. Principales fuentes de energía renovable y sus correspondientes tecnologías de generación eléctrica



Nota: **Adaptado de Schmerler, Velardo, Rodríguez, & Solís (2019)**

2.1.1 Energía solar

En el centro del Sol tienen lugar una serie de reacciones nucleares, de las cuales la más importante es la reacción protón-protón, responsable de convertir el hidrógeno en helio, y por la cual se liberan cantidades inmensas de energía. Esta energía liberada en las reacciones nucleares en el centro del Sol es la que comúnmente se conoce como *energía solar* (Goswami, 2015).

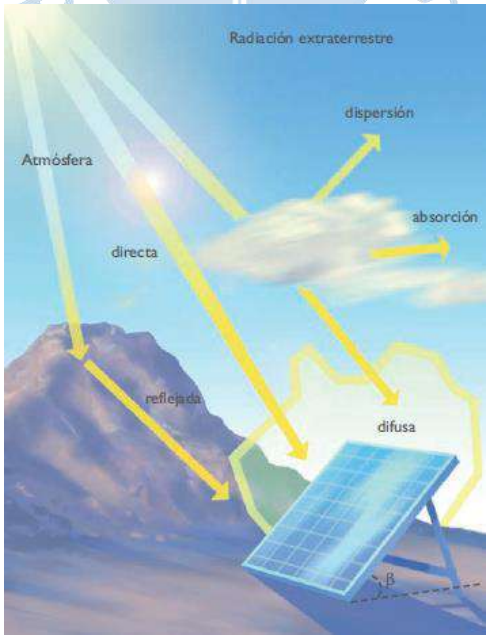
La forma específica en la que se libera la energía es a partir de la conversión de masa (m) en energía (E), de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein:

$$E = mc^2 \qquad (2.1)$$

Se estima que aproximadamente son 4 millones de t de masa las que se convierten en energía cada segundo, a causa de las reacciones que tienen lugar en el centro del Sol. Por consiguiente, la tasa de emisión de energía del sol es aproximadamente $3.8x10^{23}\ kW$. De esta energía emitida, aproximadamente $1.7x10^{14}\ kW$ son alcanzados por la Tierra (Goswami, 2015).

Aproximadamente el 2% de la energía liberada por el sol es transportada por neutrinos, los cuales atraviesan la materia sin casi perturbación alguna, y se encuentran atravesando la Tierra (y todos los cuerpos presentes en ella) a un ritmo aproximado de $6.5x10^{10} neutrinos/cm^2$ cada segundo (Jager, Isabella, & Smets, 2016). La energía restante emitida por el Sol (98%) viaja en forma de radiación electromagnética, luego, el conjunto de toda la radiación electromagnética emitida por el sol es lo que se conoce como radiación solar.

Figura 17. Formas de radiación solar en nuestro planeta



Nota: **Adaptado de Schallenberg et al. (2008)**

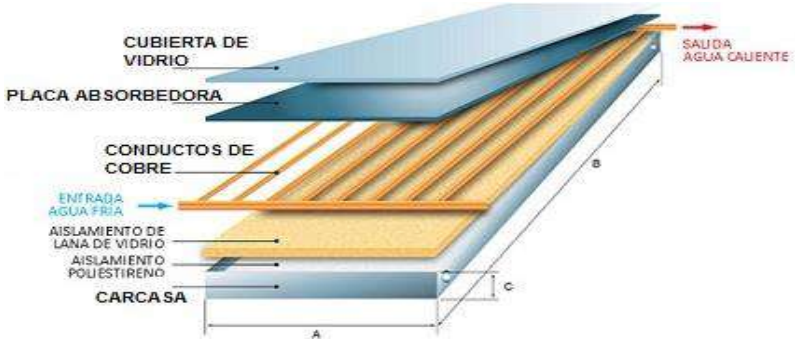
La radiación solar viaja por el espacio casi sin ser perturbada en su trayectoria. Sin embargo, en cuanto llega a la atmósfera terrestre, parte de la radiación es reflejada de vuelta al espacio, otra parte es absorbida o dispersada por las moléculas de aire y de vapor de agua, y solamente una porción de la radiación solar llega hasta la superficie terrestre sin haber cambiado su dirección (ver *figura 17*). De esta forma, la radiación solar que llega a nuestro planeta puede clasificarse de la siguiente manera (Schallenberg et al., 2008):

- Radiación directa: aquella que llega a la superficie terrestre directamente del Sol, sin haber alterado su dirección. Esta radiación es la predominante en un día soleado.
- Radiación difusa: este tipo de radiación llega a la superficie luego de haber incidido en algún elemento o partículas presentes en la atmósfera, tales como nubes o polvo. Esta la radiación que predominará en un día bastante nublado.
- Radiación reflejada: es la radiación reflejada por la superficie terrestre. Es predominante en zonas cercanas a cuerpos de agua, como mares o lagos.
- Radiación global: es la suma de la radiación directa y difusa.

La energía solar se puede aprovechar principalmente de dos maneras: para disponer de energía en forma de calor y para disponer de energía en forma de electricidad. Cuando se busca aprovechar la energía solar para generar calor, se habla de energía solar térmica (de bajas y medias temperaturas); mientras que, cuando se busca aprovechar la energía solar para generar electricidad, se habla de energía solar fotovoltaica o de energía solar térmica de concentración (de altas temperaturas).

2.1.1.1 Energía solar térmica de baja temperatura. Esta tecnología utiliza unos equipos llamados colectores de placa plana (ver *figura 18*), los cuales tienen unas superficies que, al ser irradiadas por la luz solar, absorben su energía y se calientan. Luego, parte de esta energía absorbida es transferida a un fluido de trabajo (agua o aire), mientras que otra parte se pierde como calor por convección o radiación. Para disminuir las pérdidas de calor hacia la atmósfera, estos colectores suelen tener una cubierta de vidrio en su superficie.

Figura 18. Esquema de un colector solar de placa plana



Nota: **Adaptado de https://www.energiasolar.lat/colector-solar-plano/**

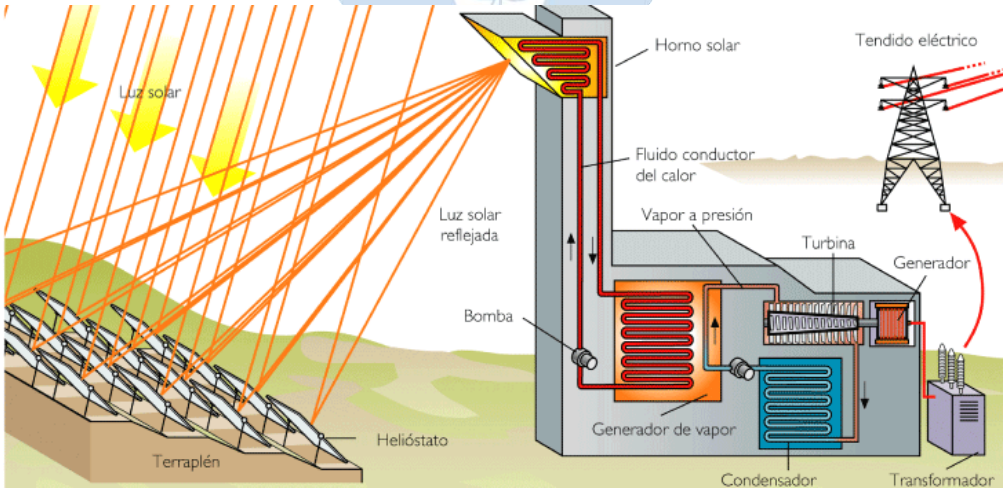
Los colectores disponibles en la actualidad son capaces de aprovechar la energía solar térmica para elevar la temperatura de un fluido de trabajo, generalmente agua, hasta valores de 365 K (92°C) (Goswami, 2015). Por lo tanto, esta tecnología se usa principalmente para calentar agua en instalaciones sanitarias o piscinas y, en algunas partes del mundo, para calentar ambientes, viviendas, etc.

2.1.1.2 Energía solar térmica de alta temperatura. Esta tecnología aprovecha la energía solar térmica para producir energía eléctrica. A diferencia de los sistemas de energía solar térmica de baja y media temperatura, con esta tecnología se busca calentar el fluido de trabajo (generalmente agua) para producir vapor. Luego, el vapor se hace pasar por una turbina, la cual trasforma la energía del fluido en energía mecánica. Finalmente, esta turbina está conectada a un generador, para así transformar la energía mecánica en energía eléctrica.

Con el fin de alcanzar las altas temperaturas necesarias para producir vapor se requiere del uso de sistemas de concentración, por lo que a esta tecnología también se le suele llamar energía solar de concentración o CSP (*Concentrated Solar Power*), por sus siglas en inglés.

Uno de los sistemas de concentración más utilizados es el de torre central con heliostatos. Los heliostatos son espejos que reflejan los rayos solares para concentrar una gran cantidad de radiación solar en un área muy pequeña, elevando su temperatura. Esta área se encuentra en lo alto de una torre central, y puede alcanzar temperaturas de hasta 1000°C (Schallenberg, y otros, 2008). Debido a su gran extensión, este tipo de sistemas se suele emplear en centrales termosolares (ver *figura 19*), y suelen operar a temperaturas superiores a los 500°C.

Figura 19. Esquema de una central solar de concentración



Nota: **Adaptado de https://www.bloglenovo.es/energia-solar-potente-barata-resultados/**

2.1.1.3 Energía solar fotovoltaica. Con esta tecnología se busca transformar la energía solar directamente en energía eléctrica, mediante el uso de celdas fotovoltaicas. El funcionamiento de las celdas fotovoltaicas se basa en el efecto fotovoltaico, según el cual se

puede generar un flujo de electrones en el interior de un material semiconductor cuando se incide radiación electromagnética sobre él (Schallenberg, y otros, 2008).

El efecto fotovoltaico, a su vez, se basa en el fenómeno fotoeléctrico, el cual establece que, si los fotones de luz que inciden sobre un material tienen una energía mayor que una cierta energía umbral, entonces el material emitirá electrones. En el caso de los materiales semiconductores, cuando un fotón con energía mayor a la energía de banda prohibida del material alcanza a un electrón de valencia, este electrón absorbe su energía y "salta" a la banda de conducción. Los electrones en la banda de conducción son electrones libres en el material y, usando una unión PN, son canalizados para obtener un flujo de electrones, y así, producir energía eléctrica (Goswami, 2015). Una observación interesante es que, sin importar cuán grande sea la energía del fotón, cada fotón solamente puede excitar a un electrón, razón por la cual las eficiencias de conversión de energía de los sistemas fotovoltaicos suelen ser muy bajas.

Una de las principales ventajas de la tecnología fotovoltaica es su escalabilidad y modularidad. Con ella se pueden obtener valores de potencia tan bajos como los µW o tan altos como los MW. Cuando varias celdas fotovoltaicas se conectan y se alojan en un mismo módulo, éste recibe el nombre de panel o módulo fotovoltaico (ver *figura 20*). Así mismo, varios paneles fotovoltaicos pueden conectarse entre sí para obtener una potencia de salida mayor. Dependiendo de la forma en que se conecten, en serie o paralelo, se obtendrán distintos valores de tensión y corriente (Schallenberg, y otros, 2008).

Figura 20. Ejemplo de panel de energía solar fotovoltaica

Nota: **Adaptado de SunFields Europe**

Cabe resaltar que la corriente obtenida de un módulo fotovoltaico es siempre corriente continua, por lo tanto, si se desea conectar un sistema fotovoltaico a la red, es necesario implementar inversores que transformen la corriente continua en corriente alterna. Además, los valores de tensión, corriente y potencia de salida de un panel fotovoltaico no son siempre constantes, ya que varían según la radiación solar incidente sobre el módulo, y esta, a su vez, varía según la ubicación y el ángulo de inclinación del panel, el momento del día, la estación del año, la presencia de nubes, etc.

Actualmente, la tecnología fotovoltaica es ampliamente usada en proyectos de electrificación rural en zonas donde no se cuenta con conexiones a la red eléctrica. También suele ser usada en viviendas o instalaciones que buscan una mayor independencia energética, las cuales pueden estar conectadas o no a la red eléctrica. Cuando las instalaciones están conectadas a la red eléctrica, esta actúa como un suministro auxiliar en momentos en los que la demanda es mayor a la energía que entregan los paneles fotovoltaicos.

2.1.2 Energía eólica

La energía eólica se obtiene a partir del viento, es decir, es la energía cinética del aire en movimiento. Como lo explican Vásquez, Tamayo y Salvador (2017), los desplazamientos de masas de aire son producto de gradientes de presión. Cuando el sol calienta la superficie terrestre, no lo hace de manera uniforme. De esta manera, el aire que está sobre tierra firme se calienta con mayor facilidad que el aire sobre los mares y océanos. Cuando la temperatura del aire aumenta, su densidad disminuye y, por lo tanto, se eleva, disminuyendo la presión en las zonas inferiores. Este gradiente de presión es el que ocasiona el movimiento del aire desde los mares hacia las costas.

Se estima que, aproximadamente, el 2% de la energía solar, responsable de calentar las masas de aire en la Tierra, contribuye a la formación de los vientos (Schallenberg, y otros, 2008). Esto nos recuerda que, la energía eólica es una manifestación indirecta de la energía solar.

La energía eólica depende principalmente de la velocidad del viento. En general, a mayor gradiente de presión, mayor velocidad de viento. En la práctica, la velocidad del viento depende de muchos factores, tales como la altitud (a mayor altitud, mayores velocidades), la ubicación y la geografía del lugar (por ejemplo, mientras más accidentes geográficos, más se frena el viento). Adicionalmente, para una misma ubicación, la velocidad y dirección del viento pueden cambiar con la hora del día, el día del año y entre años distintos. Por esta razón, cuando se busca realizar un proyecto de aprovechamiento de energía eólica, es importante contar con data histórica de velocidades y direcciones del viento en el lugar, y a una altura conocida.

2.1.2.1 Tecnologías de aprovechamiento de energía eólica. La primera aplicación conocida de la energía eólica fue en la navegación de los barcos de vela, hace ya algunos milenios (Schallenberg, y otros, 2008). Posteriormente, la energía eólica empezó a ser aprovechada, desde hace algunos siglos, en los molinos de viento para la molienda de cereales, como el maíz, y para bombear agua.

Si lo que se busca es obtener energía mecánica a partir de energía eólica, se usan aeromotores. Estas máquinas son motores accionados por el viento, y se han utilizado desde hace siglos para moler granos y para bombear agua, mayormente. Sin embargo, en la

actualidad, la principal aplicación de la energía eólica es la generación de energía eléctrica. Esto se logra con máquinas llamadas aerogeneradores.

En los aerogeneradores, la energía eólica primero se convierte en energía mecánica cuando el viento pasa por las aspas unidas a un rotor, y crea zonas de baja presión en éstas, causando que las aspas se muevan en esa dirección, y haciendo girar, a su vez, al rotor. El giro del rotor acciona un generador que se encarga de convertir la energía mecánica en energía eléctrica (Letcher, 2017).

La potencia que se puede obtener de los aerogeneradores es directamente proporcional al cubo de la velocidad del viento y al área barrida por las aspas. Tal como se muestra en las siguientes ecuaciones (Letcher, 2017).

$$P = av^3 = br^2 \tag{2.2}$$

Donde:

- P: potencia entregada por el aerogenerador [W].
- v: velocidad del viento [m/s].
- r: longitud de las aspas.
- a y b: constantes propias del aerogenerador [-].

Por esta razón, para la instalación de un aerogenerador siempre se buscan zonas con velocidades de viento altas y constantes. En términos generales, las velocidades de viento mínimas requeridas para el funcionamiento de un aerogenerador están alrededor de 3 m/s (10.8 km/h) y 4 m/s (14.4 km/h). A medida que aumenta la velocidad del viento, también aumenta la potencia entregada por el aerogenerador, hasta que se alcanza su potencia nominal. Además, los aerogeneradores suelen detenerse cuando las velocidades son superiores a 25 m/s (90 km/h), para evitar posibles roturas (Vásquez, Tamayo, & Salvador, 2017).

2.1.2.2 Componentes básicos de los aerogeneradores. Los elementos principales que componen un aerogenerador, según Schallenberg et al. (2008), son los siguientes:

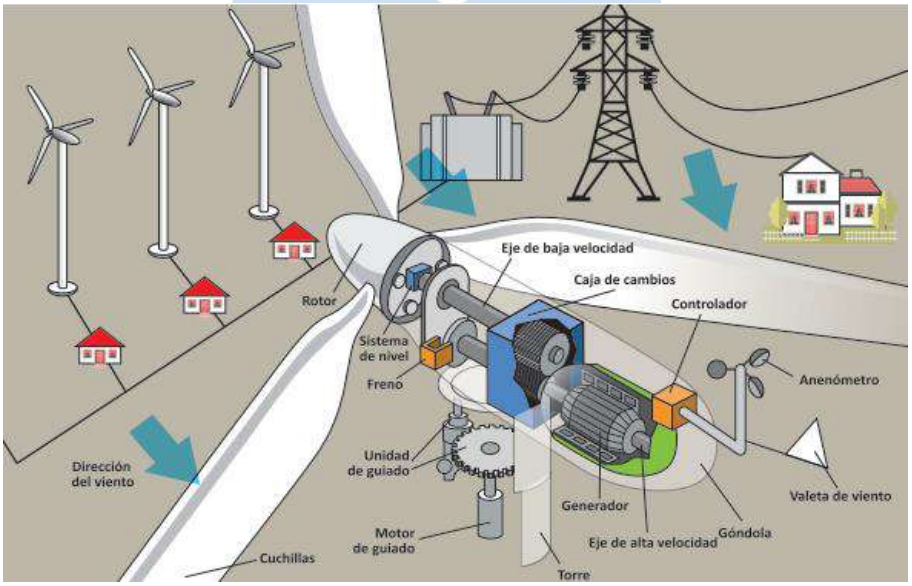
a) Torre: es el elemento que soporta la estructura del aerogenerador y suele tener una altitud de varios metros, puesto que, a mayor altura, mayor es la velocidad de los vientos, y por lo tanto, mayor potencia se puede obtener.
b) Rotor: es el elemento que transforma le energía cinética del viento en energía mecánica. Sobre el rotor se ubican las aspas, también llamadas palas o cuchillas, las cuales giran cuando el viento pasa por ellas. El material usado en las aspas suele ser un material compuesto de plástico reforzado con fibra de vidrio o carbono.
c) Góndola: es el elemento ubicado en la parte superior de la torre. En su interior se encuentran los elementos que transforman la energía mecánica en energía

eléctrica, como los ejes de baja y alta velocidad, el multiplicador y el generador, así como, los sistemas de control, orientación y frenado. En la parte exterior de la góndola se ubican instrumentos de medición, como el anemómento y la veleta, que miden la velocidad y dirección del viento, respectivamente.

d) Multiplicador: también es llamado caja de cambios. Este es el elemento que conecta el eje del rotor (eje de baja velocidad o eje principal) con el eje del generador (eje de alta velocidad), mediante un sistema de engranajes que se encarga de aumentar la velocidad del primero por un factor de entre 20 y 60. Por lo general, el eje del rotor gira a velocidades de entre 30-60 rpm y el eje del generador requiere velocidades de 1000-1800 rpm para funcionar.
e) Generador: es la máquina que transforma la energía mecánica de su eje en energía eléctrica. Su eje tiene acoplado un sistema de freno en disco, que entra en acción cuando se requiere parar la máquina por alguna emergencia.

Adicionalmente, si el aerogenerador se encuentra conectado a la red eléctrica, se requiere el uso de transformadores para elevar la tensión de salida del generador hasta la tensión nominal de la red. En la *figura 21*, se puede observar la estructura y componentes de un aerogenerador.

Figura 21. Componentes de un aerogenerador



Nota: **Adaptado de Vásquez, Tamayo, & Salvador (2017)**

2.1.2.3 Tipos de aerogeneradores. Según Schallenberg et al. (2008), los aerogeneradores pueden clasificarse según su potencia nominal, la orientación del rotor, el número de aspas y el mecanismo de regulación de potencia.

a) Según su potencia nominal, los aerogeneradores pueden ser de pequeña potencia (menor a 30 kW), de potencia media (entre 30 y 300 kW) o de gran potencia (mayor

a 300 kW). Los aerogeneradores de pequeñas potencias suelen usarse en sistemas aislados, mientras que los de mediana y gran potencia se suelen usar en sistemas conectados a la red.

b) Según la orientación del rotor, los aerogeneradores pueden ser de eje vertical o de eje horizontal (ver *figura 22*). Los aerogeneradores de eje horizontal son los más comunes, sin embargo, los aerogeneradores de eje vertical tienen algunas ventajas, como el hecho que pueden aprovechar los vientos de todas direcciones y que están instalados a nivel de suelo, facilitando las labores de mantenimiento.
c) Según el número de aspas o palas, los aerogeneradores pueden ser bipalas (2 palas), tripalas (3 palas) o multipalas (4 o más palas).
d) Según el mecanismo de regulación de potencia, los aerogeneradores pueden ser de paso fijo, si es que las aspas se mantienen en una posición fija y no permiten la regulación de potencia, o de paso variable, si es que las aspas pueden girar sobre su eje y ajustar el ángulo del aspa. Este segundo tipo permite mantener potencias de salida constantes cuando la velocidad del viento es lo suficientemente alta.

Figura 22. Aerogenerador de eje vertical (izquierda) y de eje horizontal tripala (derecha)

Nota: **Adaptado de Schallenberg et al. (2008)**

2.1.2.4 Tipos de parques eólicos. Los parques eólicos son emplazamientos donde se sitúan uno o más aerogeneradores. Si los aerogeneradores se encuentran conectados a la red eléctrica y toda la energía es inyectada a la red, se trata de parques eólicos interconectados. Si la energía producida por los aerogeneradores es usada principalmente para consumo propio, y solamente se inyecta el excedente, se trata de parques eólicos con consumos asociados. En cambio, si la energía producida es usada únicamente para consumo propio, se trata de parques eólicos aislados (Schallenberg et al., 2008).

Dependiendo del terreno en el que se encuentre, los parques eólicos pueden clasificarse en *onshore* y *offshore* (Schmerler et al., 2019) (ver *figura 23*).

- Parques *onshore*: son los que se ubican en tierra firme. Fueron los primeros en desarrollarse y construirse, y actualmente son el tipo más común.
- Parques *offshore*: son los que se encuentran en plataformas marinas. Debido a la ausencia de obstáculos en el mar, el viento es más fuerte y constante, incluso a bajas alturas, por lo que, pueden generar más energía eléctrica que sus similares.

El primer parque eólico *offshore* empezó a construirse en Suecia en 1990, y en 1991, Dinamarca terminó la instalación de su primer parque eólico con 11 aerogeneradores de 450 kW cada uno (Schmerler et al., 2019). Indudablemente, la tecnología *offshore* ha madurado mucho y se ha establecido en el mercado de las energías renovables, aunque su principal desventaja sigue siendo los mayores costos de conexión a red, construcción y mantenimiento.

Figura 23. Parque eólico *offshore* (izquierda) y *onshore* (derecha)

Nota: **Adaptado de Schallenberg et al. (2008)**

2.1.3 Energía de la biomasa

2.1.3.1 Fuentes de biomasa. El término "biomasa" hace referencia a grupo muy variado de materia orgánica que tiene su origen en el proceso de la fotosíntesis vegetal. Mediante este proceso, las plantas con clorofila aprovechan la energía del sol para convertir el dióxido de carbono y agua en materia orgánica con alto valor energético (Schmerler, Velardo, Rodríguez, & Solís, 2019). Las principales fuentes de biomasa (ver *figura 24*) utilizadas para la obtención de energía son las siguientes (Schallenberg, y otros, 2008):

- Biomasa natural: es aquella que se forma espontáneamente en la naturaleza, es decir, sin intervención de los seres humanos. Por ejemplo, la leña de los árboles no cultivados. El aprovechamiento de este tipo de biomasa debe llevarse a cabo de manera controlada y mesurada, pues la sobreexplotación de este recurso puede causar enormes pérdidas ecológicas y la destrucción de ecosistemas. A su vez, es recomendable el aprovechamiento de este recurso cuando proviene de partes muertas, como los restos de podas y clareos.
- Biomasa residual: es aquella proveniente de las actividades de los seres humanos. Por ejemplo, los residuos orgánicos obtenidos de plantaciones agrícolas, forestales

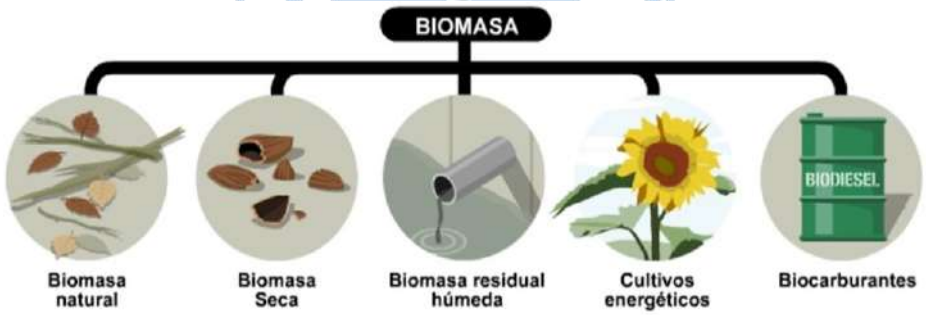
y ganaderas, así como, los residuos orgánicos generados en las industrias y zonas urbanas.

- Cultivos energéticos: hace referencia a cultivos producidos específicamente para su aprovechamiento energético. Estos pueden ser cultivos que tradicionalmente se utilizan para fines alimentarios, aunque también pueden ser cultivos no alimentarios que únicamente se aprovechan con fines energéticos.

Adicionalmente, la biomasa puede clasificarse según el porcentaje de humedad que contenga (Schmerler, Velardo, Rodríguez, & Solís, 2019).

- Biomasa seca: es aquella que contiene un porcentaje de humedad menor al 60%. Por ejemplo, la leña y residuos forestales.
- Biomasa húmeda: es aquella que contiene un porcentaje de humedad mayor al 60%. Por ejemplo, residuos de la fabricación de aceites y aguas residuales.

Figura 24. Tipos de biomasa



Nota: **Adaptado de https://ebasl.es/producir-energia-con-la-biomasa/**

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, el porcentaje de humedad de la biomasa es determinante para escoger el tipo de tecnología a utilizar. Por ejemplo, la biomasa seca se suele aprovechar mediante procesos termoquímicos, por obtenerse mayores rendimientos energéticos, mientras que, la biomasa húmeda es más fácil de aprovechar mediante procesos bioquímicos.

En la siguiente sección se comentará en mayor detalle las distintas tecnologías de aprovechamiento de la energía de la biomasa.

2.1.3.2 Tecnologías de aprovechamiento de la energía de biomasa. En cuanto a la generación de energía eléctrica, las tecnologías de aprovechamiento de la biomasa se pueden clasificar en dos, según el tipo de procesos que utilicen: procesos bioquímicos y procesos termoquímicos (Schmerler, Velardo, Rodríguez, & Solís, 2019).

Los procesos bioquímicos son procesos lentos y de menor rendimiento de energético en los cuales la biomasa es degradada por microorganismos. Si el proceso se realiza en ausencia de oxígeno, se trata de procesos anaeróbicos. En estos procesos, la materia orgánica

degradada se transforma en biogás, el cual está compuesto en su mayoría por gas metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), y se suele utilizar como combustible y para la generación de energía eléctrica. En cambio, si los procesos de degradación de la biomasa ocurren en presencia de oxígeno, se trata de procesos aeróbicos.

Además, los procesos termoquímicos son procesos con mayor rendimiento energético y que producen energía térmica en forma de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. Estos incluyen tres procesos: combustión directa, pirólisis y gasificación. En la combustión directa, la biomasa se quema en presencia de oxígeno, para obtenerse como productos dióxido de carbono, vapor de agua y calor. En el pirólisis, la materia orgánica se descompone a altas temperaturas y se obtienen combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, en función de la temperatura alcanzada y el tiempo del proceso. Finalmente, en la gasificación, se obtienen principalmente combustibles gaseosos, como el monóxido de carbono (CO) y el hidrógeno (H_2), los cuales pueden ser utilizados en la producción de energía eléctrica.

2.2 Beneficios y retos de las energías renovables

2.2.1 Beneficios de las energías renovables

Se han identificado los siguientes tres beneficios importantes que trae la producción energética con fuentes de energía renovables: incremento de la confiabilidad del sistema eléctrico, reducción de la contaminación ambiental y fácil acceso eléctrico a zonas rurales.

a) Incremento de la confiabilidad del sistema eléctrico: este beneficio es una consecuencia natural de la diversificación de la matriz eléctrica con la inclusión de energías renovables. Actualmente, en el Perú la producción de energía se realiza mayoritariamente a partir de dos fuentes, hidráulica y gas natural. Según Schmerler et al. (2019), la concentración de la producción energética en unas pocas fuentes reduce la confiabilidad del sistema ante posibibles desastres, como sequías, o ante la volatilidad de los precios de los combustibles fósibles. De esta forma, la inclusión de fuentes de energía renovable no convencionales, como solar o eólica, le da robustez al sistema y reduce el riesgo de escasez de suministro eléctrico.

b) Reducción de la contaminación ambiental: la utilización de recursos fósiles (no renovables) para la producción de energía libera gases contaminantes a la atmósfera, como el dióxido de carbono (CO_2), el cual es uno de los principales gases responsables del efecto invernadero. El incremento en las emisiones de dióxido de carbono producto de la actividad humana (transporte, industrias, generación eléctrica, etc.), ocasiona un incremento en el calentamiento de la superficie terrestre (Schallenberg, y otros, 2008). Debido a que la producción de energía a partir de fuentes renovables, incluyendo a la energía hidráulica, no genera emisiones considerables de CO_2, entonces un incremento en el porcentaje de

utilización de energías renovables para la generación eléctrica ocasionaría una disminución de las emisiones de dióxido de carbono.

Además, los combustibles fósiles también contienen nitrógeno y azufre. Al quemar estos combustibles, ambos se oxidan, generando óxidos de nitrógeno (NOx) y óxidos de azufre (SOx), respectivamente, los cuales son emitidos a la atmósfera. Posteriormente, estos óxidos se combinan con el vapor de agua presente en la atmósfera, de lo cual se obtiene ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3), respectivamente. Estos ácidos son corrosivos, y cuando las precipitaciones contienen cantidades de estos, se les llama lluvia ácida (Schallenberg, y otros, 2008). Las consecuencias de la lluvia ácida incluyen la deforestación y acidificación de los cuerpos de agua. El uso de fuentes renovables para la generación eléctrica, en lugar de la quema de combustibles fósiles, permite reducir también las emisiones de estos óxidos, por lo que, contribuye así a la reducción de la lluvia ácida y sus consecuencias destructivas para el planeta.

c) Fácil acceso a electricidad en zonas rurales: En el Perú aún no se ha logrado cerrar la brecha de acceso a electricidad en zonas rurales. Esto se debe, principalmente, a la geografía complicada en las zonas interiores del país, lo cual dificulta y encarece los costos de instalación de redes de distribución convencionales (Schmerler, Velardo, Rodríguez, & Solís, 2019). En este sentido, el uso de fuentes renovables para la generación de energía puede constituir una potencial solución.

2.2.2 Retos de las energías renovables

Se han repasado en la sección anterior los principales beneficios de la implementación de energías renovables en la matriz energética. Sin embargo, esta implementación también cuenta con una serie de retos o limitaciones prácticas, que deberán superarse en los años venideros con avances tecnológicos y políticas energéticas. Se ha identificado que una de las principales limitaciones del uso de energías renovables es la naturaleza intermitente y variable de estos recursos.

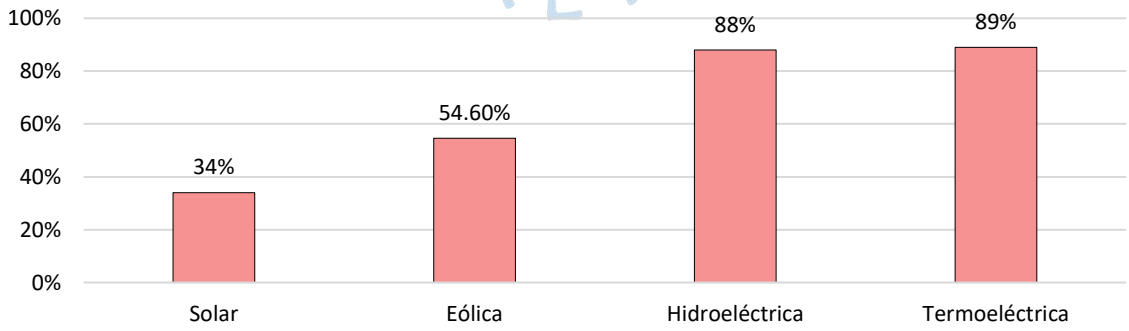
Se entiende como intermitencia a la interrupción no planificada de la generación de electricidad, a partir de recursos renovables, como la energía solar y eólica (Schmerler, Velardo, Rodríguez, & Solís, 2019). Además, la disponibilidad de estos recursos es altamente variable, y depende, en otros factores, de las condiciones climáticas, la ubicación geográfica, el momento del día, la estación del año, etc. Por todo esto, las energías renovables, en general, constituyen fuentes variables y poco confiables para la generación continua y estable de energía eléctrica o térmica. Sin embargo, no todas las energías renovables presentan una intermitencia muy pronunciada. Por ejemplo, la energía de biomasa y la energía hidráulica, si bien es cierto están sujetas a cierta variabilidad, la producción energética a partir de estos recursos es más fácil de predecir y estimar.

a) Intermitencia y variabilidad de la energía solar: La generación de energía a partir de este recurso depende del nivel de radiación solar que se tenga en un determinado lugar. Esta radiación tiene un comportamiento estacional, es decir, varía con la hora del día y con las estaciones del año. En general, los valores máximos de radiación solar se alcanzan al medio día y en época de verano. Mientras que, durante la noche, los valores son nulos. Sin embargo, estos patrones estacionales no son los únicos que afectan los niveles de radiación en un lugar, sino que también dependen de las condiciones climáticas (por ejemplo, si está nublado, lloviendo, etc.), las cuales son difíciles de predecir y pueden cambiar en cualquier momento.

b) Intermitencia y variabilidad de la energía eólica: La generación de energía a partir de este recurso depende de la velocidad de viento que se tenga. En general, las velocidades de viento y su comportamiento en un determinado lugar dependen fuertemente de las características geográficas de la zona, por lo que, es difícil establecer un patrón estacional para estas (Schmerler, Velardo, Rodríguez, & Solís, 2019). Adicionalmente, la velocidad del viento aumenta con la altura sobre el nivel del suelo, razón por la cual los aerogeneradores tienen gran altura. No obstante, la velocidad de viento es aún más voluble que la radiación solar, pudiendo cambiar bruscamente de intensidad en periodos de menos de 10 minutos (Schmerler, Velardo, Rodríguez, & Solís, 2019). Esto hace que la producción energética a partir de energía eólica sea aún más difícil de predecir.

Como se ha comentado, la intermitencia de los recursos solares y eólicos es bastante elevada. Por esto, las plantas que utilizan estos recursos suelen presentar factores de planta menores que otras centrales de generación, como las hidroeléctricas y termoeléctricas, las cuales cuentan con una mayor disponibilidad del recurso. En la *Figura 25*, se muestra los máximos factores de planta alcanzados por estos tipos de centrales en Perú el 2018.

Figura 25. Máximo factor de planta de distintos tipos de centrales en Perú (2018)



Nota: **Adaptado de Schmerler, Velardo, Rodríguez, & Solís (2019)**

Para superar el reto que presenta la intermitencia de las energías renovables existen algunas alternativas. Quizá la solución más práctica sea el almacenamiento del excedente en

forma eléctrica o térmica. De esta forma se podría absorber y conservar la energía cuando la demanda sea menor a la generación, así como, entregar lo almacenado cuando la demanda sea mayor. Otra forma de superar este reto es el uso de sistemas auxiliares, que puedan actuar cuando la generación primaria no sea capaz de suplir la demanda.

2.3 Estado actual de las energías renovables

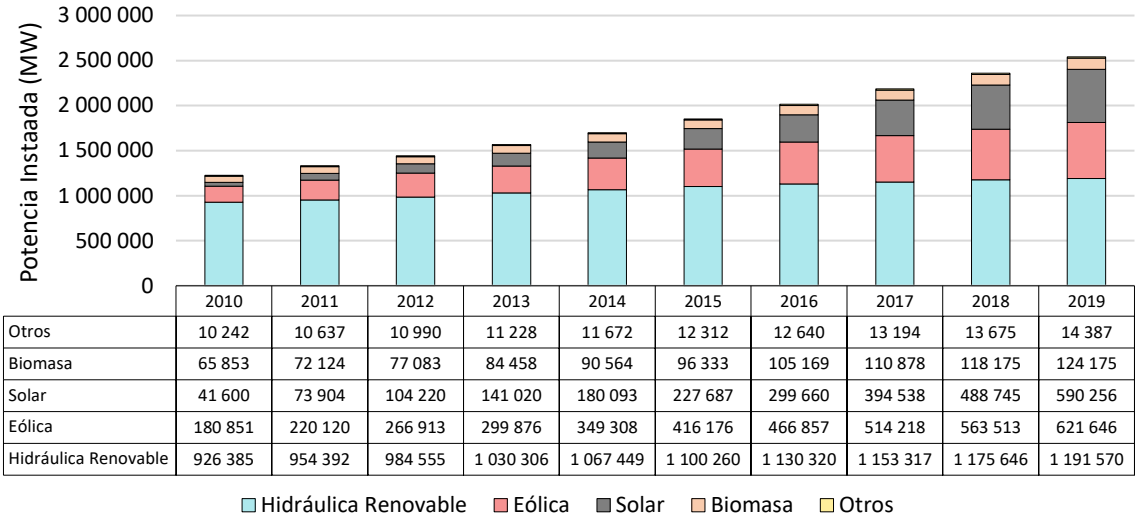
2.3.1 Estado actual de las energías renovables en el mundo

En esta sección se describe la situación actual de las energías renovables en el mundo. Primero, se incluye la evolución en los últimos años de la potencia instalada y generación de electricidad para los principales tipos de energía renovable. Así mismo, se muestra la participación actual (2019) de generadores renovables por potencia instalada y generación de electricidad. Finalmente, se describe también la distribución geográfica en el mundo de la potencia instalada y generación de electricidad.

2.3.1.1 Evolución en los últimos años (2010-2019). Según la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés), la potencia instalada de generadoras renovables en el mundo en el 2010 era de 1,224,931 MW. Mientras que, para finales del 2019, esta potencia instalada ya era de 2,542,035 MW, lo cual supone un aumento de 108% en la potencia instalada mundial en un lapso de menos de 10 años. Similarmente, la electricidad generada en el 2010 a partir de energías renovables fue 4,196,290 GWh en el mundo. Mientras que, para finales del 2019, se generaron 6,963,450 GWh de electricidad en el mundo a partir de energías renovables, lo cual supone un incremento de 66% en menos de 10 años.

En la *figura 26* puede verse que la energía renovable que más aumentó su potencia instalada en el mundo es la energía solar, la cual pasó de tener 41,600 MW en el 2010 a tener 590,256 MW en el 2019 (un aumento del 1319%). No obstante, la energía hidráulica renovable ha sido la que ha aumentado en menor medida su potencia instalada, pues pasó de 926,385 MW en 2010 a 1,191,570 MW en 2019 (un aumento del 29%).

Figura 26. Evolución de la potencia instalada por recurso energético renovable en el mundo (2010-2019)

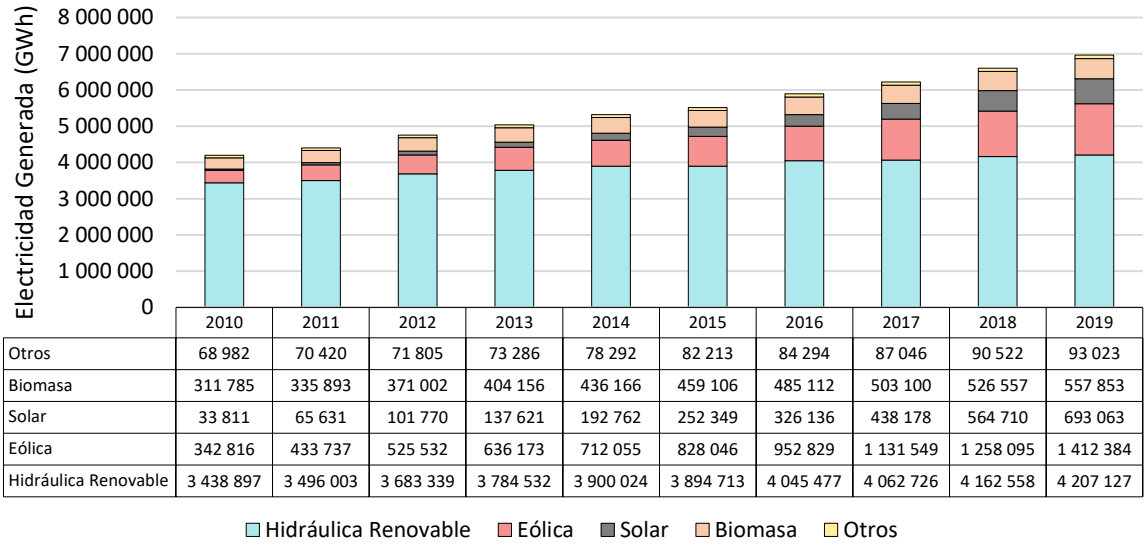


	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Otros	10 242	10 637	10 990	11 228	11 672	12 312	12 640	13 194	13 675	14 387
Biomasa	65 853	72 124	77 083	84 458	90 564	96 333	105 169	110 878	118 175	124 175
Solar	41 600	73 904	104 220	141 020	180 093	227 687	299 660	394 538	488 745	590 256
Eólica	180 851	220 120	266 913	299 876	349 308	416 176	466 857	514 218	563 513	621 646
Hidráulica Renovable	926 385	954 392	984 555	1 030 306	1 067 449	1 100 260	1 130 320	1 153 317	1 175 646	1 191 570

Nota: **Adaptado de Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA)**

En la *figura 27* se observa la evolución de la electricidad generada en el mundo por recurso energético renovable en los últimos 10 años. En esta se puede ver que nuevamente, la energía solar fue la fuente de energía renovable que tuvo un mayor incremento de electricidad generada en el mundo. En el 2010, se generaron 33,811 GWh de electricidad a partir de energía solar, mientras que, en el 2019, esta cantidad fue de 693,063 GWh (+1950%). La energía hidráulica fue la que tuvo en un menor incremento de generación de electricidad, de solo 22% en los últimos 10 años.

Figura 27. Evolución de la electricidad generada por recurso energético renovable en el mundo (2010-2019)



	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Otros	68 982	70 420	71 805	73 286	78 292	82 213	84 294	87 046	90 522	93 023
Biomasa	311 785	335 893	371 002	404 156	436 166	459 106	485 112	503 100	526 557	557 853
Solar	33 811	65 631	101 770	137 621	192 762	252 349	326 136	438 178	564 710	693 063
Eólica	342 816	433 737	525 532	636 173	712 055	828 046	952 829	1 131 549	1 258 095	1 412 384
Hidráulica Renovable	3 438 897	3 496 003	3 683 339	3 784 532	3 900 024	3 894 713	4 045 477	4 062 726	4 162 558	4 207 127

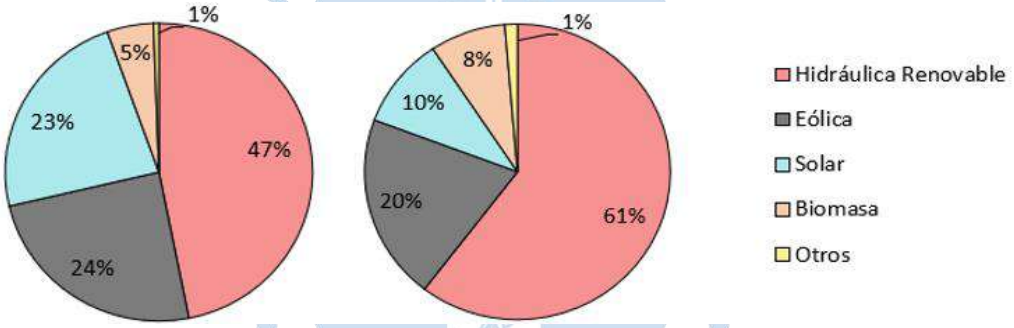
Nota: **Adaptado de Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA)**

2.3.1.2 Distribución actual por tipo de tecnología (2019). Según IRENA, para el 2019, la participación de las centrales hidroeléctricas representó un 46.87% de toda la potencia

instalada de tipo renovable a nivel mundial. Le siguen las centrales eólicas (de tipo *onshore* y *offshore*), las cuales acumularon una participación del 24.45%. En un tercer lugar muy cercano se encontraron las centrales solares (de tipo fotovoltaica y concentradas), las cuales acumularon una participación de 23.22% de la potencia instalada total. Finalmente, en una menor proporción se encuentran las centrales de biomasa (según IRENA, incluyen biocombustibles sólidos, líquidos y biogás), que contribuyeron un 4.88% de la potencia instalada mundial (ver *figura 28*). Otras centrales generadoras contribuyeron con menos del 1%, y aquí se incluyen a las de tipo geotérmica y marítimas.

Debido a que no todos los tipos de centrales generadoras tienen los mismos factores de planta, la participación en la electricidad generada por un tipo de central generadora no necesariamente corresponde con su participación en la potencia instalada. En la *figura 28* (gráfico derecho) se muestra la distribución de la electricidad generada por recurso energético renovable en 2019.

Figura 28. Distribución de la potencia instalada (izquierda) y de la electricidad generada (derecha) por recurso energético renovable en el mundo (2019)



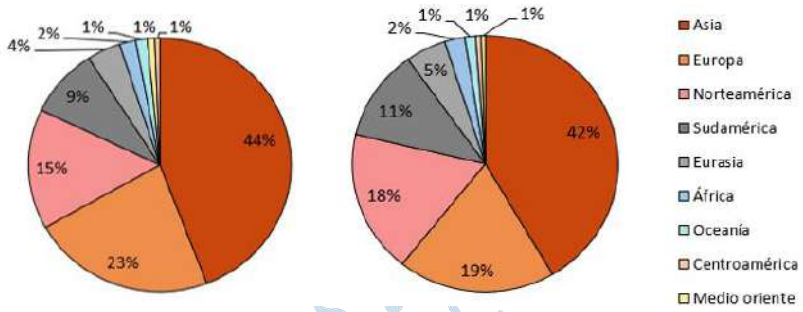
Nota: **Adaptado de Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA)**

Como puede verse también en la *figura 28*, la potencia instalada de centrales hidroeléctricas en 2019 representaba el 47%, no obstante, este tipo de generadoras representaron más del 60% de la producción de electricidad en el mismo año. Esto se debe a que, las centrales hidroeléctricas tienen factores de planta más altos que el resto, y su producción es más constante. A las hidroeléctricas, les siguen las centrales eólicas que generaron un 20% de la electricidad total en el 2019. En tercer lugar, se encuentran las centrales solares, las cuales generaron menos del 10% de la electricidad proveniente de fuentes renovables. Lo restante fue abastecido por centrales de biomasa (8%) y otras (1.34%), que incluyen marítimas y geotérmicas.

2.3.1.3 Distribución actual por regiones (2019). Según IRENA, en el mundo (ver *figura 29*), la región que tiene la mayor potencia instalada de fuentes renovables es Asia (1,123,348 MW), que representa un 44.19% de la potencia instalada mundial. En segundo lugar, le sigue Europa (575,075 MW) con un 22.62% de toda la potencia instalada, y, en tercer lugar, Norteamérica (388,863 MW) con un 15.30%. En cuanto a la electricidad generada, Asia

también lidera la lista, pues en 2019 se generaron 2,894,738 GWh de electricidad, lo que equivale al 41.57% del total (ver *figura 29*). Además, se puede señalar que el orden de potencia instalada de las regiones se mantiene con respecto a su generación eléctrica.

