

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS



**“CARACTERIZACIÓN DE LOS RECURSOS EÓLICO Y
SOLAR DE LA CIUDAD DE JULIACA”**

TESIS

Presentado por:

ELMER HUANCA CALLATA

Para optar el título de:

**LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICO
MATEMÁTICAS**

PUNO – PERÚ

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

**“CARACTERIZACIÓN DE LOS RECURSOS EÓLICO Y
SOLAR DE LA CIUDAD DE JULIACA”**

TESIS

Presentado por:

ELMER HUANCA CALLATA

Para optar el título de:

LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

Fecha de sustentación: 14 de diciembre de 2017

APROBADO POR:

Presidente : MSc. Ricardo ROMERO LOAIZA

Primer Miembro : MSc. Enma Maura BONIFAZ VELAZCO

Segundo Miembro : MSc. Renzo Henry MAMANI PARI

Director de Tesis : MSc. Víctor ROMAN SALINAS

Asesor de Tesis : MSc. José QUIÑONEZ CHOQUECOTA



Tema: Caracterización de recursos eólico y solar

Área: Física

Líneas de Investigación: Recursos Energéticos Solares y eólica

DEDICATORIA

A mis padres por todo su apoyo incesable para fortalecer mi anhelo de ser un profesional íntegro y valeroso.

AGRADECIMIENTO

Inmensa gratitud expreso a mis padres por su apoyo constante e incesable, que hicieron posible alcanzar otra de mis metas, por fortalecer mi anhelo de ser un profesional íntegro y valeroso.

A la Universidad Nacional de Altiplano, mi alma mater, a mis familiares, amigos, en especial mi inmensa gratitud al Director del presente MSc. Víctor ROMAN SALINAS y Asesor MSc. José QUIÑONEZ CHOQUECOTA, por su apoyo profesional para consolidar mi trabajo en el área de física para la caracterización recursos energéticos solar y eólico.

Quiero expresar una profunda gratitud y reconocimiento a mis jurados, quienes siempre se preocuparon de la rigurosidad en cada uno de mis presentaciones, A las instituciones encargadas de generar y proveer información meteorológica y climática de manera confiable, por su valiosa información proporcionada que permitió el desarrollo del presente trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

Índice general	
Índice de Figuras	
Índice de Tablas	
Índice de Acrónimos	
Resumen	14
Abstract	15
1. Introducción	16
1.1. Planteamiento del Problema.....	17
1.1.1. Problema general.....	18
1.1.2. Problema específico.....	18
1.2. Antecedentes de la investigación.....	19
1.3. Justificación.....	21
1.4. Objetivos del estudio.....	22
1.4.1. Objetivo General.....	22
1.4.2. Objetivos Específicos.....	22
1.5. Hipótesis.....	22
1.5.1. Hipótesis general.....	22
1.5.2. Hipótesis Específicos.....	23
2. Revisión de Literatura	24
2.1. Aspectos teóricos de la energía eólica.....	24
2.1.1. Energía contenida en el viento y potencia desarrollada por un aerogenerador.....	25
2.1.2. Variación de la velocidad de viento con la altura.....	27

2.1.3.	Distribución de Weibull.....	29
2.1.4.	Variación de la densidad del aire respecto a la altura.....	33
2.2.	Aspectos teóricos de la energía solar fotovoltaica.....	36
2.2.1.	Radiación Solar.....	36
2.2.2.	Herramientas matemáticas para la determinación teórica de la radiación solar.....	37
3.	Materiales y Métodos	53
3.1.	Materiales.....	53
3.2.	Métodos.....	54
3.2.1.	Método y tipo de investigación.....	54
3.2.2.	Secuencia de desarrollo de la investigación.....	54
3.2.3.	Variables de la investigación.....	55
3.3.	Lugar de estudio.....	55
4.	Resultados y Discusión	57
4.1.	Evaluación cuantitativa y cualitativa de la energía eólica en el distrito de Juliaca.....	57
4.1.1.	Análisis cuantitativo de la energía eólica.....	57
4.1.2.	Validación de los resultados.....	62
4.1.3.	Análisis cualitativo de la energía eólica.....	65
4.2.	Evaluación cuantitativa y cualitativa de la energía solar en el distrito de Juliaca.....	70
4.2.1.	Cuantificación del recurso solar para la ciudad de Juliaca.....	70
4.3.	Análisis cualitativo de la recurso solar	75
4.3.1.	Radiación solar global en un plano inclinado.....	76
5.	Conclusiones	78

6. Recomendaciones

80

Anexos

84

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Factores que intervienen en la potencia desarrollada por un aerogenerador..	26
2.2. Eje de rotación de la Tierra.....	39
2.3. Componentes de la radiación solar que llega a la tierra.....	42
2.4. Piranómetro de Kipp.....	44
2.5. Relación geométrica para la radiación directa en superficie horizontal y la radiación global sobre una superficie horizontal.....	48
2.6. Relación geométrica para radiación directa en superficie inclinada.....	49
2.7. Desplazamiento del plano inclinado respecto al Ecuador.....	49
3.1. Vista de la ubicación de la estación meteorológica en la ciudad de Juliaca	56
4.1. Tendencias mensuales horarias de la velocidad del viento para la ciudad de Juliaca a 10 m de altura del año 2013.....	58
4.2. Tendencias mensuales horarias de la velocidad del viento para la ciudad de Juliaca a 10 m de altura del año 2014.....	60
4.3. Tendencias mensuales horarias de la velocidad del viento para la ciudad de Juliaca a 10 m de altura.....	60
4.4. Horas en las que ocurren las velocidades máximas y mínimas para cada mes de ambos años.....	61
4.5. Rango de variación mensual de la velocidad para cada año.....	62
4.6. Rosa de vientos anual para Juliaca.....	63
4.7. Gráfico comparativo entre resultados de la SENAMHI Y NASA para Latitud 15,44°S y Longitud 70,21°O, valores en m/s a 25 m de altura....	65

4.8. Función de probabilidad de Weibull anual a 25 m.....	67
4.9. Tendencias mensuales horarias de irradiancia solar global en el plano horizontal para la ciudad de Juliaca en el año 2013.....	72
4.10. Tendencias mensuales horarias de irradiancia solar global en el plano horizontal para la ciudad de Juliaca en el año 2014.....	72
4.11. Hora en el que se presentan las máximas irradiancias promedio mensuale	73
4.12. Valores promedio y máximos mensuales, irradiancia solar global en plano horizontal para Juliaca.....	73
4.13. Gráfica de comparación de insolación solar de datos NASA y SENAM- HI para Juliaca.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Variación del coeficiente de rugosidad a respecto al tipo de terreno.....	28
2.2. Valores típicos de h_0	29
2.3. Constantes geográficas para a y b	42
2.4. Albedos paradiferentes suelos.....	52
3.1. Variables y dimensiones de la investigación.....	55
4.1. Valores promedios mensuales de velocidades en m/s de la SENAMHI para Juliaca a 10 m de altura en el año 2013.....	58
4.2. Valores promedios mensuales de velocidades en m/s de la SENAMHI para Juliaca a 10 m de altura en el año 2014.....	59
4.3. Promedio mensual de velocidades en m/s de la SENAMHI para Juliaca a 25 m en los años 2013 y 2014 y sus promedios.....	64
4.4. Comparación de la velocidad del viento promedio entre resultados de la SENAMHI Y NASA para Latitud 15,44°S y Longitud 70,21°O, valo- res en m/s a 25 m de altura.....	64
4.5. Velocidad media y densidad de potencia mensual a 25 m de altura.....	68
4.6. variación con la altura de la velocidad y la densidad de potencia.....	69
4.7. Valores promedios de irradiancia solar global horaria en W/m^2 para la ciudad de Juliaca en el año 2013.....	70
4.8. Valores promedios de irradiancia solar global horaria en W/m^2 para la ciudad de Juliaca en el año 2014.....	71

4.9. Promedio mensual de insolación solar procesados con los datos de la SENAMHI Puno para Juliaca entre los años 2013 y 2014.....	74
4.10. Comparación entre valores mensual de insolación de NASA y SENAMHI, para Juliaca.....	75
4.11. Promedio mensual de la variación de distancia Sol - Tierra, declinación, ángulo horario, horas de sol teóricos y radiación solar extraterrestre por día para la ciudad Juliaca.....	76
4.12. Radiación solar global en un plano inclinado para la ciudad de Juliaca en kW/m ² /día.....	77

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

E_c	Energía cinética
m	Masa del aire
ρ	Densidad del aire cuando trata de energía eólica
ρ	Albedo cuando trata de energía solar
V	Volumen del aire
v	Velocidad del aire
A	Área transversal
P	Potencia desarrollada, o Presión cuando se trata de gases
C_p	Coefficiente de potencia
P_M	Potencia Mecánica
h	Altura
α	Coefficiente de rugosidad
$f(v)$	Función de densidad de probabilidad de Weibull
c	Parámetro de escala
k	Factor de forma
σ	Desviación estándar
\bar{v}	Velocidad Promedio
Γ	Función Gamma
$F(v)$	Función acumulativa de Weibull
\bar{P}_W	Potencia promedio del viento

T	Temperatura
λ	Longitud de onda
H_{HT}	Radiación solar global en superficie horizontal
H_o	Radiación solar extraterrestre en superficie horizontal
s	Horas reales de sol
S	Horas teóricas de sol
I	Constante solar
C	variación de la distancia tierra-sol
n	Numero de días del año
δ	Ángulo de declinación solar en grados
W_s	Ángulo horario a la salida de sol
L	Latitud en grados
H_b	Radiación solar directa
H_d	Radiación solar difusa
H_r	Radiación solar reflejada
K_T	Índice de claridad
H_β	Radiación solar en un plano con inclinación β
$H_{b,\beta}$	Radiación solar directa en un plano con inclinación β
$H_{d,\beta}$	Radiación solar difusa en un plano con inclinación β
$H_{r,\beta}$	Radiación solar reflejada en un plano con inclinación β
θ_z	Ángulo cenital
R_b	Factor de modificación para radiación solar directa
R_d	Factor de modificación para radiación solar difusa
R_r	Factor de modificación para radiación solar reflejada
NASA	National Aeronautic and Space Administration
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

RESUMEN

El aprovechamiento de los recursos energéticos o renovables en cualquier lugar de nuestro país requiere tener una información confiable, en especial los recurso eólico y solar, que conlleven a la ejecución de proyectos viables en el aprovechamiento es estos recursos, instaurando la instalación de una de las tecnologías, sea la de aerogenerador o paneles fotovoltaicos. En ese sentido, en el presente trabajo se realizó una evaluación cuantitativa y cualitativa de los recursos eólico y solar enfocados en el objetivo de caracterizar el potencial explotable de los recursos eólico y solar de la ciudad de Juliaca, Provincia de San Román de la región de Puno; examinando los datos proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI-Puno de los años 2013-2014 información recopilada por la estación ubicada en la provincia de San Román-Juliaca, además de haber utilizado la base de datos de la NASA (Surface meteorology and solar energy, SSE, 2012) disponible en la red., bajo ese contexto, se ejecutó el análisis cuantitativo, que se basó principalmente en la caracterización de las variables viento y radiación solar en el distrito de Juliaca, mientras que el análisis cualitativo, en la estimación del potencial eólico utilizando el método estadístico de distribución de Weibull esgrimiendo aspectos teóricos para el análisis del viento y para el análisis de la radiación solar en Juliaca se utilizó el método de Liu y Jordan. Obteniendo resultados de los análisis, se muestran para la ciudad de Juliaca; En el recurso eólico en esta zona (Juliaca) no es abundante y además de ser muy variable. En el recurso solar es abundante en una superficie inclinada para ángulo apropiado de instalación de 15° aproximadamente, alcanzando un promedio de insolación solar igual a $7,087 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$. Finalmente, al comparar los datos de la NASA con la del SENAMHI, podemos afirmar que la base de datos de la NASA es en gran medida confiable para caracterizar los recursos eólico y solar.

Palabras clave: recursos energéticos, renovables, caracterización, eólico, solar.

Abstract

The use of energy resources or renewable resources anywhere in our country requires reliable information, especially wind and solar resources, which lead to the execution of viable projects in the use of these resources, establishing the installation of one of the technologies, be it wind turbine or photovoltaic panels. In this sense, in the present work a quantitative and qualitative evaluation of the wind and solar resources focused on the objective of characterizing the exploitable potential of the wind and solar resources of the city of Juliaca, Province of San Román of the region of FIST; examining the data provided by the National Service of Meteorology and Hydrology of Peru - SENAMHI-Puno of the years 2013-2014 information compiled by the station located in the province of San Román-Juliaca, besides having used the database of NASA (Surface meteorology and solar energy, SSE, 2012) available on the network. Under this context, the quantitative analysis was carried out, which was based mainly on the characterization of the variables wind and solar radiation in the district of Juliaca, while the qualitative analysis, in the estimation of the wind potential using the Weibull statistical distribution method, using theoretical aspects for wind analysis and for the analysis of solar radiation in Juliaca, the Liu and Jordan method was used. Obtaining results of the analyzes, they are shown for the city of Juliaca; The wind resource in this area (Juliaca) is not abundant and also very variable. The solar resource is abundant on an inclined surface for an appropriate installation angle of approximately 15° , reaching an average solar insolation equal to $7,087 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{day}$. Finally, when comparing NASA data with that of SENAMHI, we can affirm that the NASA database is largely reliable for characterizing wind and solar resources.

Keywords: energy resources, renewable, characterization, wind, solar.

CAPÍTULO I

Introducción

La demanda energética de la población mundial ha crecido de manera considerable a través del último siglo. Tan sólo en 2005 hubo una demanda energética de 15 TWh. En este contexto es importante mencionar que el petróleo, gas y carbón siguen siendo los combustibles más recurridos por su bajo costo. Sin embargo, el impacto ambiental de estas fuentes de energía, sumado con el crecimiento de la población en el planeta y su demanda energética, ha traído consigo nocivos efectos al medio ambiente. Por ello, el mercado de las energías renovables ha crecido de manera considerable en las últimas décadas promoviendo una forma de generar energía sin dañar al medio ambiente (Charles Schlosser y C., 2016).

El potencial de la energía solar y eólica que recibe la tierra es enorme. La cantidad de esta energía recibida es tan vasta que equivale aproximadamente al doble de toda la energía producida por otras fuentes de energía no renovable como el petróleo, carbón, uranio y gas natural (Carta González *et al.*, 2009). Además, Perú tiene una posición geográfica privilegiada en cuanto a la captación de este tipo de energías. Entre las energías renovables más populares y utilizadas en el mundo se encuentran la energía solar fotovoltaica (FV) y la energía eólica (Hualpa Huamaní, 2011).

Para realizar cualquier proyecto basado en energías renovables, sea solar o eólica, se debe realizar un estudio del potencial de la energía solar y eólica en la zona de interés, en este caso el distrito de Juliaca de la Provincia de San Román del departamento de Puno, y para que este estudio de potencial en un área de interés sea un estudio válido, los encargados de tal estudio deben preocuparse no solo de obtener la mayor cantidad de información referente a registros de los distintos recursos renovables sino que también deben asegurarse de la calidad de la información recogida, sobre todo en lo que respecta a la información del recurso eólico y solar. (De Bortoli *et al.* (2002a)).

Por tanto, me veo obligado a realizar este trabajo, en donde el objetivo es evaluar el potencial eólico y solar en el distrito de Juliaca, para viabilizar los proyectos de aprovechamiento de recurso eólico y solar, que beneficie a la población de esta localidad y sus alrededores. En este estudio, se analiza todo respecto al estudio de potencial del recurso eólico y solar en el distrito de Juliaca; Es decir un estudio cuantitativo, etapa previa de recopilación y análisis de datos en bruto de los recursos y su posterior análisis cualitativo que consiste en el estudio de potencia eólico, basados en la teoría de Weibull (Lucano y Fuentes, 2010) y la estimación de Liu – Jordan para evaluar el potencial solar. (Oyarzo Oyarzún y Silva Mancilla, 2006).

1.1. Planteamiento del Problema

La demanda de la energía a nivel mundial crece cada vez más con el transcurso de los años, y el desarrollo de un país está directamente ligado al consumo de la energía eléctrica, para lo cual las fuentes de energías renovables son una alternativa que en la actualidad se viene adoptando para la demanda energética del país, con el fin de disminuir el consumo desmedido de los recursos fósiles, y asimismo no contribuir a la contaminación ambiental y el cambio climático (Carta González *et al.*, 2009).

La energía renovable proveniente del sol y del viento, es una alternativa que depende de su forma de aprovechamiento, que genera impactos ambientales significativamente inferiores a las fuentes convencionales de energía, pueden contribuir al suministro de la red nacional energética y sustentabilidad ambiental. La magnitud de dicha contribución y la viabilidad económica de su implantación, depende de las particularidades tales como el estudio del potencial explotable de los recursos, su localización geográfica y las características de los mercados energéticos (Lucano y Fuentes, 2010).

La ciudad de Juliaca se encuentra en el altiplano peruano en donde radiación solar y los vientos son regularmente constantes que no son aprovechados actualmente para usos directos como la electricidad a través de una turbina, o para bombeo de agua mediante paneles o aerobombas. Además, la mayoría de su población de sus alrededores enfrentan problemas del suministro de agua potable por lo que consumen agua de pozo extraída del subsuelo y algunos pobladores no cuentan con energía eléctrica. Por tanto, la caracterización de los recurso eólico y solar permitiría incorporar proyectos con tecnologías limpias elevando la calidad de vida de los pobladores (Peralta Jaramillo, 2015).

Caracterizar los recursos eólico y solar en la ciudad de Juliaca se resume a la siguiente interrogante:

1.1.1. Problema general

¿Cuáles son sus características del potencial explotable de los recursos eólico y solar en la ciudad de Juliaca?

1.1.2. Problema específico

- ¿Cuáles son sus características de la velocidad y dirección de viento promedio mensual y anual para en la ciudad de Juliaca?
- ¿Qué potencia explotable mensual y anual del viento existe utilizando la distribución de Weibull?
- ¿Cuáles son sus características de la irradiancia solar global sobre una superficie horizontal promedio mensual y anual para la ciudad de Juliaca?
- ¿Como se estima la insolación solar global promedio para una superficie inclinada mediante el método de Liu - Jordan?

1.2. Antecedentes de la investigación

Los trabajos realizados a nivel nacional e internacional sobre la caracterización del recurso eólico y solar:

De Bórtoli, Mario E., Wittwer, Adrián R., Marighetti, Jorge O., Natalini, Mario. B., “*Análisis probabilístico de velocidades medias horarias de viento atmosférico en un año de registro*”, Facultad de Ingeniería - UNNE. Argentina, (2006). En este trabajo se analiza la variación de la velocidad, a partir de un nivel de probabilidad fijo, modificando el tiempo de registro de las velocidades medias horarias y utilizando el análisis probabilístico de registros cortos. Los datos utilizados para el análisis, son los obtenidos en el Aeropuerto Schiphol (Alemania) por el Royal Netherlands Meteorological Institute y disponibles en Internet (De Bortoli *et al.*, 2002a).

Werner Antonio, Errasti Michel, “*Diseño por simulación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico para una vaquería en Cuba*”, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables. CETER. La Habana. Vol. XX. No. X, XXXX, (2013) p. XX-XX ISSN 1815-5944. En este artículo se diseñó por simulación un sistema híbrido eólico-fotovoltaico de producción de energía eléctrica, para una vaquería aislada de la red eléctrica en Cuba. Las variables meteorológicas usadas fueron medidas durante un año. Estas son el punto de partida para la simulación usando el software HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable). Como resultado de la simulación HOMER muestra en una tabla de resultados con la combinación de todas las posibles variantes, ordenadas usando el capital inicial (Initial Capital). Combinando criterios técnico-económicos como el costo de la energía y la demanda insatisfecha se seleccionó la variante que mejor se ajusta a las necesidades de la vaquería (de Dios-Ortega y Errasti-Cabrera, 2013).

