

República de Cuba

Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez"

Facultad de Ingeniería

Tesis para optar por el grado académico de Máster en Eficiencia Energética

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RADIACIÓN
SOLAR Y DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS
SOBRE EL ÍNDICE DE CLARIDAD EN LA ZONA
COSTERA VENEZOLANA COMO UNA HERRAMIENTA
PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Autor: Lic. Antonieta González Alén

Tutores: Dr. Juan Francisco Puerta Fernández

Dr. Julio Rafael Gómez Sarduy

Venezuela, 2012



Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos: "Carlos Rafael Rodríguez" como parte de la culminación de los estudios de la Maestría en Eficiencia Energética, autorizando a que el mismo sea utilizado por la institución para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos ni publicado sin la aprobación del autor.

Firma del Autor

Los abajo firmantes, certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdos de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Firma del tutor

Información Científico Técnica
Nombres y Apellidos

Computación
Nombres y Apellidos

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme dado la oportunidad de de realizar estos estudios de maestría en un área que realmente me apasiono.

A la Fundación para el Desarrollo de Sector Eléctrico por permitir ampliar mis conocimientos en el área eléctrica y de eficiencia energética.

Al personal de la Dirección de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana de la Base Logística Aragua y al Centro de investigación Metodológica del Base Aérea La Carlota, al Coronel Alex Santos Abraham y al Coronel Julio Cavaneri por la colaboración prestada para la recolección de la data.

A los compañeros del Programa Sembrando Luz, por servirme de apoyo cuando ya casi me daba por vencida para el desarrollo de este trabajo.

A mis los compañeros de estudio por las experiencias compartidas, en especial a Adriana Uzcatequi y a Uxmal Amézquita.

Al personal docente de la Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez” por su alto compromiso y dedicación en el logro de las metas a su alumnado, en especial al equipo del Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente por ser un lecho de conocimiento en el área de energía y específicamente eficiencia energética.

A todas aquellas personas que directa e indirectamente colaboraron en la cristalización de este sueño.

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso y a la Divina Presencia por ser mi fuente de energía, poder y perfección.

A mis Padres por ser la fuente de enriquecimiento y ejemplo, que fortalece mis pasos.

A mis hijos por fortalecerme, acompañarme y ser mi motivo de vida.

A mis compañeros por incentivar me al logro.

A mis profesores por las experiencias y conocimientos impartidos.

A todos aquellos que han pasado por mi vida y han aportado una granito de arena para hacerme lo que yo soy hoy.

SINTESIS

El desarrollo de las tecnologías basadas en energía solar, depende, entre otras, del porcentaje de radiación solar que puede convertirse en el producto de energía deseado y de la cantidad de radiación solar disponible en el sitio de colocación, es por ello que resulta fundamental, tener acceso a datos precisos de la radiación solar. De esta manera, antes de seleccionar cualquier dispositivo o planta diseñada para el aprovechamiento de la energía solar se debe conocer de manera rigurosa la contribución de las componentes directa y difusa de la radiación global medida en la superficie de la tierra. La evaluación de las componentes de la radiación se puede simplificar introduciendo el concepto de Índice de Claridad (K_T). En la presente investigación se desarrolla una modelación de la radiación en función de las variables meteorológicas de la zona costera del país en el periodo comprendido entre el 2005-2009, para ello se aplican herramientas de inteligencia artificial, específicamente redes neuronales artificiales (RNA). Combinando las RNA y el modelo de Erbs [7] se calcula las componentes directa y difusa de la radiación global y los respectivos índices de claridad. Los resultados se comparan con los calculados utilizando factores astronómicos y se comprueba su excelente desempeño. Se desarrollo un software en lenguaje Matlab para automatizar el método. Los resultados pueden ser aplicados para obtener información necesaria para el diseño de sistemas basados en energía solar por lo que constituye una herramienta que incide en el aprovechamiento eficiente de estos sistemas. Se realiza la comparación de la modelación con los datos correspondientes al 2010 de la estación de Mene Grande y se verifica su excelente capacidad de predicción. Con este estudio se determina que la radiación difusa de la zona de la costa venezolana con clasificación climática estepas (Bs) es de 8.54 MJ/m^2 aproximadamente mientras que para los lugares con Clima húmedo-seco tropical (Aw) es ligeramente superior del orden de 9.12 MJ/m^2 .