Figura 29. Distribución de la potencia instalada (izquierda) y electricidad generada (derecha) por regiones (2019)



Nota: **Adaptado de Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA)**

Como puede observarse en ambos gráficos de la *figura 29*, Asia, Europa y Norteamérica aportan más de tres cuartas partes de la potencia instalada y de la electricidad generada a nivel mundial. Esto tiene sentido, pues estas regiones contienen a la mayoría de la población mundial, y la mayoría de los países se tratan de naciones altamente industrializadas, por lo que, es de esperarse que la demanda eléctrica sea alta.

En la *Tabla 5* se presentan los 10 países que cuentan con la mayor potencia instalada de generadoras renovables. En esta se puede apreciar que China es el país que posee la mayor potencia instalada de generadoras renovables en el mundo. Esto se debe, a que China posee algunas de las centrales de generación de fuentes renovables más importantes, como la planta solar de Tengger Desert Solar Park (1547 MW instalados), el parque eólico Gansu Wind Farm (20,000 MW planeados), y la central hidroeléctrica de Tres Gargantas (22,500 MW instalados), la cual es la más grande del mundo (Schmerler, Velardo, Rodríguez, & Solís, 2019)

Tabla 5. Los 10 países con la mayor potencia instalada (2019)

País	Región	Potencia Instalada (MW)	Electricidad generada (GWh)
China	Asia	579,577	1,611,381
Estados Unidos	Norteamérica	178,087	489,607
Brasil	Sudamérica	129,113	459,463
Japón	Asia	117,211	186,246
India	Asia	95,578	213,423
Canadá	Norteamérica	87,155	394,750
Alemania	Europa	69,808	122,481
Rusia	Eurasia	55,024	199,367
Italia	Europa	47,633	115,860
Francia	Europa	38,720	113,112

Nota: **Adaptado de Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA)**

Capítulo 3

Potencial de producción de H_2 a partir del uso de energía eólica en Piura

En este capítulo se ha determinado cuánto H_2 se produciría a partir del aprovechamiento de la energía eólica mediante aerogeneradores en Piura. En este análisis se empleó data de la velocidad media mensual del viento de los distritos de Piura, la cual fue extraída de la plataforma NASA POWER *Data Access Viewer*. Además, para poder cumplir el objetivo se debió calcular diversos parámetros como son la "Potencia desarrollada por aerogenerador (P_{aero})", la "Superficie ocupada por cada aerogenerador (Sup_{aero})" y la "Energía eléctrica por área generada a partir de la energía eólica en los distritos seleccionados de Piura (E_E)".

3.1 Selección de aerogenerador

Para el estudio se utilizaron aerogeneradores de la marca SIEMENS Gamesa. El modelo en específico es el SG 2.1-114 y ha sido seleccionado al estar destinado para emplazamientos de vientos bajos y medios (IEC IIA/IIIA/S), una potencia nominal de 2.1 MW y un diámetro del rotor de 114 m (características de un aerogenerador promedio). Además, su catálogo de alturas de torre va de 68 a 153 m y se cuenta con su curva de velocidad media del viento vs potencia desarrollada. Las principales características de este modelo se encuentran en la *Tabla 6*, mientras que, en el *Anexo B*, se puede visualizar su ficha técnica al completo.

Tabla 6. Características técnicas del aerogenerador elegido

Aerogenerador		
Marca		SIEMENS Gamesa
Modelo		SG 2.1-114
Datos generales	Potencia nominal	2.1 MW
	Clase de viento	IEC IIA/IIIA/S
	Temperatura operativa estándar	De -20°C a 40°C
Rotor	Diámetro	114 m
	Área de barrido	10.207 m^2
	Longitud de las palas	56 m
Generador	Tensión	690 V_{AC}
	Frecuencia	50/60 Hz

Nota: **Adaptado de Ficha técnica del aerogenerador (ver *Anexo B*)**

3.2 Energía generada por la instalación

3.2.1 Estudio de la velocidad media mensual del viento

La velocidad media mensual del viento se puede definir como el promedio aritmético de los valores diarios de la velocidad de este, correspondientes al mismo mes. La necesidad de conocer esta variable radica en su relación directa con la potencia que podría generar cada aerogenerador, por lo que, a mayor velocidad del viento, mayor potencia entregada (hasta llegar a la potencia máxima de este).

Tabla 7. Velocidad del viento media mensual en los distritos seleccionados

Velocidad media mensual del viento en los distritos seleccionados [m/s]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pariñas	4.69	4.16	4.13	4.89	5.52	5.62	5.67	5.68	5.82	5.77	5.56	5.28
El Alto	4.86	4.06	3.95	4.87	5.82	6.12	6.24	6.23	6.31	6.26	6.05	5.67
Los Órganos	4.86	4.06	3.95	4.87	5.82	6.12	6.24	6.23	6.31	6.26	6.05	5.67
Máncora	4.86	4.06	3.95	4.87	5.82	6.12	6.24	6.23	6.31	6.26	6.05	5.67
La Brea	4.69	4.16	4.13	4.89	5.52	5.62	5.67	5.68	5.82	5.77	5.56	5.28
Lobitos	4.86	4.06	3.95	4.87	5.82	6.12	6.24	6.23	6.31	6.26	6.05	5.67
Sullana	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Bellavista	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Ignacio Escudero	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Querecotillo	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Marcavelica	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Miguel Checa	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Salitral (Sullana)	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Lancones	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Paita	4.95	4.55	4.58	5.17	5.50	5.52	5.58	5.63	5.74	5.68	5.54	5.36
Pueblo Nuevo Colán	4.69	4.16	4.13	4.89	5.52	5.62	5.67	5.68	5.82	5.77	5.56	5.28
La Huaca	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Vichayal	4.69	4.16	4.13	4.89	5.52	5.62	5.67	5.68	5.82	5.77	5.56	5.28
Amotape	4.69	4.16	4.13	4.89	5.52	5.62	5.67	5.68	5.82	5.77	5.56	5.28
Tamarindo	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
El Arenal	4.69	4.16	4.13	4.89	5.52	5.62	5.67	5.68	5.82	5.77	5.56	5.28
Piura	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Castilla	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
26 de octubre	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Catacaos	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
La Unión	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
La Arena	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Cura Mori	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
El Tallán	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Sechura	5.20	4.74	4.73	5.55	6.01	6.21	6.38	6.37	6.36	6.18	5.96	5.71
Vice	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Bernal	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Bellavista de la Unión	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Cristo Nos Valga	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Rinconada Llicuar	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61

Nota: **Adaptado de NASA POWER *Data Access Viewer***

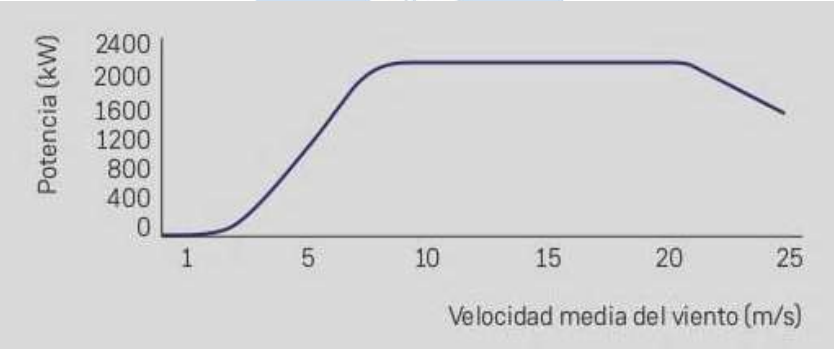
Para determinar la velocidad media mensual del viento en cada uno de los distritos de la región Piura, se utilizó el programa web NASA POWER *Data Access Viewer*[2]. El cual fue desarrollado por investigadores del LaRC (*Langley Research Center*) con la finalidad de proporcionar data meteorológica y solar recopilada por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y referente a las energías renovables, eficiencias energéticas y necesidades agrícolas. Los datos meteorológicos entregados por la plataforma (ver *Anexo A)* han sido evaluados a una elevación de 50 metros sobre el suelo y son correspondientes al periodo formado entre los años de 1990 y 2019.

Finalmente, es importante señalar que para poder plantear un proyecto eólico rentable, se tiene como principal requerimiento el tener una velocidad del viento promedio mayor o igual a 5 m/s, por lo que en este estudio no se ha considerado a los distritos que no cumplan con este requisito (ver *Tabla 7*). Además, tampoco se ha tomado en cuenta a las zonas con grandes áreas montañosas (Sierra piurana), al ser de difícil acceso para la instalación de parques eólicos.

3.2.2 Cálculo de la potencia desarrollada por cada aerogenerador

Para predecir la potencia que podría desarrollar cada aerogenerador, se utilizó un modelo simplificado, el cual consiste en seleccionar un aerogenerador comercial de baja potencia y emplear la curva de potencia de su ficha técnica (ver *Anexo B*) para la estimación. En la *figura 30* se puede visualizar la curva referente al SIEMENS Gamesa 2.1-114 de 2.1 MW, y el dato de entrada es la velocidad del viento media mensual de los distritos de la región seleccionados, en unidades de m/s (ver *Tabla 7*).

Figura 30. Curva de potencia del aerogenerador seleccionado



Nota: **Adaptado de Ficha técnica del aerogenerador (ver *Anexo B*)**

A partir de la curva de potencia de la *figura 30*, se elaboró la *Tabla 9*, en la que se expresa la relación existente entre cada uno de los valores enteros de velocidad media del viento (en m/s) con respecto a la potencia desarrollable (en kW). Esta tabla tuvo la finalidad de servir como guía para realizar el proceso de interpolación con los valores mensuales

[2] https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

referentes a los distritos de la región. Finalmente, en la *Tabla 8* se expuso los valores de potencia resultantes.

Tabla 8. Potencia desarrollada por aerogenerador en los distritos seleccionados de Piura

Potencia desarrollada por aerogenerador en los distritos seleccionados de Piura [kW]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pariñas	945	680	665	1045	1,343	1,390	1,413	1,418	1,483	1,460	1,362	1,231
El Alto	1,030	630	582	1,035	1,483	1,607	1,647	1,644	1,670	1,654	1,584	1,413
Los Órganos	1,030	630	582	1,035	1,483	1,607	1,647	1,644	1,670	1,654	1,584	1,413
Máncora	1,030	630	582	1,035	1,483	1,607	1,647	1,644	1,670	1,654	1,584	1,413
La Brea	945	680	665	1045	1,343	1,390	1,413	1,418	1,483	1,460	1,362	1,231
Lobitos	1,030	630	582	1,035	1,483	1,607	1,647	1,644	1,670	1,654	1,584	1,413
Sullana	995	690	610	880	1,207	1,338	1,436	1,478	1,516	1,474	1,394	1,268
Bellavista	995	690	610	880	1,207	1,338	1,436	1,478	1,516	1,474	1,394	1,268
Ignacio Escudero	995	690	610	880	1,207	1,338	1,436	1,478	1,516	1,474	1,394	1,268
Querecotillo	995	690	610	880	1,207	1,338	1,436	1,478	1,516	1,474	1,394	1,268
Marcavelica	995	690	610	880	1,207	1,338	1,436	1,478	1,516	1,474	1,394	1,268
Miguel Checa	995	690	610	880	1,207	1,338	1,436	1,478	1,516	1,474	1,394	1,268
Salitral (Sullana)	995	690	610	880	1,207	1,338	1,436	1,478	1,516	1,474	1,394	1,268
Lancones	995	690	610	880	1,207	1,338	1,436	1,478	1,516	1,474	1,394	1,268
Paita	1,075	875	890	1,179	1,334	1,343	1,371	1,394	1,446	1,418	1,352	1,268
Pueblo Nuevo Colán	945	680	665	1045	1,343	1,390	1,413	1,418	1,483	1,460	1,362	1,231
La Huaca	995	690	610	880	1,207	1,338	1,436	1,478	1,516	1,474	1,394	1,268
Vichayal	945	680	665	1045	1,343	1,390	1,413	1,418	1,483	1,460	1,362	1,231
Amotape	945	680	665	1045	1,343	1,390	1,413	1,418	1,483	1,460	1,362	1,231
Tamarindo	945	680	665	1045	1,343	1,390	1,413	1,418	1,483	1,460	1,362	1,231
El Arenal	945	680	665	1045	1,343	1,390	1,413	1,418	1,483	1,460	1,362	1,231
Piura	1,170	935	890	1,203	1,446	1,558	1,627	1,637	1,627	1,580	1,492	1,385
Castilla	1,170	935	890	1,203	1,446	1,558	1,627	1,637	1,627	1,580	1,492	1,385
26 de octubre	1,170	935	890	1,203	1,446	1,558	1,627	1,637	1,627	1,580	1,492	1,385
Catacaos	1,170	935	890	1,203	1,446	1,558	1,627	1,637	1,627	1,580	1,492	1,385
La Unión	1,170	935	890	1,203	1,446	1,558	1,627	1,637	1,627	1,580	1,492	1,385
La Arena	1,170	935	890	1,203	1,446	1,558	1,627	1,637	1,627	1,580	1,492	1,385
Cura Mori	1,170	935	890	1,203	1,446	1,558	1,627	1,637	1,627	1,580	1,492	1,385
El Tallán	1,170	935	890	1,203	1,446	1,558	1,627	1,637	1,627	1,580	1,492	1,385
Sechura	1,193	970	965	1,357	1,570	1,637	1,694	1,690	1,687	1,627	1,548	1,432
Vice	1,170	935	890	1,203	1,446	1,558	1,627	1,637	1,627	1,580	1,492	1,385
Bernal	1,170	935	890	1,203	1,446	1,558	1,627	1,637	1,627	1,580	1,492	1,385
Bellavista de la Unión	1,170	935	890	1,203	1,446	1,558	1,627	1,637	1,627	1,580	1,492	1,385
Cristo Nos Valga	1,170	935	890	1,203	1,446	1,558	1,627	1,637	1,627	1,580	1,492	1,385
Rinconada Llicuar	1,170	935	890	1,203	1,446	1,558	1,627	1,637	1,627	1,580	1,492	1,385

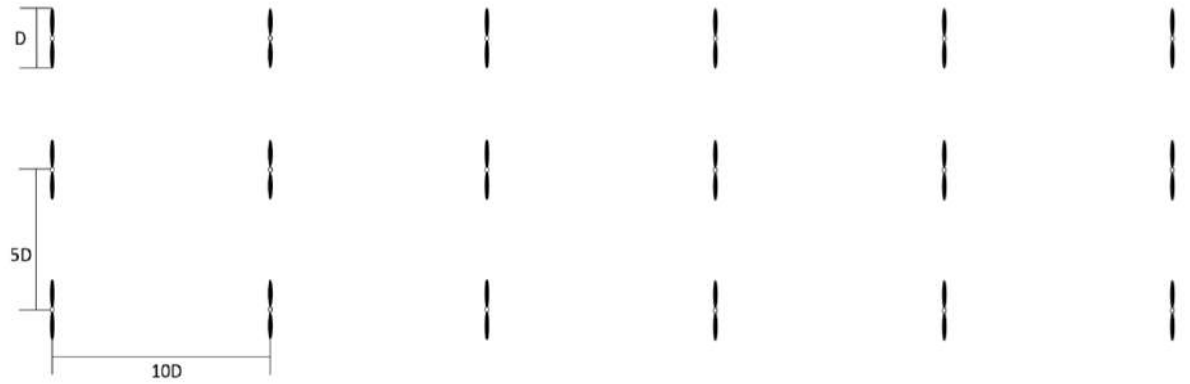
Tabla 9. Velocidad media del viento vs potencia desarrollada

Velocidad media del viento [m/s]	Potencia desarrollada por aerogenerador [kW]
0	0
1	0
2	67
3	233
4	600
5	1,100
6	1,567
7	1,900
8	2,133
9	2,167
10	2,200
11	2,200
12	2,200
13	2,200
14	2,200
15	2,200
16	2,200
17	2,200
18	2,200
19	2,200
20	2,200
21	2,033
22	1,933
23	1,833
24	1,633
25	1,567

3.2.3 Superficie ocupada por cada aerogenerador

Un fenómeno importante por considerar es la inestabilidad del viento al atravesar las palas del aerogenerador, lo cual ocasiona un aumento en su turbulencia y, por lo tanto, una pérdida de energía producible si no se optimizara la distancia entre los aerogeneradores. Ante este problema, Posso y Zambrano (2014) mencionan que, con una separación entre aerogeneradores de 8 a 10 veces el diámetro del rotor en la dirección del viento y 5 veces en la dirección vertical, se obtendrían pérdidas inferiores al 10% de la energía eléctrica producida si estos aerogeneradores estuvieran completamente aislados. Es por ello por lo que se propone la disposición de la *figura 31*, en la cual, al disponer de un diámetro (D) de 114 m y un área equivalente a $5D * 10D$, se obtiene una superficie ocupada (Sup_{aero}) de aproximadamente $0.6498\ km^2$.

Figura 31. Parámetros del cálculo de la superficie ocupada por cada aerogenerador



Nota: **Adaptado de Posso & Zambrano (2014)**

3.2.4 Cálculo de la energía eléctrica generada por la instalación

Luego de conocer los valores correspondientes a la superficie ocupada por cada aerogenerador (Sup_{aero}) y la potencia desarrollada por estos (P_{aero}), se procedió a calcular la "Energía eléctrica por área generada a partir de la energía eólica en los distritos seleccionados de Piura (E_E)" (ver *Apéndice B*). Para ello se utilizó la ecuación (3.1), se asumió un factor de disponibilidad de 0.98 (Posso, Sánchez, Espinoza, & Siguencia, 2016), y se reemplazó cada uno de los valores de P_{aero} (ver *Tabla 9*).

$$E_E = \frac{N°_{horas\ del\ mes} * F_{disp} * P_{aero}}{10^6 * Sup_{aero}}$$

$$E_E = \frac{0.98 * N°_{horas\ del\ mes} * P_{aero}}{10^6 * 0.6498} \qquad (3.1)$$

$$E_E = 1.51 * 10^{-6} * N°_{horas\ del\ mes} * P_{aero}$$

Donde:

- E_E: energía eléctrica por área generada a partir de la energía eólica en los distritos seleccionados de Piura [GWh/km^2/mes].
- $N°_{horas\ del\ mes}$: número de horas del mes [h/mes].
- F_{disp}: factor de disponibilidad típico de parques eólicos comerciales (0.98).
- Sup_{aero}: superficie ocupada por cada aerogenerador (0.6498 km^2).
- P_{aero}: potencia desarrollada por aerogenerador [kW].

3.3 Cálculo del H_2 eólico producido a partir de la electrólisis del agua

3.3.1 Producción de H_2 eólico por área

Para la estimación del "Potencial de producción de H_2 eólico por área en cada distrito de Piura (P_{H2E})" se tuvo como principal referencia a (Villarroel Sáez, Rodríguez, & & Leiva, 2011), el cual señala que la cantidad de energía teórica necesaria para producir hidrógeno vía electrólisis del agua es 39 kWh/kg H_2 (a 25°C y 1 atm), valor que corresponde al poder

calorífico superior del hidrógeno (HHV_{H_2}) y el cual es válido para condiciones ideales del sistema: eficiencia de 100%. Sin embargo en la realidad, un sistema electrolizador PEM comercial funciona con una eficiencia que oscila en el rango entre 55% y 75%, por lo que en el análisis se optó por una eficiencia del 75%, al ser el porcentaje más frecuente en los electrolizadores PEM del mercado y utilizado en la estimación de (Villarroel Sáez, Rodríguez, & & Leiva, 2011). Por ello, considerando las condiciones antes mencionadas, se planteó (3.2), y con el cual se pudo calcular los valores de P_{H2E} (ver *Tabla 10*).

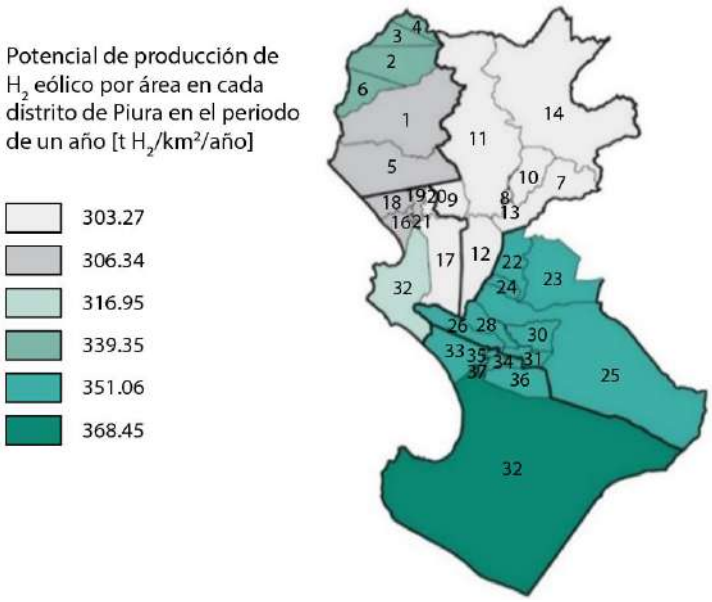
$$P_{H2E} = \frac{1000 * \eta_e * E_E}{HHV_{H_2}} = 19.231 * E_E \qquad (3.2)$$

Donde:

- P_{H2E}: potencial de producción de H_2 eólico por área en cada distrito de Piura [t H_2/km^2/mes].
- E_E: energía eléctrica por área generada a partir del uso de la energía eólica en los distritos de Piura [GWh/km^2/mes].
- HHV_{H_2}: poder calorífico superior del H_2 (39 kWh/kg H_2).
- η_e: eficiencia de un electrolizador PEM comercial (0.75).

Debido a que P_{H2E} depende exclusivamente de E_E, el distrito que encabeza la lista es Sechura con una producción de 368.45 t H_2/km^2, y le sigue el grupo conformado por Piura, Castilla, 26 de octubre, Catacaos, La Unión, La Arena, Cura Mori, El Tallán, Vice, Bernal, Bellavista de La Unión, Cristo Nos Valga y Rinconada Llicuar con una producción de 351.06 t H_2/km^2, cada uno. Finalmente, a partir de la *Tabla 10* y utilizando los valores de producción anual de H_2 eólico en cada sector de Piura, se elaboró la *figura 32*.

Figura 32. Producción anual de H_2 eólico por área en cada distrito de Piura



1	Pariñas	19	Amotape
2	El Alto	20	Tamarindo
3	Los Órganos	21	El Arenal
4	Máncora	22	Piura
5	La Brea	23	Castilla
6	Lobitos	24	26 de Octubre
7	Sullana	25	Catacaos
8	Bellavista	26	La Unión
9	Ignacio Escudero	28	La Arena
10	Querecotillo	30	Cura Mori
11	Marcavelica	31	El Tallán
12	Miguel Checa	32	Sechura
13	Salitral	33	Vice
14	Lancones	34	Bernal
15	Paita	35	Bellavista de La Unión
16	Pueblo Nuevo Colán	36	Cristo Nos Valga
17	La Huaca	37	Rinconada Llicuar
18	Vichayal		

Tabla 10. Producción mensual de H_2 eólico por área en cada distrito de Piura

Producción mensual de H_2 eólico por área en cada distrito de Piura [t H_2/km^2/mes]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pariñas	20.4	13.3	14.4	21.8	29	29	30.5	30.6	31	31.5	28.4	26.6
El Alto	22.2	12.3	12.6	21.6	32	33.6	35.5	35.5	34.9	35.7	33.1	30.5
Los Órganos	22.2	12.3	12.6	21.6	32	33.6	35.5	35.5	34.9	35.7	33.1	30.5
Máncora	22.2	12.3	12.6	21.6	32	33.6	35.5	35.5	34.9	35.7	33.1	30.5
La Brea	20.4	13.3	14.4	21.8	29	29	30.5	30.6	31	31.5	28.4	26.6
Lobitos	22.2	12.3	12.6	21.6	32	33.6	35.5	35.5	34.9	35.7	33.1	30.5
Sullana	21.5	13.5	13.2	18.4	26.1	27.9	31	31.9	31.7	31.8	29.1	27.4
Bellavista	21.5	13.5	13.2	18.4	26.1	27.9	31	31.9	31.7	31.8	29.1	27.4
Ignacio Escudero	21.5	13.5	13.2	18.4	26.1	27.9	31	31.9	31.7	31.8	29.1	27.4
Querecotillo	21.5	13.5	13.2	18.4	26.1	27.9	31	31.9	31.7	31.8	29.1	27.4
Marcavelica	21.5	13.5	13.2	18.4	26.1	27.9	31	31.9	31.7	31.8	29.1	27.4
Miguel Checa	21.5	13.5	13.2	18.4	26.1	27.9	31	31.9	31.7	31.8	29.1	27.4
Salitral (Sullana)	21.5	13.5	13.2	18.4	26.1	27.9	31	31.9	31.7	31.8	29.1	27.4
Lancones	21.5	13.5	13.2	18.4	26.1	27.9	31	31.9	31.7	31.8	29.1	27.4
Paita	23.2	17.1	19.2	24.6	28.8	28	29.6	30.1	30.2	30.6	28.2	27.4
Pueblo Nuevo Colán	20.4	13.3	14.4	21.8	29	29	30.5	30.6	31	31.5	28.4	26.6
La Huaca	21.5	13.5	13.2	18.4	26.1	27.9	31	31.9	31.7	31.8	29.1	27.4
Vichayal	20.4	13.3	14.4	21.8	29	29	30.5	30.6	31	31.5	28.4	26.6
Amotape	20.4	13.3	14.4	21.8	29	29	30.5	30.6	31	31.5	28.4	26.6
Tamarindo	21.5	13.5	13.2	18.4	26.1	27.9	31	31.9	31.7	31.8	29.1	27.4
El Arenal	20.4	13.3	14.4	21.8	29	29	30.5	30.6	31	31.5	28.4	26.6
Piura	25.3	18.2	19.2	25.1	31.2	32.5	35.1	35.3	34	34.1	31.2	29.9
Castilla	25.3	18.2	19.2	25.1	31.2	32.5	35.1	35.3	34	34.1	31.2	29.9
26 de octubre	25.3	18.2	19.2	25.1	31.2	32.5	35.1	35.3	34	34.1	31.2	29.9
Catacaos	25.3	18.2	19.2	25.1	31.2	32.5	35.1	35.3	34	34.1	31.2	29.9
La Unión	25.3	18.2	19.2	25.1	31.2	32.5	35.1	35.3	34	34.1	31.2	29.9
La Arena	25.3	18.2	19.2	25.1	31.2	32.5	35.1	35.3	34	34.1	31.2	29.9
Cura Mori	25.3	18.2	19.2	25.1	31.2	32.5	35.1	35.3	34	34.1	31.2	29.9
El Tallán	25.3	18.2	19.2	25.1	31.2	32.5	35.1	35.3	34	34.1	31.2	29.9
Sechura	25.8	18.9	20.8	28.3	33.9	34.2	36.5	36.5	35.2	35.1	32.3	30.9
Vice	25.3	18.2	19.2	25.1	31.2	32.5	35.1	35.3	34	34.1	31.2	29.9
Bernal	25.3	18.2	19.2	25.1	31.2	32.5	35.1	35.3	34	34.1	31.2	29.9
Bellavista de la Unión	25.3	18.2	19.2	25.1	31.2	32.5	35.1	35.3	34	34.1	31.2	29.9
Cristo Nos Valga	25.3	18.2	19.2	25.1	31.2	32.5	35.1	35.3	34	34.1	31.2	29.9
Rinconada Llicuar	25.3	18.2	19.2	25.1	31.2	32.5	35.1	35.3	34	34.1	31.2	29.9

3.3.2 Cálculo de superficie útil

Para determinar cuánto H_2 eólico se podría producir anualmente en cada distrito, se debe considerar a la superficie útil, la cual es el área máxima que se podría utilizar para la instalación y operación de un parque eólico. Este parámetro surge a partir de las restricciones de espacio al tener la existencia de centros urbanos, cuerpos de agua y/o zonas protegidas.

En los estudios realizados para estimar el potencial de producción energético de varios países, se utilizó el factor F_{AD} para determinar el área terrestre disponible, el cual está

relacionado a la densidad poblacional del país. Así, Posso, Sánchez, Espinoza y Siguencia (2016) realizaron una estimación del potencial energético de Ecuador, en el cual se utilizó un factor del 2%. En cuanto a Milbrandt y Mann (2006), realizaron un estudio en Estados Unidos, empleando un factor del 3%. Por último, Sigal, Leiva y Rodríguez (2014) hicieron otro en Argentina, en el cual se empleó un factor del 4.5%.

La relación entre estos análisis es que Ecuador tenía una densidad poblacional tres veces mayor a la de Argentina, mientras que la de Estados Unidos era dos veces superior a la de este (Posso, Sánchez, Espinoza, & Siguencia, 2016). Esto generó un valor de 0.09 al multiplicar el F_{AD} del país y su densidad poblacional respectiva, constante la cual, para facilidad del cálculo, se deberá dividir entre la densidad poblacional de cada distrito de la región Piura (DPD), para la obtención del F_{AD} de cada distrito.

La ecuación utilizada para el cálculo de la superficie útil de cada uno de los distritos se encuentra en (3.3) y los resultados se pueden ver en el *Apéndice C*.

$$Sup_{\text{útil}} = F_{AD} * Sup_{distrito}$$
$$Sup_{\text{útil}} = \left(\frac{0.09}{DPD}\right) * Sup_{distrito} \quad (3.3)$$

Donde:

- $Sup_{\text{útil}}$: superficie útil de cada distrito de la región Piura [km^2].
- F_{AD}: porcentaje de área disponible de cada distrito de la región Piura [-].
- DPD: densidad poblacional de cada distrito de la región Piura [hab./km^2].
- $Sup_{distrito}$: superficie de cada distrito de la región Piura [km^2].

3.3.3 Potencial de producción anual de H_2 eólico

Finalmente, luego de haber determinado los valores de los parámetros: "Superficie útil de cada distrito seleccionado ($Sup_{\text{útil}}$)" y "Potencial de producción de H_2 eólico por área de estos (P_{H2E})", se hizo posible calcular la producción anual de H_2 eólico en la región Piura.

Para lograr este cometido, se realizó la suma de la producción de H_2 de cada mes en cada uno de los distritos y se multiplicó a este valor por su $Sup_{\text{útil}}$ respectiva. El resultado de este análisis se puede ver en la *Tabla 11*, en la cual se señala que Piura tiene un potencial de producción anual de H_2 eólico de 47,745.32 t.

Tabla 11. Producción anual de H_2 eólico en la región Piura

Producción anual de H_2 eólico en la región Piura	
Distrito	Producción anual [t H_2]
Pariñas	386.21
El Alto	995.23
Los Órganos	86.28
Máncora	22.29
La Brea	1,611.57
Lobitos	1,049.07
Sullana	36.62
Bellavista	0.00
Ignacio Escudero	45.74
Querecotillo	85.81
Marcavelica	2,568.70
Miguel Checa	658.51
Salitral (Sullana)	3.94
Lancones	9,682.45
Paita	163.66
Pueblo Nuevo Colán	33.58
La Huaca	829.94
Vichayal	144.73
Amotape	44.38
Tamarindo	26.11
El Arenal	1.75
Piura	10.60
Castilla	96.09
26 de octubre	2.04
Catacaos	2,790.66
La Unión	33.98
La Arena	23.71
Cura Mori	65.12
El Tallán	71.56
Sechura	25,339.04
Vice	250.06
Bernal	21.29
Bellavista de la Unión	1.65
Cristo Nos Valga	559.31
Rinconada Llicuar	3.66
Total	**47,745.32**

Capítulo 4

Potencial de producción de H_2 a partir del uso de energía solar en Piura

En este capítulo se ha estimado el potencial de producción de hidrógeno a lo largo de un año, a partir del aprovechamiento de la energía solar mediante paneles fotovoltaicos en Piura. Para cumplir el objetivo planteado se ha realizado la selección de equipos y se han calculado diversos parámetros para cada uno de los distritos, como son: la "Hora solar pico (HSP)", la "Potencia pico del generador por área (P_{mp})", el "Rendimiento del sistema eléctrico (PR)" y la "Energía eléctrica por área generada a partir del uso de la energía solar (E_S)". Además, en el proceso se utilizaron dos programas: el programa web del PVGIS (*PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM*) y el software MATLAB®, el primero para la obtención de los datos de irradiación, y el segundo para el cálculo matemático y la representación gráfica.

4.1 Normativa peruana

En Perú existe la norma técnica de edificación EM080 para instalaciones donde se aprovecha la energía solar mediante paneles fotovoltaicos. En esta se presentan las mínimas condiciones técnicas que se deben cumplir, aunque no contempla la venta de la energía excedente ni su entrada al sistema de distribución eléctrica. Esto genera cierto inconveniente en el que no convendría el tener un exceso significativo de producción eléctrica con respecto a lo consumido. No obstante, se espera que, ante el aumento de proyectos de este tipo en los próximos años, el Estado promulgue una norma que permita la venta del excedente de energía eléctrica, como se hace en otras partes del mundo.

4.2 Selección de paneles fotovoltaicos

4.2.1 Características técnicas

Para el estudio se decidió utilizar paneles fotovoltaicos de la marca ERA. El modelo en específico es el ESPSC 400M PERC y ha sido seleccionado al contar con una potencia pico de 400 W, una alta eficiencia de 20.17% (características de un panel fotovoltaico promedio) y un buen comportamiento ante temperaturas ambientales superiores a 25°C (adecuado para las temperaturas de Piura). Las principales características de este modelo de panel se encuentran en la *Tabla 12*, mientras que, en el *Anexo C*, se puede visualizar su ficha técnica completa.

Tabla 12. Características técnicas del panel fotovoltaico elegido

Panel solar fotovoltaico	
Marca	ERA
Modelo	ESPSC 400M PERC
STC	
Alimentación máxima ($P_{máx}$)	400 Wp
Voltaje de alimentación máximo (V_{mpp})	41.7 V
Corriente de alimentación máximo (I_{mpp})	9.6 A
Voltaje con circuito abierto (V_{OC})	49.8 V
Corriente de corto circuito (I_{SC})	10.36 A
Irradiación constante para HSP	1000 W/m^2
Eficiencia del módulo (%)	20.17%
Temperatura de funcionamiento (°C)	-40°C ~+ 85°C
Voltaje máximo del sistema	1000 V_{DC}
Coeficiente de temperatura de P_{mpp}	-0.57402%/°C
Coeficiente de temperatura de V_{OC}	-0.38038%/°C
Coeficiente de temperatura de I_{SC}	0.02973%/°C
Temperatura nominal de funcionamiento (NOCT)	45°C
Dimensiones	1979x1002x40 mm

Nota: **Adaptado de Ficha técnica del panel fotovoltaico (ver *Anexo C*)**

4.2.1.1 Separación entre filas. Toda instalación de paneles fotovoltaicos debe tener en cuenta la orientación e inclinación con la que estos se van a colocar, esto con la finalidad de aprovechar la mayor cantidad de radiación solar durante el día. La orientación es definida por el ángulo de azimut formado por la proyección sobre el plano horizontal, de la recta que une cierto punto en el planeta con el sol, y el meridiano en ese lugar; mientras que la inclinación es definida por el ángulo formado por la superficie del panel con el plano horizontal (Uriol, 2020).

Debido a que la región Piura se encuentra muy cerca de la línea ecuatorial, la inclinación del panel solar con respecto al plano horizontal sería 5° (con Piura provincia como referencia), como se ha calculado en el apartado "Estudio de la irradiación y cálculo de la hora solar pico (HSP)". Este dato es el más relevante para determinar la distancia entre filas de paneles fotovoltaicos, medida que debe superarse en la instalación para aprovechar correctamente las mejores horas de sol y evitar que la sombra producida por la inclinación de un panel a lo largo del día deje un área del panel siguiente sin trabajar.

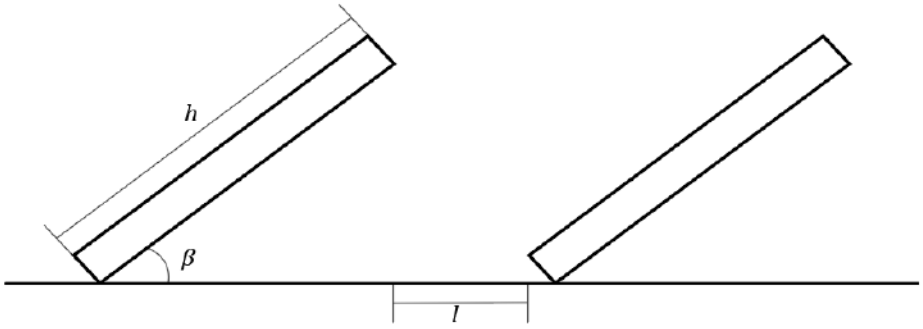
A continuación, se presenta en (4.1) la ecuación para el cálculo de la distancia mínima entre filas de paneles fotovoltaicos (Pitarch, 2020). Los parámetros utilizados para el cálculo se pueden ver en la *figura 33*.

$$l = \frac{h * \sin(\beta)}{tg(61° - latitud)} = \frac{100.2 * \sin(5°)}{tg(61° - |-5.173°|)} = 5.9289\ cm \approx 6\ cm \qquad (4.1)$$

Donde:

- l: distancia mínima entre filas [cm].
- h: dltura del panel fotovoltaico (100.2 cm).
- β: ángulo de inclinación del panel fotovoltaico (5°).
- $latitud$: latitud de Piura provincia (-5.173°).

Figura 33. Parámetros del cálculo de la distancia entre filas de paneles

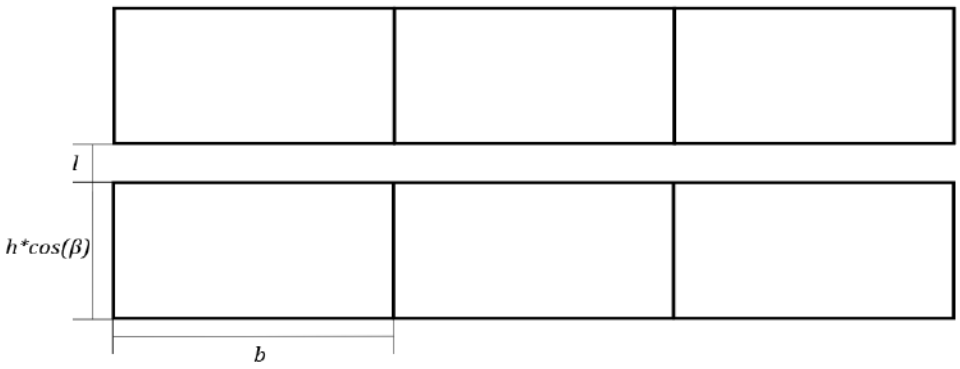


Nota: **Adaptado de Pitarch (2020)**

Con lo calculado anteriormente, se puede afirmar que las filas de paneles fotovoltaicos de este análisis deberían tener una separación mínima de 6 cm, el cual es un valor ínfimo y fácilmente superable.

4.2.1.2 Superficie ocupada por cada panel fotovoltaico. Anteriormente se explicó la necesidad de que, al momento de realizar la instalación, los paneles deban tener una separación mínima entre filas. Sin embargo, también es relevante mencionar que, si esto ocurre, el área utilizada para instalar un panel varía (específicamente el ancho), por lo que se debe determinar el nuevo valor de la superficie ocupada por el panel fotovoltaico (Sup_{Panel}).

Figura 34. Parámetros del cálculo de la superficie ocupada por cada panel



Nota: **Adaptado de** (Pitarch, 2020)

Para realizar el cálculo de la nueva área ocupada se empleó a la ecuación (4.2). Los parámetros utilizados para el cálculo se muestran en la *figura 34*. Se tuvo como resultado que la superficie ocupada por cada panel fotovoltaico es aproximadamente $2.1 * 10^{-6}\ km^2$. Posteriormente este valor se utilizó para el cálculo de la potencia pico del generador.

$$Sup_{Panel} = b * (h * \cos(\beta) + l) = 197.9 * (100.2 * \cos(5°) + 6)$$
$$Sup_{Panel} = 20941.5\ cm^2 \approx 2.1 * 10^{-6}\ km^2 \quad (4.2)$$

Donde:

- Sup_{Panel}: superficie ocupada por cada panel fotovoltaico [km^2].
- l: distancia mínima entre filas (6 cm).
- h: altura del panel fotovoltaico (100.2 cm).
- b: largo del panel fotovoltaico (197.9 cm).
- β: ángulo de inclinación del panel fotovoltaico (5°).

4.3 Energía generada por la instalación

4.3.1 Estudio de la irradiación y cálculo de la hora solar pico (HSP)

La irradiación se puede definir como una magnitud con la cual se puede expresar la potencia incidente de cualquier tipo de radiación electromagnética, sobre una unidad de superficie (4.3). Para este estudio solo se tendrá en cuenta a la radiación solar.

$$I = P/A \quad (4.3)$$

Donde:

- I: irradiación [W/m^2].
- P: potencia incidente [W].
- A: área de la superficie en donde incide la onda electromagnética [m^2].

Para determinar la irradiación incidente en cada uno de los distritos de la región Piura, se ha empleado el programa web proporcionado por el PVGIS[3] y desarrollado por investigadores del JRC (*Joint Research Centre*) de la Comisión Europea. En esta herramienta se brinda la data para conocer el potencial de producción de energía eléctrica, utilizando paneles fotovoltaicos en un punto exacto (en casi cualquier parte del mundo) y promediando datos mensuales.

Además, mediante este programa web se puede obtener el ángulo de inclinación óptimo para la colocación e instalación de los paneles fotovoltaicos, el cual es el ángulo formado entre el panel y el plano horizontal, y cuyo buen cálculo es un factor determinante para un buen rendimiento energético de los mismos. Por último, es relevante señalar que, para determinar el ángulo de inclinación óptimo, se tomó como datos de entrada a un azimut de 0° y a las coordenadas geográficas de Piura provincia (ver *Apéndice A*).

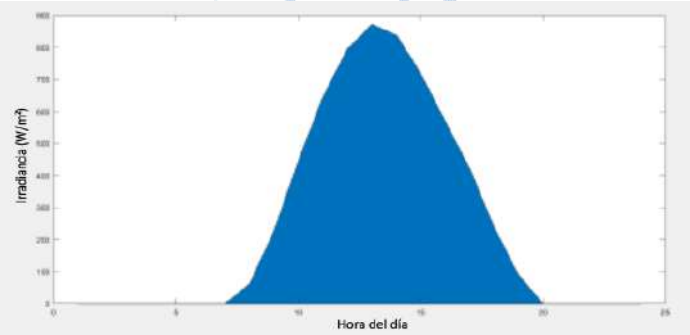
Luego de ingresar los datos, el programa web sugirió una inclinación óptima de 5° para los paneles fotovoltaicos. Es importante señalar que, para el cálculo de este valor, se evaluó

[3] https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#MR

la base de datos de radiación solar correspondiente al periodo 2005-2015 y a una altura de elevación de 38 metros.

Después de calcular la inclinación de los paneles, se empleó de nuevo la herramienta proporcionada por el PVGIS y se recopiló la data correspondiente a la irradiación global horizontal de cada mes en cada distrito de Piura. Para esto se utilizaron las coordenadas geográficas respectivas (ver *Apéndice A*). Los resultados se pueden apreciar en los *Anexos D* al *K* y se ingresaron al software MATLAB®, con la finalidad de calcular los valores de radiación media mensual ($G_{dm(\alpha\beta)}$), la cual es el área generada por debajo de la función de irradiancia global horizontal correspondiente a un mes del año.

Figura 35. Irradiación incidente del mes de enero en Piura distrito

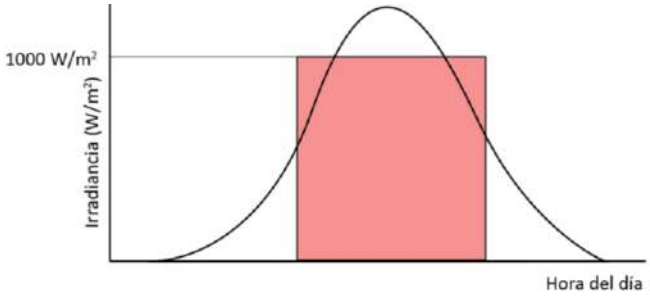


El código de MATLAB®, presente en el *Apéndice E*, fue el empleado para el cálculo de los valores de radiación media mensual (ver *Apéndice D*). En la *figura 35* se puede ver un ejemplo de los gráficos de irradiación resultantes, el cual corresponde al mes de enero en Piura distrito.

$$HSP = G_{dm(\alpha\beta)}/1000 \qquad (4.4)$$

A partir de los resultados de radiación media mensual, se pudo determinar los valores de las horas solares pico (HSP) en cada uno de los meses (ver *Anexo L*). La HSP se puede definir como el tiempo (en horas) de una hipotética irradiación solar constante de 1000 W/m^2 (4.4) y en una representación gráfica (ver *figura 36*), sería una función de valor constante que ocupa la misma área formada con los valores de irradiancia incidente (Pitarch, 2020).

Figura 36. Hora solar pico (HSP)



4.3.2 Cálculo del rendimiento del sistema eléctrico (PR)

El rendimiento global de la instalación eléctrica se pudo calcular a partir de los datos presentes en la *Tabla 13*. De estos, es importante señalar que se ha agregado un factor de seguridad (95%) con la finalidad de evitar un posible infradimensionamiento.

Tabla 13. Rendimientos de la instalación

Rendimientos de la instalación	
Nominal de la célula	0.775
Corrección por temperatura	0.885
Eficiencia de conexión a red	0.98
Efecto de la suciedad	0.97
Factor de seguridad	0.95
Total	**0.619**

Para evaluar la eficacia de una célula fotovoltaica se suele utilizar al Factor de forma o *Fill factor* (FF), el cual es el resultado de dividir a la Potencia pico del panel fotovoltaico ($P_{mp,Panel}$) entre el voltaje con circuito abierto (V_{OC}) y la corriente de corto circuito (I_{SC}). Este cálculo se puede ver en la ecuación (4.5).

$$FF = \frac{P_{mp,Panel}}{V_{OC} * I_{SC}} = \frac{400}{49.8 * 10.36} = 0.775 \qquad (4.5)$$

Donde:

- FF: factor de forma [W].
- $P_{mp,Panel}$: potencia pico del panel fotovoltaico [W].
- V_{OC}: voltaje con circuito abierto [V].
- I_{SC}: corriente de corto circuito [A].

Con respecto a la corrección por temperatura, esta se calculó teniendo en cuenta dos datos: el primero es el coeficiente de temperatura de $P_{máx}$ (-0.57402%/°C) de la *Tabla 12*, y el segundo es que la temperatura de operación pueda llegar a situarse 20°C por encima de la temperatura con la que se hicieron los ensayos (Pitarch, 2020). Esto da como resultado (4.6) una corrección por temperatura de 0.885.

$$Corrección\ por\ temperatura = 1 - coef._{temp.de\ P_{máx}} * \Delta T = 0.885 \qquad (4.6)$$

Donde:

- $coef._{temp.de\ P_{máx}}$: coeficiente de temperatura de $P_{máx}$ (-0.57402%/°C).
- ΔT: variación de temperatura [°C].

Finalmente, para el rendimiento global también se tomó en cuenta a la eficiencia de conexión a red (0.98) y al efecto de la suciedad en los paneles (0.97). Es importante señalar que se asumió un mantenimiento exhaustivo por parte de los operarios, con la finalidad de conservar el sistema en estado óptimo (Pitarch, 2020).

4.3.3 Cálculo de la potencia pico del generador (P_{mp})

La "Potencia pico del generador por área (P_{mp})" se pudo obtener a partir de (4.7), y es la relación entre la "Potencia pico del panel fotovoltaico ($P_{mp,Panel}$)" y la "Superficie ocupada por cada panel fotovoltaico (Sup_{Panel})". Según la *Tabla 12*, la "Potencia pico del panel fotovoltaico" es 400 W y de acuerdo con lo calculado en el apartado "Superficie ocupada por cada panel fotovoltaico", la Sup_{Panel} tiene un valor de $5.25 * 10^{-6}\ km^2$, lo que dio un resultado de 0.1905 GW/km^2 para P_{mp}.

$$P_{mp} = \frac{P_{mp,Panel}}{1000^3 * Sup_{Panel}} = \frac{400}{1000^3 * 2.1 * 10^{-6}} = 0.1905\ GW/km^2 \qquad (4.7)$$

Donde:

- P_{mp}: potencia pico del generador por área [GW/km^2].
- $P_{mp,Panel}$: potencia pico del panel fotovoltaico (400 W).
- Sup_{Panel}: superficie ocupada por cada panel fotovoltaico ($2.1 * 10^{-6}$ km^2).