Serrano Rico J., “*Comparación de métodos para determinar los parámetros de Weibull para la generación de energía eólica*”, Rev. Mexicana de Fís. 33, (1988) 554. Scientia et Technica Año XVIII, Vol. 18, No 2, (2013). Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701. En este artículo se analizan y comparan cinco métodos

numéricos para el análisis de la efectividad en determinar los parámetros de la distribución de Weibull, usando datos de velocidad del viento registrados en la ciudad de Pamplona, en la región nororiental de Colombia, para el periodo comprendido entre enero de 2006 y noviembre de 2007, los registros fueron obtenidos por el Grupo de Investigaciones en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona (GIMUP) y manejo de la base de datos por el grupo de Ciencias Computacionales. La efectividad de estos métodos se realiza usando la prueba de Chi-cuadrado, el método de análisis de varianza y raíz cuadrada del error cuadrático medio RMSE, observando que el método de los momentos presenta un mejor ajuste en la determinación de los parámetros de forma y escala de la distribución de Weibull. El objetivo de este trabajo es el desarrollar una metodología que permita establecer criterios para la utilización de energía eólica en la región, la cual tiene prominencia en el uso de fuentes renovables para la generación de energía eléctrica en Colombia (Rico y Serrano, 2013).

González Rodríguez Esteban, *“Estimación de la irradiancia solar global en las envolventes de un edificio estandar en la ciudad de Santiago, región metropolitana, mediante un modelo de simulación”*, Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Santiago, (2011). En este trabajo se realiza el estudio del recurso solar disponible en fachadas de edificios puede permitir el desarrollo de proyectos para su aprovechamiento, sin embargo, en Chile actualmente no se dispone de datos en forma de valores medidos por instrumentos para ello. Para subsanar esta deficiencia, se utilizan modelos que simulan los procesos físicos durante la trayectoria de la energía solar, considerando los efectos específicos asociados al entorno del lugar. Por esto, se propuso estimar la irradiancia solar global en las fachadas de un edificio estándar en la ciudad de Santiago, Región Metropolitana, mediante un modelo de simulación. Para lograr dicho objetivo, se modificó el modelo PINSOL para realizar estimaciones en entornos urbanos mediante la inclusión del factor de cielo visible (SVF), y se evaluó la exactitud del cálculo mediante una comparación con el modelo comercial Autodesk Ecotect sobre las fachadas de la biblioteca Ruy Barbosa, de la facultad de Ciencias Agronómicas en el Campus Antumapu de la Universidad de Chile (González Rodríguez, 2011).

Hualpa Huamani Maimer T. en “*Estudio de factibilidad de sistemas híbridos eólico-solar en el departamento de Moquegua*”, Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú. (2006). El estudio de las características de salida de energía que tendría un sistema híbrido (solar-eólico) en la **localidad** de Ilo. Para lograr esto se desarrolla en la primera parte el tratamiento estadístico de los datos con que se cuenta. Teniendo como base un ejemplo hipotético, de consumo de energía en una localidad rural, luego a partir de las alternativas que ofrece el mercado, la configuración del sistema solar-eólico, se hace conocer que la energía planteada es capaz de suministrar el sistema y hacer la comparación con la alternativa de grupo electrógeno utilizada en la zona (Hualpa Huamaní, 2011).

1.3. Justificación

La ciudad de Juliaca llamada *la ciudad de los vientos*, se encuentra ubicada en el altiplano peruano en donde los vientos constantes se presentan durante la mayoría de horas del día que no se aprovecha, asimismo según los datos del atlas solar del Perú se ha estimado que existe recurso solar aceptable para su aprovechamiento el cual tiene que ser determinado y dimensionado. Por otro lado, a lo largo de la ciudad y sus alrededores los habitantes en su mayoría no cuentan con los servicios básicos como el agua y el desagüe; utilizan agua proveniente de pozo subterráneos y usan letrinas para sus servicios higiénicos.

Para aprovechar los recursos renovables en cualquier lugar de nuestro país se requiere tener información actualizada sobre las características de los recursos en una zona en donde se hará el uso de estos recursos, para electrificación de zonas rurales, bombeo de agua, y otras aplicaciones.

Por tanto, realizar la caracterización detallada del recurso eólico y solar en Juliaca permitiría desarrollar proyectos como bombeo de agua con esta energía o la generación de la energía eléctrica para zonas aisladas cercanas a Juliaca, o en fin proyectos productivos de cualquier especie en donde se pueda utilizar estas energías de forma sostenible. Además, permitirá aportar a elaborar en el futuro el mapa eólico y solar detallado a profundidad

para la región de Puno con la que no se cuenta que es necesaria para la implementación de proyectos con energía eólica (Hualpa Huamaní, 2011).

Por las razones expuestas se realiza este trabajo con el fin de evaluar el potencial eólico y solar en el distrito de Juliaca, para viabilizar los proyectos aprovechando los recursos eólicos y solares en esta localidad y sus alrededores.

1.4. Objetivos del estudio

1.4.1. Objetivo General

Caracterizar el potencial explotable de los recursos eólico y solar de la ciudad de Juliaca, Provincia de San Román de la región de Puno.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Analizar la velocidad y dirección de viento promedio mensual y anual en la ciudad de Juliaca.
- Estimar la potencia explotable mensual y anual del viento utilizando la distribución de Weibull.
- Analizar la irradiancia solar global sobre una superficie horizontal promedio mensual y anual para la ciudad de Juliaca.
- Estimar la insolación solar global promedio para una superficie inclinada mediante el método de Liu y Jordan.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

Al caracterizar los potenciales explotables de los recursos eólico y solar de la ciudad de Juliaca, se tiene un potencial energético favorable para su utilización.

1.5.2. Hipótesis Específicos

- La velocidad y dirección de viento promedio mensual y anual para en la ciudad de Juliaca son variables y de potencial explotable.
- El potencial explotable mensual y anual del viento se calcula utilizando la distribución de Weibull.
- La irradiancia solar global sobre una superficie horizontal promedio mensual y anual para la ciudad de Juliaca es muy factible para su explotación.
- La insolación solar global promedio para una superficie inclinada se puede calcular por el método de Liu y Jordan.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Aspectos teóricos de la energía eólica

La energía eólica, como la mayoría de las energías renovables, tiene su origen en la radiación que alcanza al planeta procedente del Sol. En concreto, entre el 1 y 2 % de la energía solar que llega a la Tierra se convierte en energía eólica. La energía eólica se genera debido a que no todas las partes del planeta se calientan de igual modo, lo cual genera diferencias de presión en la atmósfera. A ese fenómeno se une el efecto del movimiento de rotación terrestre a escala global y los factores geográficos y climáticos locales. Una característica fundamental de este tipo de energía es su gran aleatoriedad, por lo que resulta complicado estimar la cantidad de energía eólica de la que se dispone en un intervalo determinado de tiempo. (Lezcano Udrizar *et al.*, 2011).

La energía eólica presenta una gran variación local, superior a la de la energía solar, por lo que las poblaciones vecinas, que muy probablemente tendrán el mismo potencial solar, pueden tener un recurso eólico muy diferente si uno de ellos está en una zona más propicia, más elevada o mejor orientada respecto a la dirección principal del viento esto debido a la ubicación de habitabilidad (Dufo-López *et al.*, 2011).

Por consiguiente, es imprescindible realizar el análisis teórico de los aspectos matemáticos más importantes asociadas al recurso eólico y solar que conllevara alcanzar los objetivos establecidos.

2.1.1. Energía contenida en el viento y potencia desarrollada por un aerogenerador

En términos simples, la energía del viento, o energía eólica, no es otra cosa más que la energía cinética que posee una masa de aire que se encuentra en movimiento. La energía cinética (E_C) de un cuerpo de masa m cualquiera, que se mueve con una velocidad v , responde a la ecuación 2.1.

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Esta es la forma más general que existe para expresar la energía cinética. En este caso en particular, la masa m corresponde a una masa de aire, y la velocidad v corresponde a la velocidad del viento (velocidad de esa masa de aire). Esta expresión sin embargo no ayuda mucho, se necesitan expresiones que no dependan de la masa del aire y que al mismo tiempo relacionen la energía y la potencia eléctrica sólo con la velocidad del viento y en lo posible con alguna característica propia de los aerogeneradores. En efecto, se verá que la cantidad de energía transferida al rotor de un aerogenerador por el viento depende de la densidad del aire ρ , del área barrida por las aspas del rotor, A , y de la velocidad del viento v (Carta González *et al.*, 2009).

Si el volumen del aire que se mueve es V , y tiene una densidad ρ , su masa queda determinada por la ecuación 2.2:

$$m = V\rho \quad (2.2)$$

Luego, insertando la ecuación (2.2) en la (2.1), se obtiene la expresión (2.3) para la energía cinética:

$$E_C = \frac{1}{2}V\rho v^2 \quad (2.3)$$

Por otro lado, la cantidad de aire que llega al rotor de un aerogenerador en un tiempo t dependerá de: el área de barrido del rotor A y de la velocidad del viento v , como en la figura 2.1.

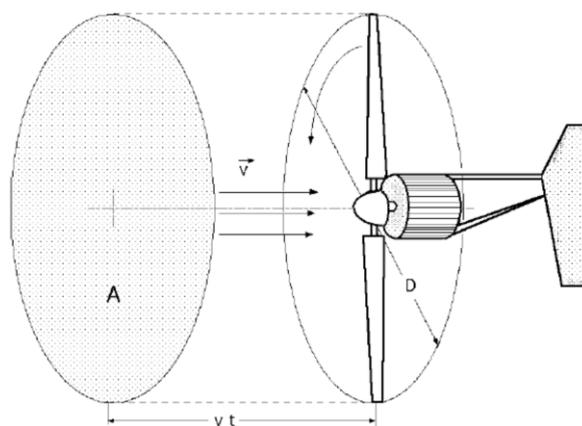


Figura 2.1: Factores que intervienen en la potencia desarrollada por un aerogenerador

Así, el volumen de aire que llega al rotor estará dado por (Carta González *et al.*, 2009):

$$V = Avt \quad (2.4)$$

Insertando la ecuación 2.4 en la 2.3, se obtienen finalmente las expresiones 2.5 y 2.6 para la energía cinética y potencia respectivamente que aporta el aire a las aspas del rotor en un tiempo t :

$$E_C = \frac{1}{2} \rho Avt v^3 \quad (2.5)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho Av v^3 \quad (2.6)$$

Como se puede apreciar, la potencia desarrollada por un aerogenerador depende del cubo de la velocidad del viento, lo que hace que pequeñas variaciones en la velocidad provoquen grandes variaciones en la potencia capturada por las palas del rotor y por ende en la potencia eléctrica generada, esta es una de las principales causas del fracaso de muchos proyectos basados en energía eólica, la estimación incorrecta del verdadero potencial eólico de la zona o simplemente la no disponibilidad de registros de mediciones. Volviendo a la expresión 2.6, no toda esta potencia se transfiere al generador eléctrico. Hasta ahora, se ha hablado de la energía disponible en el viento, pero la capacidad de un aerogenerador cualquiera para extraer esta potencia disponible en el viento depende de varios factores entre ellos su eficiencia mecánica. De esta manera para extraer la potencia de un aerogenerador, se habla de un coeficiente adimensional característico de cada aerogenerador, que se conoce como coeficiente de potencia, dado por la ecuación (Lucano y Fuentes, 2010):

$$C_P = \frac{P_M}{P_V} = \frac{POTENCIA MECÁNICA}{POTENCIA DEL VIENTO} \quad (2.7)$$

Luego:

$$P_M = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_P \quad (2.8)$$

Se ha obtenido de forma teórica el máximo valor que puede alcanzar este coeficiente de potencia, se le denomina límite de Betz y es el de 0,5926 % (Carta González *et al.*, 2009).

Este concepto proviene de la ley de Betz y dice que sólo puede convertirse menos del 16/27 (el 59 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador, (éste resultado se obtiene al medir la diferencia de la potencia útil del viento antes de la hélice y después de la hélice, luego este resultado lo maximizamos derivando e igualando a cero). Esta ley fue formulada por primera vez por el físico alemán Albert Betz en 1919. Su libro *Wind-Energie*, publicado en 1926, proporcionaba buena parte del conocimiento que en ese momento se tenía sobre energía eólica y aerogeneradores. Es sorprendente que se pueda hacer una afirmación general tan tajante que se pueda aplicar a cualquier aerogenerador de eje horizontal.

2.1.2. Variación de la velocidad de viento con la altura

La velocidad del viento también varía con la altura respecto al suelo y con ello la energía disponible, es por eso que se requiere una ecuación que prediga la velocidad del viento a una altura determinada en función de la velocidad conocida a una altura de referencia. Para una turbina eólica se necesita saber la velocidad del viento a la altura del eje del rotor, dada por lo general por el tamaño de la torre, la expresión más común es la ecuación 2.9 (Carta González *et al.*, 2009).

$$v = v_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^\alpha \quad (2.9)$$

Donde h es la altura a la cual se desea conocer la velocidad v , y v_o es la velocidad conocida a la altura de referencia h_o también conocida. El exponente α varía con la altura, hora del día, estación del año, naturaleza del terreno, velocidad del viento y temperatura. Esta ley también se conoce con el nombre de ley exponencial o ley de

potencia, tomando como altura de referencia 10 metros. La tabla 2.1 muestra la variación del coeficiente α con el tipo de terreno (Rivero, 2007)

Tabla 2.1: Variación del coeficiente de rugosidad a respecto al tipo de terreno

Tipo de terreno	C. Rugosidad α
Lugares llanos con hielo o hierba	0,08 a 0,12
Lugares llanos (mar, costa)	0,14
Terrenos poco accidentados	0,13 a 0,16
Zonas rústicas	0,2
Terrenos accidentados o bosques	0,2 a 0,26
Terrenos muy accidentados y grandes ciudades	0,25 a 0,4

FUENTE: (Rivero, 2007).

El distrito de Juliaca, presenta un coeficiente de rugosidad que estaría entre 0,2 y 0,25; por ser un espacio que cuenta con edificaciones de diferente escala, en este trabajo se utiliza un coeficiente de rugosidad $\alpha = 0,2$ (Leng *et al.*, 2004) (Stackhouse y Whitlock, 2008).

Otro modelo, alternativo al anterior, es el llamado modelo logarítmico. Este modelo asume que la velocidad del viento es proporcional al logaritmo de la altura respecto al suelo, el modelo queda descrito por la ecuación (2.10) ((Carta González *et al.*, 2009)):

$$\frac{v(h_{gen})}{v(h_{anem})} = \frac{\ln(h_{gen}/h_0)}{\ln(h_{anem}/h_0)} \quad (2.10)$$

Donde h_{gen} es la altura del eje del aerogenerador, h_{anem} es la altura a la cual se realizaron las mediciones, o altura del anemómetro, y h_0 es la longitud de rugosidad, mientras que $v(h_{gen})$ y $v(h_{anem})$ son las velocidades de viento a la altura del eje de la turbina y a la altura del anemómetro respectivamente. Tal como en el primer modelo planteado, existen valores típicos para h_0 dependiendo del tipo de terreno tal como se muestra en la tabla 2.2 (Stackhouse y Whitlock, 2008). Estos modelos se utilizarán en el momento que sea necesario.

Tabla 2.2: Valores típicos de h_0

Tipo de terreno	Longitud de Rugosidad (m) h_0
Muy liso, hielo o barro	0,00001
Mar abierto tranquilo	0,0002
Superficie de nieve	0,003
Césped	0,008
Pasto rugoso	0,0010
Campo baldío	0,03
Cultivos	0,05
Pocos árboles	0,10
Muchos árboles y algunas construcciones	0,25
Bosques y selvas	0,5
Suburbios	1,5
Centro de la ciudad, construcciones altas	3,0

FUENTE: (Stackhouse y Whitlock, 2008).

2.1.3. Distribución de Weibull

Una de las formas más comunes de analizar los datos de velocidad de viento, y de elaborar estudios sobre energías renovables basados en energía eólica es hacerlo mediante una función de densidad de probabilidad. Existen varias funciones de densidad de probabilidad que se pueden utilizar, tres de las más comunes son la de Weibull, Rayleigh y Normal, pero lejos la herramienta más utilizada para estos efectos es la llamada función de densidad de probabilidad de Weibull, o simplemente distribución de Weibull (Torres *et al.*, 2014). La función de densidad de probabilidad de Weibull para la velocidad del viento (v) está dada por la ecuación (2.11):

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} \quad k > 0, v > 0, c > 1 \quad (2.11)$$

Esta es una distribución de dos parámetros (Carta González *et al.*, 2009) donde:

c se denomina parámetro de escala y k es el factor de forma.

La función de densidad de probabilidad representa una aproximación muy útil para calcular probabilidades partiendo de un histograma: en primer lugar es mucho más simple, permite sustituir la tabla completa de valores de la distribución de frecuencias por la ecuación matemática de $f(v)$; en segundo lugar es más general, trata de reflejar no el comportamiento de una muestra concreta, sino la estructura de distribución de los valores de la variable a largo plazo; en tercer lugar es más operativa, permite obtener probabilidades de cualquier suceso.

Existen varios métodos para determinar el valor de los parámetros c y k . La estimación de los parámetros k y c involucra el uso de los datos muestrales en conjunción con alguna estadística. Uno de los métodos más frecuentemente empleado para la estimación de k y c es el método de los momentos. Éste suele utilizarse igualando la media y la desviación típica muestral con los correspondientes valores de la distribución de Weibull es decir cuando la velocidad media (\bar{v}) y la desviación estándar (σ) de la velocidad del viento se conocen. De esta forma una buena aproximación para encontrar el valor de k es la de la ecuación (2.12): (Carta González *et al.*, 2009).

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1,086} \quad 1 \leq k \leq 10 \quad (2.12)$$

Donde σ corresponde a la desviación estándar y se obtiene de la varianza (σ^2) de acuerdo a la ecuación:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \quad (2.13)$$

Una vez calculado k , se puede encontrar el valor de c según la ecuación:

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (2.14)$$

Donde \bar{v} es la velocidad media, y Γ es la función gamma tal como se muestra en las ecuaciones (2.15) y (2.16):

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (2.15)$$

$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{y-1} dx \quad \text{con } y \geq 0 \quad (2.16)$$

Este es un método práctico sobre todo cuando se tiene una serie de velocidades horarias para un año completo. La ventaja de trabajar de esta manera es que se pueden utilizar las características propias de la función de densidad de probabilidad aplicadas a la velocidad del viento. Así es como se obtienen los siguientes resultados de importancia a la hora de hacer cálculos.

La velocidad del viento media se puede escribir según la ecuación:

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (2.17)$$

Si f es la función de densidad de probabilidad de Weibull, se puede insertar la ecuación (2.11) en la ecuación (2.17) para obtener la expresión:

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} \frac{vk}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} dv \quad (2.18)$$

Haciendo el cambio de variables $x = \left(\frac{v}{c}\right)^k$ en la ecuación (2.18) y comparando con la ecuación (2.16), la velocidad media se puede escribir como se muestra en la ecuación (2.19).

$$\bar{v} = c \int_0^{\infty} x^{1/k} e^{-x} dx \quad (2.19)$$

Ahora, si $y = 1 + \frac{1}{k}$ se puede usar la función gamma de la ecuación (2.16), de esta manera, se obtiene finalmente la ecuación (2.20) para la velocidad media en función sólo de los parámetros de Weibull.

$$\bar{v} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.20)$$

también según la distribución de Weibull la desviación típica viene dada por:

$$\sigma^2 = c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right] \quad (2.21)$$

$$\sigma^2 = \frac{\bar{v}^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \quad (2.22)$$

Las tablas de función gamma publicadas sólo se dan para valores de y entre 1 y 2. Si y está fuera de este rango se puede usar la fórmula recursiva (2.23), mientras que si y es un entero se hace uso de la ecuación (2.24).

$$\Gamma(y + 1) = y\Gamma(y), \quad 1 < y < 2 \quad (2.23)$$

$$\Gamma(y + 1) = y, \quad y = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.24)$$

De igual manera, la función de distribución acumulativa $F(v)$ de una variable aleatoria continua v es la probabilidad de que v tome un valor menor o igual a algún valor v_a específico (Carta González *et al.*, 2009). Para el caso de la distribución de Weibull de dos parámetros se tiene:

$$F(v) = P(v \leq v_a) = 1 - e^{-(v/c)^k} \quad (2.25)$$

Otro de los resultados, y uno de los más importantes y útiles es el siguiente, según la ecuación 2.26, la probabilidad de que la velocidad del viento sea igual o superior a una velocidad de viento conocida v_a es (Carta González *et al.*, 2009):

$$P(v \geq v_a) = \int_{v_a}^{\infty} f(v)dv = e^{-(v_a/c)^k} \quad (2.26)$$

La importancia de este resultado radica en que de esta manera y dadas las características de operación de un aerogenerador determinado se puede calcular las horas de operación del mismo en cierto período de tiempo, como por ejemplo un año. La probabilidad de que la velocidad del viento esté dentro de un intervalo de 1 m/s, centrado en la velocidad de viento v_a , está dada por las ecuaciones:

$$P(v_a - 0,5 \leq v \leq v_a + 0,5) = \int_{v_a-0,5}^{v_a+0,5} f(v)dv \quad (2.27a)$$

$$= e^{-\left(\frac{v_a-0,5}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_a+0,5}{c}\right)^k} \quad (2.27b)$$

$$\approx f(v_a)\Delta v = f(v_a) \quad (2.27c)$$

Y en lo que respecta a la potencia promedio en el viento, se tiene que:

$$\bar{P}_W = \frac{1}{2}\rho A \int_0^{\infty} v^3 f(v)dv \quad (2.28)$$

nuevamente, si f es la función de densidad de probabilidad de Weibull, la potencia promedio queda dada por la ecuación 2.29.

$$\bar{P}_W = \frac{\rho A \bar{v}^3 \Gamma(1+3/k)}{2[\Gamma(1+1/k)]^3} \quad (2.29)$$

Esta expresión también es de mucha importancia ya que permite calcular la densidad de

potencia al dividir \bar{P}_W por el área de barrido A obteniéndose la ecuación 2.30 (Oyarzún y Silva Mancilla, 2006).

$$\text{Densidad de potencia} = \frac{\bar{P}_W}{A} = \frac{\rho \bar{v}^3 \Gamma(1+3/k)}{2[\Gamma(1+1/k)]^3} \quad (2.30)$$

Todas las expresiones anteriores constituyen la base para el análisis cualitativo que se hará posteriormente, en el cual se aplican estas ecuaciones.