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	2
Antecedentes	3
Justificación del estudio	4
Problema de Investigación	5
Objetivo General	6
Objetivos específicos	6
Hipótesis de la Investigación	6
Beneficios obtenidos	7
Límites del alcance de la investigación	7
Estructura del informe de investigación	7
CAPÍTULO 1	9
MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	9
1.1 Conceptos meteorológicos	9
1.2 Relación entre Meteorología y Climatología	11
1.3 Principios de radiación solar	13
1.4 Factores que afectan la cantidad de radiación solar	14
1.5 Instrumentación para medir la Radiación Solar	15

1.6 Determinación del Índice de Claridad para estimar la radiación Solar Directa y Difusa	16
1.7 Modelos Matemáticos de referencia internacional para la estimación del Índice de Claridad promedio mensual	16
1.7.1 Modelo de Page.	16
1.7.2 Modelo de Hollands	17
1.7.3 Modelo de Saunier	17
1.7.4 Modelos de Cálculo de la Radiación Directa y Difusa	17
1. 8 Clasificaciones Climáticas	18
1.8.1 Clasificación Climática de KÖPEEN	18
1.8.1.1 Clima húmedo-seco tropical (Aw)	19
1.8.1.2 Climas Secos (B)	19
1.9 Conclusiones parciales	20
CAPÍTULO 2.....	21
METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO.	21
2.1 Síntesis del método propuesto. Particularidades.	21
2.2 Cálculo de la radiación solar extraterrestre sobre un plano horizontal. ..	22
2.3 Cálculo del índice de claridad.	23
2.3.1 Fundamentos de las RNA.	24
2.3.2 Diseño y entrenamiento de las RNA.	25
2.4 Cálculo de la radiación directa y difusa.	31
2.5 Software en Matlab.	32

2.6 Conclusiones parciales.	36
CAPÍTULO 3.....	37
ANALISIS DE RESULTADOS.	37
3.1 Comportamiento de la radiación difusa con el índice de claridad.....	37
3.2 Selección del tamaño de la muestra a analizar	39
3.3 Selección de la muestra.	40
3.4 Análisis de resultados con la data de clima Bs.	41
3.4.1. Comparación con el método de Erbs.	41
3.4.2. Comparación con el método de Collares–Pereira y Rabl.	43
3.5 Análisis de resultados con la data de clima Aw.....	46
3.5.1. Comparación con el método de Erbs.	46
3.6 Resultados con los datos del 2010	49
3.7 Conclusiones parciales.	50
CONCLUSIONES.	52
RECOMENDACIONES	54
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

Desde los años 70 cuando se desencadena la crisis energética atendiendo a los niveles de producción y consumo de petrolero, los países desarrollados establecen un control de la eficiencia energética, en particular se destacan: Suecia, Alemania, Inglaterra y Francia. Estos países implementaron políticas activas para el ahorro de energía, mientras que en Latinoamérica el pionero fue Argentina y posteriormente se sumaron: Chile, México y Brasil.

Es por ello que cobra gran importancia el desarrollo de estudios de energías alternativas y específicamente aquellas tecnologías basadas en la energía solar. Estas últimas dependen, entre otras, del porcentaje de radiación solar que puede convertirse en el producto de energía deseado y de la cantidad de radiación solar disponible. Resulta entonces fundamental, tener acceso a datos precisos de la radiación solar y de esta manera antes de seleccionar cualquier dispositivo o planta diseñada para el aprovechamiento de la misma se debe conocer de manera rigurosa la contribución de las componentes directa y difusa y de la radiación global que incide en la superficie de la tierra.[4]