4.3.4 Cálculo de la energía eléctrica generada por la instalación

Luego de haber calculado cada uno de los parámetros necesarios para el análisis, se procedió a calcular la "Energía eléctrica por área generada a partir de la energía solar en los distritos de Piura (E_S)" (ver *Apéndice F*). Para ello se utilizó la ecuación (4.8) y se procedió a reemplazar cada uno de los valores de *HSP* (ver *Anexo L*).

$$E_S = N°_{días\ del\ mes} * HSP * P_{mp} * PR = 0.1179 * N°_{días\ del\ mes} * HSP \qquad (4.8)$$

Donde:

- E_S: energía eléctrica por área generada a partir de la energía solar en los distritos de Piura [GWh/km^2/mes].
- HSP: hora solar pico [h/día].
- P_{mp}: potencia pico del generador por área [GW/ km^2].
- PR: rendimiento del sistema eléctrico [%].
- $N°_{días\ del\ mes}$: número de días del mes [día/mes].

4.4 Cálculo del H_2 solar producido a partir de la electrólisis del agua

4.4.1 Producción de H_2 solar por área

Conocidos los valores de E_S, es posible calcular el "Potencial de producción mensual de H_2 solar por área en los distritos de la región a partir de la electrólisis del agua (P_{H2S})". La ecuación utilizada para el cálculo del H_2 solar es la (3.2), la cual también se empleó para obtener el H_2 eólico del anterior capítulo, y los resultados se pueden ver desde la *Tabla 14* hasta la *Tabla 21*.

Tabla 14. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Talara

Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Talara [$tH_2/km^2/mes$]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pariñas	470.2	420	473	429.9	396.7	360.8	383.9	419.8	434.9	484.4	480.3	494.2
El Alto	463.5	412.9	467.9	428	397.2	368.1	392.3	431.5	439.6	491.4	484.9	501.4
Los Órganos	448.2	398.9	450.7	421	390.6	362.2	388.9	423.1	431.6	482.6	479.3	490.6
Máncora	421.6	382.9	439.7	412.8	389.7	357.7	385.2	419.3	426	476.3	468.6	473.1
La Brea	485.1	435.2	479	433.7	400.1	366.2	389.1	423.0	438	488.6	484.2	502.2
Lobitos	472.6	422.6	473	432.2	399.2	366.9	388.8	424.2	435.9	487.3	483.9	496.5

Tabla 15. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Paita

Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Paita [$tH_2/km^2/mes$]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Paita	462.9	412.2	455.9	418.5	374.1	321.5	343.4	386	413.8	453.9	452.6	478.5
Pueblo Nuevo Colán	461.4	421.2	468.2	428.3	386.5	339.1	360.2	396.9	422.7	468.1	467.5	486
La Huaca	456.2	407.2	465.7	424.1	381	325.3	354.8	391.2	420.8	460.4	463.2	482.9
Vichayal	454.9	413.2	463.9	426.5	381.8	329.7	355.6	395.3	417.9	464.9	464	480.5
Amotape	452.3	410.7	460	424.5	381	328.2	355	391.5	417.2	460.6	464.1	482.3
Tamarindo	448.7	391.8	458.4	420	373.6	318.1	343.5	384.5	413.3	448.4	451.1	475.5
El Arenal	453.6	411.8	460.4	424.5	381	328.3	355.2	391.6	417.2	460.6	464	482.2

Tabla 16. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Piura

Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Piura [$tH_2/km^2/mes$]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Piura	416.3	377.1	436.9	422.4	378.1	320.4	336.2	373.3	402.8	438.3	433.8	452.6
Castilla	447.4	396.8	446.3	418.8	372.9	321.5	332.3	377.6	411.4	457.7	458.0	479.7
26 de octubre	425.8	380.8	434.3	411.7	425.4	306	322.3	362.7	397.6	440.1	442.3	465.4
Catacaos	441.4	398.1	448.2	415	363.1	303.5	313.7	355.3	388.8	435.2	440.7	467
La Unión	441.9	394.6	453.7	418.7	360.7	300.2	315.1	357.9	391.5	432.4	436.6	464.4
Tambogrande	363	343.2	401.7	377.7	345	302.6	333	381.4	406.8	445	437.9	432.2
La Arena	447.1	404.6	455.2	419.5	365.1	312.5	318	360	392.7	441.6	448.1	470.9
Las Lomas	360.6	337.6	387.6	373.1	341	302.4	345.6	395.6	417.9	455.3	441	432.3
Cura Mori	444.7	401.8	454.1	419.4	368.3	312.7	323.3	368.1	398.6	446.3	446.7	468.3
El Tallán	439.5	392.6	452.8	418.1	359.4	302.3	313.9	361.9	392.1	433.8	434.8	462.6

Tabla 17. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Huancabamba

Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Huancabamba [$tH_2/km^2/mes$]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Huancabamba	303.4	272.3	311.3	293.9	287.9	252	276.4	295.1	282.3	340	363	345.7
Canchaque	219.4	213.8	256.1	247.6	257.8	263.6	323.1	357.3	363.5	372.8	356.5	311.8
Huarmaca	247.3	217	251.9	247.1	274	299.8	359.6	392.5	395.9	408.1	383.5	348.1
Sondorillo	321.4	285.3	319.3	308.6	297.1	269.5	291.9	310.8	302.4	352.8	373.4	367.9
Carmen de la Frontera	290.4	255.6	282	265.3	272.7	229.2	262.8	270.3	264.9	318	343.5	325.4
San Miguel de El Faique	236.8	229.1	277.2	268.9	271.3	274.8	329.7	364.9	376.8	383.7	372.6	324.5
Sondor	313	274.9	309.7	290.2	283.6	253	285.9	300	288.9	351	369.2	350.8
Lalaquiz	235.9	233.5	274.5	263.7	273.7	272.2	333.2	371.6	376.4	378.8	370.6	316.6

Tabla 18. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Sullana

Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Sullana [$tH_2/km^2/mes$]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sullana	403.2	363.8	420.8	399.6	364.2	309.1	344.9	378.2	409.1	448.6	450.4	455.4
Bellavista	403.2	363.8	420.8	399.6	364.2	309.1	344.9	378.2	409.1	448.6	450.5	455.4
Ignacio Escudero	427.6	384.5	443.5	410.9	366.3	307.1	334.5	377.1	408.9	449.6	449.5	463.2
Querecotillo	409.7	360.6	422.2	398.2	361.6	306.8	331.3	370.5	405.8	445	443	456.1
Marcavelica	403.2	363.8	420.8	399.6	364.2	309.1	344.9	378.3	409.1	448.6	450.5	455.4
Miguel Checa	417.5	375.6	432.8	407.5	366.9	310.4	338.6	386.2	411.2	453.5	460.1	470.1
Salitral	409.3	368.3	424.7	401.7	362.7	304.5	338.5	372.8	407	444.7	444.3	455
Lancones	392.9	356.6	419.3	399	363	312	343.8	390	415.9	457.6	448.7	455.1

Tabla 19. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Morropón

Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Morropón [$tH_2/km^2/mes$]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Chulucanas	352.8	334.4	388.8	369.7	337.5	299.4	330.9	380.2	404	436.3	426.2	413
Morropón	309.4	297.8	350.5	340.7	313.4	286.2	324.4	372.1	394.6	417.3	400.6	388.3
Chalaco	238.8	220.1	260.4	256.4	291.2	316.8	364.6	392.3	392.7	378.5	358	320.3
La Matanza	328.3	314.8	376.7	360.7	328.3	291.7	326.1	377.6	400.8	428.4	416	400
San Juan de Bigote	292.1	282.5	330	319.6	314.5	296.4	345.7	388.2	395.4	414.5	404.5	381
Yamango	195.7	186.4	223.8	228.7	252.7	274.5	333.1	367	368.6	366.7	344.3	288
Salitral	304.8	299.4	350.7	335.6	324.6	305.8	349.1	388.1	400.9	424.2	412.3	387
Buenos Aires	326.8	315.9	373.4	355.4	325.6	297	331	379.9	402.1	429.3	418.4	399
Sta. Catalina de Mossa	245.6	235.7	281.9	274.3	289.9	302.4	358	393.7	398.7	405.3	382.8	341.9
Santo Domingo	206.3	197.6	238.8	242.9	284.9	302.5	352.9	388	381.1	370.7	350.5	293.7

Tabla 20. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Ayabaca

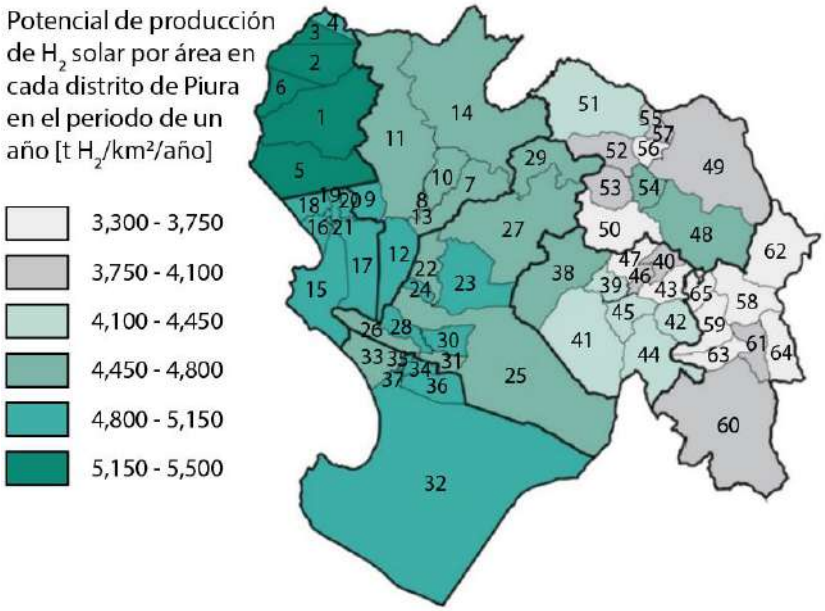
Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Ayabaca [$tH_2/km^2/mes$]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pacaipampa	368.2	319.3	349.4	338	351.5	339.5	375.6	406.1	408.8	403.2	396.9	397.4
Ayabaca	289.2	258.8	306.9	295.2	312.3	320.9	356.4	385.5	383.8	358.4	343.1	330
Frías	214.5	197.4	234.1	236.6	278.1	299.3	346.6	385.1	374.3	361.1	332.7	294.2
Suyo	303.7	287.6	337.7	330.9	322.2	306.8	357.9	409.5	423.1	448.2	427.8	401.7
Paimas	274.5	259	295.8	287	294.9	285.7	352.1	391.3	399	428.2	408.4	374.2
Sapillica	237.4	216.1	254.3	255.9	303.5	317.8	382.5	419.3	419.8	436.9	403.9	353.9
Lagunas	321	286.3	337.5	337.4	349.7	343.1	386	416.6	420.6	444.5	430.8	397.7
Jililí	263	253.3	304.2	286.1	299.9	313.9	369.2	403.9	407.4	419	395.9	347.5
Montero	230.4	211.8	252.2	247.4	258.4	279.1	287.4	373.3	386.7	391.7	368.1	335.2
Sícchez	263	253.3	304.2	286.1	299.9	313.9	369.2	403.9	411.2	421.1	395.9	348.1

Tabla 21. Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Sechura

Producción mensual de H_2 solar por área en cada distrito de Sechura [$tH_2/km^2/mes$]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sechura	481.9	428.2	471.6	429.7	377.8	321.8	345	381.6	402.5	448.3	453.6	481.5
Vice	440.3	396.8	450.9	414.7	357	296.5	310.4	348	384.9	427.3	433.1	459.4
Bernal	455.7	407.6	462.6	424.5	375.1	313.5	328.5	369	398.9	446	450.9	479.4
Bellavista de la Unión	457	413.5	461.6	423.9	368.6	310.4	328.5	365	398.1	446.1	450.8	478
Cristo Nos Valga	469.7	422.3	470.8	428.7	374.5	320.3	338.9	377	404.3	455.1	459.4	487.6
Rinconada Llicuar	457	413.5	461.6	423.9	368.6	310.4	328.4	365	398.1	446.1	450.8	478

A partir de las anteriores tablas (desde *Tabla 14* hasta *Tabla 21*) y utilizando las sumatorias anuales de P_{H2S}, se elaboró la *figura 37*. De esta se puede concluir que los distritos con mayor potencial de producción se encuentran en las provincias de Paita (número 16 al 21), Sechura (32, 36 y 37) y Talara (del 1 al 6), siendo esta última en donde se encuentran la mayoría de estos. Los distritos con mayor producción estimada de hidrógeno a nivel regional son: La Brea, con una producción anual de 5,324.346 tH_2/km^2, seguido de Lobitos y El Alto con 5,283.234 tH_2/km^2 y 5,278.609 tH_2/km^2, respectivamente.

Figura 37. Producción anual de H_2 solar por área en cada distrito de Piura



1	Pariñas	34	Bernal
2	El Alto	35	Bellavista de La Unión
3	Los Órganos	36	Cristo Nos Valga
4	Máncora	37	Rinconada Llicuar
5	La Brea	38	Chulucanas
6	Lobitos	39	Morropón
7	Sullana	40	Chalaco
8	Bellavista	41	La Matanza
9	Ignacio Escudero	42	San Juan de Bigote
10	Querecotillo	43	Yamango
11	Marcavelica	44	Salitral
12	Miguel Checa	45	Buenos Aires
13	Salitral	46	Sta. Catalatlina de Mossa
14	Lancones	47	Santo Domingo
15	Paita	48	Pacaipampa
16	Pueblo Nuevo Colán	49	Ayabaca
17	La Huaca	50	Frías
18	Vichayal	51	Suyo
19	Amotape	52	Palmas
20	Tamarindo	53	Sapillica
21	El Arenal	54	Lagunas
22	Piura	55	Jilili
23	Castilla	56	Montero
24	26 de octubre	57	Sicchez
25	Catacaos	58	Huancabamba
26	La Unión	59	Canchaque
27	Tambogrande	60	Huarmaca
28	La Arena	61	Sondorillo
29	Las Lomas	62	Carmen de la Frontera
30	Cura Mori	63	San Miguel de El Faique
31	El Tallán	64	Sondor
32	Sechura	65	Lalaquiz
33	Vice		

4.4.2 Potencial de producción anual de H_2 solar

Finalmente, para determinar la producción anual de H_2 solar en Piura, se han utilizado los parámetros: "Superficie útil de cada distrito ($Sup_{útil}$)", el cual fue calculado en el anterior capítulo (ver *Apéndice C*), y el "Potencial de producción de H_2 solar por área de estos (P_{H2S})". El proceso constó de sumar los valores de producción de hidrógeno de cada mes en cada uno de los distritos y multiplicar a este valor por su $Sup_{útil}$ respectiva. El resultado es que Piura tiene un potencial de producción anual de H_2 solar de 898,299.06 t (ver *Tabla 22*).

Tabla 22. Producción anual de H_2 solar en la región Piura

Producción anual de H_2 solar en la región Piura			
Distrito	**Producción anual [tH_2]**	**Distrito**	**Producción anual [tH_2]**
Pariñas	6,616.04	Bernal	297.81
El Alto	15,480.33	Bellavista de la Unión	23.06
Los Órganos	1,313.85	Cristo Nos Valga	7,979.97
Máncora	331.91	Rinconada Llicuar	51.17
La Brea	28,009.03	Chulucanas	3,925.70
Lobitos	16,332.07	Morropón	782.58
Sullana	573.20	Chalaco	842.91
Bellavista	0.04	La Matanza	32,967.92
Ignacio Escudero	727.34	San Juan de Bigote	3,549.03
Querecotillo	1,332.85	Yamango	1,518.88
Marcavelica	40,211.58	Salitral (Morropón)	1,094.00
Miguel Checa	10,488.93	Buenos Aires	2,965.83
Salitral (Sullana)	61.45	Sta. Catalina de Mossa	549.88
Lancones	151,779.34	Santo Domingo	1,628.66
Paita	2,568.15	Pacaipampa	15,187.85
Pueblo Nuevo Colán	559.63	Ayabaca	22,078.95
La Huaca	13,773.47	Frías	4,129.24
Vichayal	2,384.86	Suyo	36,453.13
Amotape	728.22	Paimas	3,725.22
Tamarindo	424.12	Sapillica	2,168.64
El Arenal	28.79	Lagunas	2,131.64
Piura	144.63	Jililí	1,292.93
Castilla	1,346.85	Montero	824.41
26 de octubre	27.92	Sícchez	223.17
Catacaos	37,919.25	Huancabamba	2,124.59
La Unión	461.56	Canchaque	3,795.25
Tambogrande	7,230.68	Huarmaca	31,320.75
La Arena	326.52	Sondorillo	1,680.90
Las Lomas	4,012.98	Carmen de la Frontera	9,369.82
Cura Mori	900.04	San Miguel de El Faique	1,607.77
El Tallán	971.08	Sondor	4,563.42
Sechura	345,481.64	Lalaquiz	1,533.96
Vice	3,361.68	**Total**	**898,299.06**

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Capítulo 5

Potencial de producción de H_2 a partir del uso de energía de biomasa en Piura

En este capítulo se ha determinado cuánto H_2 se podría producir a partir del aprovechamiento de la energía de biomasa en Piura. En este análisis se utilizó como principal referencia al trabajo "Estimación del Potencial Energético de Biomasa en la Región Piura Disponible para Procesos de Digestión Anaerobia" (Saavedra, Marcelo, Alamo, & Arrieta, 2017), y del cual se actualizaron los datos de producción a partir del anuario agrícola del año 2019, proporcionado por el MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego).

5.1 Cálculo de la energía eléctrica generada a partir del uso de energía de biomasa y la electrólisis del agua

5.1.1 Cálculo de la energía eléctrica generada a partir de residuos de cultivo.

Para el cálculo de la producción de energía eléctrica generada a partir del presente método, se utilizó la *Tabla 25*, la cual contiene la estimación de la producción de residuos de cultivo con potencial de biomasa en la región Piura en 2019 (ver *Tablas 23* y *24*), a partir de

$$R_{residuo} = \frac{Prod_{residuo}}{A_{cultivo}} = \frac{r_{r-c} * Prod_{cultivo}}{A_{cultivo}} \quad (5.1)$$

los datos brindados por el MINAGRI con referencia al mismo año.

Donde:

- $R_{residuo}$: rendimiento del residuo [t/ha].
- $Prod_{residuo}$: producción anual del residuo [t].
- $A_{cultivo}$: área de producción total estimada [ha].
- r_{r-c}: relación residuo/cultivo [-].

$$RCD = \frac{100 - \%_{quemados} - \%_{usados}}{100} * Prod_{residuo} \quad (5.2)$$

- $Prod_{cultivo}$: producción anual del cultivo [t].

Donde:

- RCD: residuos de cultivo potencialmente disponibles para bioenergía [t/año].
- $\%_{quemados}$: residuos de cultivos quemados para la fertilización del campo [%].
- $\%_{usados}$: residuos de cultivos ya destinados para un uso [%].
- $Prod_{residuo}$: producción anual del residuo [t].

En la *Tabla 25* se consideraron cinco tipos de cultivo: arroz, maíz, café, cacao y soya, los cuales fueron asumidos con solo una cosecha por año (a excepción del cacao) debido a las restricciones de agua en la región. El cálculo de la cantidad de residuos de cultivo potencialmente disponibles para su utilización como bioenergía, fue realizado mediante la guía de *Food and Agriculture Organization* (2014) y su Herramienta Residuos Agrícolas. Con la misma se obtuvieron los valores de las relaciones residuo/cultivo (r_{rc}) y, por lo tanto, el rendimiento de cada residuo.

Tabla 23. Producción mensual de los cultivos con potencial de biomasa en Piura en 2019

Producción mensual de los cultivos con potencial de biomasa en Piura en 2019 [t]								
Cultivo	Arroz	Maíz amarillo duro	Maíz amiláceo	Maíz choclo	Café pergamino	Cacao	Soya	Caña de azúcar (para Etanol)
ENE	2,724	990	0	90	0	135	0	90,077
FEB	0	270	0	0	0	137	0	89,481
MAR	0	0	0	0	0	147	0	93,358
ABR	0	85	1,234	780	0	140	0	161,675
MAY	24,266	2,168	580	0	0	163	0	185,927
JUN	170,881	17,993	936	579	1,457	150	0	180,167
JUL	116,131	17,332	2,532	210	2,303	175	0	201,092
AGO	0	1,034	7,015	0	917	0	140	183,417
SEP	0	246	2,517	0	54	0	103	159,448
OCT	0	132	0	270	0	0	0	179,630
NOV	2,413	6,784	0	0	0	10	244	176,625
DIC	81,078	13,054	0	30	0	381	8	162,989

Nota: **Adaptado del Anuario Peruano de Producción Agrícola del MINAGRI (2019)**

Tabla 24. Superficie cosechada mensual de los cultivos con potencial de biomasa en Piura en 2019

Superficie cosechada mensual de los cultivos con potencial de biomasa en Piura en 2019 [ha]								
Cultivo	Arroz	Maíz amarillo duro	Maíz amiláceo	Maíz choclo	Café pergamino	Cacao	Soya	Caña de azúcar (para Etanol)
ENE	325	320	0	15	0	0	0	555
FEB	0	45	0	0	0	0	0	585
MAR	0	0	0	0	0	0	0	308
ABR	0	71	1,155	130	0	0	0	446
MAY	2,748	470	605	0	0	28	0	598
JUN	21,283	3,857	1,452	110	702	1,145	0	594
JUL	15,550	4,123	2,247	36	344	0	0	591
AGO	0	525	7,356	0	6,229	0	80	612
SEP	0	42	2,629	0	964	0	86	543
OCT	0	32	0	45	0	0	0	542
NOV	275	1,474	0	0	0	386	132	494
DIC	9,018	2,784	0	5	0	0	11	349

Nota: **Adaptado del Anuario Peruano de Producción Agrícola del MINAGRI (2019)**

Es importante señalar que se realizó la estimación de la cantidad de residuos de cultivo potencialmente disponibles (5.2), suponiendo que un 15% de los residuos existentes, serían

quemados en el campo como parte de la preparación de la tierra para el siguiente ciclo de producción, mientras que para otros usos como alimentación, lecho, combustible y construcción se asignaron los porcentajes presentes en la *Tabla 25*.

Tabla 25. Estimación de residuos de cultivo con potencial de biomasa en Piura en 2019

Estimación de residuos de cultivo con potencial de biomasa en Piura en 2019									
Cultivo		Arroz		Maíz			Café	Cacao	Soya
Producción anual del cultivo [t]		397,493		76,861			4,731	1,438	495
Área de producción total estimada [ha]		49,199		29,528			8,239	1,559	309
N° de cosechas al año		1		1			1	3	1
Tipo de residuo		Cascarilla	Paja	Mazorca	Cáscara	Rastrojo	Cascarillas	Vainas	Rastrojo
Relación residuo/cultivo		0.25	1.33	0.33	0.22	1.00	1.32	1.5	1.53
Generación de residuos	Producción anual [t/año]	99,373	528,666	25,364	16,909	76,861	6,245	2,157	757
	Rendimiento del residuo [t/ha]	2.02	10.77	0.86	0.58	2.60	0.76	4.15	2.45
Residuos quemados para la fertilización del campo (15%) [t/año]		14,906	79,479	3,839	2,559	11,529	937	324	114
Uso de los residuos [t/año]	Alimentación y lecho	14,906 (15%)	370,901 (70%)	-	8,532 (50%)	53,803 (70%)	3,123 (50%)	1079 (50%)	379 (50%)
	Combustible (incluye carbón)	4,969 (5%)	26,493 (5%)	7,678 (30%)	1,706 (10%)	7,686 (10%)			
	Construcción	49,687 (50%)	26,493 (5%)	-	-	-			
Total de residuos utilizados [t/año]		69,561	423,887	7,678	10,238	61,489			
Residuos de cultivo potencialmente disponibles para bioenergía	Área de producción [ha]	49,199	49,199	29,528	29,528	29,528	8,239	1,559	309
	Rendimiento de residuos [t/ha]	0.30	0.54	0.47	0.14	0.13	0.27	0.48	0.86
	Total [t/año]	**14,906 (15%)**	**26,493 (5%)**	**14,077 (55%)**	**4,266 (25%)**	**3,843 (5%)**	**2,186 (35%)**	**755 (35%)**	**265 (35%)**

Nota: **Adaptado del Anuario Peruano de Producción Agrícola del MINAGRI (2019)**

$$E_{BA} = \frac{M_R * PCI_{BA} * R_{GP}}{1000 * F_C} = \frac{66{,}791 * 3000 * 0.1991}{1000 * 860.4} = 46.37\ GWh/\text{año} \qquad (5.3)$$

Donde:

- E_{BA}: energía eléctrica generada anualmente a partir de la combustión de residuos de cultivo en Piura [GWh/año].
- M_R: cantidad de residuos de cultivo disponibles para la producción de bioenergía (66,663.75 t/año).
- PCI_{BA}: poder calorífico inferior de la biomasa agrícola (3,000 kcal/ t).

- F_C: factor de conversión de kilocaloría a kilovatio-hora (860.4 kcal/kWh).
- R_{GP}: factor de conversión de potencia del ciclo de vapor (0.1991).

Luego de haber obtenido las cantidades de residuos disponibles, se procedió a calcular la "Energía eléctrica generada a partir de la combustión de residuos de cultivo en Piura (E_{BA})", utilizando la ecuación (5.3) (Posso, Siguencia, & Narváez, 2020), y obteniendo como resultado un valor de 46.37 GWh al año.

5.1.2 Cálculo de la energía eléctrica generada a partir de deyecciones de ganado.

Para el cálculo de la producción de energía eléctrica generada a partir del presente método, se utilizaron los datos presentes desde la *Tabla 26* hasta la *Tabla 28*, las cuales contienen los números poblacionales de los ganados vacuno, porcino y de aves de corral en la región Piura en 2019, a partir de los datos extraídos del Censo Nacional Agropecuario del 2012.

Tabla 26. Población de ganado vacuno en la región Piura

Población de ganado vacuno en la región Piura								
Población de ganado vacuno según categorías								
Categorías de ganado vacuno	Unidades agropecuarias	Población de ganado vacuno por razas				Total por razas	Ganado vacuno criollo	Total de cabezas
		Holstein	Brown Swiss	GYR/CEBU	Otras			
Terneros y terneras	25,147	4,695	4,959	4,595	1,209	15,458	35,990	51,448
Vaquillas	7,803	1,505	1,628	2,127	439	5,699	10,891	16,590
Vaquillonas	8,070	1,520	1,682	3,272	379	6,853	11,266	18,119
Vacas	36,779	7,994	7,638	8,496	2,000	26,128	61,722	87,850
Toretes	8,277	1,353	1,549	1,776	397	5,075	9,728	14,803
Toros	10,920	2,197	1,577	1,699	832	6,305	12,460	18,765
Bueyes	292	-	-	-	-	-	606	606
Población de ganado vacuno según raza en cada provincia								
Provincia	Unidades agropecuarias	Población de ganado vacuno por razas				Total por razas	Ganado vacuno criollo	Total de cabezas
		Holstein	Brown Swiss	GYR/CEBU	Otras			
Ayabaca	14,157	4,122	5,154	5,574	1,265	16,115	48,128	64,464
Huancabamba	15,462	8,392	3,307	791	1,354	13,844	43,151	57,222
Morropón	7,998	1,716	4,912	10,402	945	17,975	27,690	45,731
Piura	5,829	3,520	3,812	3,481	1,003	11,816	13,771	25,633
Sullana	1,125	982	1,508	1,110	600	4,200	5,070	9,306
Sechura	878	334	205	321	75	935	2,084	3,026
Paita	610	187	135	250	14	586	1,833	2,422
Talara	27	11	-	36	-	47	330	377
Total	**46,086**	**19,264**	**19,033**	**21,965**	**5,256**	**65,518**	**142,057**	**208,181**

Nota: **Adaptado de Saavedra, Marcelo, Alamo, & Arrieta (2017) en base a datos extraídos del Censo Nacional Agropecuario del CENAGRO (2012)**

En la *Tabla 26* se utilizaron las siguientes categorías para la clasificación del ganado vacuno: terneros y terneras, vaquillas, vaquillonas, vacas, toretes, toros y bueyes. De estos, la

categoría que aportó la mayor cantidad de cabezas de ganado a la población total, fueron los terneros y terneras (51,448). Además, las provincias de la sierra piurana: Ayabaca, Huancabamba y Morropón son las que contaron con el 80.42% de la población total vacuna.

Tabla 27. Población de ganado porcino en la región Piura

Población de ganado porcino en la región Piura				
Población de ganado porcino según categorías				
Categorías de ganado porcino	Unidades agropecuarias	Total de cabezas	Población de ganado porcino	
			Criollos	Mejorados
Lechones	22,671	61,354	53,249	8,105
Gorrinas	9,101	15,878	13,612	2,266
Marranas	17,631	29,096	25,582	3,514
Gorrinos	7,290	12,982	10,983	1,999
Verracos	11,758	18,550	16,519	2,031
Población de ganado porcino en cada provincia				
Provincia	Unidades agropecuarias	Total de cabezas	Población de ganado porcino	
			Criollos	Mejorados
Ayabaca	12,492	41,071	39,034	2,037
Huancabamba	12,877	24,862	23,484	1,378
Morropón	6,416	19,731	16,861	2,870
Piura	11,772	34,119	27,163	6,956
Sullana	2,295	10,017	7,421	2,596
Sechura	1,687	4,570	3,358	1,212
Paita	733	2,835	2,437	398
Talara	60	655	187	468
Total	**48,332**	**137,860**	**119,945**	**17,915**

Nota: **Adaptado de Saavedra, Marcelo, Alamo, & Arrieta (2017) en base a datos extraídos del Censo Nacional Agropecuario del CENAGRO (2012)**

Tabla 28. Población de aves de corral en cada provincia de la región Piura

Población de aves de corral en cada provincia de la región Piura						
Provincia	Unidades agropecuarias	Población de aves de corral				
		Pollos y pollas de engorde	Gallinas	Gallos	Pavos	Patos
Ayabaca	-	-	-	-	-	-
Huancabamba	107	80	19	4	-	4
Morropón	1,060	1,060	-	-	-	-
Piura	358,152	315,246	31,429	14	2,563	8,900
Sullana	3,000	1,000	2,000	-	-	-
Sechura	7,100	1,670	4,690	10	710	20
Paita	1,595,395	1,594,975	120	70	50	180
Talara	-	-	-	-	-	-
Total	**1,964,814**	**1,914,031**	**38,258**	**98**	**3,323**	**9,104**

Nota: **Adaptado de Saavedra, Marcelo, Alamo, & Arrieta (2017) en base a datos extraídos del Censo Nacional Agropecuario del CENAGRO (2012)**

En cuanto a la *Tabla 27*, se utilizaron las siguientes categorías para la clasificación del ganado porcino: lechones, gorrinas, marranas, gorrinos y verracos y de los cuales, el mayor aportante fue la categoría de lechones con 61,354 cabezas. En este caso, las provincias de la sierra piurana junto a Piura provincia son las que contaron con el mayor porcentaje de la población, exactamente con un 86.89%. Finalmente, el total de cabezas de las poblaciones de ganado vacuno y porcino en Piura son de 208,181 y 137,860, respectivamente.

Por su parte, la población de aves de corral en la región Piura está conformada por 1,965,814 unidades agropecuarias y de las cuales, casi en su totalidad se encuentran ubicadas en las provincias de Paita y Piura, con un 99.43%. Ahora, este número no considera a las aves con crianza familiar, debido a que, al estar en su mayoría dispersas en el campo, se hace una tarea muy difícil el recolectar su estiércol.

Para la estimación de cuánta energía eléctrica se podría producir a partir de la digestión anaeróbica de deyecciones de animales, se consideraron ciertas cantidades de producción anual dependiendo al tipo de animal y su edad o peso. Además, en la *Tabla 29* se pueden ver los valores del volumen de biogás, en su mayoría compuesto por metano, producible por t de materia fresca (m^3 CH4/t materia fresca) y la energía generable por t de estiércol (MJ/t de estiércol), los cuales están relacionados al tipo de estiércol que se use, siendo el de origen porcino el de mayor rendimiento.

Tabla 29. Deyecciones y rendimiento de metano producido según el tipo de animal

Deyecciones y rendimiento de metano producido según el tipo de animal			
Deyecciones producidas según el tipo de animal y su etapa de desarrollo			
Tipo de animal	Categoría	Edad [meses] /Peso [kg]	Deyecciones producidas (orina + heces) [kg/año]
Vacuno	Ternero	3-6 meses	2,555
	Vaca	>24 meses	10,220
	Vaca lechera	>24 meses	16,425
Porcino	Lechón	15 kg	379.6
	Cerda	125 kg	1,471
	Padrillo	160 kg	1,492.9
Aves	Ponedora	1.8 kg	36.5
	Parrillero	0.9 kg	21.9
Rendimiento de biogás de las deyecciones generadas			
Estiércol	Rendimiento de metano		
	Vol. de metano producible por t de materia fresca [m^3 CH4/t]		Energía generable por t de estiércol fresco [GJ/t]
Estiércol de vaca	7-14		0.26-0.51
Estiércol de cerdo	17-22		0.62-0.8
Excremento de aves de corral	12		0.44

Nota: **Adaptado de Saavedra, Marcelo, Alamo, & Arrieta (2017) en base a datos extraídos de Rodriguez (2002) y Wellinger, Murphy, & Baxte (2013)**

En la *Tabla 30* se realizó la estimación de la producción anual de metano en la región Piura a partir de los valores del total de cabezas de cada tipo de ganado (ver *Tablas 26*, *27* y *28*). Los cuales fueron multiplicados por sus respectivos valores de estiércol por animal y de volumen de metano producible por t de materia fresca (ambos extraídos de la *Tabla 29*), para obtener los valores de producción total de metano al año (m^3 CH4/año).

Tabla 30. Estimación de la producción anual de metano en la región Piura

Estimación de la producción anual de metano en la región Piura				
Categoría de vacuno	Total de cabezas	Estiércol por animal [kg/año]	Estiércol total al año [t/año]	Producción total de metano al año [m^3 CH_4/año] η=7 m^3 CH_4/t de estiércol
Terneros y terneras	51,448	2,555	131,449.6	920,147.5
Vaquillas	16,590	2,555	42,387.5	296,712.2
Vaquillonas	18,119	2,555	46,294	324,058.3
Vacas	87,850	10,220	897,827	6,284,789
Toretes	14,803	2,555	37,821.7	264,751.7
Toros	18,765	10,220	191,778.3	1,342,448.1
Bueyes	606	2,555	1548.3	10,838.3
Producción de estiércol y metano de ganado vacuno			1,349,106.43	9,443,745.01
Categoría de porcino	Total de cabezas	Estiércol por animal [kg/año]	Estiércol total al año [t/año]	Producción total de metano al año [m^3 CH_4/año] η=17 m^3 CH_4/t de estiércol
Lechones	61,354	379.6	23,290	395,929.6
Gorrinas	15,878	379.6	6,027.3	102,463.9
Marranas	29,096	379.6	11,044.8	187,762.3
Gorrinos	12,982	379.6	4,928	83,775.4
Verracos	18,550	1,492.9	27,692.4	470,786
Producción de estiércol y metano de ganado porcino			72,983	1,240,717.31
Categoría de ave de corral	Total de cabezas	Estiércol por animal [kg/año]	Estiércol total al año [t/año]	Producción total de metano al año [m^3 CH_4/año] η=12 m^3 CH_4/t de estiércol
Pollos y pollas de engorde	1,914,031	21.9	41,917.3	503,007.4
Gallinas	38,258	36.5	1,396.4	16,757
Producción de estiércol y metano de ganado de aves de corral			43,313.7	519,764.35
Producción total de metano al año				**11,204,226.67 m^3 CH_4/año**

Nota: **Adaptado de Saavedra, Marcelo, Alamo, & Arrieta (2017)**

Luego de haber calculado la producción total de metano de cada categoría, se determinó que en la región Piura se podrían obtener 11,204,210.9 m^3 al año en condiciones ideales. Ahora, si a este valor se le hubiera considerado una disponibilidad del total de deyecciones estimadas y que el rendimiento del gas metano es de la mitad, se hubiera obtenido un valor más real: 5,602,105.5 m^3 de CH_4 o lo que en energía eléctrica es equivalente a 13.84 GWh/año (E_{BE}). Este último valor fue obtenido asumiendo el uso de una turbina de gas de 15,000 GJ/GWh y a partir de (5.4).

$$E_{BE} = \frac{R_M}{P_{turb}} * (F_{EV} * M_{EV} + F_{EP} * M_{EP} + F_{EA} * M_{EA})$$

$$E_{BE} = \frac{0.5}{15{,}000} * (0.26 * 1{,}349{,}106.43 + 0.62 * 72{,}983 + 0.44 * 43{,}313.7) \quad (5.4)$$

$$E_{BE} = 13.84\ GWh/año$$

Donde:

- E_{BE}: energía eléctrica generada anualmente a partir de la digestión anaeróbica de deyecciones producidas por ganado en la región Piura [GWh/año].
- R_M: rendimiento del gas metano (0.5).
- P_{turb}: potencia de la turbina de gas seleccionada (15,000 GJ/GWh).
- F_{EV}: energía generable por t de estiércol de ganado vacuno (0.26 GJ/t).
- M_{EV}: producción de estiércol de ganado vacuno (1,349,106.43 t/año).
- F_{EP}: energía generable por t de estiércol de ganado porcino (0.62 GJ/t).
- M_{EP}: producción de estiércol de ganado porcino (72,983 t/año).
- F_{EA}: energía generable por t de estiércol de aves de corral (0.44 GJ/t).
- M_{EA}: producción de estiércol de ganado de aves de corral (43,313.7 t/año).

5.2 Potencial de producción anual de H_2 de biomasa a partir de la electrólisis

Finalmente, al haber determinado E_{BA} y E_{BE}, se procedió a calcular la producción anual de H_2 de biomasa en Piura a partir de la electrólisis del agua. La ecuación utilizada para ello es la (3.2), la cual también se empleó para obtener el H_2 eólico del tercer capítulo y en la cual se ingresaron los valores calculados anteriormente (ver *Tabla 31*). El resultado obtenido fue 1,157.9 t H_2 producible por año, de las cuales, el 77% aproximadamente tiene como origen a la combustión de residuos lignocelulósicos de cultivo de banano.

Tabla 31. Potencial de producción anual de H_2 de biomasa a partir de la electrólisis en la región Piura

Fuente de biomasa	H_2 producible [tH_2/año]
A partir de la combustión de residuos de cultivo	891.74
A partir de la digestión anaeróbica de deyecciones de ganado	266.16
Total	**1,157.9**

5.3 Potencial de producción anual de H_2 de biomasa a partir del reformado de bioetanol

En la actualidad, Piura es la región que brinda la mayor aportación a la producción nacional de etanol de exportación, con cerca del 90% del total nacional (Siancas, 2021). Esto genera la necesidad de un análisis adicional de este recurso para la producción de H_2, a pesar de que en este proceso no se emplearía a la electrólisis del agua, siendo el reformado de bioetanol el método empleado.

Santa María, Ruíz, Cruz y Jeoh (2013) señalan que Piura tiene un potencial de producción anual de 5,870.1 m^3 de bioetanol (ver Tabla *32*), provenientes de la fermentación de residuos lignocelulósicos (tallos, hojas y raquis) de las cosechas de banano en el valle del Chira, ubicado en la provincia de Sullana. En este informe se utilizó una densidad del etanol de 789 kg/m^3 para determinar el volumen de bioetanol producible (5.5).

Tabla 32. Potencial de producción de bioetanol a partir de la fermentación de residuos lignocelulósicos de las cosechas de banano

Potencial de producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos de las cosechas de banano								
Residuos de banano disponibles [t/año]			Relación de masa de bioetanol/biomasa [-]			Potencial de producción de bioetanol [m^3 C_2H_5OH/año]		
Tallos	Hojas	Raquis	Tallos	Hojas	Raquis	Tallos	Hojas	Raquis
15,000	13,000	810	0.24	0.07	0.15	4,562.7	1,153.4	154
Total						**5,870.1 m^3/año**		

Nota: **Adaptado de Santa María, Ruíz Colorado, Cruz, & Jeoh (2013)**

$$PP_{BRL} = \frac{1000 * RBD * r_{E-BB}}{\rho_{Etanol}} \quad (5.5)$$

Donde:

- PP_{BRL}: potencial de producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos de las cosechas de banano [m^3 C_2H_5OH/año].
- RBD: residuos de banano disponibles (tallos, hojas y raquis) [t/año].
- r_{H-E}: relación de masa de bioetanol/biomasa (tallos, hojas y raquis) [-].
- ρ_{Etanol}: densidad del etanol (789 kg/m^3).

Además de la utilización de residuos lignocelulósicos, en este análisis se consideró a la producción de bioetanol a partir de la fermentación y destilación de caña de azúcar de la región. En la *Tabla 23*, se señala que en Piura se produjeron 1,863,885 t de caña de azúcar destinadas para este tipo de energía en 2019, las cuales podrían generar 75 litros de bioetanol por t de caña de azúcar (Cardona, Montoya, Quintero, & Sánchez, 2015). Lo que generaría un potencial de producción de 139,791.38 m^3 de bioetanol al año.

$$r_{H-E} = M_{H-E} * \frac{\rho_{Etanol}}{M_{Etanol}} * M_{H_2} = 2.2 * \frac{789 * 1{,}000}{46.07 * 1{,}000} * \frac{2.016}{1{,}000} \quad (5.6)$$

$$r_{H-E} = 0.076\ ton\ H_2/m^3\ C_2H_5OH$$

Donde:

- r_{H-E}: relación de t H_2 producible mediante reformado por metro cúbico de etanol [tH_2/m^3 C_2H_5OH].
- M_{H-E}: relación molar de H_2 producible mediante reformado de bioetanol (2.2). (Coronel, 2015)

- ρ_{Etanol}: densidad del etanol (789 kg/m^3).
- M_{Etanol}: masa molar del etanol (46.07 g C_2H_5OH/mol C_2H_5OH).
- M_{H_2}: masa molar del H_2 (2.016 g H_2/mol H_2).

Coronel (2015) realizó pruebas experimentales para la producción de hidrógeno a partir del reformado de bioetanol, en su estudio determinó una relación molar de 2.2. del H_2 producible mediante reformado de bioetanol. La cual en (5.6) se adaptó para obtener una relación de kilogramo de H_2 producible mediante reformado por metro cúbico de etanol.

Al resolver (5.6) se determinó que Piura tiene un potencial de producción anual de 11,070.28 t H_2 mediante reformado de bioetanol, de los cuales 446.13 t corresponden al uso de residuos de la cosecha de banano (aproximadamente 4% del total), mientras que todo lo restante corresponde al uso de caña de azúcar. Es importante mencionar que el etanol producible mediante este último recurso, no se encuentra potencialmente disponible para su utilización como fuente generadora de H_2, al ser vendido directamente en el mercado.

Capítulo 6

Discusión de resultados

Este capítulo empieza presentando un resumen del potencial de hidrógeno verde en Piura a partir de las tres fuentes renovables consideradas: eólica, solar y biomasa. A continuación, se plantean unos posibles usos finales para el hidrógeno verde en la región. Así mismo, se realiza una comparación detallada del total del potencial de H_2 con el consumo de energía en el país y en la región. Seguidamente, se compara también los resultados de esta investigación con los valores estimados en otras ciudades de Sudamérica. Por último, se determinó cuáles son los distritos con mayor potencial para la producción de H_2 eólico, solar y de biomasa, en los cuales convendría la instalación de hipotéticas plantas de electrólisis.

6.1 Potencial de producción de H_2 verde a partir de la electrólisis del agua en Piura

A continuación, se presenta el potencial de producción de H_2 verde a partir de la electrólisis del agua en la región Piura (ver *Tabla 33*), en este se han empleado tres fuentes de energía renovable: eólica, solar y de biomasa. A estas se podría añadir la energía hidráulica, al existir dos grandes ríos en la región: el Piura y el Chira, aunque por delimitación del estudio, no se ha considerado tal fuente.

En la *Tabla 33* se muestra un resumen con los valores estimados en los anteriores capítulos, los cuales han sido calculados suponiendo un electrolizador PEM comercial con una eficiencia del 75%. La de mayor contribución en el total es la de origen solar, esto debido a que es la fuente energética con menos requisitos para su instalación (además del espacio geográfico). En cuanto a la producción de H_2 eólico, depende de que el lugar cumpla con una mínima velocidad media del viento, y la de biomasa depende de que se cuente con una gran cantidad de ganado y residuos de cultivo disponibles en la región.

Tabla 33. Producción anual de H_2 verde a partir de la electrólisis en la región Piura

Fuente de energía renovable	Producción de H_2 [tH_2/año]	Contribución [%]
Energía eólica	47,745.32	5.041
Energía solar	898,299.06	94.837
Energía de biomasa	1,157.9	0.122
Total	**947,202.28**	**100**

6.2 Posibles usos finales del H_2 verde

Se han identificado los siguientes posibles usos para el hidrógeno verde producido en la región Piura:

a) Como vector energético: en los principales sectores consumidores de energía, como el sector transporte, residencial y comercial, industrial y minero, entre otros. El hidrógeno posee excelentes cualidades como vector energético, ya que cuenta con la energía específica más alta entre todos los combustibles de uso común. De esta forma, el hidrógeno verde se perfila como un buen candidato para reemplazar a las principales fuentes energéticas, tanto primarias como secundarias, usadas actualmente, como el diésel y el gasohol en el sector transporte, o el Gas Licuado de Petróleo (GLP) y la leña en el sector residencial, entre otros. La sustitución, incluso parcial, de los combustibles fósiles por hidrógeno verde, traería como principal ventaja la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que contribuiría con la descarbonización de la región y del país. Adicionalmente, reduciría la cantidad necesaria de importaciones de petróleo crudo y diésel, entre otros combustibles, lo cual otorgaría una mayor autonomía energética.

b) En el refinado del petróleo: el hidrógeno se usa principalmente para reducir la cantidad de azufre presente en el diésel y la gasolina, a través de un proceso llamado hidrodesulfuración. La región Piura cuenta con la refinería Talara, ubicada en la provincia de mismo nombre y operada por Petroperú S.A., la cual es la segunda refinería más grande del país, según su capacidad de refinación (Ministerio de Energía y Minas, 2021). Actualmente, el hidrógeno utilizado en la refinería Talara es obtenido por método de reformado con vapor. Sin embargo, el uso de hidrógeno verde producido localmente contribuiría a reducir las emisiones de gases, como dióxido de carbono y monóxido de carbono, típicos del proceso de reformado. En este caso es necesario hacer un análisis más detallado para determinar la factibilidad de esta potencial aplicación de hidrógeno verde.

6.2.1 Consumo energético a nivel nacional y comparación con el potencial de H_2 verde

En esta sección se analizar el uso de hidrógeno verde como vector energético para cubrir el consumo de energía en el Perú. La información más reciente y detallada acerca del consumo de energía del Perú se encuentra en el Balance Nacional de Energía 2019 (Ministerio de Energía y Minas, 2021). A continuación, se presenta el desagregado del consumo final de energía por fuentes y por sectores. Así mismo, se compara el consumo por sectores con el potencial de hidrógeno verde calculado para la región Piura, a fin de determinar en qué medida este potencial de hidrógeno cubriría la demanda energética nacional del 2019.