A modo de ejemplo se plantea la siguiente situación: considere que se tiene una serie anual con 8760 datos de velocidad de viento en m/s a 19 metros de altura la cual entrega un promedio anual de 5, 12 m/s con una desviación estándar de 2,44. En base a esta información, el factor k de la distribución de Weibull se obtiene aplicando la ecuación 2.12 obteniéndose $k = 2, 24$. De manera similar y aplicando la ecuación (2.14) se obtiene el factor de escala de la distribución, $c = 5,78$. Para obtener la densidad de potencia mediante el uso de la ecuación (2.30) se debe conocer el valor de la densidad del aire, en este caso a nivel del mar. Este valor se obtendrá en apartado siguiente y corresponde a $\rho = 1, 248 \text{ kg/m}^3$. De esta manera y utilizando los valores de velocidad media anual y factor de forma se obtiene una densidad de potencia promedio anual de $143,92 \text{ W/m}^2$.

2.1.4. Variación de la densidad del aire respecto a la altura

La fuerza impulsora básica del aire en movimiento es su diferencia de presión entre dos regiones. Esta presión del aire está descrita por varias leyes físicas. Una de estas es la ley de Boyle, la cual establece que el producto de presión y volumen de un gas a una temperatura constante debe ser una constante, respondiendo a la ecuación (2.31).

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = \text{cte} \quad (2.31)$$

Otra es la ley de Charles, la cual establece que para una presión constante, el volumen de un gas varía directamente con la temperatura absoluta según la ecuación (2.32).

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (2.32)$$

En un gráfico que relacione el volumen versus temperatura, se verificaría que para un

volumen 0 le corresponderían -273°C , o 0°K . Las leyes de Charles y Boyle se pueden combinar en la ecuación de estado de los gases ideales, ecuación (2.33).

$$P V = nRT \quad (2.33)$$

En esta ecuación, R es la constante universal de gas, T es la temperatura en grados Kelvin, V es el volumen del gas en m^3 , n es el número de kilomoles de gas, y P es la presión en pascales (N/m^2). En condiciones estándares, 0°C y 1 atmósfera (101,325 KPa), un kilomol de gas ocupa $22,414 \text{ m}^3$ y la constante universal de gas es de $8314,5 \text{ J}/(\text{Kmol}^{\circ}\text{K})$, donde J representa un Joule o un Newton metro de energía. La presión de un kilomol a 0°C es entonces:

$$\frac{(8314,5 \text{ J}/(\text{Kmol}^{\circ}\text{K}))(273,15^{\circ}\text{K})}{22,414 \text{ m}^3} = 101,325(\text{KPa}) \quad (2.34)$$

La densidad del aire ρ de un gas es la masa m de 1 kilomol dividida por el volumen V del kilomol, dado por la ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.35)$$

El volumen de un kilomol varía con la presión y temperatura tal como en la ecuación 2.33 al insertar la ecuación (2.33) en la (2.35) se obtiene la expresión para la densidad del aire:

$$\rho = \frac{mP}{RT} = 3,488 \frac{P}{T} \text{ Kg}/\text{m}^3 \quad (2.36)$$

Donde P está en kPa, y T en grados $^{\circ}\text{K}$.

Como se aprecia en la ecuación 2.36, la densidad del aire es función tanto de la presión atmosférica como de la temperatura, y estas dos variables son a su vez dependientes de la altura. Por una parte, la presión disminuye a medida que la altura aumenta, haciendo que la densidad del aire ρ disminuya (manteniendo temperatura constante). Asimismo, la temperatura también disminuye con la altura haciendo que la densidad del aire aumente (manteniendo presión constante). Sin embargo, en la práctica ambas variables, presión y temperatura, están variando al mismo tiempo respecto a la altura, pero el efecto sobre la densidad del aire es mínimo y es más notorio su cambio respecto a la variación de la presión que por temperatura obteniéndose una leve disminución de la densidad del aire respecto a la altura.

Por otro lado, para cuantificar el efecto de la variación de la densidad del aire respecto a la altura, en este estudio se procederá de la misma forma como lo hace HOMER, según su manual (Stackhouse y Whitlock, 2008).

De acuerdo con la ley de los gases ideales, la densidad del aire esta definida como:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (2.37)$$

Como se había visto, ρ es la densidad del aire (kg/m^3); P es la presión (Pa); R la constante de los gases para el aire (287 J/kgK); T temperatura ($^{\circ}\text{K}$).

La variable que vamos a calcular es el ratio de densidad de aire, que es la densidad real del aire en nuestro emplazamiento dividida por la densidad de aire en condiciones estándar, 15°C y al nivel del mar. Usando la ley de los gases universales se puede expresar de la siguiente manera (Lucano y Fuentes, 2010)

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{P}{P_0} \left(\frac{T_0}{T} \right) \quad (2.38)$$

Donde: P_0 es la presión en condiciones estándar (101.325 Pa); T_0 es la temperatura en condiciones estándar (288.16°K)

La altitud afecta tanto a la presión como a la temperatura. Para altitudes inferiores de 10000 m se puede hacer la aproximación de que la temperatura decrece linealmente con la altura según la siguiente ecuación:

$$T = T_0 - B \cdot h \quad (2.39)$$

Donde: B es una constante (0.0065°K/m) y h es la altura (m).

Asumiendo esta simplificación, se puede considerar también que la presión depende de la altitud de la siguiente forma:

$$P = \left(1 - \frac{Bh}{T_0} \right)^{g/RB} \quad (2.40)$$

siendo g la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).

Sustituyendo estas ecuaciones para P y T en la ecuación que definía el ratio de densidad del aire, se llega a la siguiente ecuación para calcular el ratio de densidad de aire:

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{Bh}{T_0}\right)^{\frac{g}{RB}} \left(\frac{T_0}{T_0 - Bh}\right) \quad (2.41)$$

La ventaja de esta ecuación es que sólo h , la altitud, es una variable. Por lo tanto, con las aproximaciones realizadas se puede concluir que el ratio de densidad de aire es únicamente función de la altitud del terreno, h .

2.2. Aspectos teóricos de la energía solar fotovoltaica

2.2.1. Radiación Solar

La luz que proviene del sol está constituida por fotones de muchos colores, entre el ultravioleta (UV), y el infrarrojo (IR). En términos más rigurosos, *color* es sinónimo de *longitud de onda* (λ) o de *frecuencia* (f) de la radiación correspondiente. El producto λf es igual a la velocidad de la luz, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

La energía de un fotón depende de su color, y viene dada por la relación de Max Planck, ecuación 2.42,

$$E_f = hf \quad (2.42)$$

Donde, $h = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV}$ y se llama constante de Planck. También $E_f = h_c/\lambda$, donde $h_c = 1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}$.

La energía de cualquier fotón con $\lambda < 1100 \text{ nm}$ es mayor que la energía de enlace de las cargas positivas y negativas en los átomos del silicio. En condiciones ideales, la intensidad de la luz solar, o irradiancia, en la superficie de la tierra es de 1000 W/m^2 .

2.2.2. Herramientas matemáticas para la determinación teórica de la radiación solar

Hay que tener en cuenta que la caracterización de la radiación solar incidente en la tierra no es algo sencillo, debido a dos razones fundamentalmente (Oyarzo Oyarzún y Silva Mancilla, 2006):

- El movimiento relativo *Sol-Tierra* está regido por ecuaciones complejas, que determinan en todo momento la posición relativa del sol con respecto a cualquier punto de la superficie terrestre.
- La variedad de modelos existentes para caracterizar la radiación, la cual obliga al usuario a elegir en función de las necesidades en cada caso.

Es por las razones anteriores que los investigadores han tratado de llegar a valores de radiación incidente sobre un plano horizontal a nivel de la estación registradora a partir de las horas reales de sol. En el año 1964, se desarrolló la ecuación 2.43, mediante correlación estadística, que permite calcular la radiación solar global incidente sobre un plano horizontal en base al número de horas teóricas de sol, tipo de clima y ubicación geográfica, respecto a esto se considera que para lugares ubicados en el hemisferio sur y al oeste del meridiano de Greenwich, los ángulos de la latitud y longitud deben ser considerados negativos (Carta González *et al.*, 2009).

$$H_{HT} = H_0 \left(a + b \frac{s}{S} \right) \quad (2.41)$$

Donde:

H_{HT} : Radiación solar global promedio diaria mensual incidente sobre una superficie horizontal.

H_0 : Radiación solar extraterrestre promedio diaria mensual sobre una superficie horizontal.

s : Horas reales de sol medidos.

S : Horas teóricas de sol calculadas.

a y b : constante empíricas que dependen del tipo de clima y que deben determinarse.

2.2.2.1. Constante solar

La constante solar está definida como la cantidad de energía solar que incide perpendicularmente por unidad de tiempo sobre una superficie de área unitaria, colocada fuera de la atmósfera terrestre a una distancia del sol igual a la distancia promedio sol-tierra. La referencia radiométrica mundial World Radiometric Reference (WRR) del World Radiation Center (WRC) entrega el siguiente valor para la constante solar (I) González Rodríguez (2011).

$$I = 1367 \text{ W/m}^2 = 433,3 \text{ Btu}/(\text{ft}^2\text{h}) = 1,96 \text{ cal}/(\text{cm}^2\text{min}) \quad (2.44)$$

con una desviación standard de $1,6 \text{ W/m}^2$ y una desviación máxima de $\pm 7 \text{ W/m}^2$.

2.2.2.2. Variación de la distancia tierra sol

La pequeña excentricidad de la elíptica hace que la distancia entre el sol y la tierra varíe. Las expresiones que rigen esta variación tienen en cuenta el hecho de que la velocidad angular de la tierra en su camino sobre la elíptica es variable y se ajusta a la conocida ley de Kepler, según la cual, los planetas barren áreas iguales en tiempos iguales. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones de la ingeniería, la aproximación de considerar que la tierra gira alrededor del sol con velocidad angular constante es muy cómoda y conduce a una exactitud suficiente de la variación de la distancia de la Tierra respecto al sol, esta es la ecuación 2.45 (Santamaría y Castejón, 2010).

$$C = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \quad (2.45)$$

Donde:

C : Variación de la distancia tierra-sol.

n : Numero del día del año (01-ene = 1; 02-ene= 2; . . .; 30 dic= 364; 31dic= 365).

2.2.2.3. Ángulo de declinación solar

Se le denomina ángulo de declinación solar, al ángulo del movimiento relativo que realiza el sol con respecto a la línea de Ecuador terrestre (Carta González *et al.*, 2009). Este desplazamiento relativo del sol, de Norte a Sur y viceversa, se debe a que el eje de

rotación de la tierra tiene una inclinación de $23,45^\circ$ con respecto a la normal sobre el plano de la eclíptica solar, esto se muestra en la figura 2.2.



Figura 2.2: Eje de rotación de la Tierra.

La variación del ángulo de declinación solar para todo el año se puede determinar de manera aproximada para aplicaciones de ingeniería con la ecuación (2.46) (Carta González *et al.*, 2009).

$$\delta = 23,45 \text{sen} \left(\frac{360}{365} (284 + n) \right) \tag{2.46}$$

Donde

δ : Ángulo de declinación solar en grados.

n : Numero correlativo del día del año.

2.2.2.4. Ángulo horario a la salida del sol

Es el ángulo con respecto al norte astronómico (medio día solar) con el cual sale el sol en el horizonte cuando amanece, suponiendo el punto de observación un plano horizontal. Este ángulo se puede determinar para todo el año para cualquier parte de la superficie terrestre conociendo la latitud y la declinación solar, como se aprecia en la ecuación 2.47 (Santamaría y Castejón, 2010).

$$W_s = \text{arc cos} [-\tan(\delta) \tan(L)] \tag{2.47}$$

Donde:

W_s : Angulo horario a la salida del sol en grados (el ángulo horario para la puesta del sol es $-W_s$).

L : Latitud en grados.

δ : es la declinación en grados.

Haciendo uso de la expresión anterior puede calcularse la longitud del día (en grados), es decir, el tiempo de sol desde el orto hasta el ocaso, el cual estaría dado por: $2 \arccos [-\tan(\delta) \tan(L)]$.

2.2.2.5. Horas reales de sol

Las horas reales de sol diario (s) se miden mediante un instrumento denominado heliógrafo.

La duración de la luz solar se puede definir como el intervalo de tiempo durante el cual se ve el disco solar y determina los períodos del día durante los cuales la intensidad de la radiación directa es superior a un cierto umbral, que está reconocido a nivel mundial y es de 120 W/m^2 .

Debe quedar claro que el registro de horas de sol no entrega el nivel de radiación que ha caído sobre la estación meteorológica.

2.2.2.6. Horas teóricas de sol

La duración del día se puede calcular matemáticamente para cada día del año, y se deduce a partir del ángulo horario de salida de sol (Carta González *et al.*, 2009). Si se supone que el sol recorre un ángulo de 15° por cada hora, 360° en 24 horas, por lo que la duración del día en función del ángulo horario de la salida del sol, se determinaría mediante la ecuación 2.48.

$$S = \frac{24}{360} (2W_s) = \frac{2}{15} \arccos [-\tan(\delta) \tan(L)] \quad (2.48)$$

Donde S es la hora teórica de sol (en horas), W_s tiene que estar dado en grados ($^\circ$).

2.2.2.7. Radiación Solar extraterrestre diaria

Es la cantidad de energía solar que recibe perpendicularmente una superficie horizontal en la parte superior de la atmósfera y que se encuentra a la distancia media sol-tierra (150 millones de km). La radiación solar extraterrestre se puede calcular matemáticamente y es función de la latitud (L), de la declinación solar (δ), del Angulo horario de salida del sol (W_s) y de la variación de la distancia del sol a la Tierra (C). La forma general de la radiación solar extraterrestre diaria (H_o) se define en la ecuación 2.49 (Oyarzo Oyarzún y Silva Mancilla, 2006).

$$H_o = I \cdot C \cdot \frac{24}{\pi} \left[\cos(L) \cos(\delta) \text{sen}(W) + \frac{2\pi}{360} W_s \text{sen}(L) \text{sen}(\delta) \right] \quad (2.49)$$

La radiación solar extraterrestre diaria varía durante el año debido a la variación de la distancia entre el sol y la tierra durante el año.

2.2.2.8. Interacciones con la atmósfera

Antes de llegar a la superficie terrestre, la radiación solar extraterrestre interactúa con la atmósfera. Como resultado de esto se tiene entre otras la radiación directa y difusa (figura 2.3).

Radiación directa: Es la radiación que incide sobre los objetivos iluminados por el sol sin haber interactuado con nada y sin cambiar de dirección (es la más importante en un día soleado). Su símbolo es H_b , y se mide en W/m^2 .

Radiación difusa: Es una radiación que incide indirectamente, como reflejo de la radiación solar que es absorbida por el polvo y el aire (es la radiación típica de los días nublados). La difusión se produce al desviarse los rayos solares, debido a las partículas sólidas y las moléculas, como el vapor de agua, que existen en la atmósfera. Su símbolo es H_d , y se mide en W/m^2 .

Radiación reflejada o albedo: Es la radiación procedente de la reflexión de la radiación directa en los elementos del entorno (es importante cerca del mar y de las zonas con nieve) H_r .

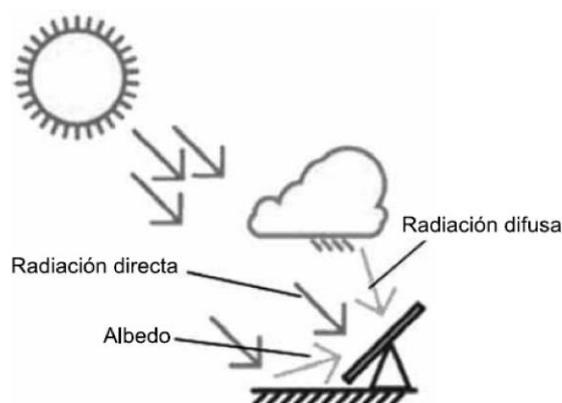


Figura 2.3: Componentes de la radiación solar que llega a la tierra.

Entonces, las condiciones atmosféricas que imperan cambian el tipo de radiación y la cantidad de la misma que llega a la superficie terrestre. Por lo tanto, una superficie expuesta al sol recibe tanta radiación directa como difusa, figura 2.3. Si se tiene en cuenta el tiempo que se expone la superficie al sol, entonces se habla de energía solar recibida por la superficie.

2.2.2.9. Radiación solar global en un plano horizontal

La radiación global que incide sobre una superficie es la suma de la radiación directa más la radiación difusa. Y se puede determinar en función de las horas teóricas de sol (S), horas reales de sol (s), incluyendo unos parámetros a y b que son propios del suelo y el clima donde se va a instalar el sistema, esto se muestra en la 2.43, y en la tabla 2.3 se dan algunos valores para las constantes geográficas a y b (López *et al.*, 2008).

Tabla 2.3: Constantes geográficas para a y b .

Ciudad	Clima	a	b
El Paso, U.S.A	Desértico, árido	0,54	0,20
Hamburgo, Alemania	Húmedo, lluvias frecuentes	0,22	0,57
Honolulu, U.S.A	Tropical, lluvias frecuentes	0,14	0,73
Madison, U.S.A	Húmedo, lluvias, nieves	0,30	0,34
Miami, U.S.A	Bosques, tropical	0,420	0,22
Niza, Francia	Bosques, seco en invierno	0,17	0,63

FUENTE: (López *et al.*, 2008).

Según la SENAMHI para la estación meteorológica de Puno ciudad $a = 0,378$
 $B = 0,438$.