La evaluación de estas componentes es un estudio complejo, pero se puede simplificar introduciendo el concepto de Índice de Claridad (K_T) que relaciona la radiación global medida sobre un plano horizontal en la superficie de la tierra con el valor de la radiación extraterrestre, es decir la radiación que se tiene para ese mismo lugar fuera de la atmósfera. Este índice de claridad es una función de la latitud, la declinación solar, el ángulo horario y el día del año. [8]

En este sentido el propósito de esta investigación es analizar la influencia de las variables meteorológicas sobre el Índice de Claridad en la zona costera venezolana y calcular el comportamiento de la radiación Solar Global, Directa y Difusa, desarrollando un modelo que constituya una herramienta para la planificación y el diseño de sistemas solares con incidencia directa en el ahorro energético.

Antecedentes

A nivel Internacional se han realizado estudios estadísticos de la radiación solar global; principalmente en los países interesados en aprovechar esta fuente energética, como los Estados Unidos y los países Europeos como Francia, Alemania, Inglaterra, etc. En Venezuela se han realizado estudios sobre la radiación solar, entre los que se pueden citar en orden cronológico:

a) “Distribución entre la radiación total y directa en un clima tropical húmedo de montaña. Su aplicación a la selección de un sistema de producción de electricidad” del año 1983, elaborado por M.A. Layrisse y J.M. Ledanois [15], profesores pertenecientes a la Universidad Simón Bolívar, quienes midieron la radiación total y directa en un clima tropical húmedo de montaña como es el caso del valle de Sartenejas, por un período de tiempo de 3 meses para crear un modelo de predicción de la radiación solar y sus componentes. Del mismo se concluye que el porcentaje de radiación directa recibida sobre una superficie perpendicular a los rayos solares representa sólo un 30% de la radiación total, haciendo poco eficiente la instalación de concentradores. La correlación desarrollada que relaciona con el factor claridad instantáneos permitió datos bastantes próximos a los medidos.

b) “Curvas características de radiación solar del oriente del país”, elaborado por R. Chacín y B. Torres, del año 1988 [35], y “Distribución solar en la zona este de Venezuela”, elaborado por Y. Limones y J. Fariñas, del año 1989 [16], ambos trabajos de pregrado desarrollados en la Universidad Central de Venezuela. En estos trabajos se procesaron los datos de medición de la radiación global horaria de algunas localidades, para aplicársela a varios modelos matemáticos (paramétrico B, la correlación polinómica y Collares-Pereira) a fin de calcular la radiación difusa y directa. Luego desarrollaron modelos matemáticos para ajustar las curvas en base al modelo de Collares-Pereira.

c) “Curvas características de la distribución de la radiación solar en la región central de Venezuela”, elaborado por R. Algélvis y C. Lazarde, del año 1990 [1], trabajo de pregrado desarrollado en la Universidad Central de Venezuela y en el

cual se procesó información solar para la obtención de valores tabulados y graficados de secuencias diarias de la radiación global, el índice de claridad promedio mensuales, la radiación solar difusa y la radiación solar directa, así como sus promedios de los valores diarios y se generó secuencias de radiación diaria usando matrices de transición de Markov, de esta manera se obtuvo también valores tabulados de los parámetros mencionados e igualmente sus valores promedios.

d) “Distribución Territorial del Potencial Solar en Venezuela”, realizado por J. Lafontant e Y. Flores, del año 1990 [13], desarrollado por el Ministerio de Energía y Minas. En este se creó un banco de datos, con los datos promedios de la radiación solar existentes en el país, para tener una estimación de los valores de los mismos a partir de la latitud y longitud geográfica y poder cuantificar en forma puntual el porcentaje regional del recurso energético solar.

e) “Estudio estadístico de la radiación Solar global en el Estado Bolívar y la influencia de las variables meteorológicas en el índice de claridad”, realizado por Uxmal Amézquita, en el año 2005, trabajo de post grado realizado en la Universidad Central de Venezuela y en el cual se desarrolló un modelo matemático bivariado para la estimación del índice de claridad promedio mensual en base a datos meteorológicos como: radiación global, insolación, nubosidad, temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo, presión atmosférica, humedad relativa y pluviometría en el estado Bolívar, Venezuela.