6.2.1.1. Consumo energético por fuentes. En la *Tabla 34* se puede ver el consumo de energía a nivel nacional por fuentes. Se hace además la distinción entre la energía consumida

en territorio nacional y la energía consumida en territorio extranjero. Esta última pertenece a la actividad llamada Bunker, y comprende los combustibles utilizados en el transporte de naves aéreas y marítimas en viajes internacionales (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

Tabla 34. Consumo final de energía por fuentes en el Perú (2019)

Fuente	Consumo [TJ]	Participación
BUNKER – Combustibles vendidos en naves marítimas y aéreas en viajes internacionales		
Turbo	31,147.6	3.4%
MGO	795.7	0.1%
Diesel B5	21.8	0.0%
Fuel Oil (*)	16,812.5	1.8%
Subtotal Bunker	**48,777.7**	**5.3%**
Consumo nacional		
Fuente Primaria	**126,656.2**	**13.7%**
Carbón Mineral	22,039.2	2.4%
Leña	85,379.6	9.3%
Bosta & Yareta	5,907.8	0.6%
Bagazo (energético)	8,931.8	1.0%
Energía Solar	1,481.7	0.2%
Bagazo (no energético)	2,916.0	0.3%
Fuente Secundaria	**746,354.7**	**81.0%**
Coque	1,566.2	0.2%
Carbón Vegetal	5,134.5	0.6%
GLP	92,047.3	10.0%
Gasohol	82,419.5	8.9%
Gasolina Motor	14,506.6	1.6%
TurboJet	16,240.1	1.8%
Diesel B5 (**)	238,832.1	25.9%
Fuel Oil (*)	2,942.0	0.3%
Gas Distribuido	101,605.9	11.0%
Electricidad	179,304.6	19.5%
No Energéticos	11,755.7	1.3%
Subtotal Consumo Nacional	**873,010.9**	**94.7%**
Total	**921,788.5**	**100.0%**

Nota: **Adaptado de Ministerio de Energía y Minas (2021)**

(*): Incluye el Petróleo Industrial y el combustible IFO 380 (*Intermediate Fuel Oil*)

(**): Incluye el combustible MGO (*Marine Gas Oil*)

Según la *Tabla 34*, en el 2019, el consumo final de energía fue de 921,788.5 TJ. De este consumo, el 94.7% fue en territorio nacional, mientras que, el 5.3% corresponde al consumo de Bunker. Así mismo, es resaltante que la mayoría del consumo nacional de energía es proveniente de fuentes secundarias (81% del consumo total), mientras que solo el 13.7% fue consumo de fuentes primarias de energía.

Entre las fuentes secundarias con mayor consumo nacional se encuentran: el diésel (238,832.1 TJ), la electricidad (179,304.6 TJ), el gas distribuido (101,605.9 TJ) y el Gas Licuado de Petróleo (GLP) (92,047.3 TJ). Finalmente, entre las fuentes primarias de energía con mayor consumo nacional están: la leña (85,379.6 TJ) y el carbón mineral (22,039.2 TJ).

6.2.1.2 Consumo energético por sectores. En la *Tabla 35* se presenta el consumo de energía a nivel nacional por sectores económicos. De igual manera a la sección anterior, se hace la distinción entre el consumo en territorio nacional y el consumo de Bunker. Para este último, la totalidad de consumo corresponde al sector transporte (viajes internacionales).

Tabla 35. Consumo final de energía por sectores económicos en el Perú (2019)

Sector económico	Consumo [TJ]	Participación
BUNKER – Combustibles vendidos en naves marítimas y aéreas en viajes internacionales		
Transporte (bunker)	48,777.7	5.3%
Subtotal Bunker	**48,777.7**	**5.3%**
Consumo nacional		
Transporte (nacional)	377,615.2	41.0%
Residencial, Comercial y Público	219,898.8	23.9%
Industria y Minería	250,528.3	27.2%
Agropecuario y Pesca	10,296.9	1.1%
No Energético	14,671.7	1.6%
Subtotal Consumo Nacional	**873,010.9**	**94.7%**
TOTAL	**921,788.5**	**100.0%**

Nota: **Adaptado de Ministerio de Energía y Minas (2021)**

Con respecto al consumo en territorio nacional del 2019 (ver *Tabla 35*), se observa que, el sector transporte es el que presenta mayor consumo energético, aproximadamente 377,615.2 TJ, lo cual corresponde a una participación de 40.1% del total. Considerando además la actividad de Bunker, el sector transporte alcanzó un 46.3% de participación en el consumo total. En segundo lugar, se encuentra el consumo del sector industria y minería (27.2%), seguido del sector residencial, comercial y público (23.9%), y, en menor medida, de los sectores agropecuario y pesca (1.1%). Finalmente, es importante mencionar que el consumo categorizado como "no energético" representa a los derivados de combustibles, como el petróleo crudo, para usos no energéticos. Por ejemplo, pertenecen a esta categoría los aceites lubricantes, solventes, etc.

6.2.1.3 Comparación del consumo energético nacional con el potencial de H_2 verde. Para poder comparar el consumo energético nacional con el potencial de hidrógeno estimado en esta investigación, se ha considerado el Poder Calorífico Inferior (PCI) del H_2, el cual es aproximadamente 120 MJ/kg (Posso, Sánchez, Espinoza, & Siguencia, 2016). Esta consideración se hace debido a que corresponde con la metodología utilizada en el Balance Nacional de Energía 2019.

Tabla 36. Comparación del potencial de hidrógeno verde en Piura con el consumo energético nacional (2019)

Sector económico	Fuentes usadas	Consumo energético [TJ] (a nivel nacional)	Consumo de H_2 equivalente [t]	Consumo de H_2 equivalente respecto al potencial en Piura [%]	Cobertura del potencial de producción de H_2 en Piura [%]
Transporte	FS: Diesel B5 (54.3%), Gasohol (20.7%), GLP (8.6%), Gas distribuido (8.1%), TurboJet (4.3%), Gasolina motor (3.7%), Fuel Oil (0.2%), Electricidad (0.1%)	377,615.2	3,146,793.3	332.22	30.10
Transporte terrestre*	FS: Diesel B5 (57%), Gasohol (22.1%), GLP (9.2%), Gas natural (8.6%), Gasolina motor (3.1%)	354,318.8	2,952,656.7	311.72	32.08
Residencial	FS: GLP (23.6%), Electricidad (21.8%), Gas distribuido (4%), Carbón vegetal (1.9%), FP: Leña (43.3%), Bosta y yareta (3.7%), Energía solar (0.6%)	161,023.0	1,341,858.3	141.67	70.59
Comercial	FS: Electricidad (54.6%), Gas distribuido (18.3%), GLP (7.8%), Diesel B5 (7.4%), Gasohol (0.06%), Gasolina motor (0.01%), Fuel Oil (0.001%), Carbón vegetal (2.1%), FP: Leña (8.5%), Energía solar (1.2%), Carbón mineral (0.0%)	46,748.0	389,566.7	41.13	243.14
Público	FS: Electricidad (63.8%), Diesel B5 (32.3%), Gas distribuido (1.7%), TurboJet (0.9%), GLP (0.5%), Carbón vegetal (0.01%), Gasolina motor (0.0%), FP: Leña (0.7%), Energía solar (0.02%)	12,128.0	101,066.7	10.67	937.21
Industria	FS: Gas distribuido (31.4%), Electricidad (26.5%), GLP (8.9%), Diesel B5 (5.5%), Fuel Oil (1.2%), Coque (0.9%), Carbón vegetal (0.7%), FP: Carbón mineral (12.9%), Leña (6.7%), Bagazo (5.2%), Energía solar (0.001%)	170,770.0	1,423,083.3	150.24	66.56
Minería	FS: Electricidad (72.7%), Diesel B5 (16.7%), Gasohol (5.1%), GLP (3.1%), Gas distribuido (2.4%), Fuel Oil (0.03%), Gasolina motor (0.003%), Carbón vegetal (0.002%), FP: Leña (0.003%), Energía solar (0.001%)	79,758.0	664,650	70.17	142.51
Agropecuario	FS: Electricidad (66.6%), Diesel B5 (26.6%), Gasolina motor (2.8%), GLP (1.7%), Gas distribuido (1.0%), Carbón vegetal (0.002%), FP: Leña (1.2%), Carbón mineral (0.1%), Energía solar (0.1%),	6,839.0	56,991.7	6.02	1,662.00
Pesca	FS: Diesel B5 (52.8%), Electricidad (30.6%), Gasolina motor (11.8%), Gas distribuido (2.8%), Fuel Oil (1.2%), GLP (0.4%), FP: Leña (0.3%)	3,458.0	28,816.7	3.04	3,286.99
TOTAL		**858,339.2**	**7,152,826.7**	**755.15**	**13.24**

Nota: **Elaboración en base a datos extraídos de Ministerio de Energía y Minas (2021)**

Indicación 1: **FS = Fuentes Secundarias, FP = Fuentes Primarias**

Indicación 2: **El consumo de H_2 equivalente (columna 4) representa la cantidad teórica de H_2[t] necesaria para cubrir la totalidad de la demanda de cada sector. Para su cálculo se ha usado el PCI del H_2, igual a 120 MJ/kg H_2**

***: El transporte terrestre es una subcategoría del sector económico de transporte, por lo que no se debe contabilizar individualmente para la suma total**

Con el PCI del hidrógeno, es posible calcular el "consumo de hidrógeno equivalente" necesario para cubrir el consumo energético de cada sector. Este "consumo de hidrógeno equivalente" se compara luego con el potencial de producción de hidrógeno estimado, el cual es 947,202.28 t. Específicamente, se divide el potencial de hidrógeno entre el "consumo de hidrógeno equivalente", para así, obtener el porcentaje de "cobertura del potencial de producción de hidrógeno".

Para esta comparación, sólo se considera el consumo energético en territorio nacional, es decir, se excluye el consumo de Bunker (fuera del territorio nacional), así como, el consumo no energético. En la *Tabla 36* se presentan los resultados de esta comparación.

Teniendo en cuenta el consumo energético nacional del 2019 y el PCI del hidrógeno, se ha estimado que sería necesario un consumo teórico de 7,152,826.7 t H_2 para cubrir la totalidad de la demanda energética. Por consiguiente, el potencial de producción de hidrógeno verde de la región Piura podría cubrir hasta el 13.24% de esta demanda.

El sector transporte es el de mayor consumo energético en el país, con una demanda en el 2019 de 377,615.2 TJ, de la cual la mayor parte proviene de derivados de combustibles fósiles, como el diésel, gasohol, GLP, entre otros. Mediante pilas de combustible, el hidrógeno es capaz de sustituir tales combustibles, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Se obtuvo que la cantidad teórica de H_2 necesaria para cubrir el consumo total del sector transporte es 3,146,793.33 t. Por lo tanto, la producción de hidrógeno verde en Piura podría cubrir el 30.1% de este consumo. Adicionalmente, si se considera el uso de hidrógeno únicamente para el transporte terrestre, se podría cubrir hasta el 32.08% de esta demanda.

Otro sector interesante de analizar es el sector residencial, donde aún predomina el uso de fuentes primarias, como la leña, y fuentes secundarias, como el GLP, la electricidad y el gas natural distribuido. La leña, principalmente utilizada en la cocción de alimentos en zonas rurales del país, es un combustible ineficiente (bajo poder calorífico) y bastante contaminante (gran cantidad de desechos producto de su combustión) (Posso, Sánchez, Espinoza, & Siguencia, 2016). Nuestra estimación ha encontrado que el potencial de hidrógeno verde de Piura podría cubrir hasta el 70.59% del consumo energético residencial del país.

Si se busca sustituir únicamente el consumo de leña (combustible con mayor consumo en este sector) con hidrógeno verde, se podría cubrir la totalidad de esta demanda, hasta 163%, quedando incluso un exceso de 366,177.62 t H_2, disponible para ser utilizado en otro sector. Así mismo, también se puede comentar que los consumos energéticos de algunos sectores pueden quedar completamente cubiertos por el potencial de hidrógeno verde de Piura. Tales sectores son: comercial (se cubre en 243.14%), público (937.21%), minería (142.51%), agropecuario (1,662%) y pesca (3,286.99%).

Finalmente, es interesante notar que, si se asume un caso más realista en el que se alcance una producción del 10% del potencial de H_2 de Piura, es aún posible cubrir la totalidad de la demanda nacional de algunos sectores. Tales sectores son: pesca (requiere 3.04% del potencial de H_2 total), agropecuario (requiere 6.02%) y casi la totalidad del sector público (requiere 10.67%).

6.2.2 Consumo energético en Piura y comparación con el potencial de H_2 verde

Debido a que no se cuentan con datos directos de consumo de energía en la región Piura, primero se realiza una estimación de este valor, considerando los datos de población del país y de la región. En otras palabras, inicialmente se calcula el consumo energético per cápita del país, para así estimar el consumo energético de la región Piura. Esta metodología la aplicaron también Sigal, Leiva y Rodríguez (2014), con el fin de estimar el consumo de combustibles en cada departamento de Argentina.

Finalmente, se compara este estimado con el potencial de hidrógeno verde de Piura, a fin de determinar en qué medida se podría cubrir el consumo energético de la región.

6.2.2.1 Estimación del consumo energético en la región Piura. En la *Tabla 37* se detallan los datos usados para la estimación del consumo de energía en Piura. Los datos de población han sido extraídos del informe "Estado de la población peruana 2020" (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2020).

Tabla 37. Estimación del consumo energético por sectores en la región Piura

Sector económico	Consumo energético [TJ] (a nivel nacional)	Población del Perú [hab.]	Consumo energético per cápita [TJ/ 1000 hab.]	Población de la región Piura [hab.]	Consumo energético en Piura [TJ] (estimado)
Transporte (total)	377,615.2	32,625,948	11.57408	2,047,954	23,703.18
Transporte terrestre (incluido en el transporte total)	354,318.8		10.86003		22,240.84
Residencial	161,023.0		4.93543		10,107.53
Comercial	46,748.0		1.43285		2,934.41
Público	12,128.0		0.37173		761.28
Industria	170,770.0		5.23418		10,719.35
Minería	79,758.0		2.44462		5,006.47
Agropecuario	6,839.0		0.20962		429.29
Pesca	3,458.0		0.10599		217.06
TOTAL	**858,339.2**	**32,625,948**	**26.30848**	**2,047,954**	**53,878.56**

Nota: **Elaboración en base a datos de consumo energético extraídos de Ministerio de Energía y Minas (2021) y datos demográficos extraídos de Instituto Nacional de Estadística e Informática (2020)**

Con el dato del consumo energético per cápita y la población de la región Piura, se estimó que el consumo de energía en esta región es aproximadamente 53,878.56 TJ, lo cual es equivalente al 6.28% del total nacional.

6.2.2.2 Comparación del consumo energético en Piura con el potencial de H_2 verde. La metodología es la misma utilizada en la sección anterior, para comparar el consumo energético nacional con el potencial de hidrógeno verde. Primero, se usa el dato del Poder Calorífico Inferior (PCI) del H_2 (120 MJ/kg) para calcular el "consumo de H_2 equivalente" por sector. Este valor luego se compara con el potencial de producción de hidrógeno verde en la región, para obtener el porcentaje de "cobertura del potencial de producción de hidrógeno". En la *Tabla 38* se presentan los resultados de esta comparación.

Tabla 38. Comparación del potencial de hidrógeno verde con el consumo energético de la región Piura (2019)

Sector económico	Consumo energético en Piura [TJ] (estimado)	Consumo de H_2 equivalente [t]	Consumo de H_2 equivalente respecto al potencial en Piura [%]	Cobertura del potencial de producción de H_2 en Piura [%]
Transporte (total)	23,703.18	197,526.50	20.85	479.53
Transporte terrestre (incluido en el transporte total)	22,240.84	185,340.33	19.57	511.06
Residencial	10,107.53	84,229.42	8.89	1,124.55
Comercial	2,934.41	24,453.42	2.58	3,873.50
Público	761.28	6,344.00	0.67	14,930.68
Industria	10,719.35	89,327.92	9.43	1,060.37
Minería	5,006.47	41,720.58	4.40	2,270.35
Agropecuario	429.29	3,577.42	0.38	26,477.27
Pesca	217.06	1,808.83	0.19	52,365.37
TOTAL	**53,878.56**	**448,988.00**	**47.40**	**210.96**

Indicación 1: **El consumo energético en Piura (columna 2) ha sido estimado a partir del consumo energético per cápita del país y la población de la región**

Indicación 2: **El consumo de H_2 equivalente (columna 3) representa la cantidad teórica de H_2 [t] necesaria para cubrir la totalidad de la demanda de cada sector. Para su cálculo se ha usado el PCI del H_2, igual a 120 MJ/kg H_2**

Se ha estimado que, para cubrir el consumo energético total de la región Piura, es necesaria una cantidad teórica de 448,988 t H_2. Debido a que el potencial de H_2 verde de la región es 947,202.28 t H_2/año, se puede decir que, una producción del 47.4% de este potencial bastaría para cubrir la totalidad de la demanda energética regional. Otra forma de interpretar este resultado es la siguiente: el potencial de H_2 verde podría cubrir la totalidad de la demanda

de energía en la región Piura, incluso si ésta aumentara hasta un 210% del valor actual, en los próximos años.

Es así como para cubrir la demanda del sector transporte en Piura, bastaría con una producción del 20.85% del potencial de H_2 verde. Asimismo, para cubrir el transporte terrestre, sería necesario un 19.57% del potencial total. Estos datos son relevantes, pues el sector transporte es el mayor contaminante, por emisiones de gases de efecto invernadero, en nuestro país. De esta forma, el reemplazo de los combustibles actuales por hidrógeno verde contribuiría considerablemente a reducir tales emisiones.

Asumiendo un caso más realista en el que se alcance una producción del 10% del potencial de H_2 verde en Piura, nota que, sería posible cubrir la totalidad de la demanda de casi cualquier sector, a excepción del sector transporte. Por ejemplo, el consumo del sector residencial requiere únicamente del 8.9% del potencial total de hidrógeno, el sector industrial, 9.43%, y el sector minero, 4.40%.

Así mismo, se ha identificado que algunos sectores requieren una cantidad mínima del potencial total de hidrógeno de la región. Por ejemplo, los sectores agropecuario y pesca, principales actividades económicas en nuestra región, requieren conjuntamente 5,386.25 t H_2 para cubrir su consumo energético. Esta cantidad representa tan sólo el 0.57% del potencial total de la región.

6.2.3 Impacto ambiental

El hidrógeno verde, por definición, es aquel que no genera gases contaminantes durante su producción ni combustión, siendo vapor de agua el único producto de esta última reacción. En cambio, los combustibles fósiles liberan grandes cantidades de gases, como dióxido de carbono o metano, durante su combustión. Estos gases, conocidos como gases de efecto invernadero, son los principales causantes de la aceleración del calentamiento global. Con el fin de analizar el impacto positivo que tendría el uso de hidrógeno verde como vector energético en la región Piura, es necesario conocer primero el impacto ambiental que causan las actividades de consumo de energía actualmente.

En el Balance Nacional de Energía 2019 del Perú se presenta una estimación de las emisiones de tres gases de efecto invernadero a causa del consumo final de energía en el país, tales gases son: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). En la *Tabla 39* se presenta un resumen de las emisiones de estos tres gases generadas por cada sector económico.

Según la *Tabla 39*, el 2019, el consumo final de energía en el Perú generó más de 38.53 millones de t de gases de efecto invernadero (GEI), de las cuales, la gran mayoría provenía del sector transporte (25.59 millones de t GEI). El sector transporte es responsable de la mayoría de las emisiones de dióxido de carbono (25.58 millones de t GEI) y óxido nitroso (1,230 t GEI), mientras que, el sector residencial y comercial es responsable de la mayoría de las emisiones

de metano (25,000 t GEI), debido principalmente al gran consumo de biomasa como fuente primaria en estos sectores.

Tabla 39. Emisiones de gases contaminantes por consumo final de energía (2019)

Sector económico	Emisiones de CO_2 [t]		Emisiones de CH_4 [t]		Emisiones de N_2O [t]		Total de emisiones [t]	
	Nacional	Piura	Nacional	Piura	Nacional	Piura	Nacional	Piura
Transporte	25,582,500	1,605,814	8,690	545.47	1,230	77.21	25,592,420	1,606,436
Industria	7,097,700	445,523	1,180	74.07	100	6.28	7,098,980	445,603
Residencial y comercial	3,722,600	233,668	25,000	1,569.25	330	20.71	3,747,930	235,258
Minero	1,473,600	92,498	60	3.77	10	0.63	1,473,670	92,502
Agropecuario	152,800	9,591	50	3.14	0	0	152,850	9,594
Pesca	167,000	10,483	30	1.88	0	0	167,030	10,484
Público	300,600	18,869	70	4.39	0	0	300,670	18,873
TOTAL	**38,496,800**	**2,416,444**	**35,080**	**2,201.97**	**1,670**	**104.83**	**38,533,550**	**2,418,751**

Nota: **Elaboración en base a datos extraídos de Ministerio de Energía y Minas (2021)**

Indicación 1: **El "total de emisiones" corresponde a la suma de las emisiones de CO_2, CH_4 y N_2O**

Indicación 2: **Las emisiones correspondientes a Piura han sido estimadas a partir de datos de población del país y la región Piura, extraídos de Instituto Nacional de Estadística e Informática (2020)**

Así mismo, en Piura se ha estimado que, el 2019, las emisiones de gases contaminantes por consumo de energía ascienden a 2.418 millones de t GEI. El sector transporte sería responsable de la emisión de 1.606 millones de t GEI, seguido del sector industrial, el cual generó aproximadamente 445,603 t de gases contaminantes, y el sector residencial y comercial, con aproximadamente 235,258 t de emisiones en la región.

Según se ha encontrado en la sección anterior, el potencial de H_2 verde sería capaz de cubrir la totalidad del consumo energético de la región (hasta el 210%). Esto quiere que, en teoría, si se reemplazaran todas las fuentes de uso actual en todos los sectores de la región por H_2 verde, se podrían eliminar por completo las emisiones de gases de efecto invernadero en la región (causadas por el consumo de energía). Sin embargo, considerando un caso más realista, en el que se alcance a producir el 10% del potencial total de H_2 verde, sería posible cubrir el 21% del consumo energético regional. Esto reduciría las emisiones de gases contaminantes en casi 508 mil t GEI/año.

No obstante, además de analizar los valores netos de emisiones de gases contaminantes, es interesante también observar la cantidad de emisiones generadas por unidad de consumo energético de cada sector. Esta relación se muestra en la *Tabla 40*.

De acuerdo con la *Tabla 40*, el sector transporte no sólo contribuye con la mayor cantidad total de emisiones de GEI, sino que también cuenta con la mayor relación de

emisiones por consumo energético. Esto se debe al tipo de combustibles usados en este sector, principalmente el diésel B5 en el transporte terrestre, los cuales son en su totalidad combustibles fósiles y altamente contaminantes.

Tabla 40. Relación de cantidad de emisiones por consumo energético en cada sector económico

Sector económico	Total de emisiones en Piura [t GEI] (estimado)	Consumo energético en Piura [TJ] (estimado)	Cantidad de emisiones por consumo energético [t GEI/TJ]
Transporte	1,606,436	23,703.18	67.77
Industria	445,603	10,719.35	41.57
Residencial y comercial	235,258	13,041.93	18.04
Minero	92,502	5,006.47	18.48
Agropecuario	9,594	429.29	22.35
Pesca	10,484	217.06	48.30
Público	18,873	761.28	24.79
TOTAL	**2,418,751**	**53,878.56**	**44.89**

Nota: **Elaboración en base a datos extraídos de Ministerio de Energía y Minas (2021)**

Indicación 1: **GEI = Gases de Efectivo Invernadero (incluye CO_2, CH_4 y N_2O)**

Con lo anterior también se concluye que, el mayor impacto ambiental se obtendría si el hidrógeno verde se usa para sustituir a los combustibles actuales en el sector transporte. En Piura, es necesaria una producción teórica de 197,526.50 t H_2 para cubrir la demanda de este sector. Esta cantidad representa el 20.85% del potencial total de hidrógeno verde de nuestra región. Por lo tanto, de lograrse alcanzar dicha producción, se contribuiría a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en 1.606 millones de t GEI/año. Esto representa una reducción del 66.4% de las emisiones de GEI de la región, y una reducción del 4.17% de las emisiones de GEI a nivel nacional, a causa de consumo final de energía.

Tabla 41. Emisiones de gases contaminantes del sector transporte terrestre por combustible utilizado en Piura

Modo de transporte / Combustible	Consumo energético en Piura [TJ] (estimado)	Consumo de H_2 equivalente [t H_2]	Consumo de H_2 equivalente respecto al potencial en Piura [%]	Emisiones de CO_2 [t CO_2]	Emisiones de CH_4 [t CH_4]	Emisiones de N_2O [t N_2O]	Total de emisiones [t GEI]
Terrestre	**22,240.84**	**185,340.36**	**19.567**	**1,502,774**	**536.69**	**73.44**	**1,503,385**
GLP	2,038.99	16,991.56	1.794	128,661	126.17	0.63	128,788
Gasohol	4,916.47	40,970.60	4.325	322,623	161.95	15.69	322,800
Gasolina Motor	685.69	5,714.12	0.603	47,517	22.60	1.88	47,542
Diesel B5	12,679.23	105,660.27	11.155	896,234	49.59	49.59	896,333
Gas Natural	1,920.46	16,003.81	1.690	107,740	176.39	5.65	107,922
Aéreo, marítimo, fluvial y ferroviario	**1,462.33**	**12,186.10**	**1.287**	**103,040**	**8.78**	**3.77**	**103,052**
TOTAL	**23,703.18**	**197,526.46**	**20.854**	**1,605,814**	**545.47**	**77.21**	**1,606,436**

Nota: **Elaboración en base a datos extraídos de Ministerio de Energía y Minas (2021)**

Indicación 1: **GEI = Gases de Efectivo Invernadero (incluye CO_2, CH_4 y N_2O)**

Suponiendo un caso más realista en el que se alcance una producción del 10% del potencial total de hidrógeno verde, esta cantidad sería suficiente para cubrir el 47.95% de la demanda del sector transporte en Piura. Aquello significaría una reducción de 770 mil t GEI/año, es decir, 31.85% del total de emisiones de GEI en la región, o 2% del total de emisiones del país.

De los combustibles utilizados en el sector transporte, el que contribuye con la mayor cantidad de emisiones contaminantes es el diésel B5 en el transporte terrestre (ver *Tabla 41*). Para cubrir completamente la demanda regional de diésel en este sector serían necesarias 105,660.27 t H_2/año, lo cual representa solamente un 11.16% del potencial total de H_2 verde de la región. Si se lograra alcanzar esta producción de hidrógeno verde, se podrían reducir las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, en 896 mil y 49.6 t GEI, respectivamente. Esto significa una reducción del 37% del total de emisiones de GEI en la región Piura, y del 2.33% del total nacional.

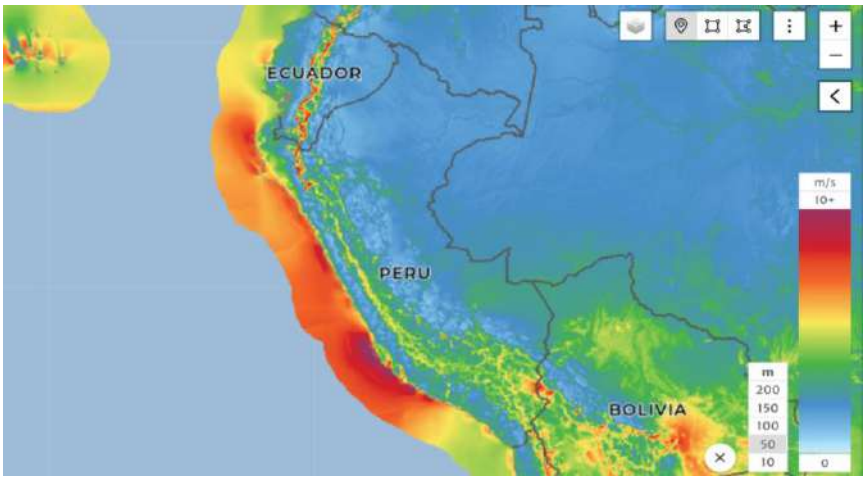
6.3 Potencial de producción de H_2 eólico a partir de la electrólisis del agua en Piura

En el estado del arte se puede ver que en anteriores investigaciones se han realizado estudios de producción de H_2 a partir del uso de energía eólica, en diferentes provincias y países de Sudamérica. Sin embargo, si se quisiera realizar una comparación directa con el potencial de H_2 de Piura, se obtendría un resultado falaz, debido a que en ellas se han tomado distintas condiciones de partida. No obstante, si se sintetizan las ecuaciones planteadas en el capítulo 3, se puede concluir que el cálculo del potencial de producción de H_2 eólico depende directamente de la potencia desarrollada por el aerogenerador seleccionado, la cual a su vez está relacionada, mediante una curva propia del aerogenerador, con la velocidad media del viento en la ubicación seleccionada.

Figura 38. Mapa de la velocidad media anual del viento en Sudamérica

Nota: **Adaptado de Global Wind Atlas**

Figura 39. Mapa de la velocidad media anual del viento en Perú



Nota: **Adaptado de Global Wind Atlas**

Es así como, al considerar el uso de un mismo tipo de aerogenerador, se podría realizar una comparación válida del potencial de producción de H_2 eólico de Piura con el de otras regiones de Sudamérica (ver *figura 38*). Gracias al mapa brindado por *Global Wind Atlas* en su página web[4], se puede determinar que la parte norte de Sudamérica, en donde se encuentra Piura, tiene los valores más bajos de velocidad media anual del viento (color verde azulado). No obstante, a lo largo de la Costa del Perú, se encuentran varios puntos de color amarillo y anaranjado (ver *figura 39*), siendo la Costa piurana la de mayor superficie en la que se pueden ver estos colores y, por lo tanto, la de mayor potencial de producción de H_2 eólico. De hecho, Piura es de las pocas regiones en el Perú que cuenta con un parque eólico: la central eólica Talara, la cual cuenta con 17 aerogeneradores de 1.8 MW cada uno.

6.3.1 Distritos con mayor potencial

Como se mencionó antes, el cálculo del potencial de producción de H_2 eólico depende principalmente de dos factores: la potencia desarrollada por el aerogenerador y la velocidad media del viento existente en el lugar; de los cuales solo el primero es modificable por el hombre. Asimismo, es relevante señalar que la estimación del potencial de producción de H_2 eólico en todos los distritos de la región Piura, se realizó a partir de la ficha técnica de los aerogeneradores SIEMENS Gamesa 2.1-114 (ver *Anexo B*) de 2 MW.

Ante esta situación y si se quisiera instalar una planta de H_2 eólico en la región Piura, resultaría necesario determinar el distrito con el mayor potencial. En la *figura 40* se puede ver la producción anual de H_2 eólico por área de los 14 distritos con más potencial de este tipo de energía de Piura. Entre ellos, como ya se dijo en el capítulo 3, el que más H_2 eólico lograría producir sería el distrito de Sechura, con 368.45 t H_2/km^2/año.

[4] https://globalwindatlas.info/

En cuanto a la *figura 41*, se puede ver el resultado de la producción en cada distrito de la *figura 40* simulando la colocación de aerogeneradores en toda su superficie útil ($Sup_{útil}$), factor dependiente de la densidad poblacional del mismo distrito. Además, en el gráfico mencionado anteriormente se puede observar que una vez más, Sechura obtiene una ventaja significativa frente a los otros 13 distritos (25,339.04 t H_2/año), al ser un distrito con poca población (5,731 km^2) y el de mayor tamaño en la región (7.5 habitantes/ km^2).

Figura 40. Producción anual de H_2 eólico por área en los distritos con más potencial

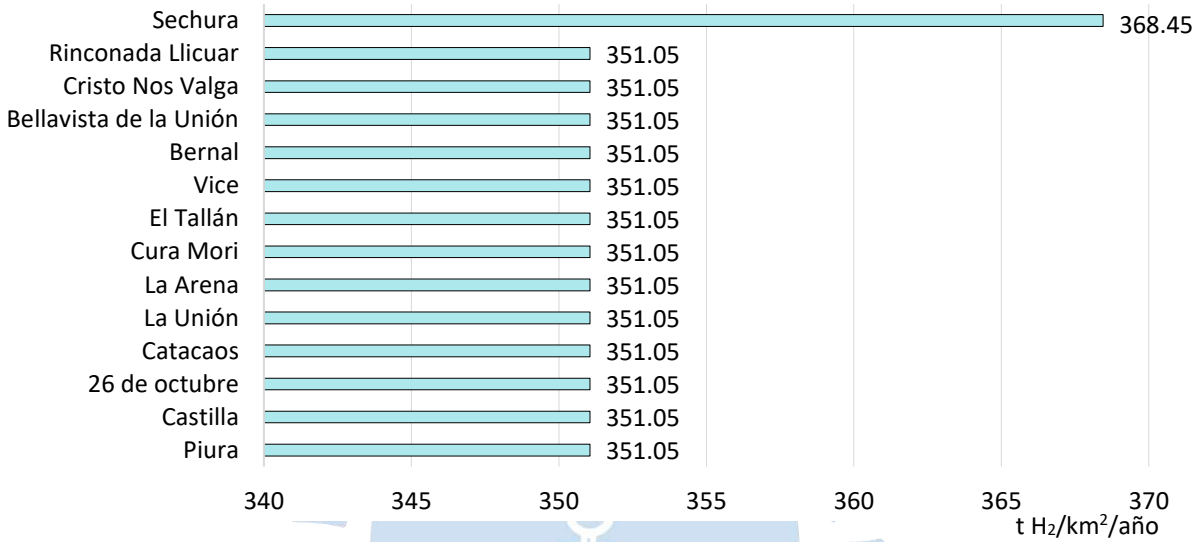
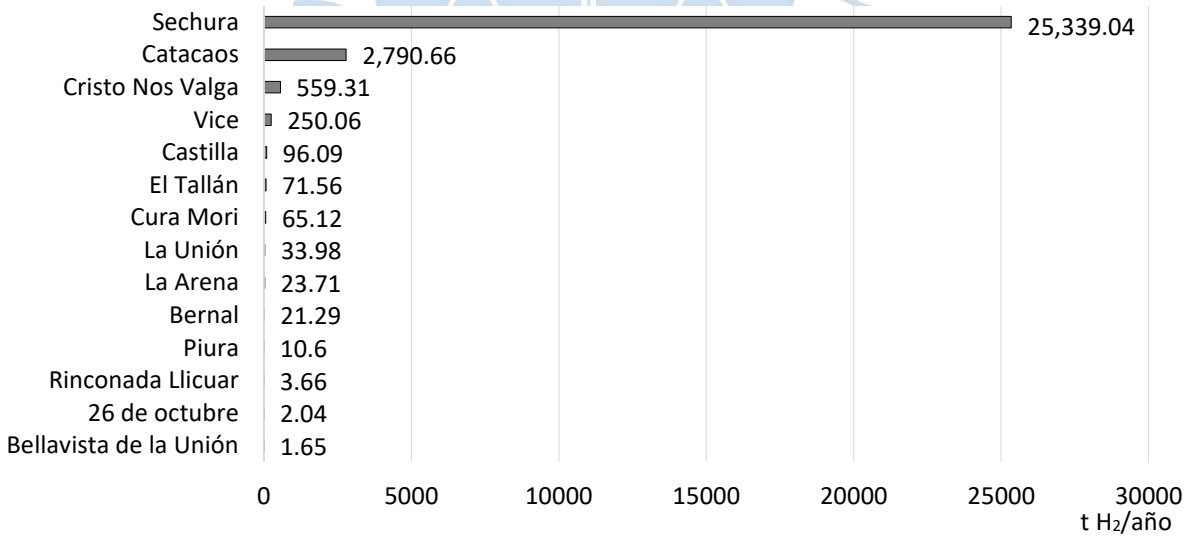


Figura 41. Producción anual de H_2 eólico en los distritos con más potencial

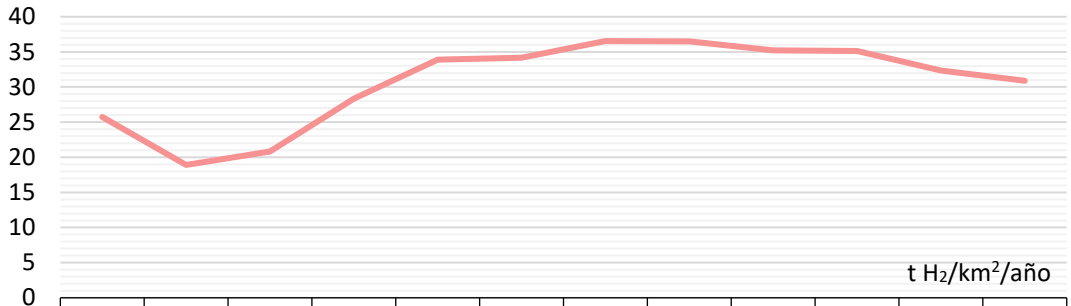


No obstante, resulta curioso que, la única planta eólica en la región de Piura no se encuentra ubicada en Sechura, sino en el distrito de Pariñas, el cual solo tiene un potencial de producción anual por área de 306.35 t H_2/km^2, ocasionando una diferencia de aproximadamente 62.1 t H_2/km^2 cubierto por aerogeneradores. Esto se debe a que en Sechura no se cuenta con una subestación que conecte la energía producida por la planta con el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

6.3.2 Producción en Sechura

Como se sabe, el principal inconveniente del uso de la energía eólica es la variación de la velocidad del viento a partir de las condiciones meteorológicas y temporales. Es ahí donde radica la importancia de identificar las fluctuaciones de la producción de H_2 eólico en el periodo de un año y determinar si los valores varían cerca de un rendimiento promedio.

Figura 42. Producción mensual de H_2 eólico por área en Sechura



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
H2 eólico	25.75	18.91	20.82	28.34	33.88	34.18	36.54	36.47	35.23	35.11	32.33	30.89

En la *figura 42*, se puede ver la gráfica correspondiente a la producción mensual de H_2 eólico por área en el distrito de Sechura e identificar las temporadas con los mayores y menores valores de producción. Los valores más altos se encuentran en la estación de invierno, es decir, desde junio hasta septiembre, siendo el pico máximo de 36.54 t H_2/km^2 por año. En cuanto a los mínimos, se pueden detectar en la estación de verano (de diciembre a marzo), con un pico mínimo de 18.91 t H_2/km^2 por año. Esto indicaría que se obtendría una diferencia de casi el doble entre ambos picos y, por lo tanto, sería recomendable el acompañar a la energía eólica con una fuente complementaria para la producción de hidrógeno.

6.4 Potencial de producción de H_2 solar a partir de la electrólisis del agua en Piura

En el caso de querer comparar el potencial de producción estimado de H_2 solar de Piura con el de otras provincias y países de Sudamérica, se caería una vez más en el error, al haber partido de condiciones diferentes. Es por ello por lo que, se sintetizaron las ecuaciones planteadas en el capítulo 4, con la finalidad de determinar a las variables relacionadas directamente con el cálculo del potencial de producción de H_2 solar. Estas fueron las características técnicas del tipo de panel fotovoltaico seleccionado y la irradiación global horizontal por año sobre la ubicación evaluada.

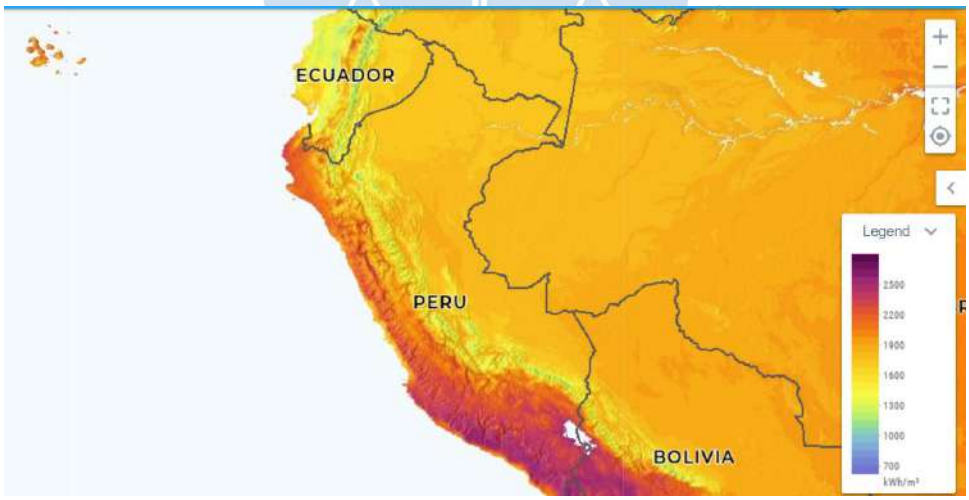
Es así como, al considerar el uso de un mismo tipo de panel fotovoltaico, se podría realizar una correcta comparación de potencial de producción de H_2 solar de Piura con el de otras regiones de Sudamérica (ver *figura 43*). Gracias al mapa brindado por *Global Solar Atlas*

en su página web[5], se puede determinar que la Costa oeste de Sudamérica, en donde se encuentra la región Piura, tiene los valores más altos de irradiación global horizontal por año (colores rojo y anaranjado). Además, si se compara a Piura con otras regiones del Perú (ver *figura 44*), se puede determinar que, a pesar de no tener los valores más altos de irradiación global horizontal, los cuales se encuentran en la Costa y Sierra sur de país, Piura sigue siendo una región con un alto potencial energético solar y, por lo tanto, de producción de H_2 solar.

Figura 43. Mapa de la irradiación global horizontal por año en Sudamérica

Nota: Global Solar Atlas

Figura 44. Mapa de la irradiación global horizontal por año en Perú



Nota: Global Solar Atlas

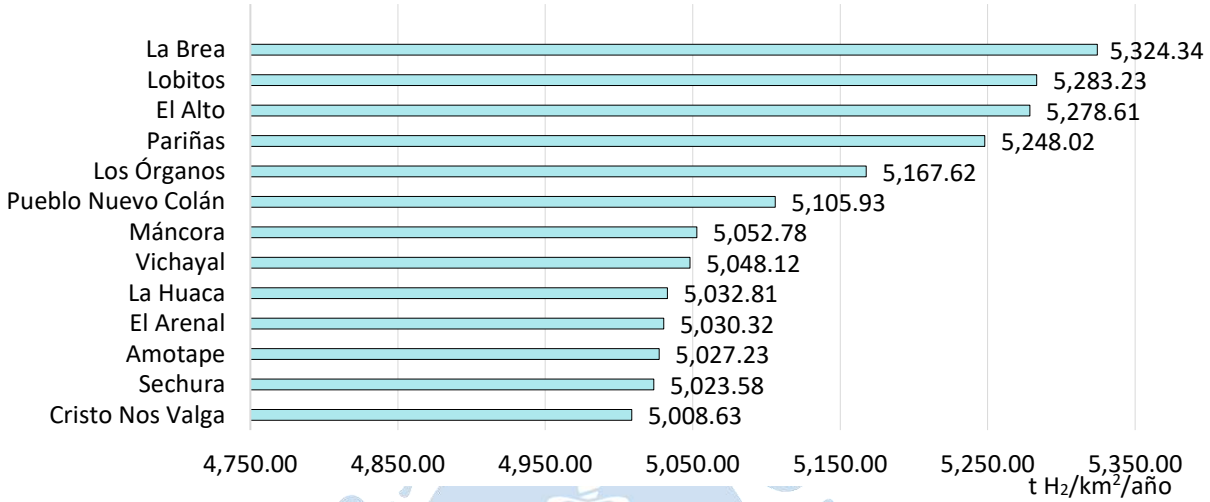
6.4.1 Distritos con mayor potencial

Como se mencionó anteriormente, el cálculo del potencial de producción de H_2 solar depende exclusivamente de dos factores: las características técnicas del tipo de panel fotovoltaico seleccionado y la irradiación global horizontal por año en el distrito evaluado; de

[5] https://globalsolaratlas.info/map

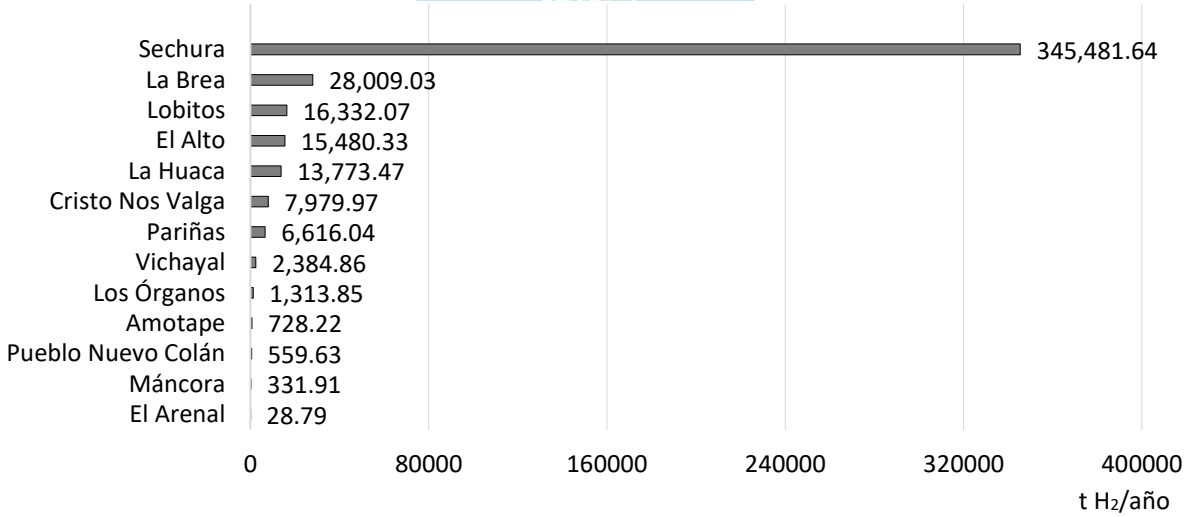
los cuales solo el primero es modificable por el hombre. Es relevante señalar que la estimación de la producción de H_2 solar en todos los distritos de la región Piura, se realizó a partir de la ficha técnica de los paneles fotovoltaicos ERA ESPSC 100M PERC (ver *Anexo C*) de 400 W.

Figura 45. Producción anual de H_2 solar por área en los distritos con más potencial



Ante esta situación y si se quisiera instalar una planta de H_2 solar en la región Piura, resulta necesario determinar los distritos con el mayor potencial. En la *figura 45* se puede ver la producción anual de H_2 eólico por área en los 13 distritos con más potencial de este tipo de energía de Piura. Entre ellos, el que más lograría producir sería el distrito de La Brea con 5,324.34 t H_2/km^2, seguido muy cerca por Lobitos y El Alto, con producciones de 5,283.234 t H_2/km^2 y 5,278.609 t H_2/km^2, respectivamente.

Figura 46. Producción anual de H_2 solar en los distritos con más potencial



En cuanto a la *figura 46*, se puede ver el resultado de la producción en cada distrito de la *figura 45,* simulando la colocación de paneles fotovoltaicos en toda su superficie útil ($Sup_{útil}$), factor dependiente de la densidad poblacional del mismo distrito. Además, en la *figura 46*, se puede observar que Sechura obtiene una ventaja significativa frente a los otros 12 distritos (345,481.64 t H_2/año), por los mismos motivos explicados para el H_2 eólico. No

obstante, Sechura no cuenta con una buena producción por área (5,023.48 t H_2/año), por lo que, solamente sería posible alcanzar una producción alta si se aprovechara una gran porción de la superficie útil de este distrito. Los distritos que le siguen son los primeros tres lugares de la anterior lista y en el mismo orden: La Brea (28,009.03 t H_2/año), Lobitos (16,332.07 t H_2/año) y El Alto (15,480.33 t H_2/año), por lo que serían los más idóneos para la colocación de una hipotética planta de H_2 solar.

6.4.2 Producción en La Brea

Al igual que con la energía eólica, la energía solar presenta el inconveniente de la variabilidad de su producción debido a las condiciones meteorológicas y temporales. Es por ello por lo que se deberían analizar las fluctuaciones en la producción de H_2 eólico en el periodo de un año, y determinar si se pudiera tener un rendimiento lo más constante posible.