2.2.2.10. Índice de claridad

Una forma particularmente conveniente de caracterizar un año solar es mediante el llamado índice de claridad (K_T), definido como la relación entre la radiación global sobre una superficie horizontal situada en la Tierra (H_{HT}) y la radiación sobre una superficie horizontal situada fuera de la atmósfera (H_o), ecuación 2.50. Este parámetro, propuesto originariamente por Liu y Jordan, mide la transparencia de la atmósfera, y en el se apoyan la mayoría de los métodos para estimar la radiación sobre superficies inclinadas (Rico y Serrano, 2013):

$$K_T = \frac{H_{HT}}{H_o} = a + b \frac{s}{S} \quad (2.50)$$

2.2.2.11. Determinación de radiación directa sobre un plano horizontal

La determinación de las características de la radiación solar en una localidad se puede hacer de manera directa, instalando aparatos de medición, debidamente calibrados y durante largos períodos de tiempo. Los promedios horarios, diarios, mensuales etc, se calculan estadísticamente. El instrumento a utilizar para este caso es el piranómetro, el cual sirve para medir la radiación global (radiación directa más radiación difusa), que se recibe en todas direcciones, por lo que el instrumento tiene que descansar sobre una base horizontal. La banda de longitud de ondas medida por el piranómetro está comprendida entre 0,3 mm y 3 mm; si está protegido de la radiación directa por un anillo protector desvanecedor, entonces mide sólo la radiación difusa. Los piranómetros más usuales se basan en la detección de la diferencia de temperaturas entre una superficie negra y una superficie blanca mediante termopilas o células fotoeléctricas, que deben estar protegidas del viento y compensadas para cambios de temperatura ambientales, mediante una doble semiesfera de vidrio, para suprimir los fenómenos de convección. Mediante un nivel se consigue la horizontalidad del aparato.

El piranómetro de Kipp y Zonen, figura 2.4, está constituido por una termopila

contenida en una caja metálica cerrada en su parte superior por dos hemisferios de cristal de 3 a 5 cm de diámetro y 2 mm de espesor. La caja está fijada sobre un zócalo metálico y la pila está protegida de la radiación difundida por el suelo por una gran corona blanca horizontal circular que actúa también como pantalla térmica. La termopila está formada por una serie de 14 termopares, láminas planas de 10 mm de longitud, 1 mm de ancho y 5 mm de espesor, dispuestas en un plano horizontal, en el que las extremidades están soldadas a unas barras de cobre verticales solidarias a una placa de latón maciza. El conjunto está protegido por un barniz negro material especial que absorbe la radiación. El calor emitido al nivel de la superficie negra es evacuado en parte por conducción y el resto por radiación y convección.

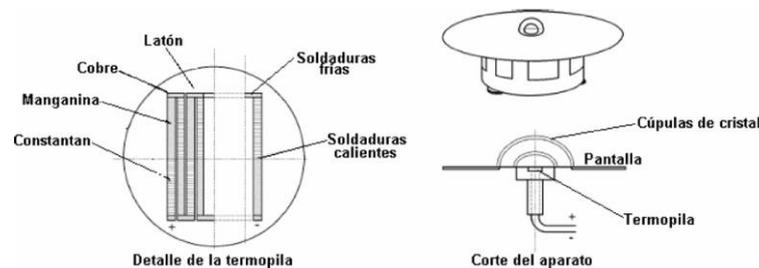


Figura 2.4: Piranómetro de Kipp.

2.2.2.12. Método directo para la determinación de la radiación solar global

La radiación solar global disponible en una localidad se caracteriza por los siguientes promedios:

El promedio diario mensual para el día $1 \leq i \leq 28, 29, 30, 31$, mes $1 \leq j \leq 12$ de un año, ecuación (2.51) (de Dios-Ortega y Errasti-Cabrera, 2013),

$$H_{HTj} = \left(\frac{1}{i}\right) \sum_{i=1}^i H_{ij} \quad (2.51)$$

El promedio diario anual, está dado según la ecuación 2.52:

$$H_{HT} = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} H_{ij} \quad (2.52)$$

Donde H_{ij} es la radiación global del día i -ésimo del mes j -ésimo del año, i es el número de días del mes j de un año.

Cuando no se cuenta con los instrumentos o los datos necesarios, se procede a utilizar métodos indirectos.

2.2.2.13. Método indirecto para la determinación de la radiación solar global

Los métodos indirectos son de dos tipos:

- **Métodos computacionales** que simulan con modelos físicos las diferentes inter- acciones de la radiación solar con la atmósfera (dispersión, absorción y reflexión) y con los cuales se puede obtener el valor de la radiación en la superficie terrestre a partir del valor de la radiación solar en el tope de la misma. Estos no se emplearán en este trabajo.
- **Métodos empíricos** que estiman el valor de la radiación solar a partir de modelos estadísticos elaborados con información de otras variables climatológicas. El brillo solar es el estimador más significativo de la radiación solar. Debido al gran número de estaciones que miden esta variable en el mundo, se han podido elaborar mapas de la distribución espacial y temporal de la disponibilidad de la energía solar.

El promedio diario de la radiación solar terrestre se puede interpretar como una fracción de la radiación en el tope de la atmósfera o de la radiación terrestre en un día completamente despejado. Por la dificultad en la definición de día despejado, que conlleva mediciones bajo esta condición durante diferentes épocas del año, se prefiere la opción al tope de radiación al tope de la atmósfera, ecuación (2.53).

$$H_{HTj} = K_{Tj}H_{0j} \quad (2.53)$$

Donde:

H_{0j} es el promedio de la radiación solar extraterrestre y

K_{Tj} es el promedio del índice de claridad atmosférica.

H_{HTj} es el promedio de la radiación solar una superficie horizontal

Para los modelos que parten del brillo solar (horas de sol), se asume que este índice

K_{Tj} es función de las horas de sol reales S_j , como se aprecia en la ecuación (2.54).

$$K_{Tj} = f(S_j) \quad (2.54)$$

El modelo más ampliamente aceptado es el modelo de Ångström modificado por Page.

Modelo de Ångström modificado La modificación introducida por Page se aprecia en la ecuación (2.55):

$$K_{Tj} = \frac{H_{HTj}}{H_{0j}} = a + b \left(\frac{S_j}{S_{0j}} \right) \quad (2.55)$$

Donde:

a y b son constantes empíricas

S_j es el promedio de horas de sol

S_{0j} es el promedio de la duración astronómica del día y j es el número del mes ($1 \leq j \leq 12$).

Para emplear este modelo es necesario calcular H_{0j} y S_{0j} , conocer a y b , y haber determinado S_j .

Modelo de Glover y McCulloch Se rige por la ecuación 2.56, en donde L es la latitud del lugar;

$$K_{Tj} = \frac{H_{HTj}}{H_{0j}} = 0,29 \cos(L) + 0,52 \left(\frac{S_j}{S_{0j}} \right) \quad (2.56)$$

Modelo de Rietveld Este modelo se rige por la ecuación 2.57.

$$K_{Tj} = \frac{H_{HTj}}{H_{0j}} = 0,18 + 0,62 \left(\frac{S_j}{S_{0j}} \right) \quad (2.57)$$

Los valores de K_T obtenidos con estos modelos en diferentes lugares del mundo son muy parecidos, lo que hace pensar que las diferencias en los valores de los coeficientes a y b se deben a problemas de calibración y al tipo de instrumentos, así como al procedimiento utilizado para calcular en la regresión H_o y S_o .

2.2.2.14. Modelo de Liu-Jordan (Radiación difusa y directa)

La radiación difusa H_{dj} y la directa H_{bj} . Se pueden también estimar a partir de la radiación global. Nuevamente en estos casos es mejor medir cada componente, pero en ausencia de datos se pueden emplear los modelos de Liu-Jordan y de Collares-Pereira-Rabi.

- En el primer modelo, Liu-Jordan se tiene la ecuación (2.58).

$$\frac{H_{dj}}{H_{HTj}} = f(K_{Tj}) \quad (2.58)$$

- En el segundo modelo (Collares-Pereira-Rabi.), f es además función de W_s . La radiación directa H_b está dada por la ecuación (2.59).

$$H_{bj} = H_{HTj} = H_{dj} \quad (2.59)$$

- El modelo de Liu-Jordan establece la ecuación (2.60) para la radiación difusa.

$$\frac{H_{dj}}{H_{HTj}} = 1,390 - 4,027K_{Tj} + 5,531K_{Tj}^2 - 3,108K_{Tj}^3 \quad (0,8 < K_{Tj} < 0,75) \quad (2.60)$$

- En el modelo de Collares-Pereira-Rabi se tiene la ecuación (2.61), para la relación entre radiación difusa y radiación solar global.

$$\frac{H_{dj}}{H_{HTj}} = 0,775 + 0,00653(W_s - 90) - [0,505 + 0,00455(W_s - 90)]\cos(115K_{Tj} - 103) \quad (2.61)$$

2.2.2.15. Radiación solar en un plano inclinado

Los paneles o colectores solares usualmente se instalan con una inclinación respecto a la horizontal, que permite recibir una mayor cantidad de energía, así como reducir la reflexión y las pérdidas por el ángulo de incidencia de la radiación. Los datos sobre radiación solar están disponibles generalmente para superficies horizontales, se debe entonces modificar esta información para conocer la radiación sobre superficies inclinadas.

Una correlación para poder estimar la radiación global promedio diaria o mensual sobre una superficie inclinada, a partir de datos de radiación promedio diaria o mensual sobre una superficie en la correlación de Liu y Jordan, la cual considera que la radiación solar incidente sobre un plano inclinado H_β está compuesta por la radiación directa recibida del sol $H_{b,\beta}$, la radiación difusa proveniente del cielo $H_{d,\beta}$ y la radiación reflejada por el piso y las superficies vecinas $H_{r,\beta}$, por lo que radiación solar global sobre superficies inclinadas estaría dado por la ecuación (2.62):

$$H_\beta = H_{b,\beta} + H_{d,\beta} + H_{r,\beta} \quad (2.62)$$

Radiación directa sobre una superficie inclinada: El modelo más aceptado para la estimación de radiación directa sobre una superficie inclinada es el que se realiza en función de la posición geométrica del Sol y del colector y se basa en la hipótesis de proporcionalidad entre fracciones directas de radiación y extraterrestres.

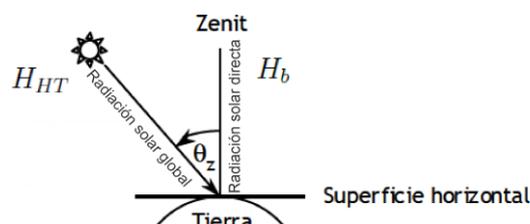


Figura 2.5: Relación geométrica para la radiación directa en superficie horizontal y la radiación global sobre una superficie horizontal.

De la figura 2.5 observamos que la radiación directa sobre una superficie horizontal es el coseno del ángulo cenital θ_z multiplicado por la radiación solar global promedio que llega a la superficie, esto es:

$$H_b = H_{HT} \cos(\theta_z) = H_{HT} [\sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(W_s)] \quad (2.63)$$

Debido a que el ángulo de incidencia del rayo solar es invariante para un instante dado, pues depende de la latitud, declinación solar y ángulo de la hora, en ese instante la única manera de aumentar la magnitud de la radiación incidente es levantar el plano en un ángulo, que se le denominará β , con respecto a la horizontal y en dirección al Ecuador (Norte). Al realizar esto lo que estamos haciendo es equivalente a desplazar la superficie hacia una latitud de menor ángulo, como se ve en la figura 2.6.

De similar forma que el anterior, de la figura 2.6 donde la superficie está inclinada se obtiene una relación (ecuación 2.64)

$$H_{b,\beta} = H_{HT} \cos(\theta_0) = H_{HT} [\sin(L - \beta) \sin(\delta) + \cos(L - \beta) \cos(\delta) \cos(W_s^j)] \quad (2.64)$$

Donde $W_s^j = \arccos[-\tan(\delta) \tan(L - \beta)]$ es el ángulo horario aparente de la salida del sol para una superficie inclinada en el hemisferio sur, orientado hacia el norte.

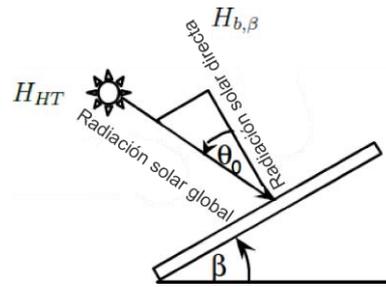


Figura 2.6: Relación geométrica para radiación directa en superficie inclinada.

Como se puede apreciar en la figura 2.7, la latitud aparente del plano inclinado es $(L - \beta)$, se puede decir a modo de ejemplo, que si la latitud L es 50° Sur y el plano se inclina 50° en dirección al Ecuador, es equivalente a que este plano se desplace al ecuador en posición horizontal, ya que $(L - \beta)$ sería cero.

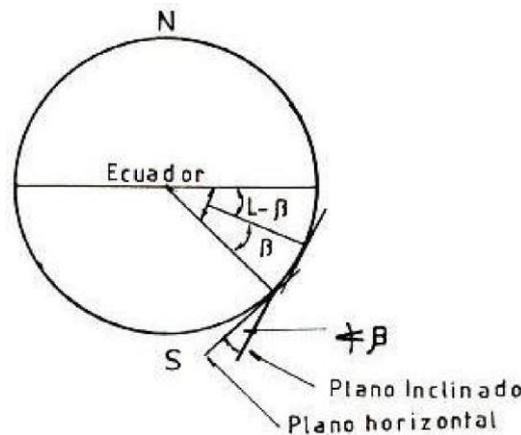


Figura 2.7: Desplazamiento del plano inclinado respecto al Ecuador.

Se observa en las figuras que 2.5 y 2.6, la radiación directa que cae en un plano aumenta cuando este se inclina hacia el ecuador (Norte), por lo tanto, **el factor modificación** de radiación directa en un plano horizontal a un plano inclinado es la que se presenta en la ecuación (2.65);

$$R_b = \frac{H_{b,\beta}}{H_b} = \frac{\cos(\theta_0)}{\cos(\theta_z)} = \frac{\text{sen}(L-\beta)\text{sen}(\delta) + \cos(L-\beta)\cos(\delta)\cos(W_s^l)}{\text{sen}(L)\text{sen}(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(W_s)} \quad (2.65)$$

En esta ecuación existen dos parámetros que son variables durante todo el año, como los son la declinación y el ángulo horario, y otro que es susceptible de variación como lo es el ángulo del plano, en el caso de este trabajo el ángulo del módulo fotovoltaico o colector. Cabe mencionar que para el caso del hemisferio

sur en el que se encuentra Juliaca, se deben considerar como negativos los ángulos de latitud (L) e inclinación (β), mientras que para el hemisferio norte se deben considerar como positivos.

Debido a que el mayor porcentaje de aporte de radiación directa normal a la superficie de radiación se presenta alrededor del mediodía solar, el factor de corrección se calcula para el ángulo de la hora nulo ($W_s = 0$). Es decir, el medio día solar es el momento en que el sol alcanza su máxima altitud con respecto al horizonte en su desplazamiento diario por Tierra, también se entiende como su paso por el meridiano del punto de medición.

El factor R_b es una función de la transmitancia de la atmósfera, menos en los equinoccios. Depende de la nubosidad atmosférica, la concentración de vapor y de la concentración de partículas. Liu - Jordan sugieren que R_b debe estimarse como la radiación extraterrestre en la superficie inclinada, entre la correspondiente a una superficie horizontal para el mes en cuestión. Por lo que R_b se calcula mediante la ecuación 2.66:

$$R_b = \frac{\cos(L-\beta)\cos(\delta)\text{sen}(W_s^l) + \frac{2\pi}{360}W_s^l\text{sen}(L-\beta)\text{sen}(\delta)}{\cos(L)\cos(\delta)\text{sen}(W_s) + \frac{2\pi}{360}W_s\text{sen}(L)\text{sen}(\delta)} \quad (2.66)$$

Donde, el valor de W_s^j para el hemisferio sur y orientado a norte, es (ecuación 2.67):

$$W_s^j = \text{mínimo} \{ W_s; \text{arc cos} [-\tan(\delta)\tan(L-\beta)] \} \quad (2.67)$$

Radiación difusa incidente sobre una superficie inclinada: Para el cálculo de la radiación difusa existen tres tipos generales de modelos: el circunsolar, el isotrópico y los anisotrópicos. El primero considera que la radiación difusa incidente procede exclusivamente del disco solar y de su aureola; los segundos parten de la asunción simplista de que la distribución de dicha radiación difusa es independiente del azimut y el ángulo cenital, teniendo la misma intensidad, la radiación que parte de cualquier punto del hemisferio celeste, mientras que los últimos la diferencian según

la posición en dicho hemisferio. Por todo ello, éstos últimos, por lo general, dan mejores resultados, debido a que tienen en cuenta la distribución de dicha radiación, que cada autor la realizan basándose en distintas hipótesis, siendo los errores cometidos, generalmente, inferiores al 5 %.

En el modelo isotrópico de Liu y Jordan, la radiación difusa no sólo varía en intensidad dependiendo del vapor de agua, las partículas, etc., sino que también varía en distribución angular con los cambios en las condiciones atmosféricas. Si se supone que la radiación procedente de la bóveda celeste es isotrópica, esto es, si se supone que es uniforme en todas las direcciones, entonces se puede decir que el cociente de la radiación difusa incidente sobre una superficie inclinada a un ángulo β , y la radiación difusa sobre la superficie horizontal es igual a la expresión 2.68.

$$R_d = \frac{H_{d,\beta}}{H_d} = \frac{1+\cos(\beta)}{2} \quad (2.68)$$

Dado que este cociente es independiente de la posición del sol en el firmamento, el factor de modificación disminuye al aumentar el ángulo de inclinación β .

Radiación reflejada incidente sobre una superficie inclinada: Similarmente dado que los diversos materiales que constituyen el suelo (pasto, concreto, arena, tierra, etc.) reflejan la radiación solar de una manera difusa, se considerará que el suelo localizado frente a la superficie inclinada es grande y tiene una reflectancia hemisférica uniforme (o albedo) ρ ante la radiación solar. Si la radiación global diaria promedio sobre una superficie horizontal es $H_{HT} = H_b + H_d$, el factor de conversión de esta radiación que intercepta la superficie inclinada está dada mediante la expresión (2.69)

$$R_r = \frac{H_{r,\beta}}{H_{HT}} = \rho \frac{1-\cos(\beta)}{2} \quad (2.69)$$

El albedo del suelo, el cual presenta una gran variabilidad, siendo función de la naturaleza del suelo. Cuando su valor no está disponible, se recomienda $\rho = 0,2$ para suelos comunes y $\rho = 0,7$ cuando se encuentran cubiertos de nieve. La tabla 2.4. muestra los valores de albedo para diferentes tipos de superficies (Santamaría y Castejón, 2010).

Tabla 2.4: Albedos para diferentes suelos.

TIPO DE SUELO	ALBEDO
Tierra negra seca	0.14
Tierra negra húmeda	0.08
Tierra gris seca	0.25 a 0.30
Tierra gris húmeda	0.10 a 0.12
Tierra arcillosa azulada seca	0.23
Tierra arcillosa azulada húmeda	0.16
Tierra de barbecho seca	0.08 a 0.12
Tierra de barbecho húmeda	0.05 a 0.07
Campo arado húmedo	0.14
Superficie desértica arcillosa	0.29 a 0.31
Arena amarillenta	0.35
Arena blanca	0.34 a 0.40
Arena gris	0.18 a 0.23
Arena de río	0.43
Arena ligera fina	0.37
Cultivo de trigo o centeno	0.10 a 0.25
Cultivo herbáceo	0.18 a 0.26
Algodonal	0.10 a 0.22
Arrozal	0.12
Cultivo de crucíferas	0.22
Cultivo de solanáceas	0.19
Vegetación boscosa	0.10 a 0.18

FUENTE: (Santamaría y Castejón, 2010)

Combinando las ecuaciones (2.65), (2.66), (2.68) y (2.69) en (2.62), tenemos la ecuación que nos permite hallar la radiación solar global sobre una superficie inclinada, ubicada en el hemisferio sur (Dios-Ortega y Errasti-Cabrera, 2013).

$$H_{\beta} = H_{HT} \left(1 - \frac{H_d}{H_{HT}}\right) R_b + H_d \left(\frac{1+\cos(\beta)}{2}\right) + H_{HT} \left(\frac{1-\cos(\beta)}{2}\right) \rho \quad (2.70)$$

Esta ecuación permite estimar la radiación solar global de forma teórica, como se sabe está basado el en modelo de Liu - Jordan. Mayormente la radiación solar global que se calculada se entiende como la irradiancia que es potencia por metro cuadrado o también puede ser mejor manejar este dato como energía por metro cuadrado que es la insolación diaria o mensual.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

El estudio ha sido realizado con datos proporcionados por la estación meteorológica del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrológica - Puno (SENAMHI-Puno, 2013) ubicada en la ciudad de Juliaca, latitud sur $15^{\circ} 28' 28''$, longitud oeste $70^{\circ} 10' 10''$, de los años 2013-2014, y la base de datos meteorológicos de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) (Stackhouse y Whitlock, 2008), recabando datos concernientes a la velocidad y dirección del viento medidos por el anemómetro CAM RC-400 y la radiación solar medido por el piranómetro de registro en superficie horizontal Kipp HYT-100. Con las cuales usando el software Excel 2013 en un ordenador, se determinaron las tendencias mensuales del promedio de la velocidad del viento durante todo el tiempo indicado, la dirección predominante del viento en el que se hace la rosa de viento para la zona, las velocidades extrapoladas a diferentes alturas del suelo (De Bortoli *et al.*, 2002a).