Justificación del estudio

Actualmente en Venezuela, los datos de las variables meteorológicas son registrados en las estaciones bajo el método de Euler según el cual cualquiera de estas variables es solo una función del tiempo y no toma en cuenta sus coordenadas cartesianas. Por otro lado, en el caso de la radiación solar los equipos utilizados son piranómetros bimetalicos tipo Robitzsch, instrumento que depende del movimiento diferencial de un par bimetalico como respuesta a la radiación solar, que solo mide la radiación global sin discriminar la radiación

solar directa de la radiación solar difusa. Los equipos que miden la radiación directa (pirheliómetro) y la radiación difusa (piranómetro con aro sombreador) no se utilizan por ser muy costosos, a pesar de que la Organización Mundial de Meteorología sugirió en el año de 1983 tener este tipo de equipos en todas las estaciones del país. Es importante resaltar que para el desarrollo de sistemas de energía solar eficientes y de la arquitectura bioclimática, se requiere conocer con exactitud tanto la radiación directa como la difusa. [2]

Por otro lado, los análisis estadísticos que se realizan comúnmente, buscan parámetros básicos como medias y medianas mensuales que no aplicarían a este trabajo y que no es el fin del mismo, ya que por la complejidad del comportamiento de las variables meteorológicas se requiere un análisis más detallado con el objetivo de modelar el comportamiento de la radiación en función de las variables meteorológicas medidas con el fin de entender su dinamismo o actuación dentro de la zona en estudio.

Dada la importancia de los valores de la radiación solar directa y difusa para la selección y utilización de sistemas de energía solar (colectores, concentradores, etc.) y para la arquitectura bioclimática en general, es una imperiosa necesidad incorporar un estudio con la data local y el uso de los conceptos como el Índice de Claridad a fin de estimar lo más cercano posible a la realidad estos valores.

Problema de Investigación

La simulación del comportamiento dinámico de los sistemas de energía solar a lo largo del tiempo es altamente necesaria para establecer su eficiencia, desempeño y confiabilidad. Para ello se requiere, entre otras variables que intervienen en un estudio de esa naturaleza, del conocimiento riguroso de la contribución de las componentes directa y difusa de la radiación solar global medida en la superficie de la tierra.

Por lo que se declara como problema científico **la necesidad de modelación del cálculo de la radiación solar difusa y directa, así como la determinación**

del Índice de claridad tomando en cuenta las variables meteorológicas medidas para los tipos climáticos presentes en la zona costera venezolana.

Objetivo General

El objetivo general de esta investigación es realizar una modelación del índice de claridad para la zona costera de Venezuela considerando la influencia de las variables meteorológicas y el tipo de clima, calculando las componentes directa y difusa de la radiación solar global.

Objetivos específicos

- Estudiar el estado del arte y los fundamentos teóricos sobre las variables meteorológicas y ecuaciones fundamentales para el cálculo de la radiación solar global, directa y difusa. .
- Procesar la información proveniente de los datos meteorológicos de radiación global, insolación, nubosidad, temperatura de bulbo húmedo, humedad relativa máxima, mínima y media, insolación y velocidad del viento de un período de 5 años, suministrados por la Dirección Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana de la Base Logística Aragua y al Centro de investigación Metodológica del Base Aérea La Carlota,
- Desarrollar el modelo para calcular el valor del índice de claridad diario, en función de las variables meteorológicas con el empleo de redes neuronales artificiales y desarrollar una aplicación en Matlab para el cálculo de las componentes directa y difusa de la radiación solar diaria.
- Comparar el modelo obtenido con otros modelos de referencia internacional

Hipótesis de la Investigación

Es posible desarrollar un modelo para el índice de claridad en función de las variables meteorológicas que se miden en las estaciones de la costa venezolana para calcular las componentes difusa y directa de la radiación solar, empleando la combinación de redes neuronales artificiales y modelos internacionales de

manera más completa que los modelos estadísticos existentes lo que le permitirá ser utilizado como una herramienta en el diseño de sistemas alternativos de energía.