En la *figura 47*, se puede ver la gráfica correspondiente a la producción mensual de H_2 solar por área en el distrito de La Brea e identificar las temporadas con los mayores y menores valores de producción. Los valores más altos se encuentran desde octubre hasta enero, siendo el pico máximo de 502.24 t H_2/km^2 por año. En cuanto a los mínimos, se pueden detectar en los meses de mayo a agosto, con un pico mínimo de 366.18 t H_2/km^2 por año. Esto indica que se obtendría un decaimiento no tan significativo entre ambos picos (aproximadamente del 27%), como en el caso de la energía eólica. Por lo que se concluye que no habría gran inconveniente con la producción mensual de H_2 solar, aunque es recomendable acompañar a los paneles fotovoltaicos de baterías o de una fuente de energía adicional, con la finalidad de combatir la variación de la irradiación solar en el periodo de un día.

Figura 47. Producción mensual de H_2 solar por área en La Brea

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
H2 solar	485.05	435.15	478.95	433.72	400.12	366.18	389.12	423.04	437.95	488.61	484.21	502.24

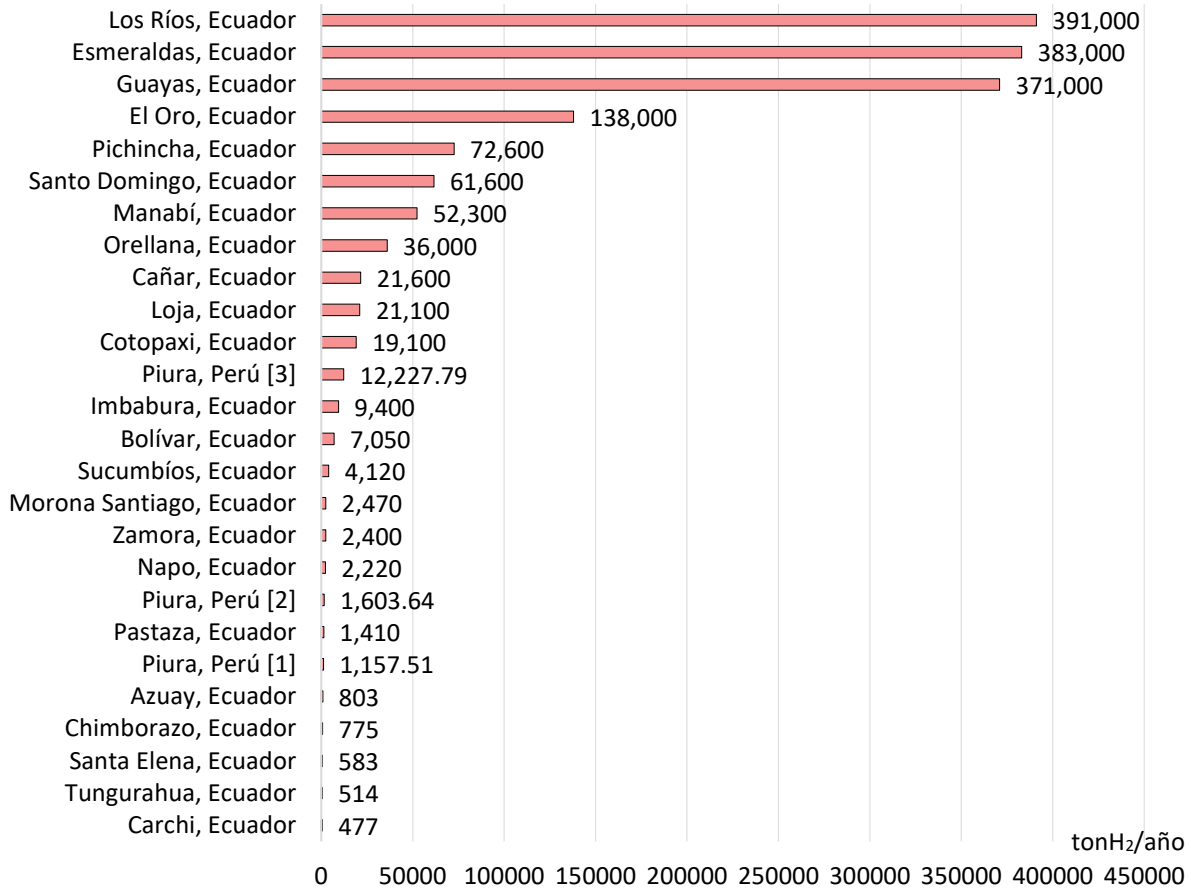
6.5 Potencial de producción de H_2 de biomasa a partir de la electrólisis y reformado

Para poder determinar si el potencial de producción de H_2 de biomasa en la región Piura es alto o bajo, este se debe comparar con los resultados de investigaciones realizadas en otras provincias y países de Sudamérica. Es por ello por lo que, se extrajeron los valores de producción presentes en (Posso, Siguencia, & Narváez, 2020), y se ubicaron en la *figura 48*. La

investigación anteriormente mencionada se centra en el análisis y estimación del potencial de producción de H_2 de biomasa en las provincias de Ecuador.

En la *figura 48* se puede ver que, Piura tiene un potencial de producción de H_2 de biomasa muy bajo en comparación con la mayoría de las provincias ecuatorianas, si solo se evalúa su posible producción a partir de la electrólisis del agua (1,157.9 t H_2/año), concretamente solo por encima de 5 provincias. Ahora, si en la comparación también se contabiliza el H_2 producido mediante el reformado de bioetanol a partir de la fermentación de residuos lignocelulósicos provenientes de las cosechas de banano, el potencial de producción de Piura no aumentaría mucho, subiendo solo dos puestos (1,603.64 t H_2/año).

Figura 48. Producción anual de H_2 de biomasa por área en Piura y en provincias de Ecuador



Nota: **Adaptado de Posso, Siguencia, & Narváez (2020)**

Indicación 1**: [1] solo el H_2 producido por la electrólisis del agua, [2] sin el H_2 producido a partir de la caña de azúcar y [3] considerando todo el potencial de H_2 de biomasa**

Ahora, si a lo anteriormente mencionado se le añadiera el H_2 producido mediante el reformado de bioetanol a partir de la fermentación de la caña de azúcar en Piura, se obtendría un potencial de producción de H_2 competitivo (12,227.79 t H_2/año). No obstante, como ya se describió en el capítulo 5, este último recurso no se encuentra disponible para su utilización

como fuente generadora de H_2, debido a que se utiliza para producir bioetanol y ser vendido directamente en el mercado en esta presentación.

Por último, es relevante señalar que los distritos de la provincia de Ayabaca serían los más idóneos para la instalación de una planta de H_2 de biomasa, debido a que según (Saavedra, Marcelo, Alamo, & Arrieta, 2017), Ayabaca tiene la mayor cantidad de cabezas de ganado vacuno (64,464) y porcino (20,753) en la región y de acuerdo con (Zegarra Tocto, 2012), es la provincia con la mayor producción de caña de azúcar en todo Piura, con casi el 60% del total.

Conclusiones

En el presente estudio se estimó el potencial de producción de H_2 verde a partir del método de producción de electrólisis del agua, durante el periodo de un año, en la región Piura y sus distritos. Se determinó que Piura tiene un potencial de producción de 947,202.28 t H_2, considerando una eficiencia de electrolizador del 75% y el uso de energía eólica, solar y de biomasa.

Sin embargo, es importante mencionar que este valor corresponde la producción simultánea de H_2 a partir de las tres fuentes mencionadas. Esto quiere decir, asumiendo disponibilidad total del área seleccionada en cada distrito para la producción de H_2 eólico y solar, así como, disponibilidad total de los residuos de cultivo y deyecciones de ganado para la producción de H_2 de biomasa. Este escenario, en la práctica, no es viable, por lo que el potencial calculado representa un valor máximo teórico de producción de hidrógeno verde en la región.

La mayoría de la producción de H_2 verde en Piura proviene de la energía solar, concretamente el 94.84%. Le sigue la producción de H_2 eólico, con un 5.04%, y, en menor medida, la producción de hidrógeno a partir de biomasa, con un 0.12%. Estos resultados pueden entenderse debido a que la generación de energía eléctrica a partir de energía solar conlleva menos requisitos que la generación a partir de energía eólica, la cual impone un requisito de velocidad mínima del viento, o que la generación a partir de biomasa, para la cual es necesaria una gran cantidad de ganado y residuos de cultivo disponibles en la región.

Otro punto por considerar es el impacto geográfico de las respectivas plantas de generación de energía. La construcción de plantas solares fotovoltaicas requiere de considerablemente menos área que los parques eólicos. Todo lo anterior sugiere que la energía solar es la fuente más favorable para la producción de hidrógeno verde en la región Piura.

El hidrógeno verde producido en Piura podría ser utilizado como vector energético en diversos sectores, tales como el sector transporte, residencial, industria, minería, entre otros. Actualmente, las principales fuentes utilizadas son derivados de combustibles fósiles, como el diésel, gasohol o el GLP, además de fuentes primarias, como la leña en el sector residencial. Estos combustibles no solo son menos eficientes que el hidrógeno, sino que, liberan grandes cantidades de gases contaminantes al ser quemados. Por esto, se plantea el uso de hidrógeno

verde como sustituto de las fuentes energéticas utilizadas actualmente, lo cual contribuiría a la descarbonización de la región y el país.

En esta investigación se ha estimado que el potencial de hidrógeno verde podría cubrir hasta el 210% del consumo total de energía en la región Piura, e incluso, podría cubrir, en teoría, hasta el 13.24% del consumo total de energía a nivel nacional. Las limitaciones obvias de este último escenario es el almacenamiento y transporte del hidrógeno a distintas partes del país, lo cual es técnicamente complicado, además de muy costoso. Sin embargo, estos datos permiten apreciar el gran potencial de hidrógeno verde con el que cuenta nuestra región, gracias a su abundancia de recursos energéticos renovables.

La sustitución de las fuentes energéticas de uso actual por hidrógeno verde producido localmente traería grandes beneficios. En primer lugar, se reducirían enormemente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principales acelerantes del calentamiento global. Se ha estimado que, con una producción del 20.85% del potencial total de H_2 verde, sería posible cubrir el total del consumo energético del sector transporte en la región. Esto reduciría las emisiones de GEI en 1.606 millones de t/año, lo cual significaría una reducción del 66.4% de las emisiones a nivel regional, y una reducción del 4.17% de las emisiones a nivel nacional. Otro beneficio inmediato sería disminuir la cantidad necesaria de importaciones de combustibles a nivel nacional, principalmente de petróleo crudo y de diésel.

Se ha identificado también como posible uso del hidrógeno verde su utilización en los procesos de refinado del petróleo, llevados a cabo en la refinería Talara. Específicamente, el hidrógeno de alta pureza es utilizado en procesos de desulfuración de los combustibles, es decir, es usado para reducir los contenidos de azufre en los productos como diésel y gasolina. Dado a que el hidrógeno utilizado actualmente en la refinería es producido a partir de reformado con vapor, el uso de hidrógeno verde, producido de fuentes renovables, contribuiría a reducir emisiones de gases contaminantes, como dióxido y monóxido de carbono, producto del proceso de reformado.

En esta investigación se ha encontrado que, el distrito de Sechura es el más idóneo para la instalación de una planta de H_2 eólico en Piura, gracias a que se podría producir 368.45 t H_2/km^2 o 25,339.04 t H_2 por año (considerando la superficie disponible del distrito). Estas estimaciones fueron realizadas asumiendo un aerogenerador SIEMENS Gamesa 2.1-114 de 2 MW.

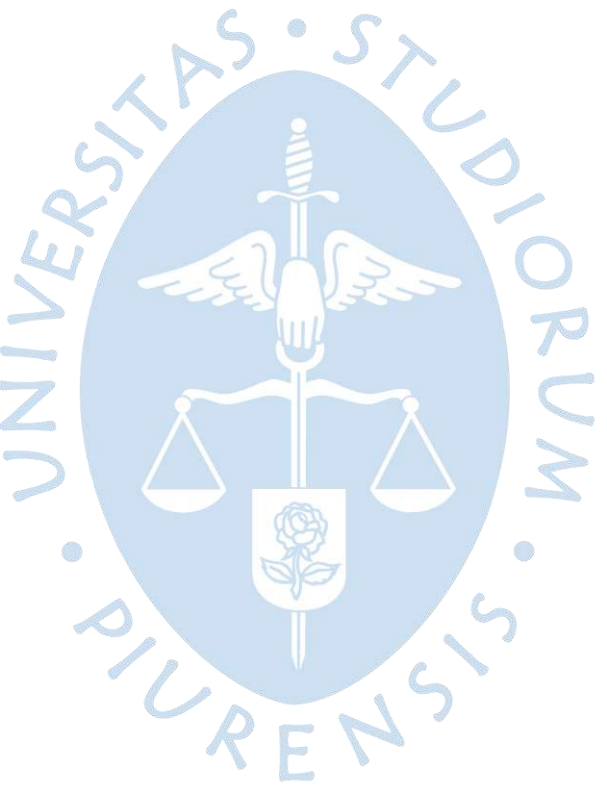
En cuanto a la instalación de una planta de H_2 solar, se encontró que el distrito más idóneo es La Brea, pues cuenta con un potencial de 5,324.34 t H_2/km^2 o 28,009.03 t H_2 por año (considerando la superficie disponible del distrito). Estas estimaciones fueron realizadas asumiendo el uso del panel fotovoltaico ERA ESPSC 100M PERC de 400 W.

Adicionalmente, se concluye que los distritos de la provincia de Ayabaca serían los más idóneos para la instalación de una planta de H_2 de biomasa, gracias a que en ella se encuentran

la mayor cantidad de cabezas de ganado vacuno (64,464) y porcino (20,753), y cuenta con la mayor producción de caña de azúcar (casi el 60%).

En cuanto al cálculo del potencial de producción de H_2 solar y eólico realizado en esta tesis, podría ser automatizado mediante un programa computacional, al estar compuesto en su mayoría por constantes y pocas variables. Así mismo, podría desarrollarse un API para la conexión del programa con las bases de datos empleadas en el presente informe. Esta conclusión podría considerarse como punto de partida para futuros trabajos.

Finalmente, se reconoce la necesidad de realizar un análisis técnico y económico detallado del potencial de producción de hidrógeno verde a partir de las distintas fuentes renovables y tecnologías disponibles actualmente. Esto es con el objetivo de determinar las tecnologías a usar, así como, la localización más idónea para producir hidrógeno verde en Piura.


UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Referencias bibliográficas

Ajayi-Oyakhire, O. (2012). *Hydrogen—Untapped Energy?* Institution of Gas Engineers and, Derbyshire, UK. Obtenido de https://www.scribd.com/document/404042241/Hydrogen-Untapped-Energy

Bedoya, A., Castrillón, J., Ramírez, J., & Vásquez, J. (2007). *Producción biológica de hidrógeno: una aproximación al estado del arte.* Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/26549002_Produccion_biologica_de_hidrogeno_una_aproximacion_al_estado_del_arte

Cardona, C. A., Montoya, M. I., Quintero, J. A., & Sánchez, Ó. J. (2015). *Evaluación económica del proceso de obtención de alcohol carburante a partir de caña de azúcar y maíz.*

Castro, S. (2015). *INSTALACIÓN Y ARRANQUE DE UN PROTOTIPO DE GASIFICACIÓN.* Tesis, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, México, D.F.

CENAGRO. (2012). *"IV Censo Nacional Agropecuario".* INEI.

Connelly, E., Penev, M., Milbrandt, A., Roberts, B., Melaina, M. W., & Gilroy, N. (2020). *Resource assessment for hydrogen production.*

Cordero, J. (2018). *Análisis comparativo entre el reformado de combustibles fósiles a partir de diésel y peróxido de hidrógeno.* Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla, Dep. Ingeniería energética, Sevilla. Obtenido de http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/91718/fichero/TFG-1718-CORDERO.pdf

Coronel, L. (2015). *Reformado de etanol para la producción de hidrógeno en una etapa empleando reactores de membrana.* Universidad Nacional del Litoral, Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica, Santa Fe, Argentina.

Da Silva, E. P., Neto, A. M., Ferreira, P. F., Camargo, J. C., Apolinário, F. R., & Pinto, C. S. (2005). *Analysis of hydrogen production from combined photovoltaics, wind energy and secondary hydroelectricity supply in Brazil.* Solar Energy, 78(5), 670-677.

Engie Impact. (2021). *Potencial del Hidrógeno Verde en el Perú.* Obtenido de https://h2.pe/uploads/20210908_H2-Peru_Estudio-final.pdf

Espinoza, L. (21 de octubre de 2020). *Conexión ESAN*. Obtenido de https://www.esan.edu.pe/conexion/actualidad/2020/10/21/gas-natural-en-el-peru-perspectivas-del-sector-hidrocarburos/

FAO. (2014). *RESIDUOS AGRÍCOLAS Y RESIDUOS GANADEROS - Manual de Usuario.* Bioenergía y Seguridad Alimentaria Évaluación Rápida (BEFS RA). Obtenido de https://www.fao.org/publications/card/es/c/20a4bb52-4d9b-4963-b8e5-73465c93cbdf/

Fatima, S., Kumar, A., & Singh, R. (2018). *Biohydrogen Production: A Potential Energy Resource.* India. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/330764155_Biohydrogen_Production_A_Potential_Energy_Resource

Fernández-Bolaños, C. (2005). *Energética del Hidrógeno, Contexto, Estado Actual y Perspectivas del Futuro.* Universidad de Sevilla, Departamento de Energética y Mecánica de Fluidos, Sevilla. Obtenido de http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3823/

Gondal, I. A., Masood, S. A., & Khan, R. (2018). *Green hydrogen production potential for developing a hydrogen economy in Pakistan.* international journal of hydrogen energy, 43(12), 6011-6039.

Goswami, D. Y. (2015). *Principles of Solar Engineering.* Boca Raton: CRC Press.

Hydrogen Council. (noviembre de 2017). Obtenido de http://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-Scaling-up_Hydrogen-Council_2017.compressed.pdf

IEA. (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities. Report prepared for the G20, Japan.* París.

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). *Estado de la población peruana 2020.* Lima. Obtenido de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1743/Libro.pdf

IRENA. (2018). *Hydrogen from Renewable Power: Technology Outlook.* International Renewable Energy Agency. Obtenido de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf

Jager, K., Isabella, O., & Smets, A. (2016). *Solar Energy: Fundamentals, Technology & Systems.* Cambridge: UIT Cambridge Ltd.

Letcher, T. (2017). *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines.* Londres: Academic Press.

Markets and Markets. (2018). *Hydrogen Generation Market worth $199.1 billion by 2023.* Northbrook. Obtenido de https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/hydrogen.asp

Milbrandt, A., & Mann, M. (2006). *Potential for Producing Hydrogen from Key Renewable Resources in the United States (No. NREL/TP-640-41134).* National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

MINAGRI. (2019). *Anuario de Producción Agrícola Nacional del 2019.*

Ministerio de Energía y Minas. (2021). *Balance Nacional de Energía 2019.* Obtenido de https://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=12&idPublicacion=633

Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2016). *A comparative overview of hydrogen production processes.* Cyprus University of Technology, Department of Electrical Engineering, Limassol, Cyprus. Obtenido de https://www.journals.elsevier.com/renewable-and-sustainable-energy-reviews

Perúpetro. (31 de marzo de 2020). *Perúpetro*. Obtenido de https://www.perupetro.com.pe/wps/wcm/connect/corporativo/f0020e22-c4e3-46a5-8548-f7cb9532e21d/Producci%C3%B3n+gas+m3.pdf?MOD=AJPERES&gas%20m3%20marzo%202020

Pitarch, M. (2020). *Dimensionado y diseño de un parque solar fotovoltaico de conexión a red para el suministro colectivo de la localidad de La Mata.* UNIVERSITAT JAUME I, ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA I CIÈNCIES, Castelló. Obtenido de http://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/191475

Posso, F., & Zambrano, J. (2014). *Estimation of electrolytic hydrogen production potential in Venezuela from renewable energies.* international journal of hydrogen energy. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.033

Posso, F., Sánchez, J., Espinoza, J. L., & Siguencia, J. (2016). *Preliminary estimation of electrolytic hydrogen production potential from renewable energies in Ecuador.* international journal of hydrogen energy,.

Posso, F., Siguencia, J., & Narváez, R. (2020). *Residual biomass-based hydrogen production: Potential and possible uses in Ecuador.* International Journal of Hydrogen Energy, 45(26), 13717-13725.

Rahmouni, S., Negrou, B., Settou, N., Dominguez, J., & Gouareh, A. (2017). *Prospects of hydrogen production potential from renewable resources in Algeria.* International Journal of Hydrogen Energy, 42(2), 1383-1395.

Rodriguez, C. (2002). *Sitio Argentino de Producción Animal.* Obtenido de http://www.produccion-animal.com.ar/sustentabilidad/05-residuos_ganaderos.pdf

Rondán, J. (2016). *Automatización, Operación y Caracterización de un Electrolizador AEM.* Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética, Sevilla.

Saavedra, R., Marcelo, D., Alamo, M. V., & Arrieta, W. (2017). *Estimación del Potencial Energético de Biomasa en la Región Piura Disponible para Procesos de Digestión Anaerobia.* Piura: In Proceedings of the 15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology:"Global Partnership for Development and Engineering Education". Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions.

Santa María, M., Ruíz Colorado, A., Cruz, G., & Jeoh, T. (2013). *Assesing the Feasibility of Biofuel Production from Lignocellulosic Banana Waste in Rural Agricultural Communities in Peru and Colombia.* Bioenergy Research 6 (3).

Schallenberg, J., Piernavieja, G., Hernández, C., Unamunzaga, P., García, R., & Díaz, M. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética.* Santa Cruz de Tenerife: Instituto Tecnológico de Canarias.

Schmerler, D., Velardo, J., Rodríguez, A., & Solís, B. (2019). *Energías renovables: experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética.* Lima: Osinergmin.

Siancas, W. (17 de abril de 2021). Piura es el principal exportador de alcohol en el Perú. Obtenido de https://larepublica.pe/sociedad/2021/04/17/piura-es-el-principal-exportador-de-alcohol-en-el-peru-lrnd/

SIEMENS ENERGY. (s.f.). *Hydrogen Solution*. Obtenido de https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/renewable-energy/hydrogen-solutions.html

Sigal, A., Leiva, E. P., & Rodríguez, C. R. (2014). *Assessment of the potential for hydrogen production from renewable resources in Argentina.* International journal of hydrogen energy, 39(16), 8204-8214.

Suárez, K. (2019). *Un poco de todo sobre el HIDRÓGENO.* Ciudad de México: Revista Ciencia. Obtenido de https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/vol-70-numero1/279-novedades-cientificas/343-un-poco-de-todo-sobre-el-hidrogeno

Subramani, V., Basile, A., & Veziroglu, T. (2015). *Compendium of Hydrogen Energy, Volume 1: Hydrogen Production and Purification.* Department in Oxford. Oxford: Elsevier.

Touili, S., Merrouni, A. A., Azouzoute, A., El Hassouani, Y., & Amrani, A. I. (2018). *A technical and economical assessment of hydrogen production potential from solar energy in Morocco.* international journal of hydrogen energy, 43(51), 22777-22796.

Uriol, J. (2020). *Estudio de la viabilidad técnica y económica de un sistema de suministro fotovoltaico con respaldo en la red eléctrica en la empresa El Chalán S.A.C.* Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Piura. Obtenido de https://hdl.handle.net/11042/4773

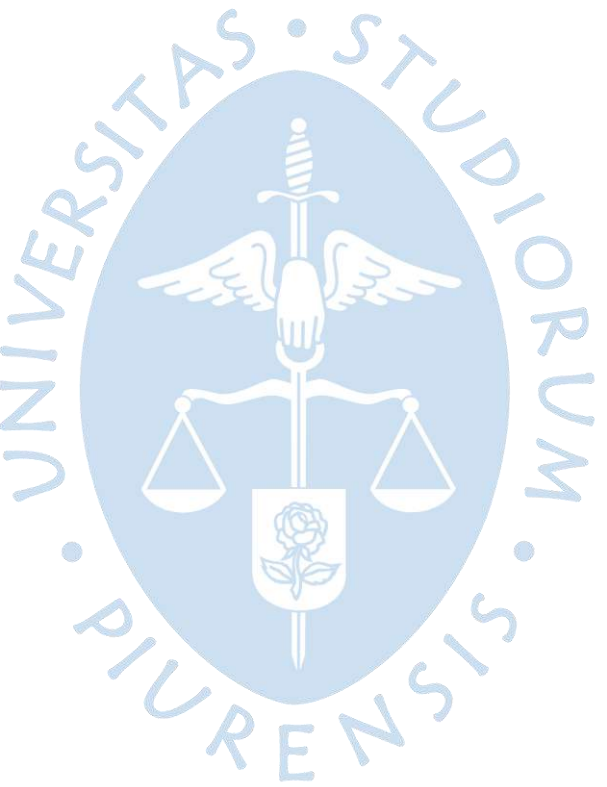
Vásquez, A., Tamayo, J., & Salvador, J. (2017). *La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático.* Lima: Osinergmin.

Villarroel Sáez, P., Rodríguez, C. R., & & Leiva, E. P. (2011). *Potencial de hidrógeno a partir de recursos eólicos en la zona central de Argentina: provincias de San Luis, Córdoba, La Pampa y Buenos Aires.* Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES). Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 15. Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/102896

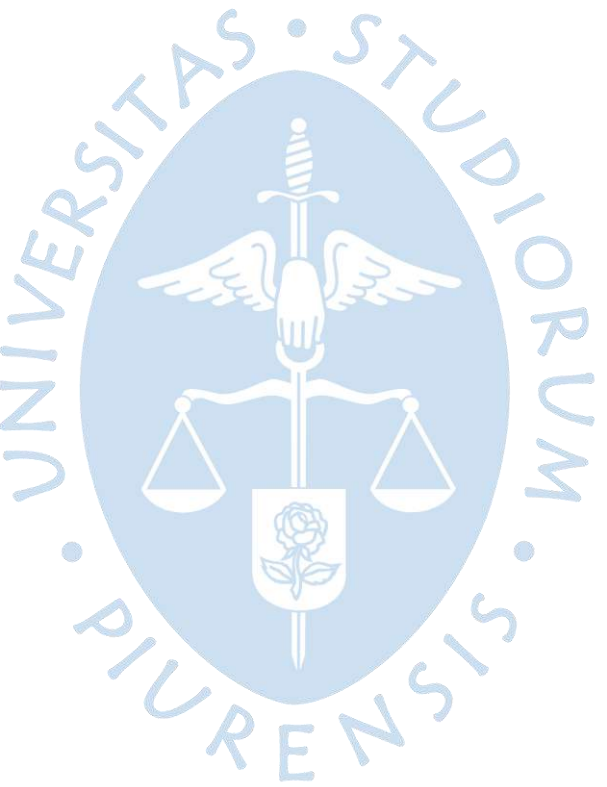
Wellinger, A., Murphy, J., & Baxte, D. (2013). *The Biogas Handbook.* Somerset: Woodhead Publishing Limited, IEA.

World Bank. (2020). *Green Hydrogen in Developing Countries.* Washington DC: World Bank Publications. Obtenido de http://documents1.worldbank.org/curated/en/953571597951239276/pdf/Green-Hydrogen-in-Developing-Countries.pdf

Zegarra Tocto, D. (2012). *La agroindustria de la caña de azúcar en Ayabaca: diagnóstico y propuesta de desarrollo sectorial.* Tesis para optar el título de Licenciado en Ingeniería Industrial y de Sistemas, Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Piura, Perú.


UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Apéndices


UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Apéndice A. Coordenadas geográficas, superficie y densidad poblacional de cada distrito de Piura

Coordenadas geográficas, superficie y densidad poblacional de los distritos de Talara					
Código	Distrito	Latitud	Longitud	Superficie [km^2]	Densidad poblacional [hab./km^2]
1	Pariñas	-4.577°	-81.272°	1,122	80.1
2	El Alto	-4.27°	-81.222°	479	14.7
3	Los Órganos	-4.18°	-81.129°	163	57.7
4	Máncora	-4.107°	-81.052°	97	132.9
5	La Brea	-4.654°	-81.306°	830	14.2
6	Lobitos	-4.453°	-81.277°	237	6.9

Coordenadas geográficas, superficie y densidad poblacional de los distritos de Sullana					
Código	Distrito	Latitud	Longitud	Superficie [km^2]	Densidad poblacional [hab./km^2]
7	Sullana	-4.904°	-80.685°	487	363
8	Bellavista	-4.89°	-80.681°	2	19,035.5
9	Ignacio Escudero	-4.846°	-80.872°	183	109.2
10	Querecotillo	-4.84°	-80.649°	282	89.7
11	Marcavelica	-4.882°	-80.703°	1,647	17.5
12	Miguel Checa	-4.902°	-80.816°	456	18.9
13	Salitral	-4.858°	-80.681°	31	214.9
14	Lancones	-4.633°	-80.546°	2,164	6.1

Coordenadas geográficas, superficie y densidad poblacional de los distritos de Paita					
Código	Distrito	Latitud	Longitud	Superficie [km^2]	Densidad poblacional [hab./km^2]
15	Paita	-5.089°	-81.114°	731	127.4
16	Pueblo Nuevo Colán	-4.91°	-81.059°	123	101
17	La Huaca	-4.91°	-80.962°	596	19.6
18	Vichayal	-4.865°	-81.071°	158	30.1
19	Amotape	-4.882°	-81.015°	61	37.9
20	Tamarindo	-4.878°	-80.976°	66	69
21	El Arenal	-4.883°	-81.026°	8	125.8

Coordenadas geográficas, superficie y densidad poblacional de los distritos de Piura					
Código	Distrito	Latitud	Longitud	Superficie [km^2]	Densidad poblacional [hab./km^2]
22	Piura	-5.173°	-80.641°	318	947.5
23	Castilla	-5.202°	-80.623°	660	217
24	26 de octubre	-5.185°	-80.67°	110	1,707.2
25	Catacaos	-5.266°	-80.676°	2,535	28.7
26	La Unión	-5.402°	-80.743°	209	194.3
27	Tambogrande	-4.931°	-80.339°	1,447	82.3
28	La Arena	-5.347°	-80.711°	168	223.9
29	Las Lomas	-4.658°	-80.243°	510	52.5
30	Cura Mori	-5.32°	-80.664°	196	95.1
31	El Tallán	-5.409°	-80.681°	106	46.8

Coordenadas geográficas, superficie y densidad poblacional de los distritos de Sechura					
Código	Distrito	Latitud	Longitud	Superficie [km²]	Densidad poblacional [hab./km²]
32	Sechura	-5.557°	-80.822°	5,731	7.5
33	Vice	-5.424°	-80.776°	334	42.2
34	Bernal	-5.459°	-80.742°	70	103.9
35	Bellavista de la Unión	-5.441°	-80.755°	15	286.9
36	Cristo Nos Valga	-5.498°	-80.741°	262	14.8
37	Rinconada Llicuar	-5.462°	-80.764°	19	163.8

Coordenadas geográficas, superficie y densidad poblacional de los distritos de Morropón					
Código	Distrito	Latitud	Longitud	Superficie [km²]	Densidad poblacional [hab./km²]
38	Chulucanas	-5.1°	-80.161°	862	88.4
39	Morropón	-5.187°	-79.971°	171	82.5
40	Chalaco	-5.041°	-79.796°	149	60.3
41	La Matanza	-5.214°	-80.091°	1,036	12.3
42	San Juan de Bigote	-5.319°	-79.788°	250	26.4
43	Yamango	-5.181°	-79.751°	217	44.1
44	Salitral	-5.342°	-79.832°	610	214.9
45	Buenos Aires	-5.267°	-79.968°	246	32.5
46	Sta. Catalina de Mossa	-5.103°	-79.885°	80	51.2
47	Santo Domingo	-5.029°	-79.876°	190	37.9

Coordenadas geográficas, superficie y densidad poblacional de los distritos de Ayabaca					
Código	Distrito	Latitud	Longitud	Superficie [km²]	Densidad poblacional [hab./km²]
48	Pacaipampa	-4.996°	-79.668°	970	25.6
49	Ayabaca	-4.64°	-79.715°	1,544	24.8
50	Frías	-4.932°	-79.947°	559	43.3
51	Suyo	-4.514°	-80°	1,069	11.5
52	Paimas	-4.627°	-79.946°	325	31.8
53	Sapillica	-4.779°	-79.982°	271	45
54	Lagunas	-4.79°	-79.845°	196	37
55	Jililí	-4.585°	-79.797°	99	28
56	Montero	-4.632°	-79.829°	130	51.4
57	Sícchez	-4.57°	-79.764°	34	55.8

Coordenadas geográficas, superficie y densidad poblacional de los distritos de Huancabamba					
Código	Distrito	Latitud	Longitud	Superficie [km²]	Densidad poblacional [hab./km²]
58	Huancabamba	-5.239°	-79.451°	445	68.3
59	Canchaque	-5.376°	-79.606°	313	26.3
60	Huarmaca	-5.568°	-79.524°	1,938	21.3
61	Sondorillo	-5.339°	-79.429°	230	46.8
62	Carmen de la Frontera	-5.148°	-79.428°	653	21.2
63	San Miguel de El Faique	-5.402°	-79.606°	208	43.2
64	Sondor	-5.315°	-79.41°	344	24.9
65	Lalaquiz	-5.216°	-79.68°	146	31.7

Apéndice B. Energía eléctrica por área generada a partir del uso de la energía eólica en cada distrito de Piura

Energía eléctrica por área generada a partir del uso de la energía eólica en cada distrito de Piura [GWh/km^2/mes]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pariñas	1.06	0.69	0.75	1.13	1.51	1.51	1.59	1.59	1.61	1.64	1.48	1.38
El Alto	1.16	0.64	0.65	1.12	1.66	1.74	1.85	1.84	1.81	1.86	1.72	1.59
Los Órganos	1.16	0.64	0.65	1.12	1.66	1.74	1.85	1.84	1.81	1.86	1.72	1.59
Máncora	1.16	0.64	0.65	1.12	1.66	1.74	1.85	1.84	1.81	1.86	1.72	1.59
La Brea	1.06	0.69	0.75	1.13	1.51	1.51	1.59	1.59	1.61	1.64	1.48	1.38
Lobitos	1.16	0.64	0.65	1.12	1.66	1.74	1.85	1.84	1.81	1.86	1.72	1.59
Sullana	1.12	0.70	0.68	0.96	1.35	1.45	1.61	1.66	1.65	1.65	1.51	1.42
Bellavista	1.12	0.70	0.68	0.96	1.35	1.45	1.61	1.66	1.65	1.65	1.51	1.42
Ignacio Escudero	1.12	0.70	0.68	0.96	1.35	1.45	1.61	1.66	1.65	1.65	1.51	1.42
Querecotillo	1.12	0.70	0.68	0.96	1.35	1.45	1.61	1.66	1.65	1.65	1.51	1.42
Marcavelica	1.12	0.70	0.68	0.96	1.35	1.45	1.61	1.66	1.65	1.65	1.51	1.42
Miguel Checa	1.12	0.70	0.68	0.96	1.35	1.45	1.61	1.66	1.65	1.65	1.51	1.42
Salitral (Sullana)	1.12	0.70	0.68	0.96	1.35	1.45	1.61	1.66	1.65	1.65	1.51	1.42
Lancones	1.12	0.70	0.68	0.96	1.35	1.45	1.61	1.66	1.65	1.65	1.51	1.42
Paita	1.21	0.89	1.00	1.28	1.50	1.46	1.54	1.56	1.57	1.59	1.47	1.42
Pueblo Nuevo Colán	1.06	0.69	0.75	1.13	1.51	1.51	1.59	1.59	1.61	1.64	1.48	1.38
La Huaca	1.12	0.70	0.68	0.96	1.35	1.45	1.61	1.66	1.65	1.65	1.51	1.42
Vichayal	1.06	0.69	0.75	1.13	1.51	1.51	1.59	1.59	1.61	1.64	1.48	1.38
Amotape	1.06	0.69	0.75	1.13	1.51	1.51	1.59	1.59	1.61	1.64	1.48	1.38
Tamarindo	1.12	0.70	0.68	0.96	1.35	1.45	1.61	1.66	1.65	1.65	1.51	1.42
El Arenal	1.06	0.69	0.75	1.13	1.51	1.51	1.59	1.59	1.61	1.64	1.48	1.38
Piura	1.31	0.95	1.00	1.31	1.62	1.69	1.83	1.84	1.77	1.77	1.62	1.55
Castilla	1.31	0.95	1.00	1.31	1.62	1.69	1.83	1.84	1.77	1.77	1.62	1.55
26 de octubre	1.31	0.95	1.00	1.31	1.62	1.69	1.83	1.84	1.77	1.77	1.62	1.55
Catacaos	1.31	0.95	1.00	1.31	1.62	1.69	1.83	1.84	1.77	1.77	1.62	1.55
La Unión	1.31	0.95	1.00	1.31	1.62	1.69	1.83	1.84	1.77	1.77	1.62	1.55
La Arena	1.31	0.95	1.00	1.31	1.62	1.69	1.83	1.84	1.77	1.77	1.62	1.55
Cura Mori	1.31	0.95	1.00	1.31	1.62	1.69	1.83	1.84	1.77	1.77	1.62	1.55
El Tallán	1.31	0.95	1.00	1.31	1.62	1.69	1.83	1.84	1.77	1.77	1.62	1.55
Sechura	1.34	0.98	1.08	1.47	1.76	1.78	1.90	1.90	1.83	1.83	1.68	1.61
Vice	1.31	0.95	1.00	1.31	1.62	1.69	1.83	1.84	1.77	1.77	1.62	1.55
Bernal	1.31	0.95	1.00	1.31	1.62	1.69	1.83	1.84	1.77	1.77	1.62	1.55
Bellavista de la Unión	1.31	0.95	1.00	1.31	1.62	1.69	1.83	1.84	1.77	1.77	1.62	1.55
Cristo Nos Valga	1.31	0.95	1.00	1.31	1.62	1.69	1.83	1.84	1.77	1.77	1.62	1.55
Rinconada Llicuar	1.31	0.95	1.00	1.31	1.62	1.69	1.83	1.84	1.77	1.77	1.62	1.55

Apéndice C. Superficie útil de cada distrito de la región Piura

Superficie útil de cada distrito de la región Piura					
Distrito	Superficie útil [km^2]	Distrito	Superficie útil [km^2]	Distrito	Superficie útil [km^2]
Pariñas	1.261	Castilla	0.274	Buenos Aires	0.681
El Alto	2.933	26 de octubre	0.006	Sta. Catalina de Mossa	0.141
Los Órganos	0.254	Catacaos	7.949	Santo Domingo	0.451
Máncora	0.066	La Unión	0.097	Pacaipampa	3.410
La Brea	5.261	Tambogrande	1.582	Ayabaca	5.603
Lobitos	3.091	La Arena	0.068	Frías	1.162
Sullana	0.121	Las Lomas	0.874	Suyo	8.366
Bellavista	0	Cura Mori	0.185	Paimas	0.920
Ignacio Escudero	0.151	El Tallán	0.204	Sapillica	0.542
Querecotillo	0.283	Sechura	68.772	Lagunas	0.477
Marcavelica	8.470	Vice	0.712	Jililí	0.318
Miguel Checa	2.171	Bernal	0.061	Montero	0.228
Salitral (Sullana)	0.013	Bellavista de la Unión	0.005	Sícchez	0.055
Lancones	31.928	Cristo Nos Valga	1.593	Huancabamba	0.586
Paita	0.516	Rinconada Llicuar	0.010	Canchaque	1.071
Pueblo Nuevo Colán	0.110	Chulucanas	0.878	Huarmaca	8.189
La Huaca	2.737	Morropón	0.187	Sondorillo	0.442
Vichayal	0.472	Chalaco	0.222	Carmen de la Frontera	2.772
Amotape	0.145	La Matanza	7.580	San Miguel de El Faique	0.433
Tamarindo	0.086	San Juan de Bigote	0.852	Sondor	1.243
El Arenal	0.006	Yamango	0.443	Lalaquiz	0.415
Piura	0.030	Salitral (Morropón)	0.255	**Total**	**190.42**

PIURENSIS

Apéndice D. Radiación media mensual en cada distrito de Piura

Radiación media mensual en cada distrito de Talara $G_{dm(\alpha\beta)}$ [Wh/(día*m²)]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pariñas	6,690	6,615	6,729	6,321	5,644	5,304	5,462	5,972	6,394	6,891	7,061	7,031
El Alto	6,594	6,504	6,657	6,292	5,651	5,411	5,582	6,140	6,463	6,992	7,129	7,134
Los Órganos	6,376	6,283	6,412	6,190	5,558	5,325	5,533	6,019	6,345	6,867	7,046	6,980
Máncora	5,998	6,031	6,255	6,069	5,545	5,259	5,480	5,966	6,262	6,776	6,889	6,732
La Brea	6,901	6,854	6,814	6,376	5,693	5,383	5,536	6,019	6,439	6,952	7,119	7,146
Lobitos	6,724	6,657	6,729	6,355	5,680	5,395	5,532	6,035	6,409	6,933	7,114	7,064

Radiación media mensual en cada distrito de Sullana $G_{dm(\alpha\beta)}$ [Wh/(día*m²)]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sullana	5,736	5,730	5,987	5,875	5,181	4,544	4,907	5,381	6,014	6,382	6,622	6,479
Bellavista	5,736	5,730	5,987	5,875	5,181	4,544	4,907	5,381	6,014	6,382	6,622	6,480
Ignacio Escudero	6,083	6,057	6,309	6,040	5,212	4,515	4,758	5,365	6,011	6,396	6,608	6,590
Querecotillo	5,829	5,679	6,007	5,853	5,145	4,511	4,713	5,271	5,966	6,331	6,512	6,489
Marcavelica	5,737	5,730	5,987	5,875	5,181	4,544	4,907	5,382	6,014	6,382	6,622	6,480
Miguel Checa	5,939	5,916	6,157	5,991	5,221	4,563	4,818	5,495	6,045	6,453	6,765	6,688
Salitral	5,823	5,801	6,042	5,906	5,161	4,477	4,816	5,304	5,983	6,326	6,532	6,473
Lancones	5,590	5,617	5,965	5,867	5,164	4,587	4,891	5,548	6,115	6,510	6,597	6,474

Radiación media mensual en cada distrito de Sechura $G_{dm(\alpha\beta)}$ [Wh/(día*m²)]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sechura	6,856	6,744	6,710	6,318	5,375	4,731	4,909	5,430	5,917	6,379	6,669	6,851
Vice	6,264	6,251	6416	6,096	5,080	4,359	4,415	4,951	5,659	6,079	6,367	6,536
Bernal	6,483	6,420	6,581	6,241	5,336	4,609	4,674	5,249	5,864	6,345	6,629	6,821
Bellavista de la Unión	6,502	6,513	6,567	6,232	5,244	4,563	4,673	5,193	5,853	6,346	6,627	6,801
Cristo Nos Valga	6,682	6,652	6,698	6,302	5,328	4,709	4,821	5,363	5,944	6,475	6,754	6,937
Rinconada Llicuar	6,502	6,513	6,567	6,232	5,244	4,563	4,673	5,193	5,853	6,346	6,627	6,801

Radiación media mensual en cada distrito de Sechura $G_{dm(\alpha\beta)}$ [Wh/(día*m²)]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Chulucanas	5,020	5,268	5,531	5,436	4,801	4,402	4,708	5,409	5,940	6,208	6,266	5,875
Morropón	4,402	4,690	4,987	5,008	4,458	4,207	4,615	5,294	5,801	5,938	5,890	5,524
Chalaco	3,398	3,468	3,705	3,770	4,143	4,658	5,187	5,581	5,774	5,385	5,263	4,557
La Matanza	4,671	4,958	5,359	5,302	4,671	4,289	4,639	5,372	5,893	6,094	6,116	5,688
San Juan de Bigote	4,156	4,449	4,695	4,699	4,474	4,358	4,918	5,523	5,813	5,897	5,946	5,420
Yamango	2,784	2,936	3,184	3,362	3,596	4,035	4,739	5,221	5,420	5,217	5,062	4,101
Salitral	4,337	4,715	4,989	4,935	4,619	4,495	4,966	5,521	5,895	6,035	6,062	5,505
Buenos Aires	4,649	4,976	5,312	5,225	4,632	4,366	4,709	5,406	5,911	6,108	6,151	5,676
Sta. Catalina de Mossa	3,494	3,713	4,011	4,033	4,125	4,446	5,094	5,601	5,862	5,766	5,628	4,864
Santo Domingo	2,934	3,112	3,398	3,571	4,053	4,447	5,021	5,520	5,602	5,273	5,153	4,178

Radiación media mensual en cada distrito de Piura $G_{dm(\alpha\beta)}$ [Wh/(día*m²)]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Piura	5,923	5,940	6,215	6,211	5,380	4,710	4,783	5,311	5,921	6,235	6,377	6,439
Castilla	6,366	6,251	6,349	6,156	5,305	4,726	4,728	5,372	6,048	6,511	6,734	6,825
26 de octubre	6,057	5,999	6,178	6,052	6,052	4,498	4,586	5,160	5,845	6,261	6,503	6,621
Catacaos	6,280	6,271	6,377	6,101	5,166	4,462	4,463	5,055	5,716	6,192	6,479	6,644
La Unión	6,288	6,216	6,454	6,155	5,132	4,414	4,483	5,092	5,756	6,152	6,419	6,607
Tambogrande	5,165	5,406	5,715	5,553	4,908	4,449	4,738	5,427	5,980	6,331	6,438	6,149
La Arena	6,361	6,373	6,476	6,167	5,195	4,594	4,524	5,123	5,773	6,283	6,588	6,700
Las Lomas	5,130	5,318	5,515	5,485	4,851	4,446	4,917	5,629	6,144	6,478	6,483	6,150
Cura Mori	6,326	6,329	6,461	6,165	5,239	4,598	4,600	5,237	5,859	6,349	6,567	6,663
El Tallán	6,253	6,183	6,442	6,147	5,114	4,444	4,466	5,149	5,764	6,172	6,392	6,582

Radiación media mensual en cada distrito de Paita $G_{dm(\alpha\beta)}$ [Wh/(día*m²)]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Paita	6,586	6,492	6,486	6,153	5,323	4,726	4,885	5,492	6,083	6,458	6,655	6,807
Pueblo Nuevo Colán	6,564	6,634	6,661	6,297	5,499	4,985	5,125	5,646	6,214	6,660	6,873	6,915
La Huaca	6,490	6,414	6,626	6,234	5,421	4,783	5,048	5,566	6,187	6,550	6,810	6,871
Vichayal	6,471	6,509	6,600	6,270	5,432	4,848	5,059	5,623	6,144	6,615	6,821	6,837
Amotape	6,435	6,469	6,545	6,240	5,420	4,825	5,051	5,570	6,133	6,554	6,822	6,862
Tamarindo	6,384	6,171	6,521	6,174	5,315	4,676	4,887	5,470	6,076	6,380	6,632	6,765
El Arenal	6,453	6,486	6,551	6,240	5,420	4,827	5,054	5,572	6,133	6,554	6,822	6,860

Radiación media mensual en cada distrito de Ayabaca $G_{dm(\alpha\beta)}$ [Wh/(día*m²)]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pacaipampa	5,239	5,029	4,972	4,969	5,001	4,990	5,344	5,777	6,011	5,736	5,834	5,654
Ayabaca	4,114	4,076	4,366	4,340	4,444	4,718	5,070	5,484	5,643	5,099	5,043	4,696
Frías	3,052	3,109	3,330	3,478	3,956	4,400	4,931	5,479	5,503	5,137	4,892	4,186
Suyo	4,321	4,530	4,805	4,865	4,585	4,511	5,092	5,826	6,221	6,377	6,289	5,715
Paimas	3,906	4,080	4,209	4,219	4,196	4,200	5,010	5,566	5,866	6,092	6,005	5,324
Sapillica	3,377	3,404	3,617	3,763	4,318	4,673	5,442	5,965	6,171	6,216	5,938	5,035
Lagunas	4,566	4,510	4,802	4,961	4,976	5,044	5,491	5,927	6,183	6,324	6,333	5,658
Jililí	3,742	3,989	4,328	4,206	4,266	4,615	5,253	5,746	5,989	5,961	5,820	4,944
Montero	3,279	3,336	3,588	3,637	3,676	4,104	4,089	5,312	5,685	5,573	5,411	4,769
Sícchez	3,742	3,989	4,328	4,206	4,266	4,615	5,253	5,747	6,045	5,991	5,820	4,952