Posteriormente se realizó un análisis cualitativo utilizando herramientas matemáticas como la distribución de Weibull para el recurso eólico, con el que se determinan las densidades de potencias mensuales y anual a diferentes alturas (Lezcano Udrizar *et al.*, 2011).

De la misma forma el recurso solar se ha evaluado teniendo ambos bases de datos, los cuales se realiza las tendencias mensuales del promedio de la irradiancia solar y la insolación promedio para una superficie horizontal (Peralta Jaramillo, 2015), seguidamente se obtiene teóricamente la insolación para una superficie con inclinación utilizando el método de Liu y Jordan y los ángulos óptimos mensuales y totales para la insolación global (González Rodríguez, 2011).

3.2. Métodos

3.2.1. Método y tipo de investigación

En la ejecución del presente trabajo de investigación se utilizó el método científico debido a que se realizó un conjunto de procedimientos que permitió alcanzar un conocimiento científico. El tipo de investigación para el presente trabajo es valorado como aplicativo. Se le denomina también activa o dinámica que se encuentra íntimamente ligada a la anterior ya que depende de sus descubrimientos y aportes teóricos. Asimismo la investigación es de tipo no muestral por que se utilizarán todos los datos, por tanto no es necesario realizar muestreo.

3.2.2. Secuencia de desarrollo de la investigación

La secuencia del desarrollo de la investigación es el siguiente:

- Consultas previas con docentes conocedores acerca del tema de investigación.
- Recolección de la bibliografía y el análisis correspondiente a la bibliografía.
- Fundamentar y desarrollar teóricamente los principios fundamentales, de la energía eólica y la energía solar.
- Obtención de datos de velocidad del viento y dirección del viento horarios, presión atmosférica, y radiación solar horaria de la SENAMHI y la NASA .
- Tratamiento de datos para la caracterización de los recursos eólico y solar, es decir, se calculó velocidad del viento horario mensual y anual, promedio mensual de la velocidad del viento y rosa del viento anual; para el recurso solar, se calculó la irradiación solar horario y promedio, mensual y anual en una superficie inclinada
- Aplicación de los modelos de Weibull y Liu - Jordan para estimar la potencia explotable de la energía eólica y solar respectivamente.

- Estimación del ángulo de inclinación óptima para la radiación solar en la ciudad Juliaca utilizando el modelo de Liu - Jordan.
- Resultados y conclusiones.
- Redacción del informe final.

3.2.3. Variables de la investigación

Tabla 3.1: Variables y dimensiones de la investigación.

Variables	Dimensión
<p>Variable independiente</p> <ul style="list-style-type: none"> • Velocidad horaria y dirección del viento. • Radiación Solar Global horario en superficie Horizontal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad del viento a 10m sobre el suelo (m/s), con precisión de $\pm 3\%$. • Dirección del viento ($^{\circ}$), con precisión de $\pm 5\%$. • Irradiación solar horario (W/m^2), con precisión de $\pm 5\%$.
<p>Variable dependiente</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potencial eólico y sus características energéticas. • Potencial solar y sus características energéticas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial a diferentes alturas, rosa del viento, potencias mensuales. • Irradiancia e Insolación diaria y mensual en superficie plana e inclinada.

FUENTE: Elaboración propia.

3.3. Lugar de estudio

El lugar de estudio es la estación meteorológica del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrológica de Puno ubicada en la ciudad de Juliaca, latitud sur $15^{\circ} 28' 28''$, longitud oeste $70^{\circ} 10' 10''$. La ciudad de Juliaca es la capital de la provincia de San Román, ubicada en la jurisdicción de la región Puno, en el sureste de Perú. El distrito cuenta con la mayor población de la región de Puno, situada a 3826 m.s.n.m. en la meseta del Collao, al noroeste

del lago Titicaca. Es el mayor centro económico de la región Puno, y una de las mayores zonas comerciales del Perú. Se halla en las proximidades de la laguna de Chacas, del Lago Titicaca y del río Maravillas.

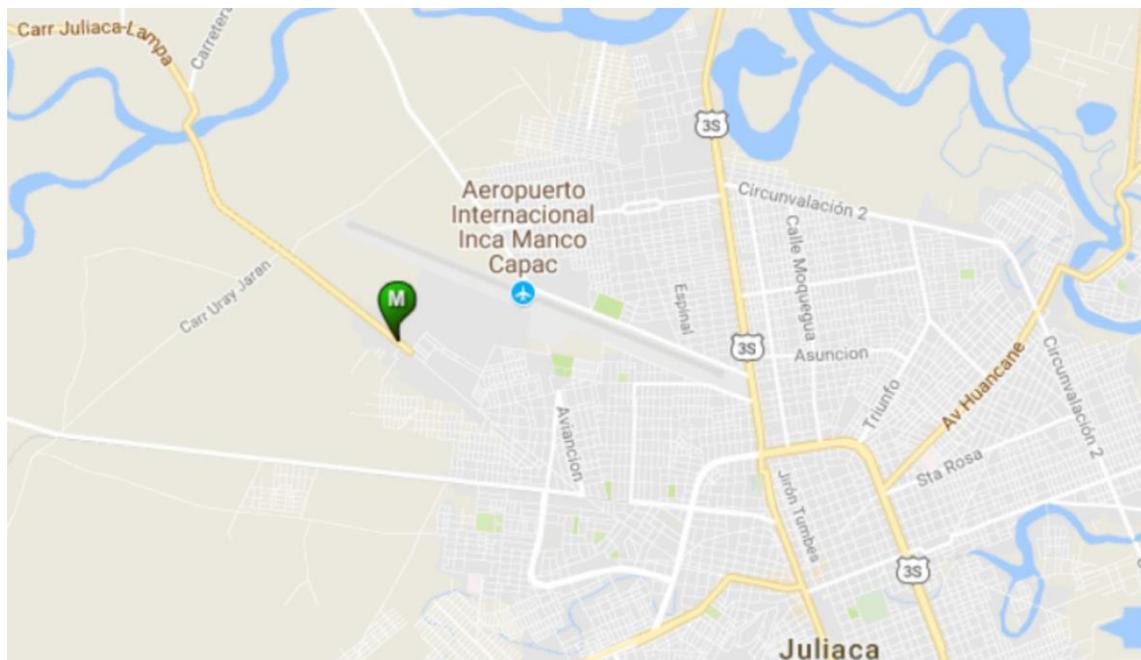


Figura 3.1: Vista de la ubicación de la estación meteorológica en la ciudad de Juliaca.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación cuantitativa y cualitativa de la energía eólica en el distrito de Juliaca

Para realizar proyectos basados en energías renovables eólicas, se realizó un estudio del potencial eólico en la zona de interés, en este caso el distrito de Juliaca, y para que este estudio de potencial en un área de interés sea un estudio válido, se logró obtener los datos recabados por la estación meteorológica del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrológica - Puno (SENAMHI-Puno) y la base de datos meteorológicos de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) (Stackhouse y Whitlock, 2008), concernientes a datos de la velocidad y dirección del viento medidos por el anemómetro CAM RC-400, información recogida para la caracterización del recurso eólico, debido a la relación cúbica que existe entre la velocidad del viento y la potencia desarrollada por un aerogenerador.

4.1.1. Análisis cuantitativo de la energía eólica

Para realizar el análisis del potencial eólico se utilizó las siguientes fuentes de información: Datos recogidos por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrológica (SENAMHI) de Puno, durante los años 2013, 2014, y La base de datos de la National Aeronautics an Space Administration (NASA) (Stackhouse y Whitlock, 2008).

Los datos del SENAMHI, consisten en un conjunto de datos recogidos por la estación meteorológica ubicada en Latitud sur 15° 26' 39.0" y Longitud oeste 70° 12' 28.2"; cada uno de los cuales representa la velocidad promedio del viento para cada hora, día y año a 10 metros de altura.

La NASA pone a disposición del mundo entero una base de datos de diversas variables climatológicas tales como velocidad de viento, radiación, temperatura, etc. creada especialmente para su utilización en estudios de factibilidad de proyectos

basados en energías renovables y fomentar la utilización de estas energías limpias. Esta base de datos está formada por valores promedio de 10 años para cada mes del año. En el caso de velocidad de viento, estos valores corresponden a promedios de velocidad en m/s a 50 metros de altura. Los datos se encuentran organizados en un sistema con áreas comprendidas de 1° de latitud por 1° de longitud para todo el mundo (Stackhouse y Whitlock, 2008). Esta información será de mucha utilidad para cuantificar tanto el recurso eólico como solar en sectores más alejados de los principales sectores poblados.

4.1.1.1. Cuantificación de los recursos eólico para la ciudad de Juliaca

En este trabajo se analizaron 8367 datos de un total de 8760 horas del año 2013 y 8353 datos de un total de 8760 en el año 2014, la diferencia advertida para un año se debe a que por situaciones ajenas no registró la estación meteorológica de la SENAMHI-Puno (SENAMHI-Puno, 2013). La información recopilada fue reordenada de tal forma de analizar las distintas tendencias mensuales a lo largo de los años que se muestran en las Tablas 4.1, 4.2 y Figuras 4.1, 4.2.

Tabla 4.1: Valores promedios mensuales de velocidades en m/s de la SENAMHI para Juliaca a 10 m de altura en el año 2013.

Hora - Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
1	1,63	1,45	1,24	1,53	0,94	0,76	1,26	1,03	1,19	1,13	1,87	1,91	1,33
2	1,63	1,41	1,39	1,19	0,93	1,12	0,89	1,22	1,27	1,06	1,65	1,88	1,30
3	1,73	1,46	1,46	1,08	0,71	0,96	0,92	1,14	0,99	1,29	1,06	1,47	1,19
4	1,48	1,16	1,06	1,16	1,02	0,81	0,94	1,24	0,83	1,45	1,20	1,21	1,13
5	1,92	1,35	1,46	1,44	0,93	0,86	1,06	1,30	0,86	0,97	1,28	1,34	1,23
6	1,13	1,12	0,95	1,24	0,92	0,89	0,92	1,04	1,10	1,30	0,75	1,44	1,07
7	0,87	0,93	1,19	1,13	1,29	1,06	0,69	0,88	0,72	1,05	0,97	1,33	1,01
8	1,10	1,13	1,40	0,79	0,98	0,54	0,68	0,71	0,73	0,82	1,34	1,24	0,95
9	1,20	1,08	0,97	0,93	0,84	0,83	1,14	0,96	1,24	1,46	1,96	2,13	1,23
10	1,61	1,66	1,36	1,57	1,23	1,15	1,43	1,60	1,92	2,27	2,25	2,68	1,73
11	2,03	2,02	1,93	1,83	2,35	1,82	2,05	2,25	2,56	2,97	2,65	2,94	2,28
12	2,27	2,36	2,50	2,12	2,73	1,90	2,81	2,83	3,15	3,27	2,85	3,10	2,66
13	2,87	2,73	2,55	2,27	2,83	2,00	3,81	2,90	3,36	3,48	3,50	3,76	3,01
14	4,12	3,13	2,69	2,82	3,41	2,30	3,64	3,00	3,53	4,05	4,38	4,24	3,44
15	4,22	3,55	4,05	3,05	3,67	2,65	4,16	3,52	4,13	3,73	4,72	4,72	3,85
16	5,20	4,69	5,19	4,43	4,14	2,64	5,16	4,50	4,66	4,77	6,13	5,43	4,75
17	4,75	4,83	4,95	4,58	4,38	3,50	5,23	5,53	5,96	5,54	5,92	4,63	4,98
18	4,03	4,13	3,97	4,13	3,02	3,34	4,13	4,11	4,20	3,98	5,28	4,70	4,09
19	3,50	3,82	3,42	3,22	2,97	2,34	3,44	3,16	3,51	3,76	3,64	3,49	3,36
20	2,83	3,60	2,89	3,21	2,65	1,92	2,89	2,52	3,03	3,77	3,69	3,47	3,04
21	3,04	3,01	2,16	2,76	2,16	1,78	2,49	2,46	2,56	3,54	2,82	3,01	2,65
22	2,23	2,73	2,19	2,40	1,63	1,55	2,03	1,62	1,89	2,46	2,47	2,98	2,18
23	2,33	1,98	1,54	1,81	1,19	1,01	1,47	1,59	1,52	1,88	2,60	2,25	1,76
24	2,23	2,10	1,31	1,55	1,10	1,07	1,41	1,45	1,57	1,47	2,00	1,58	1,57
Promedio	2,50	2,39	2,24	2,18	2,00	1,62	2,28	2,19	2,35	2,56	2,79	2,79	2,32
Maximo	5,20	4,83	5,19	4,58	4,38	3,50	5,23	5,53	5,96	5,54	6,13	5,43	4,98

FUENTE: Elaboración propia conforme al anexo.

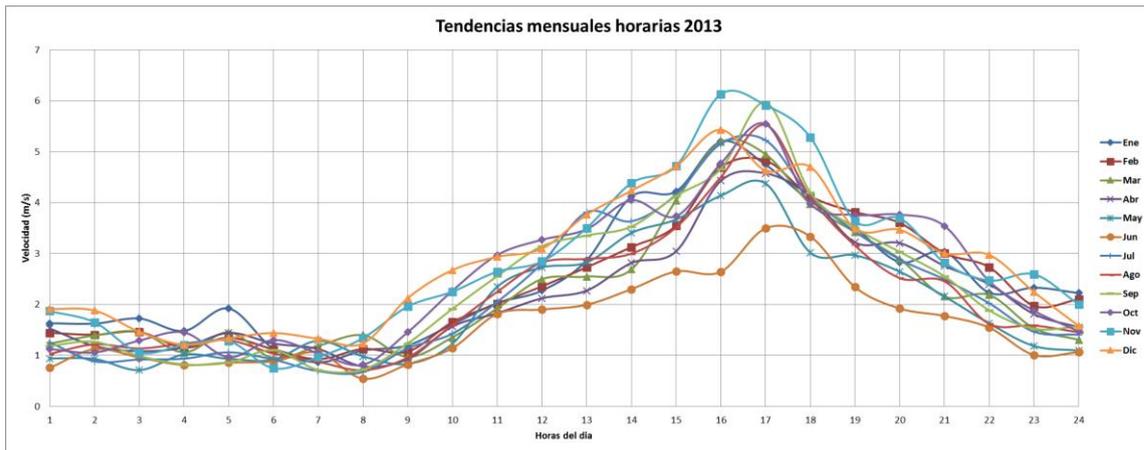


Figura 4.1: Tendencias mensuales horarias de la velocidad del viento para la ciudad de Juliaca a 10 m de altura del año 2013.

FUENTE: Elaboración propia conforme a Tabla 4.1.

Tabla 4.2: Valores promedios mensuales de velocidades en m/s de la SENAMHI para Juliaca a 10 m de altura en el año 2014.

Hora - Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
1	1,33	1,75	1,54	1,83	0,64	1,06	0,96	1,33	1,49	1,43	1,57	1,61	1,36
2	1,43	1,61	1,59	1,39	0,73	1,32	0,69	1,42	1,47	1,26	1,45	1,68	1,31
3	1,43	1,76	1,76	1,38	0,41	1,26	0,62	1,44	1,29	1,59	0,90	1,77	1,26
4	0,98	1,66	1,56	1,66	0,52	1,31	0,44	1,74	1,33	1,95	0,89	1,60	1,28
5	1,32	1,95	2,06	2,04	0,33	1,46	0,46	1,90	1,46	1,57	0,92	1,54	1,41
6	0,93	1,32	1,15	1,44	0,72	1,09	0,72	1,24	1,30	1,50	0,78	1,45	1,11
7	0,57	1,23	1,49	1,43	0,99	1,36	0,39	1,18	1,02	1,35	0,67	1,03	1,06
8	1,00	1,23	1,50	0,89	0,88	0,64	0,58	0,81	0,83	0,92	1,24	1,14	0,96
9	1,00	1,28	1,17	1,13	0,64	1,03	0,94	1,16	1,44	1,66	1,76	1,93	1,20
10	1,41	1,86	1,56	1,77	1,03	1,35	1,23	1,80	2,12	2,47	2,05	2,48	1,70
11	1,73	2,32	2,23	2,13	2,05	2,12	1,75	2,55	2,86	3,27	2,35	2,64	2,30
12	1,87	2,76	2,90	2,52	2,33	2,30	2,41	3,23	3,55	3,67	2,45	2,70	2,73
13	2,67	2,93	2,75	2,47	2,63	2,20	3,61	3,10	3,56	3,68	3,30	3,56	2,99
14	3,72	3,53	3,09	3,22	3,01	2,70	3,24	3,40	3,93	4,45	3,98	3,84	3,48
15	3,92	3,85	4,35	3,35	3,37	2,95	3,86	3,82	4,43	4,03	4,42	4,42	3,85
16	5,00	4,89	5,39	4,63	3,94	2,84	4,96	4,70	4,86	4,97	5,93	5,23	4,74
17	4,15	5,43	5,55	5,18	3,78	4,10	4,63	6,13	6,56	6,14	5,32	4,03	5,18
18	3,33	4,83	4,67	4,83	2,32	4,04	3,43	4,81	4,90	4,68	4,58	4,00	4,22
19	3,00	4,32	3,92	3,72	2,47	2,84	2,94	3,66	4,01	4,26	3,14	2,99	3,48
20	2,33	4,10	3,39	3,71	2,15	2,42	2,39	3,02	3,53	4,27	3,19	2,97	3,14
21	2,64	3,41	2,56	3,16	1,76	2,18	2,09	2,86	2,96	3,94	2,42	2,61	2,72
22	1,63	3,33	2,79	3,00	1,03	2,15	1,43	2,22	2,49	3,06	1,87	2,38	2,27
23	1,93	2,38	1,94	2,21	0,79	1,41	1,07	1,99	1,92	2,28	2,20	1,85	1,83
24	1,93	2,40	1,61	1,85	0,80	1,37	1,11	1,75	1,87	1,77	1,70	1,28	1,65
Promedio	2,14	2,75	2,60	2,54	1,64	1,98	1,91	2,55	2,72	2,92	2,46	2,53	2,40
Maximo	5,00	5,43	5,55	5,18	3,94	4,10	4,96	6,13	6,56	6,14	5,93	5,23	5,18

FUENTE: Elaboración propia. Conforme al anexo

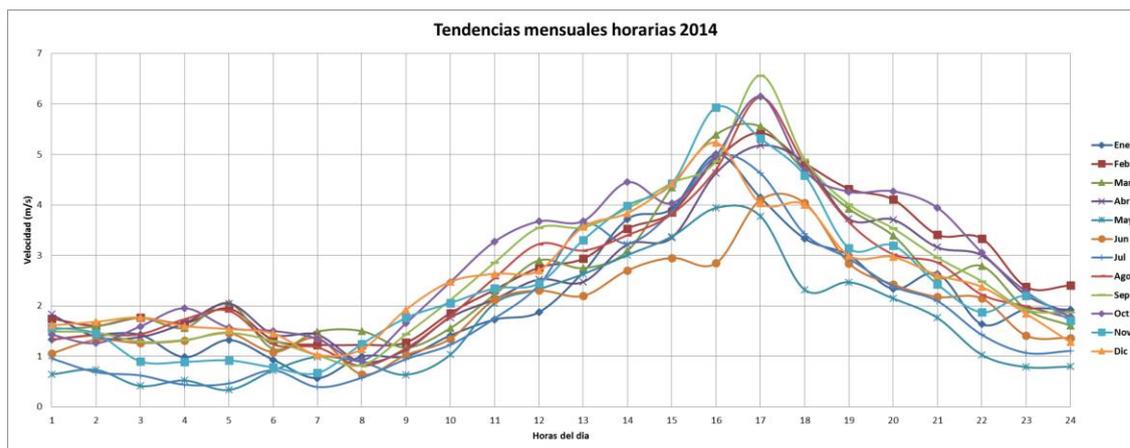


Figura 4.2: Tendencias mensuales horarias de la velocidad del viento para la ciudad de Juliaca a 10 m de altura del año 2014.

FUENTE: Elaboración propia conforme a Tabla 4.2.

De las Figuras. 4.1 y 4.2 queda de manifiesto la aleatoriedad del recurso del viento, pero se observa que los meses al que corresponden a las mayores velocidades a lo largo del año son los meses de NOVIEMBRE y DICIEMBRE para el 2013 y FEBRERO y OCTUBRE para el año 2014, siendo los meses más ventosos del año, y viendo a simple vista el mes con menos viento es el mes de Junio para ambos años.

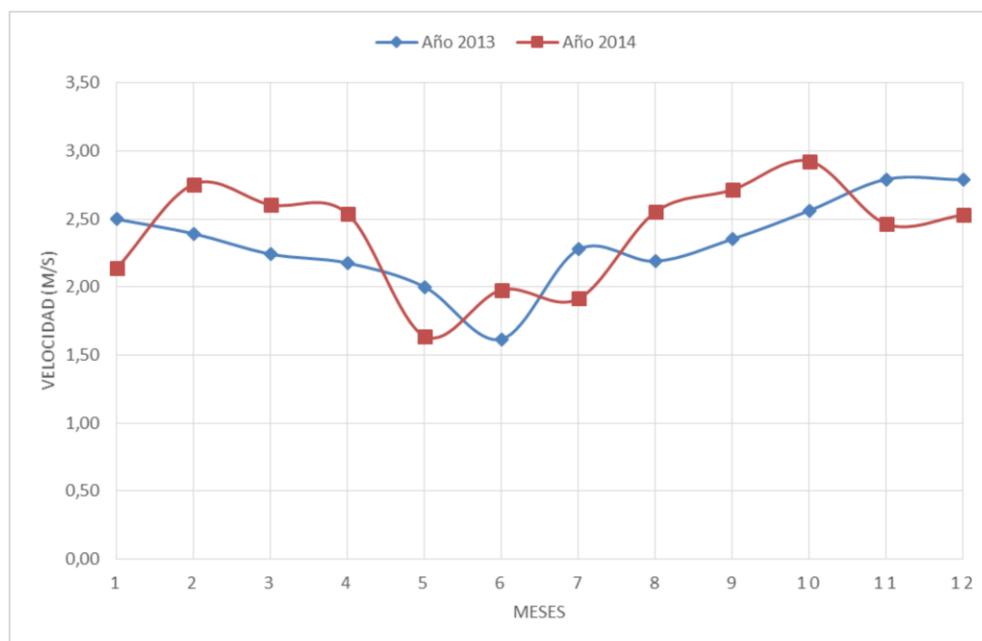


Figura 4.3: Tendencias mensuales horarias de la velocidad del viento para la ciudad de Juliaca a 10 m de altura.

De la Figura. 4.3 se puede observar que, los meses que presentan un mayor potencial eólico son los meses Agosto Setiembre, octubre, NOVIEMBRE, DICIEMBRE, ENERO Y FEBRERO. La mayoría de estos meses superan los 2,5 m/s de promedio mensual.

Por otra parte, la época del año que presenta los promedios más bajos de velocidad corresponde a los meses de Otoño e Invierno, entre Marzo y Julio, obteniéndose promedios mensuales incluso los 1,62 m/s para el mes de Junio del año 2013.

Las horas a las que ocurren las velocidades máximas y mínimas también presentan alguna tendencia (Torres *et al.*, 2014), los valores máximos de velocidad se presentan en promedio por lo general pasando el medio día entre las 14:00 y las 18:00 horas. El caso de la hora para la velocidad mínima es un poco distinto, donde no existe una tendencia tan clara, varía entre las 3:00 horas y las 8:00 horas en promedio para ambos años. Podemos confirmar esto viendo la Figura 4.4.

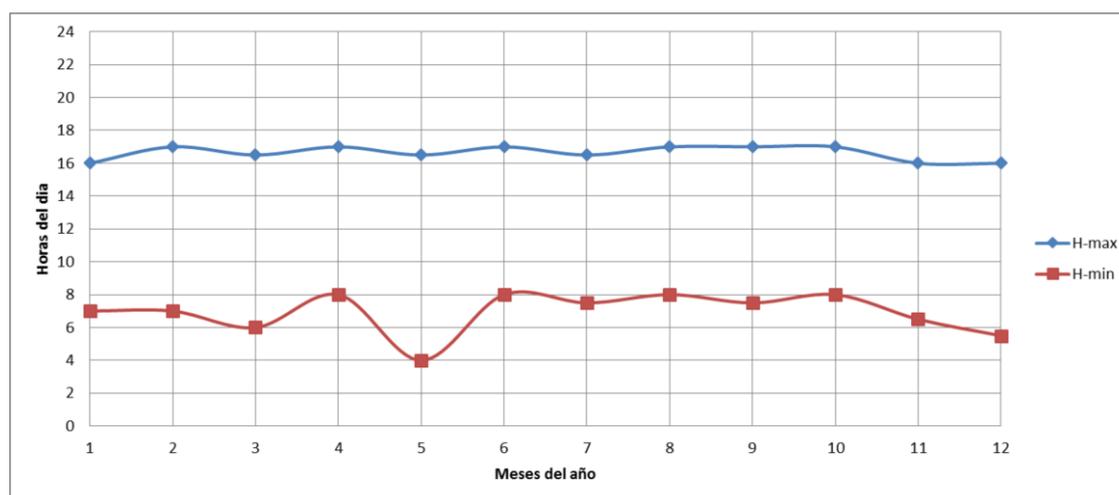


Figura 4.4: Horas en las que ocurren las velocidades máximas y mínimas para cada mes de ambos años.

En la Figura. 4.5 se puede ver que los meses de mayor potencial eólico (mayor promedio de velocidad) son además los meses que presentan el mayor grado de variabilidad, es decir, presentan un rango más amplio de velocidades, por ejemplo en Noviembre las velocidades varían entre los 0,75 m/s y los 6,13 m/s, es decir un rango de 5 m/s, mientras que Junio presenta velocidades entre los 0,54 m/s y 3,50 m/s, un rango cercano a 2 m/s para el año 2013 mientras que para el año 2014 es mucho mayor la variación.

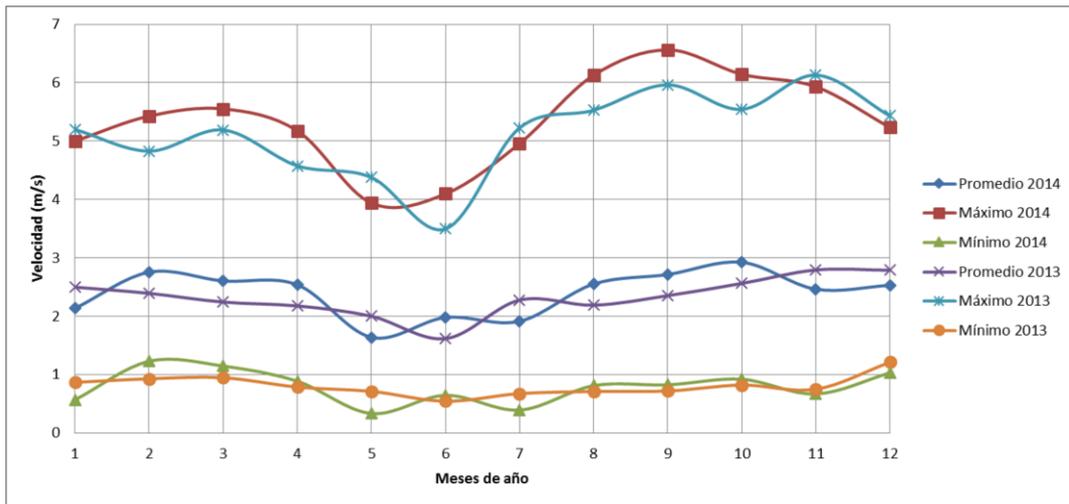


Figura 4.5: Rango de variación mensual de la velocidad para cada año.

FUENTE: Elaboración propia.

4.1.1.2. Análisis de la dirección del viento

Para determinar la energía que pueda generar un aerogenerador, no basta con conocer la energía que tiene el viento únicamente, sino que también es importante conocer la dirección predominante del viento, esto es si la variabilidad en la dirección es muy grande, habrá muchos momentos en los que la turbina estará girando para posicionarse de frente al viento, para esto se hace la rosa de viento (Rivero, 2007).

Para realizar este análisis se evalúa una serie de dirección de viento promedio obtenido por el SENAMHI durante el año 2013 y 2014. Se aprecia en la Figura 4.6 que la dirección predominante del viento es el Oeste, un porcentaje considerable también es el Este.

4.1.2. Validación de los resultados

Como se sabe, en general la información de la que se dispone en cuanto a recurso eólico, de la estación meteorológicas ubicadas físicamente en el Distrito de Juliaca, son por lo general buenos resultados. Sin embargo, en el presente trabajo se ha utilizado una base de datos proveniente de la NASA para cuantificar el recurso eólico. El objetivo de este apartado es comparar las distintas fuentes de información de las cuales se dispone y

ver si existe o no alguna similitud. Es decir, saber qué tan representativa es la base de datos de la NASA.

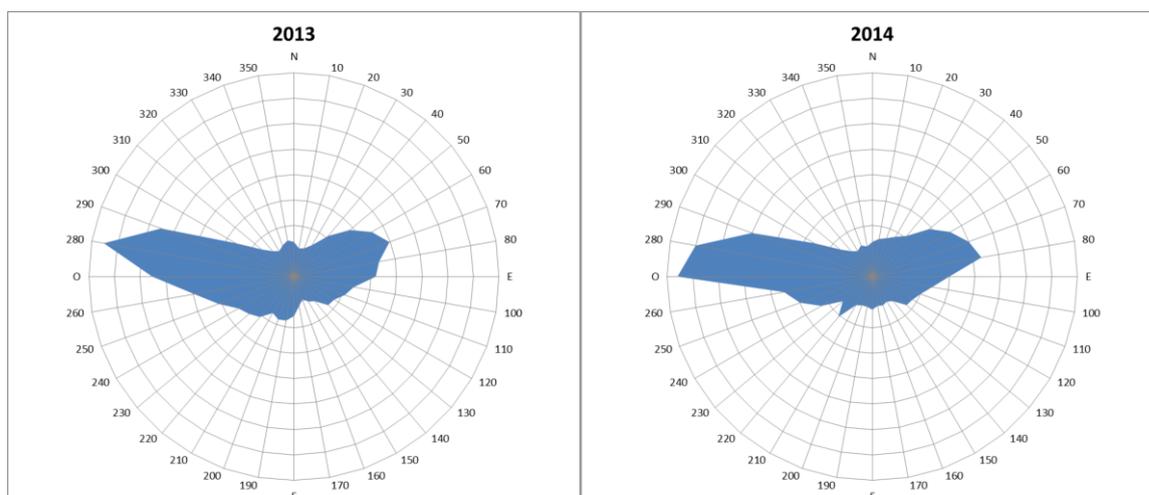


Figura 4.6: Rosa de vientos anual para Juliaca.

FUENTE: Elaboración propia.

Para comparar los resultados de la SENAMHI que son velocidades a 10 metros de suelo, se tiene que extrapolar (De Bortoli *et al.*, 2002b) desde 10 a 25 metros, ya que las velocidades obtenidas de la NASA están a 25 metros del suelo, esto con el fin de que el estudio sea para aerogeneradores de pequeña potencia. La ecuación que es más confiable para extrapolar velocidades es la ecuación (4.1):

$$v = v_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^\alpha \quad (4.1)$$

Donde: h es la altura a la cual se desea conocer la velocidad v , y v_o es la velocidad conocida a una altura de referencia h_o también conocida. El exponente α llamado coeficiente de rugosidad, varía con la altura, hora del día, estación del año, naturaleza de terreno, velocidad del viento y temperatura. Para Juliaca se va a utilizar un coeficiente de rugosidad $\alpha = 0, 2$ (para zonas rurales, sector rural, barrios) (Stackhouse y Whitlock, 2008).

Por tanto, para comparar los datos de la NASA con la del SENAMHI, se procedió a extrapolar la velocidad promedio de cada año a 25 m y luego tomamos el promedio de estas para comparar, logrando obtener los datos que se muestran en la Tabla, 4.3.

Tabla 4.3: Promedio mensual de velocidades en m/s de la SENAMHI para Juliaca a 25 m en los años 2013 y 2014 y sus promedios.

MES	2013	2014	PROMEDIO
Ene	3,00	2,57	2,78
Feb	2,87	3,31	3,09
Mar	2,69	3,13	2,91
Abr	2,61	3,05	2,83
May	2,40	1,97	2,19
Jun	1,94	2,38	2,16
Jul	2,73	2,30	2,52
Ago	2,63	3,07	2,85
Sep	2,83	3,26	3,04
Oct	3,08	3,51	3,29
Nov	3,35	2,96	3,16
Dic	3,35	3,04	3,19
PROMEDIO	2,79	2,88	2,83

FUENTE: Elaboración propia.

Al realizar la comparación los resultados del SENAMHI con la base de datos de la NASA se aprecia que la diferencia no es tan notoria llegando a un promedio de 8,9 %, siendo los meses de enero a abril y Octubre a diciembre los que presentan menos diferencia, menores a 10 %, asimismo el que presenta mayor diferencia es el mes de junio llegando al 57 % de diferencia, tal como se muestra en la Tabla 4.4 y Figura 4.7.

Tabla 4.4: Comparación de la velocidad del viento promedio entre resultados de la SENAMHI Y NASA para Latitud 15,44°S y Longitud 70,21°O, valores en m/s a 25 m de altura.

MES	SENAMHI	NASA	DIF	DIF(%)
Ene	2,78	2,76	0,02	0,82
Feb	3,09	2,82	0,27	8,77
Mar	2,91	2,71	0,20	6,89
Abr	2,83	2,82	0,01	0,41
May	2,19	3,09	0,90	41,41
Jun	2,16	3,41	1,25	57,92
Jul	2,52	3,61	1,09	43,48
Ago	2,85	3,38	0,53	18,70
Sep	3,04	3,38	0,34	11,06
Oct	3,29	3,15	0,14	4,39
Nov	3,16	3,02	0,14	4,30
Dic	3,19	2,90	0,29	9,19
PROMEDIO	2,83	3,09	0,25	8,93

FUENTE: Elaboración propia.

Finalmente, respecto a la diferencia entre las velocidades de la NASA y del SENAM- HI, se debe tener en cuenta en primer lugar que los resultados de la SENAMHI se elaboraron en base a información de una estación meteorológica existente en un lugar físico específico, mientras que la información proveniente de la NASA corresponde a un valor representativo para una extensa zona de territorio obtenido de un promedio de 10 años de mediciones.

En este caso al decir Juliaca, en realidad esto se refiere a una extensa zona de territorio que abarca desde los alrededores de la ciudad de Lampa, hasta la ciudad de Puno. Además de este factor, pueden existir otros que pueden ir desde una ubicación inadecuada de la estación meteorológica, hasta una mala estimación del coeficiente de rugosidad α . Uno de los factores más críticos es la existencia de un microclima para la ciudad debido a la cercanía de cerros con alturas que pueden superar los 700 metros que hace que la velocidad promedio cercana a los cerros disminuyan.

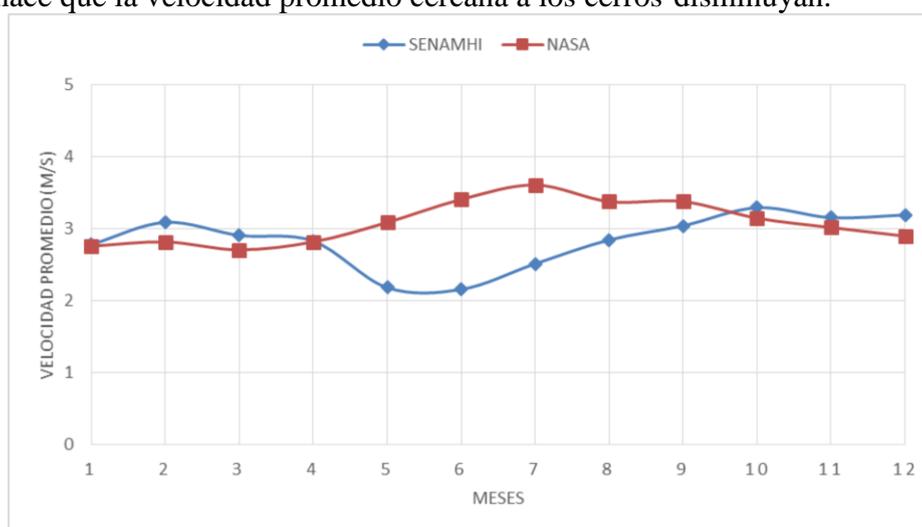


Figura 4.7: Gráfico comparativo entre resultados de la SENAMHI Y NASA para Latitud 15,44°S y Longitud 70,21°O, valores en m/s a 25 m de altura.

FUENTE: Elaboración propia conforme a Tabla 4.4.

4.1.3. Análisis cualitativo de la energía eólica

El análisis del potencial eólico está basado en el concepto de densidad de potencia y la función de probabilidad de Weibull. La fuente de información considerada es los resultados de la SENAMHI para una altura de 25 m de la superficie de suelo.

4.1.3.1. Función de densidad de probabilidad de Weibull

La función de densidad de probabilidad de Weibull nos permite describir el potencial probable del recurso eólico en base a velocidad promedios horarios del viento (Rico y Serrano, 2013). La expresión dada por Weibull para velocidad del viento v esta dado por la ecuación(4.2)

$$f(v) = \frac{\kappa}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{\kappa-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^\kappa}, \quad \kappa > 0, v > 0, c > 1 \quad (4.2)$$

Esta es una distribución de dos parámetros donde c es el parámetro de escala y k es el factor de forma.

Se utiliza el método de los momentos para determinar los parámetros c y k , que presenta mayor efectividad en determinar estos parámetros de la distribución de Weibull. La ecuación (ecuación (4.3)) para encontrar el valor de k es:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1,086} \quad 1 \leq k \leq 10 \quad (4.3)$$

donde σ es la desviación estándar y \bar{v} es la velocidad media.

Una vez calculado k se puede hallar el valor de c , según la ecuación (4.4):

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (4.4)$$

donde Γ es la función gamma dado por:

$$\Gamma(y) = \int_0^\infty e^{-x} x^{y-1} dx \quad \text{con } y \geq 0 \quad (4.5)$$

Esta importante información fue calculada con los datos de la velocidad media horaria. En la Figura 4.8 se muestra la función de probabilidad de Weibull ajustado con los parámetros de forma: $k = 2,31$ y de escala $c = 3,19$ m/s; utilizando la velocidad media anual igual a 2,83 m/s que corresponde a la velocidad media para los años 2013 y 2014.

La forma muy estrecha de esta función de distribución de probabilidad que se aprecia en la Figura 4.8, significa que hay una regular variación de velocidades con una alta probabilidad de que ocurran velocidades bajas; en otras palabras, la campana de la figura tiene la parte más alta para una velocidad promedio de 2,5 m/s aproximadamente, esto indica que existe la mayor probabilidad que exista viento pero a bajas velocidades, lo cual no es favorable para aprovechar este recurso, pues un aerogenerador para producir su

potencia nominal requiere una velocidad mayor que 3 m/s.