Radiación media mensual en cada distrito de Huancabamba $G_{dm(\alpha\beta)}$ [Wh/(día*m²)]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Huancabamba	4,317	4,289	4,428	4,321	4,096	3,705	3,932	4,199	4,150	4,837	5,336	4,918
Canchaque	3,122	3,368	3,644	3,640	3,667	3,876	4,597	5,083	5,344	5,304	5,242	4,436
Huarmaca	3,519	3,418	3,584	3,633	3,899	4,408	5,116	5,584	5,821	5,806	5,639	4,952
Sondorillo	4,572	4,494	4543	4,537	4,227	3,963	4,153	4,421	4,446	5,020	5,489	5,234
Carmen de la Frontera	4,131	4,026	4,012	3,900	3,880	3,369	3,738	3,845	3,894	4,525	5,049	4,630
San Miguel de El Faique	3,369	3,609	3,944	3,953	3,860	4,040	4,691	5,192	5,540	5,459	5,478	4,616
Sondor	4,453	4,330	4,406	4,266	4,036	3,720	4,068	4,268	4,247	4,994	5,428	4,991
Lalaquiz	3,356	3,678	3,905	3,877	3,893	4,001	4,741	5,287	5,534	5,389	5,449	4,505

Apéndice E. Código de MATLAB® para el cálculo de la radiación media mensual

```
%Transposición de matriz de datos
DATOS = transpose(A);
%Ingreso de los valores de radiación por mes
H=0:23;
M=1:12;
Enero=DATOS(1,:);
Febrero=DATOS(2,:);
Marzo=DATOS(3,:);
Abril=DATOS(4,:);
Mayo=DATOS(5,:);
Junio=DATOS(6,:);
Julio=DATOS(7,:);
Agosto=DATOS(8,:);
Septiembre=DATOS(9,:);
Octubre=DATOS(10,:);
Noviembre=DATOS(11,:);
Diciembre=DATOS(12,:);
%Representación gráfica correspondiente a la irradiancia y
cálculo de la integral por mes
figure(2);
area(Enero);
trapz(Enero);
xlabel('Hora del día');
ylabel('Mes del año');
hold on
```

Apéndice F. Energía eléctrica por área generada a partir del uso de la energía solar en cada distrito de Piura

Energía eléctrica por área generada a partir de la solar en cada distrito de Talara [GWh/km^2/mes]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pariñas	24.45	21.8	24.6	22.36	20.6	18.76	19.96	21.83	22.62	25.2	24.97	25.7
El Alto	24.1	21.5	24.3	22.25	20.7	19.14	20.4	22.44	22.86	25.6	25.22	26.1
Los Órganos	23.3	20.7	23.4	21.89	20.3	18.83	20.22	22	22.44	25.1	24.92	25.5
Máncora	21.92	19.9	22.9	21.47	20.3	18.6	20.03	21.81	22.15	24.8	24.37	24.6
La Brea	25.22	22.6	24.9	22.55	20.8	19.04	20.23	22	22.77	25.4	25.18	26.1
Lobitos	24.58	22	24.6	22.48	20.8	19.08	20.22	22.06	22.67	25.3	25.16	25.8

Energía eléctrica por área generada a partir de la solar en cada distrito de Sullana [GWh/km^2/mes]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sullana	20.96	18.9	21.9	20.78	18.9	16.07	17.93	19.67	21.27	23.3	23.42	23.7
Bellavista	20.96	18.9	21.9	20.78	18.9	16.07	17.93	19.67	21.27	23.3	23.42	23.7
Ignacio Escudero	22.23	20	23.1	21.36	19	15.97	17.39	19.61	21.26	23.4	23.37	24.1
Querecotillo	21.3	18.7	22	20.7	18.8	15.96	17.23	19.26	21.1	23.1	23.03	23.7
Marcavelica	20.97	18.9	21.9	20.78	18.9	16.07	17.93	19.67	21.27	23.3	23.42	23.7
Miguel Checa	21.71	19.5	22.5	21.19	19.1	16.14	17.61	20.08	21.38	23.6	23.93	24.4
Salitral	21.28	19.2	22.1	20.89	18.9	15.84	17.6	19.39	21.16	23.1	23.1	23.7
Lancones	20.43	18.5	21.8	20.75	18.9	16.22	17.88	20.28	21.63	23.8	23.33	23.7

Energía eléctrica por área generada a partir de la solar en cada distrito de Piura [GWh/km^2/mes]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Piura	21.65	19.6	22.7	21.97	19.7	16.66	17.48	19.41	20.94	22.8	22.56	23.5
Castilla	23.27	20.6	23.2	21.77	19.4	16.72	17.28	19.63	21.39	23.8	23.82	24.9
26 de octubre	22.14	19.8	22.6	21.41	22.1	15.91	16.76	18.86	20.67	22.9	23	24.2
Catacaos	22.95	20.7	23.3	21.58	18.9	15.78	16.31	18.48	20.22	22.6	22.92	24.3
La Unión	22.98	20.5	23.6	21.77	18.8	15.61	16.38	18.61	20.36	22.5	22.7	24.1
Tambogrande	18.88	17.8	20.9	19.64	17.9	15.74	17.32	19.84	21.15	23.1	22.77	22.5
La Arena	23.25	21	23.7	21.81	19	16.25	16.53	18.72	20.42	23	23.3	24.5
Las Lomas	18.75	17.6	20.2	19.4	17.7	15.73	17.97	20.57	21.73	23.7	22.93	22.5
Cura Mori	23.12	20.9	23.6	21.81	19.1	16.26	16.81	19.14	20.72	23.2	23.23	24.4
El Tallán	22.85	20.4	23.5	21.74	18.7	15.72	16.32	18.82	20.39	22.6	22.61	24.1

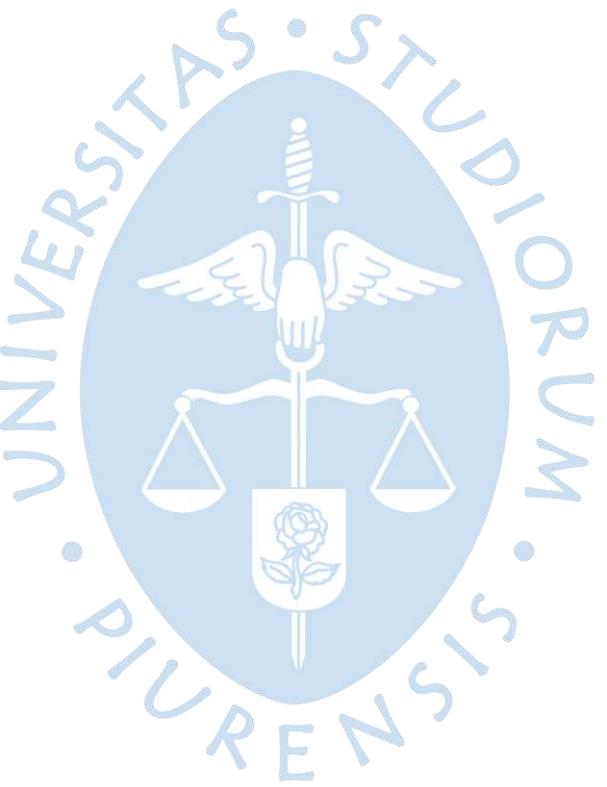
Energía eléctrica por área generada a partir de la solar en cada distrito de Morropón [GWh/km^2/mes]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Chulucanas	18.35	17.4	20.2	19.23	17.5	15.57	17.21	19.77	21.01	22.7	22.16	21.5
Morropón	16.09	15.5	18.2	17.71	16.3	14.88	16.87	19.35	20.52	21.7	20.83	20.2
Chalaco	12.42	11.4	13.5	13.33	15.1	16.48	18.96	20.4	20.42	19.7	18.62	16.7
La Matanza	17.07	16.4	19.6	18.75	17.1	15.17	16.96	19.63	20.84	22.3	21.63	20.8
San Juan de Bigote	15.19	14.7	17.2	16.62	16.4	15.41	17.97	20.19	20.56	21.6	21.03	19.8
Yamango	10.18	9.69	11.6	11.89	13.1	14.27	17.32	19.08	19.17	19.1	17.9	15
Salitral	15.85	15.6	18.2	17.46	16.9	15.9	18.15	20.18	20.85	22.1	21.44	20.1
Buenos Aires	16.99	16.4	19.4	18.48	16.9	15.44	17.21	19.76	20.91	22.3	21.76	20.7
Sta. Catalina de Mossa	12.77	12.3	14.7	14.26	15.1	15.73	18.62	20.47	20.73	21.1	19.91	17.8
Santo Domingo	10.72	10.3	12.4	12.63	14.8	15.73	18.35	20.18	19.81	19.3	18.23	15.3

Energía eléctrica por área generada a partir de la solar en cada distrito de Paita [GWh/km^2/mes]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Paita	24.07	21.4	23.7	21.76	19.5	16.72	17.85	20.07	21.52	23.6	23.54	24.9
Pueblo Nuevo Colán	23.99	21.9	24.3	22.27	20.1	17.63	18.73	20.64	21.98	24.3	24.31	25.3
La Huaca	23.72	21.2	24.2	22.05	19.8	16.92	18.45	20.34	21.88	23.9	24.09	25.1
Vichayal	23.65	21.5	24.1	22.18	19.9	17.15	18.49	20.55	21.73	24.2	24.13	25
Amotape	23.52	21.4	23.9	22.07	19.8	17.07	18.46	20.36	21.69	24	24.13	25.1
Tamarindo	23.33	20.4	23.8	21.84	19.4	16.54	17.86	19.99	21.49	23.3	23.46	24.7
El Arenal	23.59	21.4	23.9	22.07	19.8	17.07	18.47	20.37	21.69	24	24.13	25.1

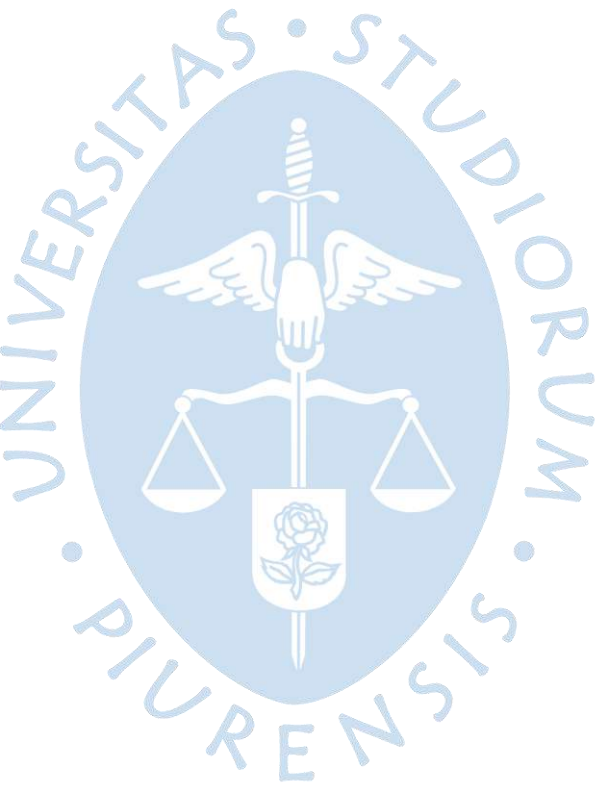
Energía eléctrica por área generada a partir de la solar en cada distrito de Sechura [GWh/km^2/mes]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sechura	25.06	22.3	24.5	22.35	19.6	16.73	17.94	19.85	20.93	23.3	23.59	25
Vice	22.89	20.6	23.4	21.56	18.6	15.42	16.14	18.1	20.02	22.2	22.52	23.9
Bernal	23.69	21.2	24.1	22.07	19.5	16.3	17.08	19.18	20.74	23.2	23.45	24.9
Bellavista de la Unión	23.76	21.5	24	22.04	19.2	16.14	17.08	18.98	20.7	23.2	23.44	24.9
Cristo Nos Valga	24.42	22	24.5	22.29	19.5	16.66	17.62	19.6	21.02	23.7	23.89	25.4
Rinconada Llicuar	23.76	21.5	24	22.04	19.2	16.14	17.08	18.98	20.7	23.2	23.44	24.9

Energía eléctrica por área generada a partir de la solar en cada distrito de Ayabaca [GWh/km^2/mes]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pacaipampa	19.15	16.6	18.2	17.58	18.3	17.65	19.53	21.11	21.26	21	20.63	20.7
Ayabaca	15.04	13.5	16	15.35	16.2	16.69	18.53	20.04	19.96	18.6	17.84	17.2
Frías	11.15	10.3	12.2	12.3	14.5	15.56	18.02	20.03	19.46	18.8	17.3	15.3
Suyo	15.79	15	17.6	17.21	16.8	15.96	18.61	21.29	22	23.3	22.24	20.9
Paimas	14.28	13.5	15.4	14.92	15.3	14.86	18.31	20.34	20.75	22.3	21.24	19.5
Sapillica	12.34	11.2	13.2	13.31	15.8	16.53	19.89	21.8	21.83	22.7	21	18.4
Lagunas	16.69	14.9	17.6	17.55	18.2	17.84	20.07	21.66	21.87	23.1	22.4	20.7
Jililí	13.68	13.2	15.8	14.88	15.6	16.32	19.2	21	21.18	21.8	20.59	18.1
Montero	11.98	11	13.1	12.86	13.4	14.52	14.94	19.41	20.11	20.4	19.14	17.4
Sícchez	13.68	13.2	15.8	14.88	15.6	16.32	19.2	21	21.38	21.9	20.59	18.1

Energía eléctrica por área generada a partir de la solar en cada distrito de Huancabamba [GWh/km^2/mes]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Huancabamba	15.78	14.2	16.2	15.28	15	13.1	14.37	15.35	14.68	17.7	18.87	18
Canchaque	11.41	11.1	13.3	12.87	13.4	13.71	16.8	18.58	18.9	19.4	18.54	16.2
Huarmaca	12.86	11.3	13.1	12.85	14.3	15.59	18.7	20.41	20.59	21.2	19.95	18.1
Sondorillo	16.71	14.8	16.6	16.05	15.4	14.02	15.18	16.16	15.73	18.3	19.41	19.1
Carmen de la Frontera	15.1	13.3	14.7	13.79	14.2	11.92	13.66	14.05	13.77	16.5	17.86	16.9
San Miguel de El Faique	12.31	11.9	14.4	13.98	14.1	14.29	17.15	18.98	19.59	20	19.38	16.9
Sondor	16.28	14.3	16.1	15.09	14.8	13.16	14.87	15.6	15.02	18.3	19.2	18.2
Lalaquiz	12.27	12.1	14.3	13.71	14.2	14.15	17.33	19.32	19.57	19.7	19.27	16.5


UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Anexos


UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Anexo A. Velocidad del viento media mensual en cada distrito de Piura

Velocidad del viento media mensual en cada distrito de Talara [m/s]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pariñas	4.69	4.16	4.13	4.89	5.52	5.62	5.67	5.68	5.82	5.77	5.56	5.28
El Alto	4.86	4.06	3.95	4.87	5.82	6.12	6.24	6.23	6.31	6.26	6.05	5.67
Los Órganos	4.86	4.06	3.95	4.87	5.82	6.12	6.24	6.23	6.31	6.26	6.05	5.67
Máncora	4.86	4.06	3.95	4.87	5.82	6.12	6.24	6.23	6.31	6.26	6.05	5.67
La Brea	4.69	4.16	4.13	4.89	5.52	5.62	5.67	5.68	5.82	5.77	5.56	5.28
Lobitos	4.86	4.06	3.95	4.87	5.82	6.12	6.24	6.23	6.31	6.26	6.05	5.67

Velocidad del viento media mensual en cada distrito de Sullana [m/s]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sullana	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Bellavista	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Ignacio Escudero	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Querecotillo	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Marcavelica	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Miguel Checa	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Salitral	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Lancones	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36

Velocidad del viento media mensual en cada distrito de Ayabaca [m/s]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pacaipampa	2.49	2.39	2.25	2.36	2.72	3.47	3.85	3.69	2.95	2.57	2.68	2.63
Ayabaca	2.49	2.39	2.25	2.36	2.72	3.47	3.85	3.69	2.95	2.57	2.68	2.63
Frías	2.49	2.39	2.25	2.36	2.72	3.47	3.85	3.69	2.95	2.57	2.68	2.63
Suyo	2.49	2.39	2.25	2.36	2.72	3.47	3.85	3.69	2.95	2.57	2.68	2.63
Paimas	2.49	2.39	2.25	2.36	2.72	3.47	3.85	3.69	2.95	2.57	2.68	2.63
Sapillica	2.49	2.39	2.25	2.36	2.72	3.47	3.85	3.69	2.95	2.57	2.68	2.63
Lagunas	2.49	2.39	2.25	2.36	2.72	3.47	3.85	3.69	2.95	2.57	2.68	2.63
Jililí	2.49	2.39	2.25	2.36	2.72	3.47	3.85	3.69	2.95	2.57	2.68	2.63
Montero	2.49	2.39	2.25	2.36	2.72	3.47	3.85	3.69	2.95	2.57	2.68	2.63
Sícchez	2.49	2.39	2.25	2.36	2.72	3.47	3.85	3.69	2.95	2.57	2.68	2.63

Velocidad del viento media mensual en cada distrito de Morropón [m/s]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Chulucanas	4.37	4.02	3.86	4.16	4.40	4.37	4.40	4.55	4.77	4.75	4.67	4.59
Morropón	2.78	2.69	2.53	2.60	2.86	3.48	3.80	3.63	3.03	2.76	2.87	2.86
Chalaco	2.78	2.69	2.53	2.60	2.86	3.48	3.80	3.63	3.03	2.76	2.87	2.86
La Matanza	4.37	4.02	3.86	4.16	4.40	4.37	4.40	4.55	4.77	4.75	4.67	4.59
San Juan de Bigote	2.78	2.69	2.53	2.60	2.86	3.48	3.80	3.63	3.03	2.76	2.87	2.86
Yamango	2.78	2.69	2.53	2.60	2.86	3.48	3.80	3.63	3.03	2.76	2.87	2.86
Salitral	2.78	2.69	2.53	2.60	2.86	3.48	3.80	3.63	3.03	2.76	2.87	2.86
Buenos Aires	2.78	2.69	2.53	2.60	2.86	3.48	3.80	3.63	3.03	2.76	2.87	2.86
Sta. Catalina de Mossa	2.78	2.69	2.53	2.60	2.86	3.48	3.80	3.63	3.03	2.76	2.87	2.86
Santo Domingo	2.78	2.69	2.53	2.60	2.86	3.48	3.80	3.63	3.03	2.76	2.87	2.86

Velocidad del viento media mensual en cada distrito de Paita [m/s]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Paita	4.95	4.55	4.58	5.17	5.50	5.52	5.58	5.63	5.74	5.68	5.54	5.36
Pueblo Nuevo Colán	4.69	4.16	4.13	4.89	5.52	5.62	5.67	5.68	5.82	5.77	5.56	5.28
La Huaca	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
Vichayal	4.69	4.16	4.13	4.89	5.52	5.62	5.67	5.68	5.82	5.77	5.56	5.28
Amotape	4.69	4.16	4.13	4.89	5.52	5.62	5.67	5.68	5.82	5.77	5.56	5.28
Tamarindo	4.79	4.18	4.02	4.56	5.23	5.51	5.72	5.81	5.89	5.80	5.63	5.36
El Arenal	4.69	4.16	4.13	4.89	5.52	5.62	5.67	5.68	5.82	5.77	5.56	5.28

Velocidad del viento media mensual en cada distrito de Piura [m/s]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Piura	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Castilla	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
26 de octubre	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Catacaos	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
La Unión	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Tambogrande	3.89	3.48	3.26	3.40	3.65	3.64	3.68	3.87	4.17	4.29	4.33	4.20
La Arena	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Las Lomas	3.89	3.48	3.26	3.40	3.65	3.64	3.68	3.87	4.17	4.29	4.33	4.20
Cura Mori	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
El Tallán	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61

Velocidad del viento media mensual en cada distrito de Sechura [m/s]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sechura	5.20	4.74	4.73	5.55	6.01	6.21	6.38	6.37	6.36	6.18	5.96	5.71
Vice	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Bernal	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Bellavista de la Unión	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Cristo Nos Valga	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61
Rinconada Llicuar	5.15	4.67	4.58	5.22	5.74	5.98	6.18	6.21	6.18	6.04	5.84	5.61

Velocidad del viento media mensual en cada distrito de Huancabamba [m/s]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Huancabamba	2.73	2.65	2.74	3.07	3.62	4.71	5.15	5.04	4.06	2.94	2.51	2.64
Canchaque	2.78	2.69	2.53	2.60	2.86	3.48	3.80	3.63	3.03	2.76	2.87	2.86
Huarmaca	3.18	3.06	2.87	2.87	2.94	3.14	3.26	3.20	3.06	3.14	3.28	3.23
Sondorillo	2.73	2.65	2.74	3.07	3.62	4.71	5.15	5.04	4.06	2.94	2.51	2.64
Carmen de la Frontera	2.73	2.65	2.74	3.07	3.62	4.71	5.15	5.04	4.06	2.94	2.51	2.64
San Miguel de El Faique	2.78	2.69	2.53	2.60	2.86	3.48	3.80	3.63	3.03	2.76	2.87	2.86
Sondor	2.73	2.65	2.74	3.07	3.62	4.71	5.15	5.04	4.06	2.94	2.51	2.64
Lalaquiz	2.78	2.69	2.53	2.60	2.86	3.48	3.80	3.63	3.03	2.76	2.87	2.86

Nota: **Adaptado de NASA POWER *Data Access Viewer***

Anexo B. Ficha técnica del aerogenerador elegido

Presencia consolidada con una destacable cartera de pedidos

SG 2.1-114: máxima eficiencia en emplazamientos de vientos medios y bajos

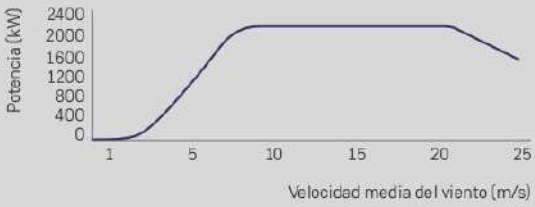
Siemens Gamesa, su aliado tecnológico de confianza

Una de las claves del éxito de Siemens Gamesa es el desarrollo constante de nuevos y avanzados productos adaptados al caso de negocio de cada cliente. Nos esforzamos por ofrecer las mejores soluciones tecnológicas para cada proyecto, al tiempo que reducimos el Coste de Energía para garantizar retornos a largo plazo.

Por esta razón, ponemos a disposición de nuestros clientes un catálogo de producto optimizado y eficiente, avalado por tecnologías ampliamente validadas, y por nuestras mejores credenciales:

- La confianza de nuestros clientes: 110 GW instalados en todo el mundo.
- Una experiencia acreditada a lo largo de más de 40 años de actividad que convierte a Siemens Gamesa en un referente para sus proyectos eólicos.
- Y el reconocimiento del sector.

Curva de potencia SG 2.1-114



Catálogo de alturas de torre

Un referente en su segmento

Con un rotor de 114 metros, diferentes opciones de torre (desde 68 hasta 153 metros) y una potencia nominal de 2.1 MW, el aerogenerador SG 2.1-114 [1] constituye una de las propuestas de producto de la plataforma Siemens Gamesa 2.X.

Este modelo es un referente por su baja densidad de potencia, lo que permite obtener la máxima rentabilidad en emplazamientos de vientos bajos y medios. Así lo acredita una sólida presencia, con más de 6.800 MW instalados en todo el mundo, y una significativa cartera de pedidos.

Adicionalmente dispone de soluciones optimizadas para localizaciones en Clase S que permiten su adaptación a las condiciones medioambientales de mercados como India, China y Brasil.

Mínima densidad de potencia, máxima rentabilidad

Con una pala de 56 metros de longitud y perfiles aerodinámicos desarrollados con tecnologías de última generación, SG 2.1-114 garantiza la máxima producción de energía junto con niveles de emisión de ruido reducidos gracias a la tecnología de bordes serrados DinoTails® Next Generation.

Asimismo mediante la aplicación de tecnologías exhaustivamente validadas y certificadas en la plataforma Siemens Gamesa 2.X, esta turbina reduce de forma significativa el Coste de Energía.

Versatilidad y amplia experiencia

Con más de 60 GW instalados en el segmento de 2.0-2.9 MW y niveles de disponibilidad superiores al 98%, Siemens Gamesa 2.X destaca por su versatilidad y máximo rendimiento en todo tipo de emplazamientos y condiciones de viento. Su catálogo de rotores y de alturas de torre (63-153 metros), así como diferentes opciones ambientales conforman una excelente propuesta para extraer la máxima energía del viento con la mayor eficiencia.

[1] Modelo comercializado como SG 2.0-114 en ciertos mercados.

Especificaciones técnicas

Datos generales	
Potencia nominal	2.1 MW
Clase de viento	IEC IIA/IIIA/S
Control	Pitch y velocidad variable
Temperatura operativa estándar	Rango desde -20°C hasta 40°C [2]

Rotor	
Diámetro	114 m
Área de barrido	10.207 m²
Densidad de potencia	205,74 W/m²

Palas	
Longitud	56 m
Perfil	Siemens Gamesa
Material	Fibra de vidrio reforzada con resina de epoxi o poliéster

Torre	
Tipo	Diferentes tecnologías disponibles
Altura	68, 80, 93, 106, 125, 127, 153 m y según emplazamiento

Multiplicadora	
Tipo	3 etapas

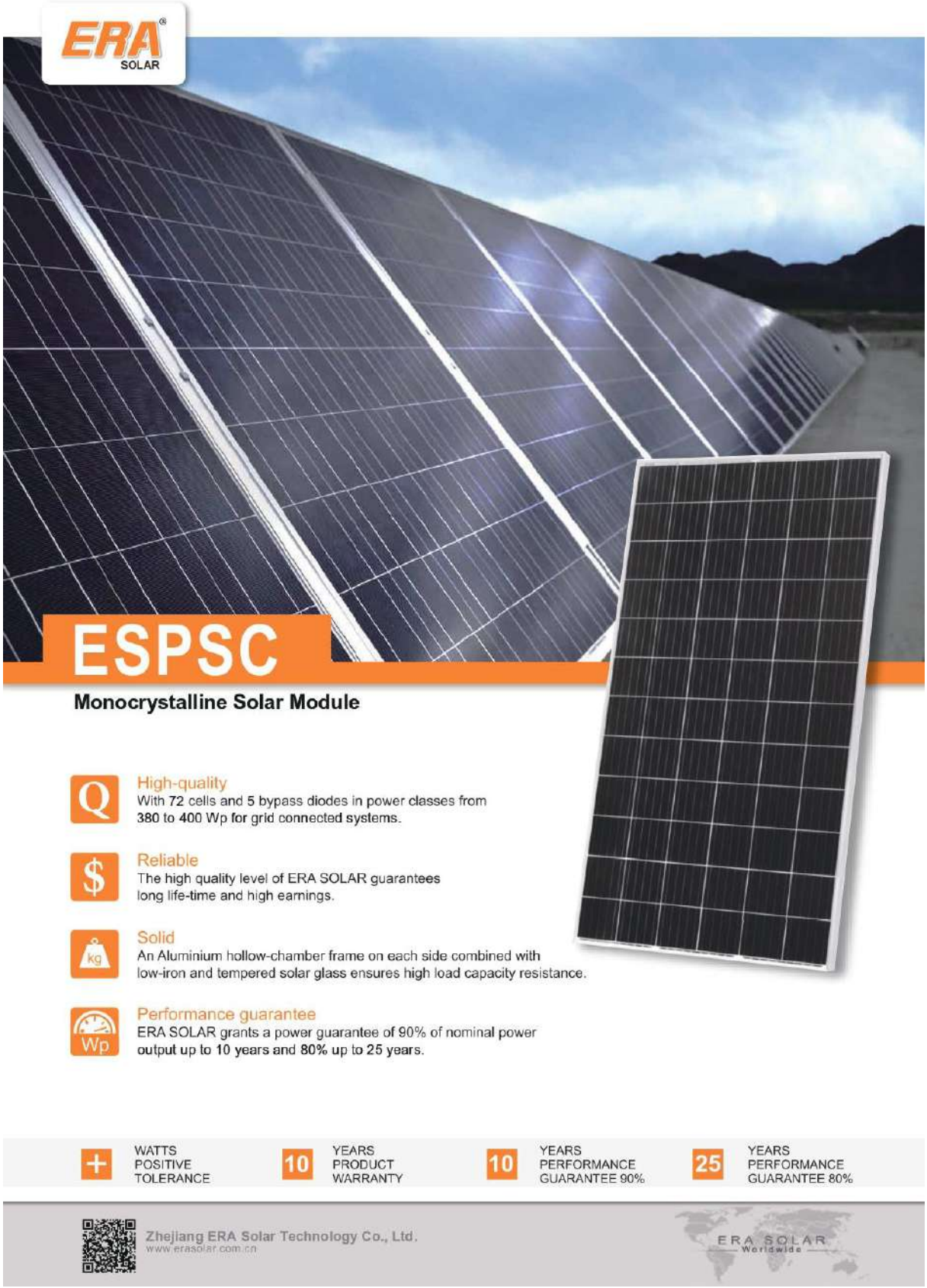
Generador	
Tipo	Doblemente alimentado
Tensión	690 V AC
Frecuencia	50 Hz/60 Hz
Clase de protección	IP 54
Factor de potencia	0,95 CAP-0,95 IND en todo el rango de potencias [3]

[2] Diferentes versiones y kits opcionales para adaptar la máquina a altas o bajas temperaturas y ambientes salino y polvoriento.

[3] Factor de potencia en bornas de salida del generador en el lado de baja tensión antes de la entrada del transformador.

Nota: **Adaptado de SIEMENS Gamesa y extraído de https://www.siemensgamesa.com/es-es/products-and-services/onshore/aerogenerador-sg-2-1-114**

Anexo C. Ficha técnica de los paneles fotovoltaicos elegidos



ESPSC

Monocrystalline Solar Module

SPECIFICATIONS	
Dimensions	1979 x 1002 x 40mm
Weight	22.5 kg
Frame	Aluminium hollow-chamber frame on each side
Glass	Low-iron and tempered glass 3.2 mm
Cells	72 pcs Mono PERC (158.75 x158.75 mm)
Cell Embedding	EVA
Back-Foil	FEVE / PET / FEVE
Junction Box	TÜV certified
Cable	4 mm² solar cable 2 x 900 mm or Customized Length
Temperature Range	-40°C ... +85°C
Load Capacity	5400 Pa(IEC 61215)40mm
Application class	Class A
Electrical protection class	Class II
Fire safety class	Class C
Product warranty	10 years
Power Guarantee	10 years 90% 25 years 80%

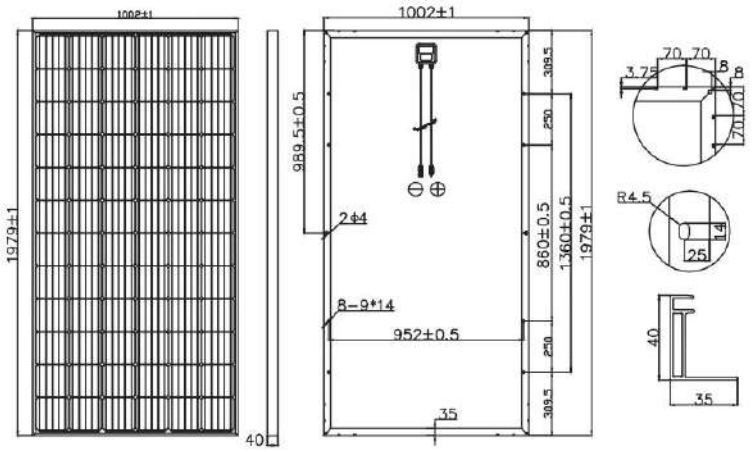
Packaging Configuration

(Two pallets = One stack)
27pcs/pallet, 54pcs/stack, 594pcs/40'HQ Container

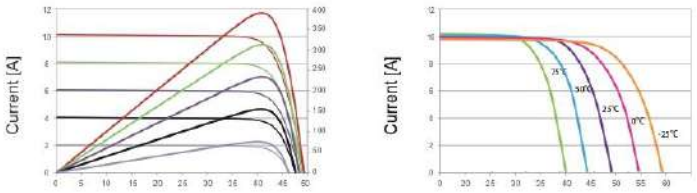
CHARACTERISTICS	
Max. System Voltage	1000V/DC
Temperature-Coefficient I_{sc}	+0.02973%/°K
Temperature-Coefficient V_{oc}	-0.38038%/°K
Temperature-Coefficient P_{mpp}	-0.57402%/°K
NOCT***	45°C

CERTIFICATES
IEC 61215 edition 2 (TÜV Nord) (TÜV Rheinland)
IEC 61730 MCS INMETRO
CE CEC SALT-MIST
UL1703 CSA
PID Resisitant

INSURANCE
Chubb



CURRENT-VOLTAGE CURVES



Voltage [V]
Module characteristics at constant module temperatures of 25°C and variable levels of irradiance

Voltage [V]
Module characteristics at variable module temperatures and constant module irradiance of 1.000 W/m²

ESPSC TYPE	380M	385M	390M	395M	400M
Power Class	380Wp	385Wp	390Wp	395Wp	400Wp
Max. Power Voltage (V_{mpp})* at STC**	40.5V	40.8V	41.1V	41.4V	41.7V
Max. Power Current (I_{mpp}) at STC	9.39A	9.44A	9.49A	9.55A	9.60A
Open Circuit Voltage (V_{oc}) at STC	48.9V	49.1V	49.3V	49.5V	49.8V
Short Circuit Current (I_{sc}) at STC	9.75A	9.92A	10.12A	10.23A	10.36A
Module Efficiency	19.16%	19.42%	19.67%	19.92%	20.17%

* MPP: Maximum Power Point
** STC (Standard Test Conditions): 1000W/m², 25°C, AM 1.5
*** Normal Operating Cell Temperature

ERA SOLAR and the ERA SOLAR logo are trademarks or registered trademarks of ERA SOLAR Corporation.
© October 2019 ERA SOLAR Corporation. All rights reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

Nota: **Adaptado de Auto Solar y extraído de https://autosolar.pe/pdf/ERA-Mono-PERC-400W.pdf**

Anexo D. Datos mensuales de irradiación global horizontal en Talara

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Pariñas [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	62.23	43.26	48.63	57.71	54.26	39.62	31.77	46.64	87.21	122.13	136.55	114.41
08:00	241.48	213.47	245.49	248.64	232.29	198.21	193.07	222.41	287.48	334.91	358.43	322.37
09:00	472.85	448.17	482.82	479.74	435.62	391.65	386.1	421.69	509.04	569.66	595.25	558.82
10:00	685.11	679.75	698.95	685.63	614.4	566.84	569.37	619.97	704.68	770.36	794.69	761.06
11:00	843.93	843.41	854.42	830.93	744.46	697.33	707.22	768.32	840.1	912.17	921.15	902.12
12:00	936.24	936.33	932.22	903.04	820.12	773.88	784.86	857.96	909.38	978.15	985.74	968.54
13:00	934.86	927.96	949.79	895.91	808.79	772.34	792.57	862.91	893.26	957.69	963.39	951.27
14:00	867.99	869.46	880.86	813.97	734.75	704.5	725.94	786.13	807.43	859.18	873.81	869.53
15:00	721.11	715.23	733.39	663.19	594.42	566.12	593.2	644.69	651.24	687.54	697.86	719.51
16:00	515.99	522.81	527.78	456.63	404.47	386.67	415.49	453.21	449.31	467.52	481.92	512.8
17:00	294.04	301.41	286.84	240.91	198.27	193.31	216.3	240.38	232.05	229.55	239.79	280.29
18:00	114.08	114.14	88.18	44.44	2.15	13.49	45.94	47.7	22.87	2.33	12.37	70.17

Datos mensuales de irradiación global horizontal en El Alto [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	65.91	44.67	50.5	59.91	57.07	42.22	33.48	50.4	91.61	131.73	143.67	120.3
08:00	249.91	218.64	236.82	252.62	231.56	211.22	213.23	247.61	306.19	348.06	375.81	339.58
09:00	469.3	436.94	469.62	479.99	434.96	400.78	404.24	454.68	523.02	594.81	598.95	569.75
10:00	682.64	664.56	692.93	678.76	623.08	584.46	590.11	647.39	709.42	790.78	800.07	777.45
11:00	822.16	830.81	845.01	824.62	742.6	721.62	717.01	793.9	844.32	918.6	939.29	914.5
12:00	906.78	916.3	934.68	895.76	817.39	784.46	795.06	876.3	911.3	980.2	996.59	978.64
13:00	917.29	925.9	947.9	893.44	814.29	777.68	796.6	871.67	897.95	966.91	970.21	966.12
14:00	850.35	843.64	870.05	809.76	738.24	707.93	732.36	793.73	809.19	867.28	870.41	876.02
15:00	705.41	709.52	719.92	655.89	590.18	575.72	601.97	651.4	657.93	689.98	697.87	723.66
16:00	501.88	509.37	516.23	455.45	402.7	393.52	424.47	458.43	456.55	469.74	483.45	515.52
17:00	310.03	290.97	287.98	240.78	196.58	195.77	223.23	243.1	232.63	231.33	243.13	281.68
18:00	112.54	112.19	84.87	44.64	2.2	15.77	49.76	50.99	22.85	2.14	9.07	70.36

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Los Órganos [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	65.79	42.79	47.82	58.64	56.96	42.8	34.11	50.4	91.47	126.61	136.61	117.47
08:00	243.31	210.33	227.69	246.86	229.55	206.65	206.07	239.14	299.03	334.3	362.74	330.58
09:00	458.48	426.1	466.37	474.95	428.76	399.76	399.52	437.77	506.34	569.56	593.9	560.66
10:00	670.34	651.83	673.71	673.88	607.99	578.44	576.51	637.18	696.47	770.44	790.27	767.05
11:00	811.01	813.26	825.5	817.62	733.16	711.51	713.5	779.65	826.23	905.22	933.81	907.56
12:00	894.38	903.36	903.63	896.17	807.74	776.83	793.84	858.06	900.11	973.13	988.79	967.61
13:00	889.8	887.38	916.49	884.1	804.56	768.63	797.89	857.59	890.16	956.32	963.71	942.09
14:00	811.05	817.39	843.09	799.69	726.39	699.43	730.96	787.05	798.71	856.22	862.92	861.56
15:00	661.76	683.24	687.75	635.5	579.8	558.08	596.1	638.92	644.97	682.43	691.57	698.68
16:00	469.16	470.46	471.74	430.91	386.6	378.58	418.28	446.73	446.14	464.05	476.89	484.56
17:00	292.9	269.04	267.74	229.98	193.83	190.41	218.71	238.62	226.5	226.36	239	276.48
18:00	108.45	107.41	80.56	41.26	2.13	14.19	47.22	47.69	19.29	1.81	5.86	65.41

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Máncora [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	55.69	40.33	45.92	57.92	57.26	43.22	34.71	51.01	90.39	124.68	132.87	110.79
08:00	219.48	202.86	224.5	243.25	231.53	201.39	203.45	235.37	287.01	329.17	350.44	319.21
09:00	438.55	422.16	450.77	462.23	431.24	392.67	400.52	437.6	501.71	559.63	584.56	546.29
10:00	647.6	635.72	666.38	657.73	609.12	576.97	578.77	632.49	691.49	757.01	782.82	749.28
11:00	794.25	795.12	817.2	814.08	736.41	704.13	709.88	774.67	824.32	895.92	915.38	891.18
12:00	873.54	868.01	897.79	883.06	809.33	773.35	788.59	850.04	885.96	965.32	966.05	948.56
13:00	858.94	858.43	899.61	871.66	804.82	766.32	789.11	849.9	877.43	943.09	945.56	924.52
14:00	774.63	797.07	823.17	785.17	726.35	692.46	720.16	780.47	786.77	847.67	845.19	830.02
15:00	610.51	632.34	659.13	621.34	566.3	542.52	587.63	635.56	634.36	675.33	677.89	669.44
16:00	410.19	433.18	448.7	418.18	379.07	368.17	406.1	441.77	441.49	456.08	458.31	443.8
17:00	234.21	245.95	246.02	216.76	191.48	184.98	214.45	231.28	223.57	220.43	225.72	248.33
18:00	80.42	99.49	76.17	37.51	2.07	12.41	46.24	45.79	17.6	1.79	4.07	50.06

Datos mensuales de irradiación global horizontal en La Brea [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	67.57	43.95	50.49	59.7	55.46	39.65	31.33	46.29	88.56	128.47	143.86	121.97
08:00	262.03	230.79	254.73	259.64	238.72	210.18	204.86	233.51	300.78	341.56	370.98	342.32
09:00	485.3	474.04	484.17	479.75	437.03	405.38	394.27	436.51	507.92	564.69	592.75	581.06
10:00	693.17	689.91	700.74	688.15	619.34	573.27	576.83	623.78	702.34	777.24	798.74	770.15
11:00	861.22	857.78	858.78	828.43	752.9	706.96	709.43	766.09	840.3	921.75	926.22	909.02
12:00	945.21	949.74	939.19	908.48	820.95	781.94	791.54	864.12	913.75	985.73	988.23	974.91
13:00	949.98	963.54	957.12	900.09	818.65	780.47	802.67	866.04	901.46	963.09	970.43	958.64
14:00	885.32	889.73	888.79	821.84	738.66	711.15	736.55	790.43	815.13	863.7	876.32	876.62
15:00	749.12	754.73	746.49	671.8	599.59	571.33	601.18	646.53	655.43	695.99	707.53	728.3
16:00	552.73	554.58	540.84	466.22	409.7	394.31	422.32	456.42	457.38	474.22	485.07	521.97
17:00	333.22	328.41	302.82	247.72	199.56	195.65	218.85	241.5	232.95	232.77	245.4	288.26
18:00	116.03	117.2	90.01	44.53	2.15	13.09	46.24	47.5	22.65	2.38	13.09	72.27

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Lobitos [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	63.11	42.71	48.5	58.54	54.99	40.13	32.2	47.85	87.29	125.4	142.59	116.18
08:00	248.84	218.06	238.74	253.79	239.12	205.92	202.34	232.51	301.52	349.33	374.61	339.19
09:00	477.6	449.81	475.55	479.95	441.76	407.38	401.67	441.31	518.83	585.07	606.96	569.65
10:00	683.42	687.88	701.35	688.78	617.32	582.53	585.27	634.3	702.17	781.4	807.38	764.89
11:00	849.07	843.28	855.8	821.98	750.03	720.21	718.11	773.5	836.23	914.54	932.9	904.25
12:00	929.61	929.76	941.45	904.61	822.69	778.05	793.42	866.28	907.7	982.37	985.43	972.37
13:00	925.34	937.65	950.43	898.69	815.71	777.11	797.05	866.75	893.09	955.12	958.95	956.32
14:00	868.24	875.77	878.9	816.05	738.82	707.72	727.16	790.27	807.7	857.26	868.67	868.83
15:00	729.72	722.15	734.56	673.62	594.34	573.37	595.29	643.37	650.92	684.71	700.99	718.78
16:00	530.2	523.63	525.02	467.14	403.93	391.82	418.08	451.32	451.24	466.78	483.08	507.65
17:00	305.87	309.99	290.88	246.34	199.06	195.47	215.59	239.94	229.08	229.07	240.9	276.22
18:00	112.75	116.28	87.4	45	2.24	14.88	45.89	48.04	22.83	2.13	11.03	69.97

Nota: **Adaptado de PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS)**

Anexo E. Datos mensuales de irradiación global horizontal en Sullana

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Sullana [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	63.61	43.47	49.8	60.59	53.19	40.62	33.77	50.99	87.37	104.8	129.78	104.99
08:00	229.13	209.89	229.12	238.69	198.9	153.32	189.65	200.27	235.46	256.43	304.47	283.79
09:00	447.28	427.13	455.09	459.38	378.52	284.46	300.29	312.99	415.25	461.52	504.63	498.66
10:00	652.69	647.97	674.22	660.54	556.78	437.09	441.63	491.05	628.39	682.48	709.52	701.61
11:00	812.95	791.41	821.18	794.99	692.39	566.37	573.38	654.25	787.6	848.73	873.19	854.78
12:00	879.26	860.31	892.14	861.22	779.37	689.05	717.06	809.56	888.51	945.73	955.54	922.32
13:00	831.24	832.96	876.67	852.37	767.98	702.3	738.33	817.48	877.89	933.13	933.73	907.04
14:00	678.05	693.05	761.84	753.25	686.83	633.32	690.94	740.12	791.38	836.61	846.49	820.87
15:00	488.52	522	566.62	569.57	531.17	509.07	574.72	614.19	637.72	657.44	673.97	637.12
16:00	346.01	372.29	376.73	397.44	358.52	354.1	403.34	426.96	438.74	442.25	459.2	446.71
17:00	214.13	232.99	216.17	201.4	175.62	172.62	207.09	224.64	217.99	211.25	227.78	244.57
18:00	93.42	96.5	67.34	25.14	1.83	1.85	36.57	38.87	7.65	1.83	3.84	56.85

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Bellavista [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	63.61	43.47	49.8	60.6	53.2	40.63	33.78	50.99	87.37	104.8	129.79	104.99
08:00	229.13	209.9	229.12	238.69	198.91	153.33	189.66	200.27	235.46	256.44	304.47	283.79
09:00	447.29	427.14	455.1	459.39	378.53	284.46	300.3	312.99	415.26	461.53	504.64	498.67
10:00	652.7	647.98	674.23	660.56	556.79	437.1	441.64	491.06	628.4	682.49	709.54	701.63
11:00	812.97	791.42	821.11	795.01	692.4	566.38	573.39	654.26	787.61	848.74	873.21	854.8
12:00	879.28	860.32	892.15	861.24	779.39	689.07	717.07	809.57	888.53	945.75	955.56	922.34
13:00	831.25	832.97	876.69	852.38	768	702.31	738.35	817.49	877.91	933.14	933.75	907.05
14:00	678.06	693.06	761.86	753.26	686.84	633.34	690.95	740.13	791.39	836.62	846.51	820.89
15:00	488.53	522	566.63	569.58	531.18	509.08	574.74	614.2	637.73	657.45	673.99	637.14
16:00	346.01	372.3	376.74	397.44	358.52	354.11	403.35	426.97	438.75	442.26	459.21	446.72
17:00	214.14	232.99	216.17	201.4	175.63	172.63	207.09	224.64	217.99	211.26	227.79	244.58
18:00	93.43	96.5	67.34	25.14	1.83	1.85	36.57	38.87	7.65	1.83	3.84	56.86

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Ignacio Escudero [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	64.03	44.41	49.63	59.17	53.68	30.32	31.83	45.39	81.35	96.95	108.29	100.99
08:00	237.56	214.05	233.11	240.58	199.2	150.4	141.46	157.42	216.17	233.99	281.14	290.09
09:00	450.29	438.96	465.56	465.73	373.42	283.1	257.07	296.91	405.1	452.88	493.64	495.23
10:00	671.12	664.06	682.17	667.85	553.31	436.76	418.04	489.57	620.14	685.92	703.73	704.15
11:00	822.27	825.81	833.93	809.68	691.01	563.32	575.36	655.92	792.36	854.8	875.59	857.17
12:00	896.04	882.37	920.35	882.1	782.28	686.5	703.06	815.25	892.84	952.68	967.6	925.32
13:00	863.48	860.35	910.94	867.23	774.61	697.45	740.79	825.36	883.94	938.63	946.53	926.31
14:00	742.61	744.95	816.12	780.88	695.81	632.9	687.55	757.43	803.11	843.57	852.4	838.9
15:00	577.44	587.6	629.43	608.03	539.86	509.94	566.32	620.59	642.77	670.12	681.1	673.25
16:00	415.49	431.43	445.34	413.04	367.88	347.1	393.62	433.46	442.45	451.06	464.38	466.22
17:00	241.15	262.29	248.36	216.17	178.63	175.14	203.68	227.25	219.71	213.59	227.71	252.37
18:00	101.38	100.4	74.33	29.93	1.83	1.94	39.49	40.01	11.28	1.89	6.06	59.88