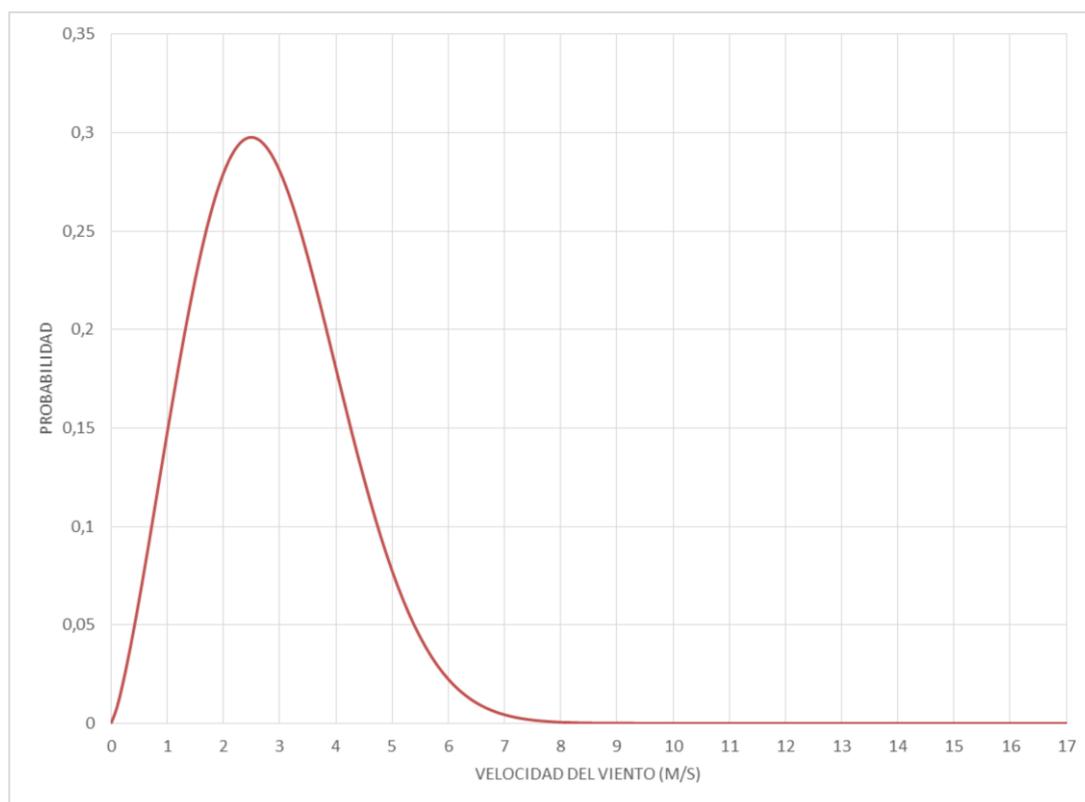


Figura 4.8: Función de probabilidad de Weibull anual a 25 m.

4.1.3.2. Potencial eólico

Una vez que ya se han obtenido los parámetros de Weibull, se puede estimar la densidad de potencia (Potencia media \bar{P} por el área de barrido A) mensual mediante la ecuación (4.6):

$$\text{Densidad de potencia} = P_w = \frac{\bar{P}}{A} = \frac{\rho \bar{v}^3 \Gamma(1+3/k)}{2[\Gamma(1+1/k)]^3} \quad (4.6)$$

ρ es la densidad media del aire en el lugar que disminuye con la altura la temperatura y la presión. Para nuestros cálculos se considera que la densidad varía únicamente con la altura del lugar según la ecuación (4.7):

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{Bh}{T_0}\right)^{\frac{g}{RB}} \left(\frac{T_0}{T_0 - Bh}\right) \quad (4.7)$$

Donde: ρ_0 es la densidad del aire en condición estándar (1,225 kg/m³), T_0 es la temperatura estándar (288,16 °K), h es la altura (en m) donde se quiere calcular la densidad, g es la aceleración de la gravedad (9,8 m/s²), R constante específica del aire (287 J/kg°K) y

$$B = 0,0065 \text{ } ^\circ\text{K/m.}$$

Si sustituimos para Juliaca $h = 3826$ m en la ecuación (4.7) la densidad media es: $\rho = 0,832 \text{ kg/m}^3$.

Haciendo uso de la ecuación (4.6) la densidad de potencia mensual a una altura de 25 m, se aprecia en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Velocidad media y densidad de potencia mensual a 25 m de altura.

Mes	\bar{v} (m/s)	P_w (W/m ³)
Ene	2,78	15,01
Feb	3,09	20,63
Mar	2,91	17,23
Abr	2,83	15,86
May	2,19	7,29
Jun	2,16	7,03
Jul	2,52	11,13
Ago	2,85	16,13
Sep	3,04	19,69
Oct	3,29	24,99
Nov	3,16	21,96
Dic	3,19	22,75
Prom	2,83	15,91
TOTAL		199,69

FUENTE: Elaboración propia.

El análisis realizado indica que los meses de febrero y de setiembre hasta diciembre presentan niveles de densidad superiores a 20 W/m^2 , siendo estas las mejores épocas del año, en el mes de mayo y junio presenciamos las más bajas del año con un densidad de potencia mínima en el mes de junio de $7,03 \text{ W/m}^2$.

4.1.3.3. Variación con la altura

Una de las importancias de este estudio también es determinar la variación tanto de la velocidad del viento como de la potencia con la altura, ya que si se quiere instalar un aerogenerador las variables de su potencia desarrollada vienen determinadas por la velocidad de viento reinante y la altura de la torre del aerogenerador, o altura del eje del rotor. Dependiendo de las necesidades de la carga a la cual se desee suministrar electricidad, se harán necesarios aerogeneradores de mayor o menor potencia nominal o bien situar este a una altura específica. Hoy en día podemos tener torres de entre 20 y 80 metros de altura e incluso más, para aerogeneradores pequeños, lo normal es encontrar

torres de poco más de 20 metros hasta 40 metros, mientras que para aerogeneradores de gran potencia las alturas son por sobre los 50 m.

La Tabla 4.6 muestra cómo varían tanto la velocidad media anual como la densidad de potencia media en función de la altura para la ciudad de Juliaca alrededor de las coordenadas indicadas, considerando los resultados trabajados con los datos de la SENAMHI.

Tabla 4.6: variación con la altura de la velocidad y la densidad de potencia.

ALTURA(m)	\bar{v} (m/s)	k	c	P_w (W/m ³)	P_w (W/m ³) Total anual
10	2,36	1,89	2,66	11,06	132,73
15	2,56	2,07	2,89	12,90	154,79
20	2,71	2,20	3,06	14,48	173,74
25	2,83	2,31	3,20	15,89	190,67
30	2,94	2,40	3,32	17,18	206,13
35	3,03	2,48	3,42	18,37	220,49
40	3,11	2,56	3,51	19,50	233,96
45	3,19	2,62	3,59	20,56	246,70
50	3,26	2,68	3,66	21,57	258,82
55	3,32	2,74	3,73	22,53	270,42
60	3,38	2,79	3,79	23,46	281,56
65	3,43	2,84	3,85	24,36	292,30
70	3,48	2,89	3,91	25,22	302,68
75	3,53	2,93	3,96	26,06	312,74
80	3,58	2,97	4,01	26,88	322,50

FUENTE: Elaboración propia.

En la Tabla 4.6 se observa que un aumento de 10 a 80 metros traería como consecuencia un aumento en la densidad de potencia media de poco más de un 230 % teniendo como referencia los 11,06 W/m² disponibles a 10 metros es decir aumenta abruptamente. Sin embargo, por tratarse de un sector urbano, difícilmente podríamos contar con una torre de dicho tamaño para la instalación de un aerogenerador. Para aerogeneradores por debajo de 10 KW de potencia, se podrían considerar torres de entre 30 y 50 metros, en cuyo caso la densidad de potencia media disponible aumenta entre un 60 % a casi un 100 % respectivamente, de hecho, se aprecia que la densidad de potencia media se duplica aproximadamente a los 50 metros.

4.2. Evaluación cuantitativa y cualitativa de la energía solar en el distrito de Juliaca

4.2.1. Cuantificación del recurso solar para la ciudad de Juliaca

Se procede a cuantificar de forma similar que se hizo para el recurso eólico. La base de datos que se empleará para este análisis son los datos registrados por la estación meteorológica de la SENAMHI-Puno, durante los años 2013 y 2014, y la base de datos de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) como se indicó en los apartados anteriores. La ubicación geográfica que utilizaremos es el análisis de datos es la ubicación de la estación meteorológica, es decir, Latitud sur 15° 26' 39.0" y Longitud oeste 70° 12' 28.2".

A continuación, en las tablas 4.7 y 4.8 se muestra la irradiancia solar global promedio horaria sobre la superficie horizontal en W/m².

Tabla 4.7: Valores promedios de irradiancia solar global horaria en W/m² para la ciudad de Juliaca en el año 2013.

Hora/Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	11,65	4,36	2,61	1,53	0,32	0,00	0,00	0,35	13,27	36,31	46,15	25,42	11,83
7	120,23	111,46	108,84	98,97	85,19	27,43	48,39	89,03	192,03	229,55	299,35	169,71	131,68
8	313,39	322,04	358,39	326,10	122,94	49,43	71,23	330,48	462,30	490,62	534,08	356,74	311,48
9	510,71	568,82	601,65	568,60	324,10	58,47	153,03	543,61	676,47	694,79	712,19	576,84	499,11
10	693,03	781,04	768,13	763,23	698,87	635,70	576,13	723,77	888,43	868,72	883,62	780,35	755,09
11	813,32	939,86	867,52	860,13	813,55	782,97	783,35	848,03	1026,77	978,45	1026,38	820,77	880,09
12	935,90	1044,54	923,94	877,53	825,00	838,17	827,97	872,90	1080,07	958,00	1013,96	898,26	924,69
13	850,55	920,61	822,48	807,37	762,10	790,03	764,68	769,90	973,43	894,72	967,69	849,84	847,78
14	811,84	938,75	686,71	699,10	665,29	653,60	651,74	678,77	832,80	732,14	879,54	728,61	746,57
15	659,26	719,68	587,84	550,33	547,06	548,20	565,29	553,45	651,63	552,90	693,96	598,29	602,32
16	408,97	486,07	352,65	318,93	329,42	338,97	324,42	350,26	401,20	368,07	435,77	326,87	370,13
17	221,06	250,43	153,65	121,30	125,00	120,20	135,58	157,77	176,37	148,41	207,00	148,65	163,78
18	58,00	59,79	26,94	8,53	3,77	3,73	9,03	13,42	20,17	19,86	37,00	36,48	24,73
19	1,61	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,45	0,23
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Promedio	267,06	297,83	260,89	250,07	220,94	201,95	204,62	247,16	308,12	290,52	322,36	263,22	261,23
Maximo	935,90	1044,54	923,94	877,53	825,00	838,17	827,97	872,90	1080,07	978,45	1026,38	898,26	927,43

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.8: Valores promedios de irradiancia solar global horaria en W/m^2 para la ciudad de Juliaca en el año 2014.

Hora/Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	15,72	6,22	2,42	1,42	0,35	0,00	0,00	1,02	12,65	42,34	40,56	35,18	13,16
7	118,45	110,20	102,49	93,39	87,27	36,42	50,50	120,46	178,62	248,44	287,99	215,56	137,48
8	332,12	320,56	342,18	298,17	126,36	91,56	145,28	373,55	447,36	508,75	522,13	462,44	330,87
9	543,89	557,43	586,51	512,43	368,20	290,10	320,15	590,68	651,24	710,84	671,30	602,62	533,78
10	640,22	773,28	783,42	784,25	695,21	621,19	652,46	806,17	842,35	865,37	879,55	824,71	764,02
11	798,54	892,29	869,45	843,19	818,64	788,34	792,60	881,51	975,40	982,79	1012,40	1002,45	888,13
12	990,12	981,61	901,34	865,41	834,29	809,85	831,50	924,32	982,33	960,64	998,57	974,26	921,19
13	910,67	910,12	838,12	793,62	780,43	782,10	760,23	811,10	854,41	860,30	883,44	879,37	838,66
14	843,45	820,24	673,29	702,38	683,15	661,45	654,28	685,20	700,12	735,67	801,25	812,20	731,06
15	651,12	685,34	571,22	552,82	550,45	551,12	552,48	565,18	551,58	560,45	632,00	593,41	584,76
16	320,55	423,19	361,38	331,52	334,20	337,28	538,69	422,52	395,16	354,17	415,52	375,11	384,11
17	201,78	172,58	142,11	135,14	126,18	122,34	133,56	149,56	152,40	152,18	203,23	169,42	155,04
18	43,32	41,28	19,15	7,68	5,75	4,65	8,84	14,30	19,98	28,61	35,67	38,60	22,32
19	0,72	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,51	0,16
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Promedio	267,11	278,95	258,05	246,73	225,44	212,35	226,69	264,40	281,82	292,11	307,66	291,08	262,70
Maximo	990,12	981,61	901,34	865,41	834,29	809,85	831,50	924,32	982,33	982,79	1012,40	1002,45	926,53

FUENTE: Elaboración propia.

En las tablas (4.7 y 4.7) y Figuras (4.9 y 4.10) se puede observar que los meses de Primavera-Verano presenta la mayor irradiancia incidente alcanzándose en el mes de Noviembre un irradiancia promedio de $322,36 W/m^2$ en cada hora para el año 2013 y para el 2014 una irradiancia promedio de $307,66 W/m^2$, al igual que en el caso eólico, es decir el periodo comprendido entre los meses de Septiembre a Febrero. Asimismo en los meses de Otoño-Invierno, el período de Marzo a Agosto disminuye la irradiancia promedio alcanzándose los mínimos en el mes de junio de $201,95 W/m^2$ el año 2013 y $212,35 W/m^2$ en el año 2014.

En las tendencias horarias mensuales de irradiancia como se aprecia en las Figuras 4.9 y 4.10, un aspecto interesante es la **forma de campana** que presentan los datos ordenados en forma horaria en donde se tiene al medio día los valores máximos de la radiación. Mas claramente, se puede decir que el máximo valor para el recurso solar, para cualquier época del año se encuentra al mediodía entre las 11:00 y 12:00 (figura 4.11), un dato interesante a considerar para cualquier proyecto basado en esta tecnología. El caso de la hora para la irradiancia solar mínima (mínimas registrados distintos de cero) para cada mes es distinto, pero la mayor parte del año ésta se presenta en horas

comprendidas, entre las 18:30 y las 05:30 horas, podemos confirmar esto viendo la figura 4.9 y 4.10. Profundizando un poco más en este tema, vemos que lo más común es encontrar el peak (González Rodríguez, 2011) de irradiancia solar entre las 11:00 y las 12:00 horas.

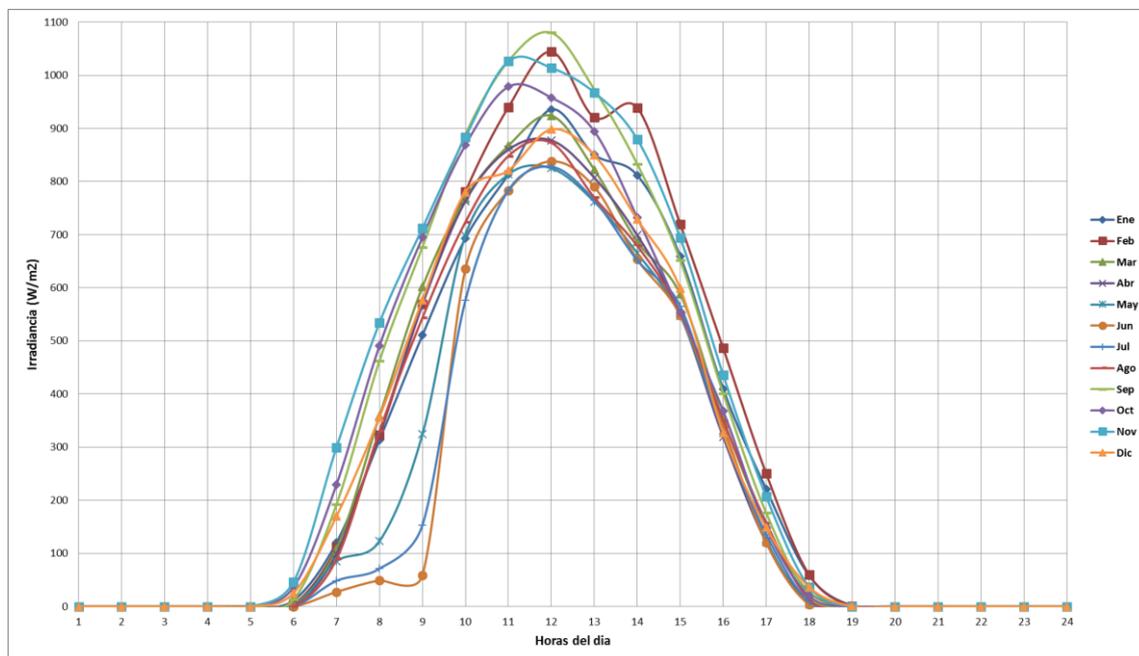


Figura 4.9: Tendencias mensuales horarias de irradiancia solar global en el plano horizontal para la ciudad de Juliaca en el año 2013.

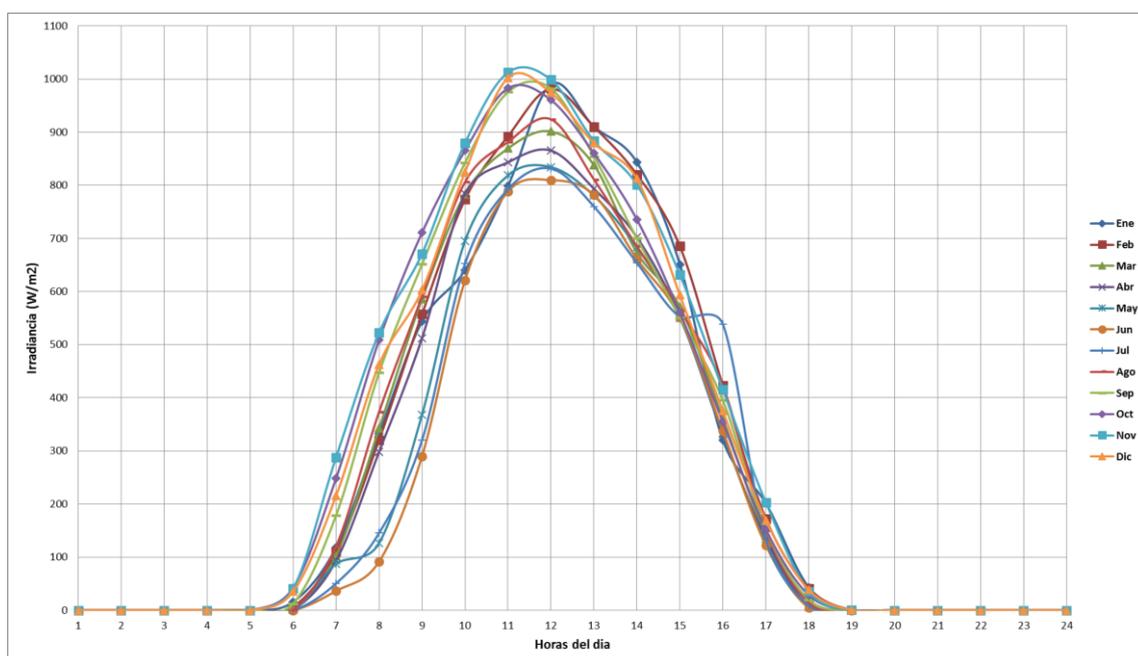


Figura 4.10: Tendencias mensuales horarias de irradiancia solar global en el plano horizontal para la ciudad de Juliaca en el año 2014.

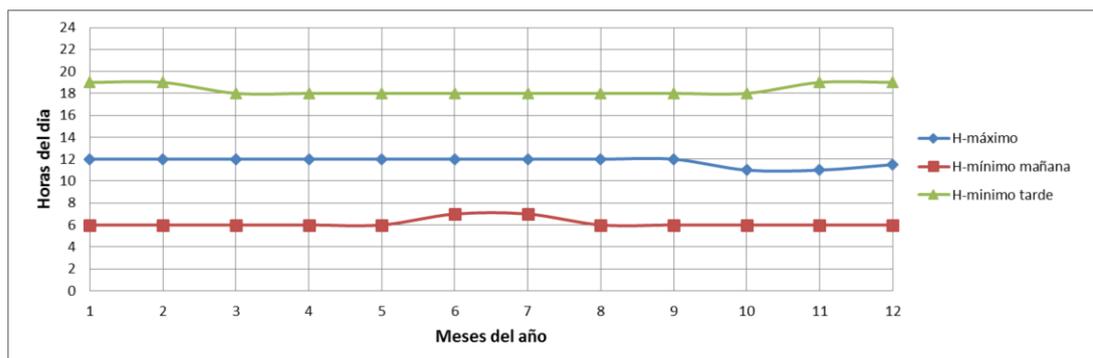


Figura 4.11: Hora en el que se presentan las máximas irradiancias promedio mensuales.