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Querecotillo [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	63.34	44.02	50.99	60.57	55.08	40.97	34.47	48.88	82.25	103.55	113.49	103.49
08:00	231.8	201.96	229.6	234.76	204.02	152.8	146.79	163.95	224.35	248.88	280.34	283.94
09:00	443.87	427.4	450.84	456.15	371.52	284.65	259.46	296.71	413.31	454.88	485.68	493.66
10:00	649.62	633.64	666.9	658.3	547.76	432.05	419.93	486.89	621.2	674.11	697.37	696.56
11:00	810.79	789.86	811.4	793.87	679.23	557.55	556.03	641.43	774.45	835.73	864.43	844.79
12:00	887.54	856.08	887.59	863.86	765.64	683.26	690.16	794.39	881.24	937.01	950.7	923.15
13:00	859.45	818.15	881.22	851.5	759.11	691.49	725.82	814.13	879.97	928.4	936.69	915
14:00	719.79	703.21	777.63	755.63	685.15	630.41	681.72	737.51	790.21	838.12	835.68	828.81
15:00	507.84	538.16	583.83	576.67	539.37	510.64	561.95	607.02	637.11	657.5	666.73	655.35
16:00	349.71	361.5	388.38	377.28	360.81	350.47	395.76	421.62	437.75	440.57	455.71	443.54
17:00	212.93	215.52	214.08	199.34	175.04	174.78	204.81	220.3	217.16	210.84	222.37	243
18:00	92.75	89.77	64.98	25.46	1.75	1.97	36.05	37.91	7.1	1.69	2.85	57.18

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Marcavelica [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	63.63	43.48	49.8	60.59	53.19	40.61	33.69	50.98	87.37	104.8	129.8	105.01
08:00	229.15	209.9	229.12	238.69	198.9	153.32	189.65	200.27	235.46	256.44	304.48	283.81
09:00	447.3	427.15	455.1	459.39	378.53	284.46	300.3	312.99	415.26	461.53	504.65	498.68
10:00	652.71	647.99	674.24	660.56	556.79	437.1	441.64	491.06	628.4	682.5	709.55	701.64
11:00	812.98	791.43	821.12	795.01	692.41	566.38	573.4	654.27	787.62	848.75	873.22	854.81
12:00	879.29	860.33	892.16	861.25	779.4	689.08	717.08	809.58	888.54	945.76	955.57	922.35
13:00	831.26	832.98	876.69	852.4	768.01	702.32	738.36	817.5	877.92	933.15	933.75	907.06
14:00	678.07	693.06	761.86	753.27	686.86	633.35	690.97	740.14	791.4	836.63	846.52	820.89
15:00	488.53	522.01	566.63	569.59	531.2	509.1	574.75	614.21	637.74	657.45	673.99	637.14
16:00	346.01	372.3	376.74	397.45	358.54	354.13	403.37	426.98	438.76	442.26	459.2	446.71
17:00	214.13	232.99	216.18	201.41	175.64	172.65	207.12	224.65	217.99	211.25	227.77	244.57
18:00	93.41	96.49	67.33	25.15	1.8	1.82	36.48	38.87	7.65	1.83	3.84	56.85

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Miguel Checa [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	63.22	43.06	49.91	60.06	53.61	39.96	32.32	49.48	81.77	100.2	127.5	113.65
08:00	236.68	210.17	228.78	244.06	201.08	156.64	149.43	217.16	227.34	243.58	322.27	310.47
09:00	451.31	436.54	463.45	468.64	374.22	288.87	266.72	326.94	417.86	470.55	523.56	526.13
10:00	672.78	660.69	682.19	671.36	558.79	448.75	437.02	511.91	637.32	694.67	728.79	708.8
11:00	825.92	812.55	823.47	804.39	697.34	569.17	580.38	671.73	793.6	861.8	888.98	864.65
12:00	888.02	882.11	906.08	877.39	786.27	685.62	713.92	816.95	891.69	954.62	972.29	936.7
13:00	842.29	837.78	888.33	863.16	776.66	701.25	741.65	828.06	883.32	943.16	955.6	925.56
14:00	705.11	704.85	787.82	764.36	691.62	636.67	689.02	750.19	800.19	846.75	858.13	829.9
15:00	518.15	554.21	595.5	587.06	536.2	507.07	568.58	620.69	641.88	668.81	683.84	665.43
16:00	395.49	421.78	419.36	408.33	364.09	350.8	394.59	433.4	441.17	450.48	466.59	476.25
17:00	241.17	252.08	239.01	213.42	178.68	176.14	205.76	228.77	219.07	216.14	231.27	267.02
18:00	99.22	100.27	73.26	28.43	1.89	1.93	38.41	39.66	10.22	1.9	5.94	63.33

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Salitral [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	62.76	43.19	49.4	60.74	55.73	39.33	33.57	48.71	83.27	101.18	120.47	103.91
08:00	230.02	209.77	231.3	236.86	195.29	153.72	170.19	173.07	229.6	247.27	288.04	281.11
09:00	447.27	435.9	453.17	461.6	368.74	248.3	272.41	297.65	411.99	452.57	482.27	487.29
10:00	650.12	641.81	670.79	659.93	547.81	434.92	429.33	489.53	623.69	665.44	698.35	697.01
11:00	810.33	796.47	819.35	797.84	680.02	551.85	566.06	638.78	784.41	838.22	859.6	839.94
12:00	893.54	860.82	898.58	870.69	775.48	678.23	704.56	806.05	880.2	938.11	952.36	921.22
13:00	855.1	856.58	879.54	852.49	766.02	699.86	736.11	815.12	880.33	932.63	936.19	915.17
14:00	708.28	715.74	780.22	758.41	690.81	633.83	689.04	736.03	791.31	832.74	840.59	825.41
15:00	504.83	543.85	585.28	584.91	540.94	511.29	569.66	611.55	636.59	661.76	670.63	654.94
16:00	356.05	376.76	393.74	393.22	360.81	351.9	401.26	426.59	436.66	443.42	453.61	449.05
17:00	211.82	227.53	215.04	203.85	177.27	171.62	206.79	222.4	216.92	211.26	225.4	241.43
18:00	93.15	92.59	66.02	25.57	1.82	1.89	36.9	38.36	7.87	1.84	3.95	56.46

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Lancones [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	62.23	45.55	51.54	61.56	57.75	42.64	37.3	52.84	92.12	98.5	114.74	104.16
08:00	225.05	204.75	230.77	240.04	203.15	145.18	139.81	175.76	250.52	276.67	293.79	279.75
09:00	435.46	421.22	456.7	457.14	378.23	288.18	279.62	348.24	461.13	505.42	527.09	504.19
10:00	643.09	638.16	660.92	657.27	553.36	442.63	454.63	542.02	663.87	723.41	729.78	709.8
11:00	801.63	793.16	812.18	797.94	684.94	572.81	592.24	701.09	804.91	876.36	877.29	859.16
12:00	866.63	855.25	889.92	870.05	774.28	707.12	729.38	828.82	893.41	960.65	955.52	934.08
13:00	833.73	806.77	879.22	856.9	767	711.91	745.85	832.13	881.05	934.18	948.39	921.38
14:00	694.79	702.25	770.08	759.2	694.54	643.9	693.43	758.17	785.54	833.91	831.51	821.68
15:00	479.61	529.94	593.35	575.23	530.28	509.39	572.51	614.51	631.52	662.33	659.14	640.15
16:00	293.62	347.04	365.41	372.1	347.54	345.44	400.71	429.99	434.5	432.78	441.84	422.66
17:00	171.05	188.06	195.32	195.83	171.65	176.31	206.79	222.64	211.29	204.32	215.54	226.28
18:00	83.07	84.57	59.74	23.22	1.62	1.71	38.4	42.11	4.78	1.59	2.05	51.13

Nota: **Adaptado de PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS)**

Anexo F. Datos mensuales de irradiación global horizontal en Paita

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Paita [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	68.34	43.87	50.05	57.08	52.44	36.81	29.71	46.14	85.82	112.36	113.47	110.39
08:00	240.65	218.59	232.36	241.24	207.25	174.56	183.03	207.26	256.24	276.2	289.07	315.47
09:00	459.26	433.4	457.31	459.73	382.33	317.58	290.79	325.95	432.44	465.34	502.29	529.11
10:00	669.09	654.92	662.11	660.06	561.12	465.93	437.66	504.63	629.16	674.55	716.38	716.38
11:00	798.66	798	806.35	805.4	699.43	589.07	577.31	664.04	785.39	848.39	868.57	851.54
12:00	890.57	877.33	897.84	878.92	774.08	687.74	695.75	791.39	874.35	930.4	942.1	927.7
13:00	912.63	906.19	912.42	869.79	779.27	710.1	725.67	824.64	877.62	932.63	946.32	926.71
14:00	861.04	859.92	853.98	797.59	712.76	652.76	689.51	763.62	798.91	847.19	855.69	851
15:00	724.62	735.66	714.75	655.14	573.94	533.37	588.77	639.13	647.81	680.3	694.06	716.04
16:00	533.15	538.36	517.11	456.42	387.69	369.66	410.26	446.67	448.99	461.41	473.09	510
17:00	314.42	309.4	295.02	234.09	190.26	184.1	212.35	233.6	228.52	226.93	241.02	281.27
18:00	113.39	116.4	87	37.02	1.89	4.08	44.38	44.56	17.96	1.94	12.46	71.77

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Pueblo Nuevo Colán [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	64.62	47.9	51.47	61.86	55.27	40.4	32.23	47.36	88	116.06	130.54	117.33
08:00	245.13	226.68	244.48	257.66	224.01	196.59	191.38	215.98	264.5	282.71	325.12	328.71
09:00	470.73	455.64	482.89	478.69	403.24	351.46	325.37	358.42	442.14	496.79	534.01	542.03
10:00	679.98	679.22	696.4	685.9	591.45	502.96	480.26	537.55	650.85	721.67	741.17	732.8
11:00	834.05	834.3	840.95	830.28	722.26	623.71	611.11	695.68	809.68	882.97	898.3	880.22
12:00	911.09	929.05	923.18	895.56	804.53	731.3	740.6	829.25	902.64	964.35	983.71	946.91
13:00	912.43	930.14	935.49	888.23	798.35	738.24	768.69	836.94	896.38	952.78	958.18	941.63
14:00	853.1	861.06	858.94	806.18	725.09	669	710.93	766.07	811.19	858.29	867.13	858.08
15:00	691.71	723.69	725.96	658.18	584.26	552.73	590.54	635.79	656.49	689.48	700.43	712.44
16:00	496.43	523.31	525.75	461.35	395.41	383.53	415.67	446.03	448.43	467.15	483.16	506.38
17:00	293.67	312.15	291.34	236.55	193.09	190.71	214.4	234.15	227.6	225.63	241.09	279.08
18:00	110.72	111.18	83.86	36.59	1.98	4.41	43.85	43	16	2.06	9.74	68.95

Datos mensuales de irradiación global horizontal en La Huaca [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	67.32	45.4	50.24	61.79	54.39	40.04	32.54	48.72	86.61	98.8	120.43	117.31
08:00	259.88	216.8	243.25	255.97	212.5	167.05	189.08	205.75	275.93	244.81	308.01	316.17
09:00	480.53	448.5	488.49	477.15	393.24	308.49	305.72	317.88	430.61	469.44	521.41	539.33
10:00	689.55	678.13	704.56	681.29	578.19	477.32	456.87	514.45	647.89	702.36	732.82	732.42
11:00	844.75	848.36	857.84	824.5	717.39	605.19	598.37	682.7	803.23	874.47	894.72	877.59
12:00	904.95	910.11	925.26	892.5	802.41	710.59	734.72	829.24	903.1	969.33	984.7	954.87
13:00	882.27	889.75	929.7	882.38	796.1	729.09	764.09	842.77	893.52	952.43	959.98	933.83
14:00	806.97	810.73	851.65	798.45	719.37	659.52	707.9	769.15	807.43	858.83	865.98	854.92
15:00	656.21	672.57	703.65	644.08	568.49	530.92	592.05	634.32	650.35	689.26	697.58	703.69
16:00	491.08	490.25	508.26	450.49	389.09	369.9	411.62	445.91	447.22	464.15	476.93	501.78
17:00	299.03	292.33	280.49	231.33	187.63	182.35	211.51	233.51	226.68	223.52	239.17	272.29
18:00	107.43	110.56	82.24	34.34	1.87	2.32	43.43	41.95	14.03	2.05	8.54	66.71

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Vichayal [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	62.48	45.49	49.13	61.92	53.49	38.95	32.08	47.79	86.32	112.3	128.74	112.85
08:00	236.36	217.37	240.62	253.33	213.14	177.23	175.56	210.94	245.24	268.44	308.35	313.21
09:00	459.15	454.4	479.12	480.66	396.12	320.97	296.79	341.74	427.25	481.67	524.12	532.88
10:00	679.96	678.18	692.56	679.65	574.44	482.85	470.44	528.13	636.93	709.06	735.27	728.42
11:00	838.16	825.77	842.46	823.9	715.52	606.55	607.79	687.99	800.48	878.92	898.16	867.7
12:00	905.22	899.44	919.82	895.57	795.7	715.34	740.26	830.02	902.16	968.11	978.34	941.17
13:00	901.73	920.94	923.93	887.12	793.52	728	766.91	840.73	895.41	952.37	960.88	931.43
14:00	833.03	839.5	855.04	803.55	720.89	665.56	712.41	771.29	808.72	859.9	863.76	857.1
15:00	677.56	704.97	714.51	653.29	581.75	544.89	588.7	638.8	654.47	689.42	695.71	708.55
16:00	486.53	508.69	517.22	458.17	392.63	374.99	411.19	447.21	444.29	465.85	480.18	499.5
17:00	281.53	304.56	281.56	236.5	192.33	187.59	212.52	235.13	226.69	226.56	237.94	275.28
18:00	109.64	109.58	83.57	36.54	1.99	4.74	43.82	43.64	16.3	2.11	9.65	68.76

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Amotape [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	44.77	30.77	42.39	62.86	53.91	38.59	29.73	46.83	85.21	101.81	124.93	114.71
08:00	241.12	217.88	234.45	258.18	209.12	167.58	182.72	211.27	231.84	245.63	312.39	321.12
09:00	466.76	453.16	472.97	478.81	390.8	308.83	305.53	321	421.07	467.38	526.06	541.56
10:00	684.93	680.72	691.64	679.95	577.14	483.05	465.81	519.54	638.59	707.66	739.15	730.88
11:00	832.18	834.06	841.75	823.64	720.32	606.67	605.66	683.38	808.93	876.23	885.29	876.82
12:00	897.14	910.75	922.8	889.01	801.04	720.3	731.63	824.6	905.62	966.28	982.89	944.52
13:00	898.16	902.69	919.74	877.32	795.56	730.55	764.62	837.2	892	954.55	959.07	930.66
14:00	823.44	835.61	841.02	797.51	719.23	662.13	708.68	768.02	809.66	854.88	867.92	850.93
15:00	667.94	692.51	707.07	650.21	572.44	542.53	589.6	634.15	651.94	689.01	698.33	704.65
16:00	482.89	496.33	510.19	453.15	390.01	373.88	412.48	447.26	447.22	464.38	479.39	503.13
17:00	286.65	305.42	278.14	234.03	188.41	187.25	211.27	234.4	225.73	223.81	237.95	274.89
18:00	108.81	109.36	82.35	35.42	1.93	3.42	43.41	42.22	14.95	1.98	9.04	67.64

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Tamarindo [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	67.29	43.88	51.13	61.66	53.54	39.51	31.56	47.41	85.69	91.28	111.79	112.43
08:00	248.85	210.41	242.9	249.94	203.85	159.04	164.4	191.68	250.37	223.54	279.55	309.69
09:00	466.08	438.88	481.47	471.31	382.79	291.5	275.95	310.55	407.94	444.27	495	525.09
10:00	677.45	663.73	693.21	675.27	558.69	459.37	436.68	496.21	628.02	676.1	706.5	720.72
11:00	839.58	806.88	839.49	815.38	704.7	585.65	583.24	665.55	785.7	839.06	875.65	861.95
12:00	895.68	866.58	924.77	888.46	789.78	699.06	711.79	817.31	892.44	951.87	957.46	939.12
13:00	874.6	848.68	902.86	873.93	779.98	716.84	750.38	830.21	886.82	940.95	947.31	923.93
14:00	785.08	778.98	832.41	789.4	708.31	647.25	699.11	765.51	803.65	850.91	858.61	846.34
15:00	655.69	650.89	693.16	642.12	562.98	526.51	579.92	628.22	647.9	682.17	686.41	696.14
16:00	476.15	476.1	502.68	443.78	382.97	366.13	402.82	443.07	445.88	458.29	469.76	493.27
17:00	289.44	282.14	275.05	229.17	185.64	182.3	207.56	232.1	226.95	219.04	236.1	270.36
18:00	107.77	103.62	81.96	33.91	1.76	2.71	43.24	41.87	14.34	1.99	8.24	66.4

Datos mensuales de irradiación global horizontal en El Arenal [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	63.04	47.95	48.56	62.85	53.91	40.42	32.35	48.76	85.2	101.82	124.94	114.72
08:00	241.12	217.88	234.45	258.18	209.12	167.58	182.71	211.27	231.84	245.64	312.4	321.13
09:00	466.77	453.17	472.97	478.8	390.8	308.83	305.53	321	421.07	467.38	526.07	541.56
10:00	684.93	680.72	691.64	679.94	577.13	483.04	465.81	519.54	638.59	707.66	739.15	730.88
11:00	832.18	834.07	841.75	823.64	720.32	606.66	605.65	683.38	808.92	876.23	885.29	876.83
12:00	897.14	910.75	922.8	889.01	801.04	720.29	731.63	824.6	905.62	966.28	982.89	944.52
13:00	898.16	902.69	919.74	877.32	795.56	730.55	764.62	837.2	892	954.54	959.07	930.65
14:00	823.44	835.61	841.02	797.51	719.23	662.13	708.68	768.02	809.66	854.88	867.91	850.93
15:00	667.94	692.5	707.07	650.21	572.45	542.54	589.6	634.15	651.94	689.01	698.32	704.65
16:00	482.89	496.33	510.19	453.15	390.02	373.89	412.49	447.26	447.22	464.38	479.38	503.12
17:00	286.65	305.41	278.14	234.03	188.41	187.26	211.28	234.41	225.73	223.81	237.94	274.88
18:00	108.8	109.35	82.35	35.42	1.93	3.42	43.41	42.3	14.95	1.83	8.17	66.37

Nota: **Adaptado de PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS)**

Anexo G. Datos mensuales de irradiación global horizontal en Piura

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Piura [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	61.15	47.2	54.77	65.87	59.97	46.09	36.6	49.17	78.21	96.69	107.89	103.18
08:00	225.17	215.13	229.82	255.5	210.15	158.8	146.65	159.76	210.94	231.2	274.23	295.29
09:00	445.18	441.97	473.05	472.22	389.55	291.61	265.37	291.35	395.01	436.71	475.31	502.97
10:00	644.37	645.7	681.53	682.73	570.28	451.62	415.22	474.64	604.59	654.98	684.61	679.74
11:00	794.3	810.05	839.82	827.9	713.43	580.94	564.48	634.94	759.37	820.29	827.54	824.65
12:00	871.13	873.52	913.21	894.04	799.21	683.96	694.14	785.5	884.29	928.24	925.12	901.58
13:00	840.04	842.48	884.47	884.04	786.27	712.04	728.46	818.75	880.4	921.1	923.25	889.73
14:00	719.42	721.43	776.93	797.59	712.01	652.06	688.62	760.42	796.41	831.2	828.88	802.1
15:00	569.93	573.1	610.82	640.97	565.86	555.12	582.35	629.28	646.42	665.05	664.69	666.88
16:00	422.81	426.67	432.7	435.14	384.57	384.48	415.02	440.07	442.58	440.46	447.26	468.85
17:00	239.15	252	246.89	229.36	186.43	191.39	215.07	230.5	216.91	207.39	213.42	245.18
18:00	90.02	91.1	71.28	25.12	1.86	2.15	30.73	36.75	5.85	1.77	4.89	59.15

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Castilla [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	68.43	50.2	53.51	62.41	55.48	41.19	33.53	49.12	86.61	109.45	127.41	116.51
08:00	255.47	224.69	244.3	252.54	208.86	182.82	152.07	170.76	243.01	279.61	305.91	324.03
09:00	483.16	462.55	481.74	472.07	387.9	309.67	274.7	306.21	419.32	475.95	518.81	542.33
10:00	697.41	682.6	690.61	677.69	570.66	461.81	423.4	494.71	629.74	695.49	720.53	728.31
11:00	848.21	846.19	850.39	828.72	706.71	584.88	567.6	656.73	790.44	852.82	868.73	874.02
12:00	918.61	913.44	930.23	891.41	786.47	695.33	690	798.96	894.03	960.96	972.16	945.65
13:00	898.37	891.32	895.78	875.26	779.5	710.85	714.85	820.91	883.19	946.7	960.13	931.3
14:00	770.91	775.15	811.2	791.7	705.21	648.24	677.93	753.56	795.34	845.24	857.73	838.37
15:00	609.58	607.44	635.83	627.26	554.05	540.3	568.53	623.87	641.03	675.17	693.66	697.38
16:00	444.44	436.09	440.61	429.58	373.96	369.84	395.04	435.96	441.79	453.79	474.5	501.67
17:00	271.11	261.88	243.36	223.33	174.43	178.99	201.13	224.41	218.23	214.13	229.44	262.62
18:00	100.07	99.02	71.63	24.43	1.73	1.9	29.18	37.15	4.95	1.85	4.73	62.9

Datos mensuales de irradiación global horizontal en 26 de octubre [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	66.06	49.95	54.95	62.54	54.95	40.8	32.76	46.4	77.05	98.58	113.1	111.3
08:00	234.06	220.18	229.2	247.05	199.5	149.71	138.8	154.76	208.5	232.75	281.56	308.72
09:00	457.52	448.08	470.59	459.53	374.4	280.07	255.82	284.73	390.9	438.3	484.38	518.97
10:00	658.14	651.78	677.28	665.71	550.34	435.1	401.93	463.44	597.64	656.6	695.71	696.37
11:00	808.8	815.9	833.97	808.37	689	559.53	545.6	619.46	750.2	821.64	839.52	842.43
12:00	885.86	878.7	906.71	873.54	771.66	657.94	669.66	764.92	872.82	929.7	938.43	920.08
13:00	853.94	847.18	878.33	863.53	758.86	683.73	701.74	796.57	868.81	922.93	937.36	908.31
14:00	731.55	725.45	771.66	778.5	685.82	624.38	661.42	738.7	785.76	833.9	843.44	820.84
15:00	581.03	577.41	607.2	624.67	542.86	527.64	555.94	609.84	637.43	668.8	679.56	686.02
16:00	434.28	431.76	430.45	422.72	366	361.3	392.5	424.56	436.35	444.88	461.28	486.93
17:00	248.86	257.21	246.08	220.87	174.65	175.98	199.87	220.56	213.87	211.32	223.69	259.06
18:00	97.32	95.26	71.78	24.85	1.75	1.89	29.91	36.17	5.78	1.81	5.08	62.27

Irradiancia media de cada mes del año en Catacaos [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	66.45	50.19	53.18	60.21	54.16	38.74	32.3	47.61	76.62	93.47	114.66	113.14
08:00	239.95	230.47	234.15	242.81	203.27	152.07	139.99	153.13	191.26	224.43	270.63	297.7
09:00	468.15	451.9	463.27	463.45	369.14	282.88	241.27	267.34	363.29	427.59	476.18	508.55
10:00	678.94	663.55	678.43	665.4	544.48	429.9	379.6	437.68	556.88	633.84	681.78	699.35
11:00	835.32	827.38	841.32	809.39	688.22	553.32	516.32	600.01	726.36	801.8	830.51	837.45
12:00	910.08	890.13	924.37	882.32	761.59	655.15	645.51	745.51	861.31	920.14	932.51	922.86
13:00	877.51	867.69	908.06	871.75	760.6	669.8	687.42	784.2	864.69	930.15	938.85	918.03
14:00	753.09	772.29	811.34	782.89	694.24	619.19	648.76	730.17	785.08	832.82	851.97	834.68
15:00	630.01	657.11	657.69	637.99	544.07	523.79	555.24	608.67	632.97	667.14	681.96	688.52
16:00	457.98	475.49	471.83	434.21	368.65	359.41	389.14	426.07	436.01	446.44	464.89	491.72
17:00	262.84	282.09	257.81	225.26	175.85	175.65	198	219.21	215.31	212.22	228.75	268.14
18:00	99.66	102.45	75.43	25.63	1.65	1.91	29.13	35.57	6.46	1.87	6.19	63.83

Datos mensuales de irradiación global horizontal en La Unión [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	71.22	47.92	52.66	62.6	51.47	37.8	31.4	46.96	83.36	90.16	104.63	109.55
08:00	250.14	215.33	242.34	246.19	193.98	153.76	140.83	181.93	218.49	214.85	250.27	291.28
09:00	470.43	432.8	461.8	464.68	368.24	275.78	236.8	272.19	351.32	409.5	456.35	496.75
10:00	667.41	659.69	681.42	669.76	549.1	428.48	381.9	431.54	554.13	629.13	662.95	689.4
11:00	806.18	821.16	832.97	816.44	675.85	548.58	512.66	597.61	725.12	807.05	832.76	841.75
12:00	886.87	882.21	917.8	888.03	761.25	652.91	661.6	753.79	866.01	920.29	940.36	922
13:00	848.11	864.97	913.5	871.51	750.69	664.39	696.57	780.61	868.1	924.29	936.25	904.24
14:00	767.98	774.6	829.46	793.35	682.37	612.34	648.93	730.41	787.39	829.83	847.48	827.01
15:00	641.45	656.28	681.65	642.98	548.14	507.82	552.52	609.83	639.51	665.83	683.32	688.59
16:00	481.35	480.12	493.7	444.33	371.54	354.8	390.97	429.4	437.42	447.58	469.52	498.22
17:00	292.49	278.13	268.56	228.06	177.54	175.05	200.14	220.64	218.1	211.43	227.19	271.58
18:00	103.88	103	78.47	27.04	1.73	1.91	29.12	36.97	7.13	1.94	7.72	66.17

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Tambogrande [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	64	46.42	51.58	62.29	58.81	43.38	38.39	54.24	93.13	115.99	117.62	114.24
08:00	232.09	205.25	229.33	239.49	211.73	164.72	171.82	201.56	249.51	287.73	301.46	301.02
09:00	436.64	419.94	445.16	446.44	376	286	281.22	328.9	450.65	499.89	512.59	513.51
10:00	633.85	625.03	662.72	642.36	536.65	445.81	447.49	520.61	647.09	706.79	719.94	700.34
11:00	779.4	776.85	805.9	774.21	662.69	561.59	584.92	686.35	797.04	870.46	865.64	842.09
12:00	827.79	826.58	878.84	845.24	741.36	673.54	704.17	813.68	878.05	934.17	947.83	906.06
13:00	756.39	784.21	842.1	815.61	729.2	673.39	715.53	806.43	859.22	907.39	921.36	874.08
14:00	587.22	675.46	730.32	710.35	651.86	608.29	659.58	735.56	775.06	803.78	821.55	754.98
15:00	388.76	476.69	511.95	503.84	478.9	492.15	541.82	600.28	606.49	612.76	627.17	538.43
16:00	234.13	312.58	324.15	327.06	309.11	333.15	372.22	425.98	419.15	400.22	404.53	350.71
17:00	145.74	175.54	180.02	168.49	150.28	164.74	193.22	215.22	202.55	190.78	196.11	203.41
18:00	78.79	81.65	53.03	17.36	1.35	1.69	27.13	37.97	2.49	1.44	1.98	49.91

Datos mensuales de irradiación global horizontal en La Arena [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	67.17	48.14	52.25	60.96	53.67	39.46	32.18	47.21	79.8	102.43	126.96	116.84
08:00	243.53	220.76	237.84	241.25	200.47	180.71	146.18	158.69	203.07	227.45	288.41	301.81
09:00	469.11	448.29	468.98	469.35	375.96	305.96	246.93	269.34	362.06	430.28	480.74	504.29
10:00	678.57	682.47	689.81	671.12	549.91	442.13	388.91	442.68	569.31	645.43	690.88	707.3
11:00	828.63	841.92	843.94	820.22	686.15	559.07	520.94	610.02	741.08	821.82	847.08	850.45
12:00	909.76	916.97	928.69	891.95	768.33	671.91	662.15	761.92	864.36	939.34	950.95	932.82
13:00	886.42	889.19	920.8	880.05	762.77	686.36	697.06	788.56	868.38	936.41	946.24	920.39
14:00	774.11	790.78	827.04	794.88	695.74	627.32	655.66	736.09	787.99	839.2	856.43	838.42
15:00	651.6	668.63	684.39	640.63	552.4	533.25	556.03	616.91	635.56	673.33	688.26	689
16:00	470.88	479.6	481.48	441.71	371.16	367.72	389.46	434.37	436.75	449.76	473.99	500.31
17:00	275.65	281.26	264.1	228.08	176.7	177.85	199.88	220.27	218.6	215.26	231.34	273.29
18:00	105.31	104.96	76.28	26.3	1.68	1.9	28.82	36.41	6.17	1.9	6.74	64.81

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Las Lomas [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	65.27	44.37	52.18	62.77	58.88	44.75	41.25	58.06	96.23	123.69	123.93	107.83
08:00	216.23	203.76	217.55	240.4	203.15	172.01	176.74	216.49	281.37	307.4	308.18	288.48
09:00	406.02	410.01	426.58	449.65	352.15	293.13	300.4	369.55	481.22	535.55	537.99	509.94
10:00	621.06	618.32	627.19	640.77	525.64	450.88	473.58	568.01	683.7	744.55	735.27	699.23
11:00	755.32	758.87	764.64	762.17	641.26	568.67	608.17	719.48	820.72	878.31	873.3	835.31
12:00	808.31	797.94	836.89	831.57	730.23	669.32	729.25	829.84	891.32	954.14	946.34	914.36
13:00	732.9	757.38	811.81	796.87	727.97	663.41	737.83	824.86	866.86	920.9	923.05	887.92
14:00	614.3	661.93	708.96	698.1	654.23	598.83	678.27	744.95	778.44	809.59	825.68	771.41
15:00	427.21	485.19	502.54	498.05	480.65	483.43	551.92	608.57	621.15	621.16	626.98	559.97
16:00	255.13	322	336.96	324.2	317.96	335.22	389.74	428.07	419.21	395.33	389.15	345.33
17:00	153.94	174.46	175.88	162.27	157.09	164.95	198.27	220.07	201.45	186.1	190.9	187.56
18:00	74.38	83.92	53.51	17.77	1.68	1.83	31.28	40.92	2.49	1.43	1.89	43.01

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Cura Mori [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	66.94	48.64	52.21	61.64	54.6	39.35	32.34	49.44	83.69	105.86	121.53	111.06
08:00	247.61	219.18	240.5	245.49	202.66	169.82	150.27	166.32	209.55	239.57	286.64	293.25
09:00	471.75	450.35	473.68	471.38	379.41	302.98	255.12	286.62	378.86	446.45	483.72	501.85
10:00	675.39	680.08	690.12	677.64	556.07	446.49	407.95	454.71	586.31	662.47	689.22	708.95
11:00	835.71	834.52	848.93	825.86	694.6	569.73	537.88	625.46	757.99	834.8	842.64	848.98
12:00	911.56	911.73	924.55	897.35	774.94	670.96	670.64	781.6	875.55	947.18	947.52	929.07
13:00	879.02	896.56	927.45	877.39	768.23	688.87	703.4	807.3	874.36	935.66	947.92	918.8
14:00	774.96	785.62	826.77	791.3	700.27	632.31	664.13	747.45	789.09	842.5	857.43	832.79
15:00	631.49	657.56	666.94	636.38	554.68	531.91	559.9	623.12	640.58	670.7	685.3	690.88
16:00	460.21	468.43	474.48	431.19	373.62	367.17	390.79	435.06	440.03	448.94	470.83	495.28
17:00	269.95	274.92	260.3	224.33	178.67	176.03	199.43	223.04	217.73	213.24	228.56	269.37
18:00	101.77	101.57	75.12	25.28	1.66	1.91	28.37	37.01	5.6	1.87	5.76	62.9

Datos mensuales de irradiación global horizontal en El Tallán [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	70.81	47.96	52.59	61.68	53.45	38.2	32.19	48.42	83.15	96.78	106.28	114.76
08:00	248.11	217.12	243.52	245.24	190.58	154.9	142.75	186.81	218.07	219.63	250.88	293.08
09:00	471.47	432.35	461.75	463.69	368.17	282.46	240.86	272.39	349.17	414.13	455.44	493.35
10:00	669.53	657.57	678.15	674.09	541.64	433.29	377.09	436.79	558.66	630.88	656.5	693.15
11:00	807.97	814.66	830.17	817.92	669.85	558.95	510.83	600.8	729.99	809.52	832.03	834.2
12:00	880.68	881.01	918.71	889.18	757.79	653.76	659.14	763.27	869.95	920.73	932.79	914.96
13:00	848.86	864.93	911.61	871.71	750.81	659.71	691.88	793.3	868.43	927.39	932.1	902.28
14:00	762.22	773.56	829.1	789.24	684.56	611.94	645.77	739.59	785.45	830.09	841.24	824.25
15:00	631.67	646.09	680.76	638.62	547.34	514.76	548.81	616.02	639.05	665.09	683.28	681.1
16:00	474.5	473.22	489.96	442.65	370.73	358	388.22	433.03	438.34	443.99	466.81	494.48
17:00	283.93	273.16	267.69	226.3	176.99	176.53	200.11	221.62	217.49	211.47	227.71	270.49
18:00	103.51	101.77	77.75	26.23	1.69	1.86	28.7	37.28	6.03	1.89	6.89	65.71

Nota: **Adaptado de PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS)**

Anexo H. Datos mensuales de irradiación global horizontal en Sechura

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Sechura [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	75.12	52.31	52.49	62.73	54.82	38.37	31.53	47.9	85.66	108.9	129.81	115.81
08:00	270.26	237.73	246.71	257.61	222.8	195.12	193.98	216.73	239.4	248.47	295.69	319.43
09:00	500.33	474.24	481.06	479.25	399.35	334.77	327.76	342.63	381.88	426.98	475.92	525.6
10:00	705.24	687.5	704.94	682.47	566.65	466.58	445.71	488.65	581.79	656.05	682.42	721.1
11:00	851.37	851.03	856.3	828.82	708.72	576.54	572.11	645.57	757.68	838.31	862.45	859.96
12:00	922.22	918.43	930.74	906.39	779.83	673.57	694.73	780.48	879.86	942.4	962.37	935.03
13:00	935.53	939.46	940.57	893.1	782.04	691.04	726.14	808.53	875.51	943.21	955.92	929.23
14:00	874.74	874.11	858.82	811.21	710.99	638.76	674.38	743.57	791.01	846.48	870.56	862.41
15:00	733.67	732.54	727.43	666.3	574.8	549.19	589.67	637.23	646.77	679.14	698.88	718.2
16:00	546.54	535.12	532.69	464.77	389.2	380.47	412.55	448.43	446.56	463.62	480.67	513.92
17:00	325.9	327.54	295.85	236.25	184.12	184.79	209.04	230.16	222.11	223.01	243.78	280.1
18:00	114.81	114.11	81.98	28.75	1.77	1.96	31.18	39.66	8.72	2.1	10.24	70.14

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Vice [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	64.75	46.41	49.08	61.17	52.44	37.11	31.39	44.22	67.75	87.16	99.3	104.95
08:00	233.79	216.35	235.9	239.25	189.53	147.05	143.68	137.77	183.68	200.49	247.46	275.16
09:00	459.49	432.37	454.34	452.8	365.12	269.46	229.57	244.86	342.12	399.99	445.58	474.16
10:00	652.04	656.67	677.32	662.55	537.39	422.63	373.66	411.59	540.97	613.84	662.61	681.14
11:00	801.47	811.13	828.59	807.72	666.91	536.63	500.22	579.42	721.67	788.32	822.97	832.94
12:00	873.86	882.3	905.98	878.63	746.85	645.83	647.67	742.9	852.33	915.75	920.32	909.59
13:00	866.08	860.4	911.7	868.91	752.18	659.37	683.45	775.71	861.49	918.7	934.99	902.13
14:00	790.36	779.9	825.71	786.18	678.51	606.68	641.7	724.19	787.16	827.17	845.08	830.07
15:00	660	678.98	684.66	641.03	541.73	506.61	544.59	609.36	637.74	661.09	679.35	693.5
16:00	474.46	498.23	490.5	442.78	368.61	351.61	388.87	423.78	437.74	450.16	470.9	497.18
17:00	281.97	282.91	273.3	227.72	178.71	174.55	200.54	219.58	218.52	214.56	230.74	269.74
18:00	105.41	105.12	78.61	27.45	1.72	1.84	30.09	37.26	7.87	2.02	8.15	65.61

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Bernal [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	72.44	49.99	52.23	63.77	55.1	39.39	32.02	48.29	85.99	105.01	121.75	118.05
08:00	262.12	226.08	249	254.97	208.63	169.07	161.23	195.78	225.38	248.34	286.81	316.15
09:00	489.92	451.79	478.75	477.52	400.8	309.39	277.85	284.57	373.58	440.23	488.65	524.64
10:00	682.88	671.96	690.96	676.9	572.66	459.16	418.1	455.93	583.26	658.3	694.41	714.45
11:00	820.82	832.04	848.74	822.76	699.6	577.04	541.7	628.28	752.76	832.74	857.02	860.72
12:00	908.62	906.66	924.78	896.58	778.96	672.81	684.02	776.55	868.16	936.91	954.8	945.67
13:00	877.24	886.26	918.17	884.86	775.4	682.37	707.18	796.91	872.32	936.76	955.07	930.23
14:00	806.14	805.18	839.42	802.25	704.24	632.21	661.19	741.39	793.06	835.78	857.82	848.55
15:00	657.84	679.31	698.67	649.75	566.61	522.37	564.76	621.84	644.08	673.11	693.65	703.32
16:00	497.24	504.67	516.65	451.98	387.71	364.35	394.05	436.71	439.72	457.96	475.14	512.55
17:00	301.98	297.77	284.58	232.88	184.59	178.54	202.22	225.01	219.21	218.15	235.74	279.03
18:00	106.08	108.32	79.08	27.02	1.75	1.92	29.49	37.91	6.99	1.96	7.96	67.59

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Bellavista de la Unión [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	70.54	50.5	50.86	61.78	53.97	37.71	32.12	46.85	80.39	104.17	123.99	115.74
08:00	257.5	224.16	239.48	247.47	199.95	164.3	167.26	180.36	220.22	250.81	287.77	309.17
09:00	484.04	452.03	469.31	471.01	385.69	302.28	271.43	284.26	372.84	444.83	489.23	523.16
10:00	678.84	676.36	692.49	678.23	556.94	458.48	415.78	456.68	579.86	660.22	696.26	714.78
11:00	826.68	837.27	848.99	823	691.33	573.69	530.96	621.67	755.33	826.55	853.34	858.73
12:00	902.91	910.61	927.53	901.83	763.81	659.61	679.66	764.54	869.22	933.89	951.66	944.84
13:00	885.32	900.93	919.48	884.32	768.29	676.18	708.75	790.41	866.41	934.72	952.01	929.74
14:00	822.64	827.8	845.27	800.38	693.4	630.28	666	733.44	793.23	838.99	855.71	846.88
15:00	674.66	701.17	700.18	651.29	562.91	518.16	568.13	619.99	645.8	671.05	693.38	703.14
16:00	493.55	521.65	509.39	453.32	382.84	361.57	398.28	433.28	441.03	458.73	476.97	509.93
17:00	296.63	301.58	282.81	231.69	183.11	178.95	204.26	223.64	221	220.25	238.03	276.99
18:00	108.44	109.36	81.43	28.06	1.76	1.95	30.24	37.95	7.88	2.03	8.75	67.74

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Cristo Nos Valga [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	75.16	51.82	53.41	63.59	54.78	39.65	32.27	48.14	87.32	119.81	137.7	120.89
08:00	272.85	236.86	255.96	256.12	209.67	194.25	193.43	207.7	238.31	278.12	305.84	329.85
09:00	507.9	474.02	482.08	479.06	387.47	326.45	295.82	298.55	384.42	452.38	498.59	543.42
10:00	698.22	693.39	703.77	684.46	572.34	464.19	426.68	465.17	591.27	667.79	705.41	729.86
11:00	840.79	846.3	857.09	828.58	706.67	578.69	559.27	642.45	765.31	844.65	876.33	873.85
12:00	920.9	931.31	939.93	908.12	779.94	674.16	693.31	787.41	884.99	953.69	968.87	952.29
13:00	896.42	914.53	925.78	891.21	776.09	690.17	717.47	813.32	880.47	945.19	962.34	941.6
14:00	824.27	844.84	853.21	807.21	700.64	633.41	674.01	752.99	796.61	847.06	865.38	866.94
15:00	687.83	703.82	719.36	660.57	567.67	543.32	582.87	633.35	646.22	678.55	702.65	716.2
16:00	528.02	528	532.97	458.54	386.52	379.23	408.47	445.59	442	464.37	483.56	512.72
17:00	319.12	315.75	293.66	237.19	184.82	183.88	207.39	229.63	220.2	221.8	239.21	281.95
18:00	110.87	111.5	80.86	27.57	1.77	1.94	30.05	38.8	7.01	1.97	8.32	67.8

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Rinconada Llicuar [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	70.54	50.5	50.86	61.77	53.96	37.69	32.1	46.76	80.39	104.17	123.99	115.74
08:00	257.5	224.16	239.48	247.46	199.93	164.28	167.24	180.35	220.22	250.81	287.77	309.17
09:00	484.03	452.03	469.3	470.99	385.67	302.27	271.42	284.25	372.83	444.82	489.22	523.15
10:00	678.82	676.34	692.47	678.2	556.92	458.46	415.77	456.67	579.84	660.21	696.24	714.76
11:00	826.66	837.25	848.97	822.97	691.31	573.67	530.95	621.66	755.31	826.53	853.32	858.71
12:00	902.89	910.59	927.5	901.8	763.78	659.59	679.64	764.52	869.2	933.86	951.64	944.81
13:00	885.3	900.9	919.45	884.29	768.26	676.15	708.72	790.39	866.38	934.7	951.98	929.71
14:00	822.62	827.78	845.25	800.36	693.38	630.26	665.98	733.41	793.2	838.96	855.68	846.86
15:00	674.64	701.15	700.17	651.27	562.89	518.15	568.11	619.97	645.78	671.03	693.35	703.11
16:00	493.53	521.64	509.38	453.31	382.83	361.56	398.27	433.27	441.02	458.71	476.95	509.9
17:00	296.61	301.57	282.8	231.68	183.11	178.94	204.26	223.63	220.99	220.24	238.01	276.97
18:00	108.42	109.35	81.43	28.06	1.76	1.95	30.24	37.95	7.88	2.03	8.75	67.78

Nota: **Adaptado de PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS)**

Anexo I. Datos mensuales de irradiación global horizontal en Morropón

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Chulucanas [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	70.37	48.28	53.46	61.5	58.29	42.95	40.22	54.4	93.25	109.72	123.75	111.54
08:00	229.91	201	227	233.33	208.6	160.55	158.5	182.77	243.99	274.88	293.97	287.8
09:00	429.7	416.27	434.24	440.54	374.53	288.84	275.26	337.17	455.29	503.27	520.11	489.05
10:00	621.82	616.77	655.16	632.17	532.63	443.5	450.25	534.37	647.78	718.32	721.3	690.81
11:00	767.77	743.21	794.06	774.52	647.93	563.98	580.14	697.44	800.01	865.68	861.58	824.56
12:00	827.47	820.67	849.63	833.45	722.58	663.59	695.65	808.83	875.75	918.43	943.49	881.91
13:00	730.04	769.38	823.52	800.39	718.73	662.69	721.21	811.23	854.03	896.05	914.84	855.38
14:00	566.69	643.54	696.21	702.6	635.76	601.26	661.43	734.15	764.59	776.99	788.35	735.34
15:00	355.72	471.9	479.27	483.06	462.04	482.55	536.13	597.77	603.77	583.16	570.42	492.38
16:00	211.01	293.91	297.58	302.58	295.03	329.37	376.89	410.66	400.15	376.5	353.22	297.61
17:00	137.88	163.73	169.49	157.56	143.76	161.17	192.84	208.94	198.8	183.37	172.63	169.01
18:00	71.11	78.91	51.17	13.79	1.45	1.65	19.76	31.46	2.39	1.34	1.88	39.83

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Morropón [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	64.37	43.29	52.6	60.55	58.97	46.07	36.55	56.13	95.9	111.49	123.37	108.31
08:00	213.46	189.65	219.77	235.09	204.63	166.27	161.96	196.69	270.1	293.4	304.65	301.66
09:00	403.61	389.82	421.88	431.46	365.36	293.57	305.91	372.28	476.96	529.44	530.52	502.14
10:00	597.39	569.36	608.02	624.14	521.91	450.51	473.52	558.8	665.65	717.85	714.75	678.1
11:00	689.95	696.44	725.67	738.87	631.17	560.07	591.12	701.36	786.76	836.23	846.42	798.95
12:00	683.68	713.38	773.53	775.88	665.81	631.14	683.28	773.24	836.86	866.29	892.08	849.28
13:00	598.98	654.63	691.62	712.8	647.53	617.9	688.86	763.46	814.04	828.93	835.22	788.96
14:00	475.37	552.88	594.62	612.48	573.24	559.45	623.58	696.8	727.97	733.66	703.07	638.02
15:00	307.76	394.17	423.21	410.26	399.79	438.03	509.65	565.86	571.26	526.6	491.72	426.35
16:00	185.34	261.23	282.94	256.69	259.83	294.39	353.96	389.21	369.7	329.28	294.59	251.49
17:00	116.5	155.14	147.95	140.08	128.8	147.87	179.11	199.61	183.15	163.14	151.78	143.02
18:00	65.07	70.43	44.79	9.93	1.17	1.59	7.56	20.78	2.16	1.22	1.94	37.68

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Chalaco [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	74.88	48.94	55.14	66.8	66.99	52.95	47.67	65.66	110.43	143.77	158.51	123.44
08:00	243.34	217.17	233.5	254.61	245.19	225.87	236.39	267.23	327.52	362.8	379.62	329.17
09:00	401.84	384.09	411.15	452.99	429.96	423.48	440.94	483.75	546.95	590.24	587.08	529.44
10:00	509.83	500.17	532.17	573.39	579.79	571.68	608.97	656.53	709.99	734.14	738.36	673.65
11:00	510.43	507.19	536.5	590.97	633.43	662.4	709.52	764.01	797.88	783.59	773.44	710.89
12:00	444.68	451.14	482.55	496.31	579.78	658.71	727.8	789.97	809.01	731.3	727.63	647.83
13:00	371.39	400.68	421.75	420.53	532.12	624.98	714.51	761	767.93	669.01	643.12	532.66
14:00	304.75	332.44	363.13	361.09	448.81	573.95	643.66	680.5	679.76	566.03	517.72	427.19
15:00	219.23	272.46	297.95	261.84	315.39	431.92	516.64	537.43	521.26	402.95	366.64	269.15
16:00	148.76	171.24	205.42	180.47	199.38	281.34	354.2	375.91	325.77	258.36	240.12	177.09
17:00	92.49	110.63	115.99	102.06	111.36	149.14	185.2	196.66	174.57	141.85	129.23	96.91
18:00	76.37	71.38	49.31	8.57	1.22	1.5	1.68	2.34	2.37	1.13	1.95	39.88