Además, en la figura 4.12, se puede apreciar que los valores máximos anuales para ambos años, en el cual observamos que la irradiancia son similares para cada mes con una ligera variación, y lo más resaltante es que los valores promedios se asemejan para cada mes de ambos años.

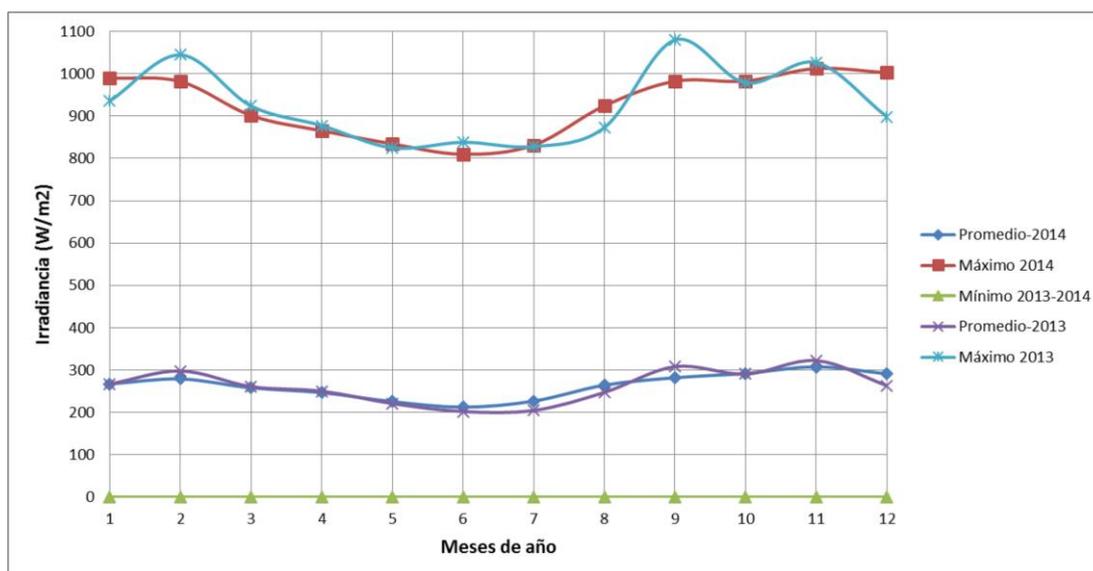


Figura 4.12: Valores promedio y máximos mensuales de irradiancia solar global en plano horizontal para Juliaca.

4.2.1.1. Comparación de resultados del SENAMHI con datos de la NASA

El objetivo de este apartado, al igual que en el recurso eólico, es comparar las distintas fuentes de información de las que se dispone y ver si existe o no alguna correlación (Oyarzo Oyarzún y Silva Mancilla, 2006).

Al igual que en el apartado para el análisis del recurso eólico, es necesario realizar una comparación de los datos de NASA con los datos procesados obtenidos de nuestra estación meteorológica; para lo cual necesitamos convertir los promedios mensuales de la irradiancia (Tabla 4.7 y 4.8) obtenida, a unidades de irradiación o insolación el cual se consigue multiplicando a la irradiancia promedio por el número de horas del día (24 horas) y dividiendo entre (1 kilo = 1000) para cada año, por lo que la insolación se medirá en kWh/m²/día, esto lo tenemos en la tabla 4.9.

Tabla 4.9: Promedio mensual de insolación solar procesados con los datos de la SENAMHI Puno para Juliaca entre los años 2013 y 2014.

Mes	2013	2014	PROMEDIO
Ene	6,41	6,41	6,41
Feb	7,15	6,69	6,92
Mar	6,26	6,19	6,23
Abr	6,00	5,92	5,96
May	5,30	5,41	5,36
Jun	4,85	5,10	4,97
Jul	4,91	5,44	5,18
Ago	5,93	6,35	6,14
Sep	7,39	6,76	7,08
Oct	6,97	7,01	6,99
Nov	7,74	7,38	7,56
Dic	6,32	6,99	6,65
PROMEDIO	6,27	6,30	6,29

FUENTE: Elaboración propia.

Para comparar los datos NASA y SENAMHI, consideramos el promedio de los promedios mensuales de la insolación de los dos años como los que están en la tabla 4.9. Al comparar se obtiene una diferencia promedio anual de 6,97 %, con una máxima de 15,64 % en el mes de Febrero y una mínima de 2,30 % en el mes de Diciembre, lo cual indica que el recurso solar se puede calcular exactitud ya que no es variable como el recurso eólico. Esto se aprecia en la tabla 4.10 y figura 4.13.

Tabla 4.10: Comparación entre valores mensual de insolación de NASA y SENAMHI, para Juliaca.

Mes	SENAMHI	NASA	DIFERENCIA	DIFERNC(%)
Ene	6,41	5,84	0,570	8,90
Feb	6,92	5,84	1,082	15,64
Mar	6,23	5,66	0,567	9,10
Abr	5,96	5,65	0,311	5,21
May	5,36	5,63	0,275	5,13
Jun	4,97	5,39	0,417	8,38
Jul	5,18	5,57	0,395	7,63
Ago	6,14	5,94	0,198	3,22
Sep	7,08	6,49	0,587	8,29
Oct	6,99	6,84	0,150	2,15
Nov	7,56	7,01	0,552	7,30
Dic	6,65	6,50	0,153	2,30
PROMEDIO	6,29	6,03	0,44	6,97

FUENTE: Elaboración propia.

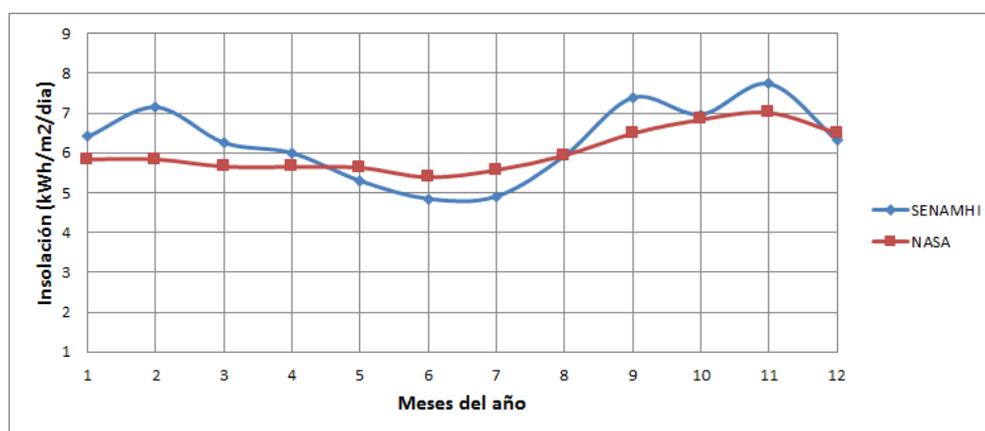


Figura 4.13: Gráfica de comparación de insolación solar de datos NASA y SENAMHI para Juliaca.

Respecto a la diferencia entre SENAMHI y NASA, hay que considerar que el primero se elaboró en base a información de una estación meteorológica existente en un lugar físico específico (base de datos de la estación de SENAMHI Puno), mientras que la información proveniente de la NASA corresponde a un promedio de 10 años para una extensa zona de territorio, al igual que en el caso del recurso eólico. Todos los datos analizados anteriormente, se aprecia claramente la similitud de los datos y existe tanta diferencia entre estas dos como para el recurso eólico discutido en apartados anteriores.

4.3. Análisis cualitativo del recurso solar

En este apartado se realizó la determinación de la insolación solar para la ciudad de Juliaca en forma teórica, no obstante, para poder realizar la determinación teórica de insolación solar para la ciudad de Juliaca, se debe contar con una base de datos de las horas reales de sol de la ciudad, con el mismo que no se cuenta, sin embargo se toma los datos de la insolación global promedio sobre una superficie horizontal para determinar el la insolación global promedio para una superficie inclinada.

En primer lugar, se obtiene las horas teóricas de sol mensual, para lo cual se determina las horas teóricas de sol diaria para cada día del mes. Se utiliza para esto la ecuación 2.48, valor de la distancia tierra-sol (C , ecuación 2.45), declinación solar (δ , ecuación 2.46) y ángulo horario de salida del sol (W_s , ecuación 2.47) y la radiación extraterrestre (H_0 , ecuación 2.49).

En la tabla 4.11 se aprecia los valores mencionados anteriormente para todo el año. Cabe señalar que al momento de realizar los cálculos, por tratarse de una zona ubicada al sur de la línea del Ecuador, y al Oeste del meridiano de Greenwich, los valores de latitud y longitud deben ser considerados como negativos.

Tabla 4.11: Promedio mensual de la variación de distancia Sol -Tierra, declinación, ángulo horario, horas de sol teóricos y radiación solar extraterrestre por diaria para la ciudad Juliaca.

Mes	C	δ (°)	W_s	S (horas)	Ho (kWh/m ² /día)
Ene	1,031	-20,847	96,057	12,808	11,357
Feb	1,017	-8,670	92,419	12,323	10,803
Mar	1,009	-2,389	90,664	12,089	10,314
Abr	0,992	9,493	87,338	11,645	9,131
May	0,977	18,806	84,582	11,278	7,970
Jun	0,969	23,077	83,226	11,097	7,369
Jul	0,968	21,101	83,862	11,182	7,617
Ago	0,977	13,296	86,238	11,498	8,597
Sep	0,992	1,994	89,446	11,926	9,808
Oct	1,008	-9,849	92,764	12,369	10,751
Nov	1,023	-19,051	95,493	12,732	11,233
Dic	1,032	-23,096	96,780	12,904	11,387

FUENTE: Elaboración propia.

4.3.1. Radiación solar global en un plano inclinado

En este apartado se determina la radiación solar global por día en un plano inclinado (H_{β}) para Juliaca, para lo cual se utiliza la ecuación (2.70). Para esta ecuación se considera los valores obtenidos para la insolación solar global media para una superficie horizontal; y los valores mensuales de radiación solar extraterrestre diaria. Una vez obtenida la radiación solar global mensual se determina el índice de claridad (K_T) para cada mes del año.

Una vez obtenido los valores anteriormente mencionados, radiación solar directa y difusa, utilizando la expresión de Liu y Jordan, ecuación (2.70), en la cual se determina la relación entre la radiación solar difusa y la radiación solar global. Finalmente se obtiene el valor final para la radiación solar global en un plano inclinado para la ciudad de Juliaca. Esto se aprecia en la tabla 4.12.

Tabla 4.12: Radiación solar global en un plano inclinado para la ciudad de Juliaca en $\text{kW/m}^2/\text{dia}$.

Mes	β	K_T	HHT	Hd	H_{β}
Ene	-18	0,564	6,410	2,053	7,648
Feb	-6	0,646	7,150	1,850	7,841
Mar	12	0,607	6,260	1,805	6,447
Abr	32	0,657	6,000	1,501	6,409
May	45	0,665	5,300	1,292	6,196
Jun	50	0,658	4,850	1,210	5,979
Jul	48	0,645	4,910	1,276	5,876
Ago	38	0,690	5,930	1,327	6,563
Sep	21	0,754	7,390	1,226	7,683
Oct	0	0,649	6,970	1,791	7,423
Nov	-16	0,689	7,740	1,739	9,184
Dic	-21	0,555	6,320	2,069	7,797
Promedio	15,42	0,648	6,269	1,595	7,087

FUENTE: Elaboración propia.

En esta última tabla se aprecia no solo la radiación global para un plano inclinado, sino también el ángulo óptimo para cada mes del año para el cual se tiene la radiación global máxima. Finalmente, para un colector solar se requiere un ángulo de inclinación promedio de $15,4^{\circ}$ siempre que este orientado hacia el norte, esta superficie recibirá una energía solar promedio por unidad de área igual a $7,087 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$, energía que es adecuada para instalar sistemas con tecnología solar.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

1. Con respecto al recurso eólico, de los resultados del estudio de potencial realizados para la ciudad de Juliaca, se concluye que se presentan mayor potencial en los meses de Primavera-Verano, la mayoría de estos meses superan los 3 m/s de promedio mensual a una altura de 25 m de altura. Los meses de Noviembre y Diciembre presentan además el promedio de velocidad mensual más alto en estos años que corresponde a 3,29 m/s. Las tendencias mensuales se mantienen regularmente para cada año con la excepción del mes de Junio en donde se tiene una velocidad promedio muy baja de 2,16 m/s. El promedio anual de la velocidad del viento es de 2,83 m/s a una altura de 25 m esto con datos de la SENAMHI y 3,09 m/s debido a la NASA. También se observa que la dirección predominante del viento es el Oeste, sin embargo existe también un porcentaje considerable en la dirección Este.
2. Del análisis estadístico y probabilístico de las velocidades medias horarias durante los años 2013 y 2014, el factor de forma y de escala para esta zona es de 2,31 y 3,19 m/s respectivamente, estos valores nos indica la alta probabilidad de tener velocidades bajas. La densidad de probabilidad promedio anual es 15,91 W/m², y la densidad de potencia mensual varía en relación a potencia cubica de la velocidad media, en donde el mes de OCTUBRE y DICIEMBRE son los meses de mayor potencia y el mes de MAYO y JUNIO los de menor potencia. En la variación de la densidad de potencia con la altura se observa que un aumento de 10 a 80 metros traería como consecuencia un aumento en la densidad de potencia media de poco más de un 230 % teniendo como referencia los 11,06 W/m² disponibles a 10 metros. Sin embargo, por tratarse de un sector urbano, difícilmente podríamos contar con una torre de dicho tamaño para la instalación de un aerogenerador. Para aerogeneradores por debajo de 10 KW de potencia, se podrían considerar torres de entre 30 y 50 metros, en cuyo caso la densidad de

potencia media disponible aumenta entre un 60 % a casi un 100 % respectivamente, de hecho se aprecia que la densidad de potencia media se duplica aproximadamente a los 50 metros. Finalmente, el recurso eólico en la ciudad es escasa y muy variable tanto en su dirección como en su magnitud, esto indica que no podría instalarse un aerogenerador con una velocidad de arranque mayor a 3 m/s sino que sea menor a 2 m/s aproximadamente.

3. Respecto al recurso solar, se tiene que el máximo valor para la ciudad de Juliaca, se encuentra al mediodía entre las 11:00 y 12:00 horas, un dato interesante a considerar para cualquier proyecto basado en esta tecnología. También se concluye que el mes con mayor radiación solar en un plano horizontal es Noviembre con promedio de 7,56 (W/m^2) y el de menor valor es Junio con un promedio de 4,94 (W/m^2). Los promedios mensuales de radiación global en un plano inclinado son siempre mejor que en la superficie horizontal.
4. Respecto al potencial solar se observa que los meses que presentan un mayor potencial son los de primavera-verano. Para la región se aprecia que el mes de mayor potencial solar es el de Noviembre como era de esperarse. En relación al recurso solar, para lograr un mejor aprovechamiento de este, se debe orientar el arreglo o colector solar hacia el Norte con un ángulo de inclinación que puede ser tanto fijo como variable. El ángulo de inclinación del arreglo debe ser 15° orientado hacia Norte, para la situación de un arreglo fijo, mientras que para la opción de un arreglo con ángulos de inclinación variables se tiene para cada mes un valor óptimo. Finalmente el recurso solar es abundante, suficientemente como para utilizar esta energía en esta zona, lo cual hace que algunos de los habitantes en esta zona lo utilizan como energía térmicas.
5. Por último, al comparar los datos de la NASA con los del SENAMHI podemos precisar que, la base de datos de la NASA es confiable en gran medida para caracterizar los recurso eólico y solar para una determinada zona, de tal forma que podemos analizar con facilidad los recurso eólico y solar sin una estación meteorológica.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

1. En lo que se refiere al recurso eólico, los resultados del estudio de potencial realizados para la ciudad de Juliaca, es una referencia calculada de dos años de datos del viento, sin embargo sería mejor trabajar con mayor cantidad de años para que se tenga datos más consistentes o realizar mapas de este recurso para la región de Puno.
2. Con relación al recurso solar se hizo comparaciones más pertinentes que tienden a mantenerse casi constante para cada año, sufre menor variación en relación al recursos eólico, por lo cual los cálculos realizados son más acertados, pero de todas maneras mientras se realice con datos de más años es el trabajo sería muy provechoso o realizar mapas de este recurso para la región de Puno.
3. Por último pensamos que este trabajo puede ayudar a realizar nuevos proyectos de mayor alcance que tenga impacto social y económico en las zonas rurales y urbanas en el altiplano del Perú.

BIBLIOGRAFÍA

- Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., y Castro Gil, M. A. (2009). *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. Uned.
- Charles Schlosser, F. y C., S. K. A. (2016). The impact of climate change on wind and solar resources in southern africa. *Applied Energy*, 161:556–564.
- De Bortoli, M. E., Canavesio, O., Benitez, F., y Makuch, F. (2002a). Análisis de velocidades de viento atmosféricas medias horaria anual extrema a través del análisis probabilístico de registros cortos.
- De Bortoli, M. E., Canavesio, O., Benitez, F., y Makuch, F. (2002b). Cuantificación de la dispersión al analizar velocidades de viento atmosférico medias horaria anual mediante el análisis probabilístico de registros cortos.
- de Dios-Ortega, W. y Errasti-Cabrera, M. A. (2013). Diseño por simulación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico para una vaquería en cuba. *Ingeniería Mecánica*, 16(2):123– 131.
- Dufo-López, R., Bernal-Agustín, J. L., Yusta-Loyo, J. M., Domínguez-Navarro, J. A., Ramírez-Rosado, I. J., y Lujano, Juan Aso, I. (2011). Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone pv–wind–diesel systems with batteries storage. *Applied Energy*, 88(11):4033–4041.
- González Rodríguez, E. A. (2011). Estimación de la irradiancia solar global en las envolventes de un edificio estándar en la ciudad de santiago, región metropolitana, mediante un modelo de simulación.
- Hualpa Huamaní, M. T. (2011). Estudio de factibilidad de sistemas híbridos eólico-solar en el departamento de moquegua.

- Leng, G. J., Monarque, A., Graham, S., Higgins, S., y Cleghorn, H. (2004). Retscreen international: Results and impacts 1996-2012. *Minister of Natural Resources Canada*.
- Lezcano Udrízar, S. M., De Bórtoli, M. E., y Marighetti, J. O. (2011). Análisis de metodos de determinacion de vientos extremos.
- López, J. L., López García, C., González Eduardo, M. d. L., Zermeño Otero, E., Mendoza Martínez, J., Pacheco Lozano, J. Á., y Ortiz Garaygordóbil, G. A. (2008). Estadística preliminar de los vientos para la zona urbana de aguascalientes. *Estimación del potencial contaminante por pilas en el relleno sanitario "San Nicolás" de la ciudad de Aguascalientes, México*, p. 20.
- Lucano, M. J. y Fuentes, M. (2010). Evaluación del potencial de radiación solar global en el departamento de cochabamba utilizando modelos de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales. *Revista boliviana de física*, 17(17):13–21.
- Oyarzo Oyarzún, E. J. y Silva Mancilla, R. A. (2006). Aplicaciones de las energías renovables en la región de magallanes.
- Peralta Jaramillo, J. (2015). Modelamiento computacional del recurso solar y eólico para aplicación de sistemas de energía renovable.
- Rico, J. C. y Serrano, M. (2013). Comparación de métodos para determinar los parámetros de weibull para la generación de energía eólica. *Scientia et technica*, 18(2):315–320.
- Rivero, I. G. (2007). Metodología para evaluar la factibilidad de una planta de generación híbrida con energías renovables.
- Santamaría, G. y Castejón, A. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Editex.
- SENAMHI-Puno (2013). Servicio nacional de meteorología e hidrología (senamhi). *Ministerio de Energía y Minas. Lima-Perú*.

Stackhouse, P. W. y Whitlock, C. H. (2008). Surface meteorology and solar energy (sse) release 6.0, nasa sse 6.0. *Earth Science Enterprise Program, National Aeronautic and Space Administration (NASA), Langley*, <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>.

Torres, N., Noa, R., Fuentes, P., y Pérez, R. (2014). Sistema de información para el análisis de datos del viento. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 8(3):106–120.

ANEXOS