Datos mensuales de irradiación global horizontal en La Matanza [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	64.2	45.1	50.95	60.97	59.34	45.05	40.31	54.56	91.83	106.59	123.21	108.96
08:00	222.97	192.82	219.31	228.23	207.97	160.19	154.41	189	252.92	276.23	291.55	272.15
09:00	425.86	402.26	428.46	442.64	373.29	285.97	280.03	347.76	455.48	504.12	504.33	485.99
10:00	614.02	596.78	639.6	637.2	533.04	443.04	445.91	536.32	646.09	711.02	703.25	683.41
11:00	725.66	720.55	772.53	764.78	639.64	552.64	574.68	690.67	790.99	841.37	840.5	818
12:00	740.31	769.47	826.17	812.57	699.94	636.36	687.85	789.96	863.51	902.77	927.71	854.63
13:00	657.45	708.11	766.14	755.47	676.94	638.4	697.33	794.71	843.25	876.23	896.72	818.72
14:00	503.4	589.2	659.67	660.53	602.48	585.65	641.79	724.94	753.48	756.33	759.87	674.31
15:00	325.75	426.17	472.85	468.75	443.07	464.94	541.19	595.92	598.67	569.78	549.82	471.63
16:00	193.56	276.58	302.87	304.07	289.88	318.66	370.52	407.71	395.45	371.27	345.81	293.36
17:00	127.92	156	169.76	154.36	144.6	156.14	190.78	211.87	198.81	177.42	170.97	167.08
18:00	69.41	75.05	50.71	12.5	1.25	1.62	14.49	28.07	2.27	1.25	1.76	40.08

Datos mensuales de irradiación global horizontal en San Juan de Bigote [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	61.9	45.3	47.17	59.75	56.5	46.18	38.01	58.97	97.97	124.04	136.89	109.46
08:00	207.04	190.43	201.53	227.01	194.32	170	186.17	232.71	291.12	325.06	340.06	301.82
09:00	384.28	365.83	397.04	421.37	368.48	322.03	349.93	427.69	503.18	556.55	561.66	510.14
10:00	550.13	549.6	558.97	583.46	529.43	478.69	528.3	613.93	679.51	741.62	737.79	682.69
11:00	656.6	655.8	673.33	674.2	634.97	584.64	650.28	731.47	791.68	824.59	854.19	804.7
12:00	646.36	670.63	712.47	703.1	666.12	650.27	735.56	807.71	840.78	850.83	889.97	839.45
13:00	571.46	615.72	676.62	663.72	652.04	644.03	721.15	786.58	800.21	803.62	812.09	760.99
14:00	440.63	501.31	565.22	572.63	567.45	581.79	654.53	708.49	712.43	686.02	693.98	617.88
15:00	292.53	376.66	401.19	398.68	403.35	443.29	520.94	568.76	556.73	507.66	477.58	403.98
16:00	180.71	250.79	264.23	249.28	267.69	290.01	352.06	389.25	359.94	317.53	289.8	228.86
17:00	123.42	153.66	151.11	136.87	132.4	144.95	179.35	194.19	177.08	157.86	150.27	131.88
18:00	41.31	73.54	46.34	8.78	1.2	1.64	1.78	2.76	1.82	1.08	1.7	28.46

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Yamango [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	37.01	29.35	32.74	39.61	38.38	32.58	32	41.46	60.2	126.87	142.16	72.17
08:00	198.56	179.73	200.98	224.3	218.94	202.67	218.81	251.69	307.76	342.82	358.31	298.49
09:00	321.58	317.23	361.31	391.33	381.7	377.65	406.45	450.1	524.88	557.39	565.13	477.32
10:00	388.23	403.45	428.09	486.06	507.73	507.42	568.96	616.24	677.11	722.13	707.92	608.04
11:00	388.02	395.27	434.11	494.5	548.99	593.22	667.73	730.92	763.05	769.04	763.18	651.65
12:00	347.62	359.02	396.11	426.85	491.49	586.06	685.39	756.55	788.51	737.51	717.29	578.43
13:00	301.76	333.74	363.88	381.59	442.56	551.31	662.11	732.03	736.63	649.15	615.94	490.55
14:00	272.52	305.74	325.17	330.02	382.07	485.9	583.09	639.41	635.21	554.37	507.96	392.95
15:00	218.33	255.09	278.32	268.96	278.12	341.21	446.78	490.42	464.91	391.93	346.85	247.68
16:00	143.85	180.87	191.58	196.01	194.09	233.43	304.96	332.85	301.29	235.98	211.24	157.53
17:00	96.59	108.07	127.65	115.21	110.37	122.54	161.21	176.82	157.77	128.3	124.61	94.57
18:00	70.22	68.32	43.86	7.72	1.15	1.4	1.66	2.55	2.18	1.11	1.74	31.35

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Salitral [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	64.1	46.12	38.87	46.25	57.2	35.88	31.76	42.16	92.33	123.14	136.05	109.08
08:00	215.22	201.02	208.57	229.5	207.63	173	187	230.38	295.41	327.5	337.06	300.65
09:00	400.89	390.85	409.05	433.69	379.65	333.52	353.35	426.33	511.28	565.87	562.03	507.19
10:00	576.53	573.97	595.02	600.78	537.67	498.55	530.01	609.29	685.3	747.11	735.16	678.14
11:00	668.71	687.01	717.05	717.74	648.64	606.08	657.36	736.41	797.52	838.09	867.91	803.41
12:00	683.97	709.51	777.69	755.91	688.8	671.46	737.77	802.64	846.76	866.94	898.96	851.55
13:00	598.93	665.44	727.77	715.39	675.94	666.99	729.9	784.24	807.84	831.77	844.34	790.43
14:00	457.04	537.18	605.46	607.36	587.67	592.48	663.06	706.71	732.55	703.55	719.2	645.88
15:00	300.14	392.09	433.66	419.92	425.97	463.32	529.79	578.25	569.27	532.92	501.84	416.35
16:00	184.24	275.03	276.03	258.2	270.14	302.67	360.48	401.22	369.54	337.81	301.84	240.77
17:00	122.76	163.05	153.92	140.81	138.1	149.67	183.54	200.54	184.57	158.62	155.95	130.87
18:00	64.4	74.07	45.93	8.95	1.23	1.49	2.08	2.82	2.15	1.13	1.54	30.75

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Buenos Aires [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	65.53	46.31	51.45	62.24	57.19	45.71	41.29	56.63	93.21	111.15	124.99	108.18
08:00	220.99	201.15	217.79	234.24	210.27	167.83	167.01	207.99	276.54	301.37	313.64	285.9
09:00	426.96	404.93	423.89	444.55	373.79	304.75	313.09	387.38	482.92	540.57	536.75	504.74
10:00	602.73	589.47	629.14	634.95	530.81	461.61	485.98	573.5	675.93	730.53	724.68	685.02
11:00	708.84	715.35	750.78	749.6	642.05	576.06	604.51	712.27	808.02	857.04	859.61	815.11
12:00	739.65	755.8	809.96	796.04	690.61	662.77	694.37	793.64	855.24	895.47	919.95	869.11
13:00	650.62	708.68	766.72	751.87	674.37	649.13	695.43	777.8	828.75	847.94	882.45	814.24
14:00	515.99	598.78	659.85	643.91	598.23	577.91	641.27	701.47	738.95	737.11	751.52	676.26
15:00	334.29	431.86	476.32	447.58	428.54	459.19	518.25	569.74	581.67	551.02	531.02	458.21
16:00	198.07	287.33	308.21	296.74	282.92	309.53	357.6	400.86	381.53	358.6	332.3	271.85
17:00	118.47	161.12	169.47	152.98	142.04	149.74	183.97	205.18	186.45	175.88	172.27	155.96
18:00	66.91	75.2	48.82	10.25	1.2	1.63	5.74	19.07	2	1.31	1.61	31.63

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Sta. Catalina de Mossa [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	38.07	28.71	34.24	39.98	40.63	33.73	32.66	41.31	60.62	73.4	75.02	60.65
08:00	213.16	196.32	223.48	239.04	230.61	206.98	216.93	256.14	311.74	344.32	362.16	308.27
09:00	385.42	358.79	415.1	436.6	394.99	380.43	411.3	459.52	537.55	575.64	577.97	508.4
10:00	504.43	503.65	564.24	585.18	546.36	538.59	577.48	639.68	705.99	760.35	745.14	680.43
11:00	546.38	568.15	607.23	658.17	632.91	638.11	692.66	764.35	809.42	846.5	854.48	772.03
12:00	508.55	505.02	569.77	584.61	615.83	651.14	742.97	804.78	843.74	838.48	839.81	747.26
13:00	430.48	465.39	486.44	496.69	560.23	634.69	731.25	786.71	817.28	786.68	756.63	648.67
14:00	333.98	394.44	408.39	402.21	476.57	554.27	656.26	714.76	724.1	653.03	620.28	503.1
15:00	231.48	299.32	314.98	286.19	313.97	406.47	507.57	551.57	544.77	467.58	417.21	309.77
16:00	145.66	207.14	217.91	184.83	196.6	262.54	344.51	372.39	330.2	275.85	243.6	189.14
17:00	95.93	117.41	131.33	110.62	114.81	137.83	177.05	192.07	174.68	142.66	133.97	104.44
18:00	60.62	68.33	37.93	8.54	1.08	1.57	3.36	17.8	1.78	1.31	1.55	31.51

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Santo Domingo [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	67.74	48.5	50.85	44.11	39.94	33.15	31.67	39.8	109.28	138.79	153.97	121.42
08:00	225.98	203.23	219.08	252.49	245.73	227.12	232.94	268.2	321.95	358.58	374.73	317.48
09:00	360.41	356.09	394.29	433.2	426.46	415.89	434.77	477.17	541.24	584.89	581.57	500.91
10:00	435.47	448.46	501.51	545.68	570.74	567.07	599.32	654.37	710.49	729.34	713.74	642.82
11:00	434.48	460.46	492.75	557.07	626.2	663.35	696.95	760.63	791.06	770.07	758.54	659.14
12:00	376.43	392.48	436.44	449.06	597.68	649.58	717.78	788.81	806.78	723.54	734.01	583.8
13:00	321.35	350.02	382.8	403.25	533.21	612.55	697.15	762.5	749.41	651.22	633.43	476.4
14:00	263.2	301.79	325.94	334.72	440.41	552.24	623.47	672.05	653.64	551.2	519.63	389.75
15:00	195.19	244.59	262.5	254.89	292.08	392.68	482.99	531.27	472.88	387.41	347.66	225.55
16:00	137.83	165.59	187.82	180.05	192.26	262.84	338.74	357.96	289.17	244.67	215.79	145.55
17:00	81.24	104.18	109.02	108.96	86.97	69.02	163.2	190.23	154.48	132.49	118.86	89.15
18:00	35.06	36.62	34.75	7.95	1.05	1.48	1.98	17.32	1.72	1.18	1.36	26.07

Nota: **Adaptado de PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS)**

Anexo J. Datos mensuales de irradiación global horizontal en Ayabaca

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Pacaipampa [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	37.53	29.81	31.91	42.28	67.48	40.47	30.52	38.63	99.15	140.51	150.68	56.06
08:00	254.3	219.29	222.55	245.72	249.96	230.4	234.93	272.29	331.23	365	369.31	324.25
09:00	459.07	417.19	437.75	448.61	445.12	430.2	438.38	482.31	553.99	591.04	585.27	542.98
10:00	618.91	603.11	602.34	619.64	607.99	588.49	607.7	660.27	713.67	743.79	744.65	710.74
11:00	706.46	709.3	689	696.87	701.72	679.26	706.05	773.18	813.85	818.96	840.09	805.09
12:00	733.51	699.38	702.69	717.51	712.04	701.84	759.1	814.47	833.34	772.89	799.22	788.29
13:00	673.13	653.23	658.1	662.16	665.9	684.27	736.21	804.83	788.26	676.45	707.38	714.35
14:00	627.74	568.61	578.01	572.72	597.45	616.11	685.16	723.15	698.84	605.53	644.77	640.39
15:00	507.66	491.43	475.12	467.32	472.78	499.41	550.06	578.62	572.08	500.18	492.73	498.12
16:00	360.83	352.5	342.12	320.38	322.46	349.27	390.91	412.2	404.45	348.05	328.19	350.25
17:00	204.78	203.73	188.17	167.54	156.45	169.09	203.51	215.28	199.92	172.27	170.47	190.49
18:00	54.56	81.13	43.75	7.91	1.29	1.57	1.68	2.04	1.83	1.3	1.59	32.47

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Ayabaca [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	77	50.39	59.8	72.14	71.96	59.13	50.58	69.93	114.44	150.68	156.36	119.63
08:00	251.67	221.28	240.9	255.85	260.47	244.69	244.04	279.56	336.43	372.85	369.71	322.23
09:00	434.42	397.73	430.38	447.27	458.31	436.78	452.79	504.15	555.87	572.41	566.15	515.91
10:00	564.58	536.52	576.14	592.34	599.38	594.72	624.39	667.79	725.91	686.94	689.52	635.43
11:00	586.07	559.07	598.01	637.7	657.87	680.54	723.85	774.52	791.89	712.49	699.81	671.79
12:00	558.92	546.83	590.99	574.66	611.01	666.77	717.06	787.46	755.62	666.5	655.87	637.01
13:00	491.08	503.12	546.67	533.65	562.11	637.43	696.11	726.24	715.63	596.03	620.82	560.64
14:00	432	441.56	467.09	458.75	490.53	572.96	628.36	664.12	624.68	538.08	532.66	486.23
15:00	323.19	369.46	400.12	375.71	388.44	446.09	502.57	522.53	491.64	428	399.29	354.44
16:00	222.51	256.33	262.2	268.36	272.09	313.44	357.44	370.77	340	277.16	254.82	235.28
17:00	136.03	152.79	154.63	114.48	69.99	63.75	71.13	115.2	189.07	96.73	96.84	131.38
18:00	36.47	40.8	39.49	8.69	1.37	1.7	1.86	2.09	1.76	1.08	1.58	25.67

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Frías [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	38.99	30.33	32.87	38.58	39	32.45	31.91	38.13	54.51	66.62	115.52	105.51
08:00	252.93	223.11	237.91	265.81	254.73	226.89	234.09	267.5	332.3	370.38	378.29	330.66
09:00	395.69	378.89	410.03	442.41	436.45	409.86	435.27	485.49	554.55	586.02	571.74	520.26
10:00	458.22	448.04	497.84	539.14	567.22	571.18	598.66	653.95	717.61	708.16	678.25	632.56
11:00	437.91	433.57	463.52	540.45	611.16	648.16	691.62	761.32	801.47	747.41	725.99	646.98
12:00	368.69	372.49	409.86	427.63	556.91	618.9	711.23	792.88	797.59	697.16	673.57	576.45
13:00	307.73	329.68	344.05	378.92	506.57	586.57	685.86	763.27	741.28	635.15	602.99	488.55
14:00	267.79	288.62	309.34	318.74	417.82	518.87	591.68	670.04	639.57	547.91	488.88	376.41
15:00	202.92	243.86	260.73	238.99	274.29	386.96	454.89	500.56	438.99	400.43	330.86	225.72
16:00	141.81	162.88	192.84	169.42	184.27	258.12	315.12	338.15	276.22	240.24	210.93	146.3
17:00	92.46	117.79	119.49	106.99	106.53	139.9	169.04	179.94	146.57	136.57	112.76	92.51
18:00	86.93	79.49	51.61	10.8	1.05	1.65	11.58	28.19	2.54	1.11	1.92	43.88

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Suyo [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	58.5	44.51	51.15	64.45	58.24	48.47	45.13	62.39	103.71	131.5	140.52	103.83
08:00	200.9	189.4	207.51	237.57	192.67	177.72	192.61	254.48	316.57	346.15	355.29	304.38
09:00	400.63	376.32	422.24	433.89	361.17	341.02	384.29	460.37	542.07	590.94	587.17	530.56
10:00	590.72	566.86	623.92	624.48	545.65	510.12	566.83	651.76	734.12	778.33	772.97	722.34
11:00	696.14	664.36	720.9	738.77	665.92	623.85	683.5	783.62	848.64	898.58	899.75	850.45
12:00	702.05	677.28	740.22	753.18	725.57	684.69	754.01	848.73	894.31	938.71	934.3	885.92
13:00	570.42	611.81	668.51	674.98	673.69	654.07	730.35	824.1	855.94	883.02	874.02	803.27
14:00	431.09	505.87	544.31	552.87	578.01	584.06	664.14	735.24	755.04	771.23	733.21	636.9
15:00	293.32	387.44	372.84	371.64	390.34	443.02	515.38	579.37	592.14	546.9	514.73	426.53
16:00	198.4	267.4	254.28	259.5	253.74	290.08	354.03	392.76	385.47	332.23	319.7	268.57
17:00	115.63	164.47	152.75	141.77	137.98	151.89	179.72	201.35	190.55	158.39	155.43	150.29
18:00	63.41	73.81	46.5	12.11	1.52	1.63	21.83	32.03	2.24	1.29	1.58	32.3

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Paimas [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	60.86	42.59	45.76	62.12	39.44	32.41	32.58	46.64	104.02	130.74	142.18	107.21
08:00	198.34	187.79	212.69	236.84	209.97	190.32	215.17	258.44	314.3	351.9	359.44	303.57
09:00	396.5	375.11	421.27	443.72	389.4	365.24	413.64	466.29	542.05	593.37	590.91	521.95
10:00	567.62	537.05	600.05	606.33	560.89	517.31	590.71	648.15	718.12	769.94	768.05	702.85
11:00	629.2	607.12	649.49	685.01	649.22	603.45	699.84	754.34	817.78	858.35	867.27	805.61
12:00	579.5	572.96	613.57	603.51	652.98	625.05	720.51	781.74	822.97	873.27	876.56	807.51
13:00	473.58	509.7	506.9	532.28	585.85	589.85	698.14	766.67	783.2	824.56	805.23	723.04
14:00	379.15	427.22	429.5	427.01	480.72	526.64	625.92	696.78	689.35	715.27	681.69	569.27
15:00	261.18	347.13	324.67	297.26	305.47	368.42	487.02	547.68	540.98	510.13	473.05	373.98
16:00	180.67	248.1	224.41	195.91	202.91	245.73	333.18	375.34	348.73	313.97	294.34	240.69
17:00	117.98	152.69	135.96	118.31	117.94	133.67	175.72	195.97	181.76	149.1	144.32	135.57
18:00	61.13	72.18	44.35	10.27	1.3	1.48	17.54	28.41	2.23	1	1.54	32.21

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Sapillica [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	37.37	29.71	33.2	38.38	39.98	34.08	32.1	39.64	55.91	66.13	70.75	58.54
08:00	245.1	208.21	233.02	262.48	256.87	233.53	242.35	276.82	340.91	377.79	392.23	340.58
09:00	406.6	372.67	403.05	440.52	451.58	432.66	459.62	497.37	570.44	623.47	620.4	544.56
10:00	515.47	475.31	524.19	552.13	606.2	597.04	644.62	695.55	763.79	801.22	780.39	709.88
11:00	517.14	501.4	528.16	584.51	682.11	693.85	756.95	825.29	878.07	898.64	874.36	796.23
12:00	450.35	442.17	478.9	498.7	636.18	703.94	802.29	862.18	905.02	910.01	869.24	762.71
13:00	372.59	380.34	404.69	429.29	583.03	654.82	762.62	838.77	842.66	850.47	808.73	651.75
14:00	291.34	328.06	355.29	361.11	467.06	570.53	682.02	748.44	745.71	719.11	664.01	499.93
15:00	215.53	274.73	275.83	274.14	288.92	378.58	515.06	571.87	550.44	508.57	438.93	315.17
16:00	147.83	185.02	205.36	189.48	191.45	243.17	346.69	380.15	335.01	300.75	264.82	192.34
17:00	114.7	129.21	124.33	119.84	112.97	128.85	179.88	195.64	180.98	158.81	152.45	128.7
18:00	63.39	77.17	51.26	11.96	1.14	1.4	17.83	33.34	2.43	1.12	1.56	34.06

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Lagunas [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	37.78	29.72	32.66	38.34	39.19	33.93	32.17	39.9	98.51	147.66	162.89	62.87
08:00	252.71	215.57	235.08	265.31	260.54	241.93	245.77	284.58	347.74	377.82	393.37	338.7
09:00	454.86	406.19	427.94	467.83	463.6	451.03	460.33	509.43	578.97	623.96	629.37	566.15
10:00	630.68	584.36	614.3	639.34	634	623.45	649.86	705.96	760.85	803.73	808.13	739.83
11:00	726.04	680.93	708.46	753.06	752.81	722.54	763.75	825.79	862.5	893.74	902.01	842.93
12:00	672.1	659	729.32	774.84	761.41	743.96	786.38	845.07	871.37	895.22	930.71	840.43
13:00	584.23	582.43	666.57	681.5	706.1	706.74	772.56	797.97	822.28	834.09	855.36	771.79
14:00	460.75	487.39	548.81	550.66	598.91	614.17	679.17	722.22	708.96	707.98	716.82	652.44
15:00	337.46	401.07	383.01	384.61	380.54	453.36	525.41	566.07	552.93	531.7	510.49	436.33
16:00	226.02	254.5	261.03	246.88	242.52	301.35	370.87	391.84	378.04	338.21	326.83	276.34
17:00	145.23	169.59	153.83	148.25	135.01	149.55	194.91	212.92	198.97	168.79	95.51	95.66
18:00	38.49	39.59	41.25	10.28	1.11	1.59	9.86	25.33	1.72	1.16	1.48	34.52

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Jililí [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	36.84	28.57	32.66	39.98	39.94	34.72	32.67	41.14	57.06	118.3	156.98	78.58
08:00	233.51	200.73	228.42	254.81	251.7	242.23	245.33	279.2	337.25	382.21	386.68	324.7
09:00	412.76	402.48	438.37	457.86	445.52	436.29	454.88	497.46	567.95	618.28	614.65	546.09
10:00	574.76	566.15	620.86	615.12	612.17	594.17	631.44	679.43	745.63	788.77	779.34	715.32
11:00	643	639.71	700.93	675.49	694.83	696.44	742.87	800.5	857.46	867.84	879.91	811.75
12:00	579.45	595.41	651.32	637.4	676.85	709.3	767.73	829.95	864.24	875.8	873.98	764.78
13:00	431.48	491.75	543.21	540.51	575.06	647.01	747.42	792.06	809.7	801.35	732.61	617.2
14:00	306.91	370.72	417.22	413.96	437.93	555.32	648.97	708.26	705.69	647.25	603.03	455.55
15:00	235.95	302.88	310.45	269.76	252.27	339.36	476.55	541.13	525.39	440.21	400.76	296.83
16:00	155.43	212.52	210.41	178.95	171.33	228.56	323.05	363.4	342.05	276.19	251.4	196.81
17:00	96.91	138.31	134.39	113.75	107.45	129.86	173.03	192.23	174.82	143.44	139.05	111.15
18:00	35.26	39.85	39.55	8.2	1.09	1.39	8.56	21.55	1.69	1	1.31	25.5

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Montero [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	40.16	28.99	33.82	41.13	41.2	35.31	33.07	41.6	73.13	143.28	152.38	118.6
08:00	216.41	181.23	211.66	252.88	245.98	236.12	241.5	272.59	333.37	372.36	371.92	319.07
09:00	375.03	330.03	376.84	436.84	436.81	427.58	451.62	492.53	558.1	602.01	586.06	522.35
10:00	491.24	460.05	514.76	556.78	569.67	571.57	625.09	661.36	721.57	749.82	748.95	688.62
11:00	523.41	495.31	533.52	577.43	610.11	645.98	703.39	755.41	803.48	816.8	800.63	756.85
12:00	437.49	442.14	481.92	467.4	525.83	600.68	699.2	761.95	805.56	802.17	760.6	682.56
13:00	365.9	405.46	424.31	404.67	445.05	572.64	671.64	718.74	753.75	718.52	693.23	575.99
14:00	315.04	352.27	383.4	348.39	370.83	495.89	592.54	653.8	678.01	622.32	601.5	473.7
15:00	239	284.43	298.1	277.91	239.89	320.99	448.83	490.18	524.78	456.45	414.02	319.6
16:00	159.76	213.21	198.35	193.1	127.26	128.94	256.76	346.77	339.67	202.79	201.02	209.35
17:00	79.79	102.58	94.51	71.73	62	66.26	74.98	93.74	91.94	85.37	79.77	77.94
18:00	35.32	40.34	37.16	8.67	1.05	1.52	10.42	22.89	1.77	1.06	1.25	24.76

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Sícchez [W/m²]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	36.84	28.57	32.66	39.98	39.94	34.72	32.67	41.14	112.63	148.95	156.96	86.51
08:00	233.5	200.73	228.42	254.83	251.73	242.28	245.38	279.23	337.26	382.21	386.67	324.69
09:00	412.76	402.48	438.38	457.87	445.54	436.33	454.91	497.49	567.97	618.28	614.65	546.09
10:00	574.76	566.16	620.86	615.13	612.19	594.2	631.47	679.45	745.64	788.78	779.35	715.32
11:00	643.01	639.72	700.94	675.5	694.85	696.46	742.9	800.53	857.48	867.86	879.93	811.76
12:00	579.45	595.42	651.33	637.41	676.87	709.32	767.75	829.97	864.26	875.81	874	764.79
13:00	431.48	491.75	543.21	540.52	575.07	647.02	747.44	792.07	809.72	801.37	732.63	617.21
14:00	306.91	370.73	417.22	413.96	437.93	555.33	648.98	708.27	705.71	647.26	603.04	455.56
15:00	235.95	302.88	310.45	269.76	252.27	339.36	476.55	541.13	525.4	440.22	400.77	296.84
16:00	155.43	212.52	210.41	178.95	171.32	228.55	323.05	363.4	342.06	276.19	251.41	196.81
17:00	96.61	138.31	134.39	113.74	107.44	129.85	173.01	192.22	174.82	143.45	139.07	111.16
18:00	35.26	39.85	39.55	8.2	1.09	1.4	9.12	21.61	1.69	1	1.31	25.5

Nota: **Adaptado de PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS)**

Anexo K. Datos mensuales de irradiación global horizontal en Huancabamba

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Huancabamba [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	60.73	33.94	33.56	36.32	36.23	28.79	26.99	35.01	73.38	121.59	141.89	103.06
08:00	208.04	198.14	197.4	215.81	217.06	175.12	180.8	207.43	240.48	311.28	353.36	277.58
09:00	359.33	362.31	369.47	387.75	362.65	312.9	316.47	362.75	394.01	486.51	522.08	452.39
10:00	486.05	484.66	494.87	510.74	487.22	422.94	445.95	489.48	491.76	592.06	661.9	585.18
11:00	566.14	576.85	550.32	563.74	552.15	481.25	505.27	550.61	531.15	640.01	711.56	669.33
12:00	584.71	577.14	582.3	573.61	567.71	513.41	537.75	550.88	527.04	617.13	714.89	669.33
13:00	558.29	572.03	562.89	568.16	531.4	509.43	528.96	541.07	535.38	591.04	677.84	623.1
14:00	540.98	521.1	563.73	522.09	484.07	472.82	499.84	499.51	491.67	561.29	623.94	586.59
15:00	463.75	465.16	485.84	448.56	415.56	373.97	420.38	447.93	424.32	497.9	497.01	493.39
16:00	341.26	334.73	349.06	321.73	294.46	269.72	305.37	333.19	315.1	335.76	348.6	329.08
17:00	109.06	123.15	193.25	167.52	146.34	142.86	163.04	179.72	123.84	81.49	79.9	95.19
18:00	38.64	39.7	45.73	5.25	1.08	1.39	1.44	1.55	1.57	1.09	1.25	33.44

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Canchaque [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	35.67	28.11	31.75	37.17	36.27	30.52	30.27	40.18	58.29	72.43	74.21	59.25
08:00	191.18	182.1	194.97	218.81	204.08	187.89	201.45	241.6	300.43	338.5	349.87	295.12
09:00	330.01	333.54	368.65	395.35	360.11	334.25	372.7	424.89	504.64	564.41	555.73	483.98
10:00	441.43	462.75	497.27	515.84	484.43	468.15	528.43	592.75	662.45	716.09	717.83	626.61
11:00	458.55	490.64	528.1	567.82	547.32	556.4	642.49	699.29	734.4	780.84	800.4	699.34
12:00	434.04	441.13	494.75	502.27	531.84	571.73	669.31	734.05	772.8	769.18	773.58	662.71
13:00	367.67	408.24	455.95	454.54	486.4	554.96	660.29	717.05	725.21	689.57	688.31	545.8
14:00	313.82	348.88	384.82	382.96	422.19	493.01	587.23	642.28	649.53	589.46	555.79	433.54
15:00	222.9	287.42	304.46	271.82	293.6	341.92	446.56	488.72	472.8	405.13	369.96	295.82
16:00	150.95	192.63	214.23	179.23	193.01	220.28	303.16	331.75	307.17	241.93	224.14	180.94
17:00	104.83	124.14	123.72	108.15	106.86	115.29	153.85	168.23	154.6	135.33	130.11	115.64
18:00	70.49	68.56	45.47	5.76	1.07	1.36	1.36	1.92	1.55	0.97	1.81	37.32

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Huarmaca [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	56.55	31.08	32.85	38.97	36.97	32.43	31.94	39.81	96.78	150.9	164.75	131.27
08:00	254.7	216.05	228.18	258.5	247.35	230.08	238.05	270.05	336.43	375.82	403.23	339.98
09:00	392.24	384.29	403.22	429.34	431.98	420.77	436.69	478.81	550.72	606.95	604.3	553.44
10:00	485.05	475.85	500.87	550.64	566.77	554.9	601.31	652.47	692.59	751.38	753.43	684.09
11:00	479.35	495.01	512.68	553.92	606.03	626.57	688.87	762.71	780.47	819.6	808.57	727.13
12:00	450.23	423.82	464.85	462.32	529.74	624.35	721.52	779.61	800.14	802.78	788.5	685.64
13:00	398.37	383.71	418.26	409.19	464.95	598.77	704.2	764.56	780.46	733.18	698.99	594.27
14:00	348.8	333.46	348.99	340.34	405.1	538.33	640.44	695.06	710.32	648.14	585.97	485.86
15:00	249.22	260.53	278.43	273.46	289.78	384.48	511.9	561.19	536.91	464.45	403.16	329.78
16:00	176.97	201.96	203.86	186.46	194.25	260.94	351.39	377.88	341.92	281.38	262.21	218.54
17:00	135.27	137.33	135.99	123.94	124.74	134.79	188.29	198.74	192.15	170.09	160.79	152.02
18:00	92.22	74.51	55.51	5.93	1.02	1.23	1.83	2.62	2.07	1.11	1.83	50.38

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Sondorillo [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	70.06	41.55	34.11	37.59	37.07	29.41	28.19	35.5	86.24	118.43	146.01	108.69
08:00	219.39	199.31	199.56	217.17	218.83	191.5	194.51	212.88	240.91	311.73	340.2	300.21
09:00	375.51	356.19	365.73	394.42	373.66	336.57	334.9	380.93	399.56	504.98	519.86	459.21
10:00	509.65	493.38	503.18	525.19	508.8	474.51	477.25	506.6	510.25	616.26	678.68	598.8
11:00	568.72	577.72	584.03	595.05	577.87	542.6	555.65	581.19	550.11	644.71	746.66	681.42
12:00	587.54	587.18	602.29	622.64	591.83	551.97	572.25	593.41	588.97	662.38	745.29	677.42
13:00	577.47	616.67	607.23	613.27	572.73	540.47	568.63	582.25	587.07	628.08	719.45	680.5
14:00	552.46	548.44	563.46	573.1	527.94	496.89	530.37	537.95	558.68	600.37	641.64	626.48
15:00	477.62	476.13	490.34	481.52	435.66	431.83	472.6	465.74	468.96	502.07	506.26	507.95
16:00	361.27	342.98	349.38	339.03	310.81	302.72	338.74	344.46	341.72	349.3	359.8	360
17:00	232.55	215.68	197.64	133.87	70.3	62.94	78.28	178.71	111.49	80.51	80.97	198.61
18:00	39.77	39.04	45.9	4.18	1.02	1.28	1.56	1.65	1.5	1.09	1.33	34.28

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Carmen de la Frontera [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	43.46	25.06	26.57	30.69	31.92	22.75	22.57	30.14	60.34	103.77	125.94	89.67
08:00	175.98	174.31	164.12	183.25	188.13	147.34	154.17	180.68	191.8	264.16	305.79	240.35
09:00	303.99	313.32	307.8	320.11	313.2	266.12	282.24	301.34	333.15	419.43	468.79	400.57
10:00	425.5	425.29	436.46	438.57	425.31	369.19	406.98	425.1	438.45	527.7	602.38	535.39
11:00	487.59	500.62	498.31	480.76	499.93	436.44	481.05	499.16	467.59	569.24	646.94	615.35
12:00	529.46	535.41	521.96	500.46	527.91	457.5	501.78	517.72	502.96	578.01	685.07	607.4
13:00	536.35	516.26	540.19	510.66	517.57	457.39	504.06	511.48	499.9	571.67	654.84	563.5
14:00	513.88	501.02	496.51	497.45	492.63	432.54	479.72	470.73	499.56	545.76	586.73	567.27
15:00	458.66	435.74	447.09	440.68	433.2	372.69	418.49	419.51	418	452.33	475.48	462.79
16:00	343.42	332.82	336.18	318.22	298.65	266.3	313.18	316.35	307.85	327.79	326.57	320.79
17:00	210.08	187.92	191.94	174.79	150.23	138.93	171.66	170.61	172.78	163.82	167.14	189.47
18:00	102.86	78.64	44.52	4.8	1.3	1.66	2.38	2.26	1.88	1.15	1.59	37.31

Datos mensuales de irradiación global horizontal en San Miguel de El Faique [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	36.79	29.52	31.87	39.07	36.71	31.72	31.61	40.02	60.09	125.75	132.28	59.23
08:00	197.51	185.37	201.5	223.52	200.57	184.05	195.88	235.04	304.16	339.59	354.62	296.94
09:00	355.24	343.17	381.16	398.2	358.03	340.6	370.23	428.32	510.05	561.12	562.04	496.9
10:00	466.59	478.4	521.88	536.56	498.96	475.82	533.14	590.51	669.25	717.91	732.99	643.11
11:00	517.98	541.15	589.63	606.39	575.15	563.48	637.89	701.82	768.77	803.94	817.5	729.24
12:00	475.72	494.86	573.49	573.69	575.25	610.96	693.92	755.04	797.92	781.52	812.18	702.6
13:00	402.56	446.18	517.29	528.93	539.96	587.05	674.17	730.82	768.42	708.77	716.29	581.42
14:00	339.86	379.66	425.9	426.4	458.23	523.95	614.19	666.95	680.99	606.83	574.65	470.5
15:00	243.78	303.62	316.88	295.68	308.67	359.68	465.54	510.81	495.19	413.22	384.34	300.97
16:00	155.62	203.92	211.52	199.3	194.3	239.1	309.64	351.69	319.45	258.48	241.92	181.09
17:00	105.35	131.91	126.7	119.44	112.99	122.24	162.94	178.42	163.76	140.56	146	118.16
18:00	71.47	70.83	45.65	6.04	1.03	1.26	1.75	2.31	2	1.02	1.89	36.28

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Sondor [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	36.16	28.01	31.59	36.52	35.09	27.84	26.88	33.93	49.48	118.09	129.66	52.22
08:00	211.61	199.34	199.17	209.57	215.86	179.85	182.34	208.78	232.04	310.93	340.18	277.38
09:00	365.77	360.22	361.31	375.83	358.81	318.27	324.55	356.24	383.12	495.09	525.98	448.41
10:00	495.01	500.05	497.15	491.79	480.58	441.03	453.59	481.92	481.59	602.73	658.47	590.14
11:00	567.01	566.99	559.6	546.15	542.25	498.32	541.48	563.01	511.6	662.72	735.8	660.28
12:00	581.52	562.16	581.73	568.36	568.02	518.23	546.28	580.36	562.93	626.02	702.22	672.71
13:00	573.47	554.53	588.84	576.67	539.54	499.01	549.93	554.42	560.22	607.24	683.47	653.54
14:00	544.58	507.39	536.14	530.99	485.49	473.51	526.72	510.69	542.63	576.86	628.52	591.16
15:00	445.43	455.33	470.28	440.55	406.51	388.29	443.22	468.22	447.15	488.75	494.25	478.97
16:00	337.37	325.35	344.11	318.32	287.87	276.29	306.04	335.19	312.1	336.02	342.43	336.06
17:00	206.06	205.06	190.3	167.09	114.45	97.53	164.75	173.33	162.84	168.79	182.95	197.59
18:00	88.63	65.86	45.43	4.21	1	1.33	1.69	1.98	1.55	1.13	1.36	32.88

Datos mensuales de irradiación global horizontal en Lalaquiz [W/m^2]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
07:00	36.84	29.57	32.43	37.71	37.81	31.19	31.53	40.71	59.56	101.99	124.32	59.5
08:00	199.4	191.92	196.99	221.6	205.11	179.47	196.18	238.06	294.46	322.93	346.3	285.49
09:00	347.79	356.3	382.92	399.01	355.31	338.93	371.33	431.77	507.68	554.71	563.44	473.53
10:00	474.47	488.96	521.38	533.32	497.25	479.73	536.03	605.52	664.67	713.22	721.91	632.74
11:00	512.55	544.96	580.83	584.87	585.91	561.66	650.55	721.71	766.35	786.72	813.11	715.19
12:00	469.87	501.65	563.13	548.43	574.61	597.34	698	769.6	796.13	781.38	811.28	693.58
13:00	408.25	440.56	484.87	483.26	528.3	561.6	676.53	749.94	763.8	710.82	716.51	586.35
14:00	349.24	382.75	427.87	421.41	459.21	512.32	614.72	671.53	681.91	597.02	576.41	466.61
15:00	241.32	314.24	324.04	307.76	317.56	363.25	474.69	520.06	507.43	433.32	397.91	281.33
16:00	159.1	217.73	216.09	209.75	213.28	244.17	323.76	354.03	325.06	251.17	239.59	171.85
17:00	93.39	137.69	129.55	122.88	117.88	129.84	165.46	181.43	165.09	135.09	135.99	106.96
18:00	63.26	71.87	44.81	7.26	1.04	1.5	1.75	2.56	2.07	1.07	1.71	31.45

Nota: **Adaptado de PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS)**

PIURENSIS

Anexo L. Hora solar pico (HSP) mensual en cada distrito de Piura

Hora solar pico (HSP) mensual en cada distrito de Talara [h/día]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pariñas	6.690	6.615	6.729	6.321	5.644	5.304	5.462	5.972	6.394	6.891	7.061	7.031
El Alto	6.594	6.504	6.657	6.292	5.651	5.411	5.582	6.140	6.463	6.992	7.129	7.134
Los Órganos	6.376	6.283	6.412	6.190	5.558	5.325	5.533	6.019	6.345	6.867	7.046	6.980
Máncora	5.998	6.031	6.255	6.069	5.545	5.259	5.480	5.966	6.262	6.776	6.889	6.732
La Brea	6.901	6.854	6.814	6.376	5.693	5.383	5.536	6.019	6.439	6.952	7.119	7.146
Lobitos	6.724	6.657	6.729	6.355	5.680	5.395	5.532	6.035	6.409	6.933	7.114	7.064

Hora solar pico (HSP) mensual en cada distrito de Sullana [h/día]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sullana	5.736	5.730	5.987	5.875	5.181	4.544	4.907	5.381	6.014	6.382	6.622	6.479
Bellavista	5.736	5.730	5.987	5.875	5.181	4.544	4.907	5.381	6.014	6.382	6.622	6.480
Ignacio Escudero	6.083	6.057	6.309	6.040	5.212	4.515	4.758	5.365	6.011	6.396	6.608	6.590
Querecotillo	5.829	5.679	6.007	5.853	5.145	4.511	4.713	5.271	5.966	6.331	6.512	6.489
Marcavelica	5.737	5.730	5.987	5.875	5.181	4.544	4.907	5.382	6.014	6.382	6.622	6.480
Miguel Checa	5.939	5.916	6.157	5.991	5.221	4.563	4.818	5.495	6.045	6.453	6.765	6.688
Salitral	5.823	5.801	6.042	5.906	5.161	4.477	4.816	5.304	5.983	6.326	6.532	6.473
Lancones	5.590	5.617	5.965	5.867	5.164	4.587	4.891	5.548	6.115	6.510	6.597	6.474

Hora solar pico (HSP) mensual en cada distrito de Morropón [h/día]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Chulucanas	5.020	5.268	5.531	5.436	4.801	4.402	4.708	5.409	5.940	6.208	6.266	5.875
Morropón	4.402	4.690	4.987	5.008	4.458	4.207	4.615	5.294	5.801	5.938	5.890	5.524
Chalaco	3.398	3.468	3.705	3.770	4.143	4.658	5.187	5.581	5.773	5.385	5.263	4.557
La Matanza	4.671	4.958	5.359	5.302	4.671	4.289	4.639	5.372	5.893	6.094	6.116	5.688
San Juan de Bigote	4.156	4.449	4.695	4.699	4.474	4.358	4.918	5.523	5.813	5.897	5.946	5.420
Yamango	2.784	2.936	3.184	3.362	3.596	4.035	4.739	5.221	5.420	5.217	5.062	4.101
Salitral (Morropón)	4.337	4.715	4.989	4.935	4.619	4.495	4.966	5.521	5.895	6.035	6.062	5.505
Buenos Aires	4.649	4.976	5.312	5.225	4.632	4.366	4.709	5.406	5.911	6.108	6.151	5.676
Sta. Catalina de Mossa	3.494	3.713	4.011	4.033	4.125	4.446	5.094	5.601	5.862	5.766	5.628	4.864
Santo Domingo	2.934	3.112	3.398	3.571	4.053	4.447	5.021	5.520	5.602	5.273	5.153	4.178

Hora solar pico (HSP) mensual en cada distrito de Piura [h/día]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Piura	5.923	5.940	6.215	6.211	5.380	4.710	4.783	5.311	5.921	6.235	6.377	6.439
Castilla	6.366	6.251	6.349	6.156	5.305	4.726	4.728	5.372	6.048	6.511	6.734	6.825
26 de octubre	6.057	5.999	6.178	6.052	6.052	4.498	4.586	5.160	5.845	6.261	6.503	6.621
Catacaos	6.280	6.271	6.377	6.101	5.166	4.462	4.463	5.055	5.716	6.192	6.479	6.644
La Unión	6.288	6.216	6.454	6.155	5.132	4.414	4.483	5.092	5.756	6.152	6.419	6.607
Tambogrande	5.165	5.406	5.715	5.553	4.908	4.449	4.738	5.427	5.980	6.331	6.438	6.149
La Arena	6.361	6.373	6.476	6.167	5.195	4.594	4.524	5.123	5.773	6.283	6.588	6.700
Las Lomas	5.130	5.318	5.515	5.485	4.851	4.446	4.917	5.629	6.144	6.478	6.483	6.150
Cura Mori	6.326	6.329	6.461	6.165	5.239	4.598	4.600	5.237	5.859	6.349	6.567	6.663
El Tallán	6.253	6.183	6.442	6.147	5.114	4.444	4.466	5.149	5.764	6.172	6.392	6.582

Hora solar pico (HSP) mensual en cada distrito de Paita [h/día]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Paita	6.586	6.492	6.486	6.153	5.323	4.726	4.885	5.492	6.083	6.458	6.655	6.807
Pueblo Nuevo Colán	6.564	6.634	6.661	6.297	5.499	4.985	5.125	5.646	6.214	6.660	6.873	6.915
La Huaca	6.490	6.414	6.626	6.234	5.421	4.783	5.048	5.566	6.187	6.550	6.810	6.871
Vichayal	6.471	6.509	6.600	6.270	5.432	4.848	5.059	5.623	6.144	6.615	6.821	6.837
Amotape	6.435	6.469	6.545	6.240	5.420	4.825	5.051	5.570	6.133	6.554	6.822	6.862
Tamarindo	6.384	6.171	6.521	6.174	5.315	4.676	4.887	5.470	6.076	6.380	6.632	6.765
El Arenal	6.453	6.486	6.551	6.240	5.420	4.827	5.054	5.572	6.133	6.554	6.822	6.860

Hora solar pico (HSP) mensual en cada distrito de Sechura [h/día]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sechura	6.856	6.744	6.710	6.318	5.375	4.731	4.909	5.430	5.917	6.379	6.669	6.851
Vice	6.264	6.251	6.416	6.096	5.080	4.359	4.415	4.951	5.659	6.079	6.367	6.536
Bernal	6.483	6.420	6.581	6.241	5.336	4.609	4.674	5.249	5.865	6.345	6.629	6.821
Bellavista de la Unión	6.502	6.513	6.567	6.232	5.244	4.563	4.673	5.193	5.853	6.346	6.627	6.801
Cristo Nos Valga	6.682	6.652	6.698	6.302	5.328	4.709	4.821	5.363	5.944	6.475	6.754	6.937
Rinconada Llicuar	6.502	6.513	6.567	6.232	5.244	4.563	4.673	5.193	5.853	6.346	6.627	6.801

Hora solar pico (HSP) mensual en cada distrito de Ayabaca [h/día]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pacaipampa	5.239	5.029	4.972	4.969	5.001	4.990	5.344	5.777	6.011	5.736	5.834	5.654
Ayabaca	4.114	4.076	4.366	4.340	4.444	4.718	5.070	5.484	5.643	5.099	5.043	4.696
Frías	3.052	3.109	3.330	3.478	3.956	4.400	4.931	5.479	5.503	5.137	4.892	4.186
Suyo	4.321	4.530	4.805	4.865	4.585	4.511	5.092	5.826	6.221	6.377	6.289	5.715
Paimas	3.906	4.080	4.209	4.219	4.196	4.200	5.010	5.566	5.866	6.092	6.005	5.324
Sapillica	3.377	3.404	3.617	3.763	4.318	4.673	5.442	5.965	6.171	6.216	5.938	5.035
Lagunas	4.566	4.510	4.802	4.961	4.976	5.044	5.491	5.927	6.183	6.324	6.333	5.658
Jililí	3.742	3.989	4.328	4.206	4.266	4.615	5.253	5.746	5.989	5.961	5.820	4.944
Montero	3.279	3.336	3.588	3.637	3.676	4.104	4.089	5.312	5.685	5.573	5.411	4.769
Sícchez	3.742	3.989	4.328	4.206	4.266	4.615	5.253	5.747	6.045	5.991	5.820	4.952

Hora solar pico (HSP) mensual en cada distrito de Huancabamba [h/día]												
Distrito	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Huancabamba	4.317	4.289	4.428	4.321	4.096	3.705	3.932	4.199	4.150	4.837	5.336	4.918
Canchaque	3.122	3.368	3.644	3.640	3.667	3.876	4.597	5.083	5.344	5.304	5.242	4.436
Huarmaca	3.519	3.418	3.584	3.633	3.899	4.408	5.116	5.584	5.821	5.806	5.639	4.952
Sondorillo	4.572	4.494	4.543	4.537	4.227	3.963	4.153	4.421	4.446	5.020	5.489	5.234
Carmen de la Frontera	4.131	4.026	4.012	3.900	3.880	3.369	3.738	3.845	3.894	4.525	5.049	4.630
San Miguel de El Faique	3.369	3.609	3.944	3.953	3.860	4.040	4.691	5.192	5.540	5.459	5.478	4.616
Sondor	4.453	4.330	4.406	4.266	4.036	3.720	4.068	4.268	4.247	4.994	5.428	4.991
Lalaquiz	3.356	3.678	3.905	3.877	3.893	4.001	4.741	5.287	5.534	5.389	5.449	4.505

Nota: **Adaptado de PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS)**