Beneficios obtenidos

1-Se obtuvo un modelo más completo para el cálculo de la radiación solar directa y difusa a partir de las variables meteorológicas en la zona costera de Venezuela no reportado hasta el momento en la literatura científica consultada.

2-Se desarrolló un software basado en el modelo obtenido para la automatización de los cálculos de manera que facilite su utilización como un asistente en el diseño más apropiado y en la toma de decisiones en la selección de sistemas de energía solar (colectores, concentradores, etc.) y en el diseño de instalaciones bajo los supuestos de la arquitectura bioclimática.

3-Se evaluó la radiación difusa para la zona costera venezolana en función del tipo de clima.

4-A partir de esta investigación se dispone de una herramienta con alta capacidad de predicción que puede ser empleada en pronósticos sin necesidad de invertir en costoso equipamiento, utilizando las mediciones de variables meteorológicas disponibles en las estaciones.

Límites del alcance de la investigación

La baja disponibilidad de información en algunas estaciones meteorológicas de la zona costera impidió que las mismas fueran incluidas en el estudio. Esto limita el alcance de la modelación realizada, debido a la dispersión de las estaciones bajo estudio en el área geográfica, lo que provoca que en algunos puntos no se cuente con los valores de las variables.

Estructura del informe de investigación

El informe de la investigación está estructurado en introducción, tres capítulos conclusiones y recomendaciones. Los capítulos del mismo abordan los siguientes aspectos:

Capítulo I: Se tratan los aspectos generales del tema en estudio entre los cuales se puede mencionar una breve reseña histórica del desarrollo de las tecnologías de la energía solar, la relación entre la meteorología y la climatología, la importancia de la interpretación de los datos meteorológicos, los factores que afectan la cantidad de radiación solar. Se dan también las clasificaciones de los diferentes Tipos de Climas enfatizando en los presentes en la zona costera venezolana.

Capítulo II: Trata sobre el desarrollo del modelo neuronal del índice de claridad y la programación en Matlab para la automatización de los cálculos. En este capítulo se define la metodología utilizada y se describe en forma secuencial y detallada, los pasos seguidos en este trabajo de investigación para lograr todos los objetivos planteados. Se menciona como fue construida la base de datos, la forma de procesamiento de los datos usados, el cálculo de los Índice de Claridad y la validación del modelo propuesto.

Capítulo III: Se presentan los resultados obtenidos y se realiza la comparación de la modelación propuesta con los modelos internacionales existentes para el periodo 2005 – 2009. Se comprueba la capacidad de predicción del modelo obtenido con la data del año 2010 a partir de los reportes reales suministrados por la Fuerzas Armadas considerando como caso de estudio la estación de Mene Grande.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

En la actualidad, existen diversas tecnologías de energía solar para la captación y aprovechamiento de la misma, con el objeto de obtener y ahorrar energía a un menor costo, así como también ayudar a la preservación del medio ambiente. El aprovechamiento de estas tecnologías pasa por el conocimiento de los recursos disponibles, entre ellos la radiación solar con que se cuenta en la zona bajo estudio.

Para una mejor comprensión de la investigación desarrollada se presenta en este capítulo la base teórica y conceptual sentando las bases para la modelación.

1.1 Conceptos meteorológicos

En meteorología el término Insolación se conoce como las horas durante las cuales brilla el sol sobre un lugar. Esta se mide en horas y décimas de hora con un instrumento denominado Heliofanógrafo. La intensidad de la insolación es mayor en el punto en que los rayos solares inciden verticalmente.

La Humedad Relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua que tiene el aire y la que tendría si estuviese saturado. La humedad relativa del aire se expresa en porcentaje y se determina mediante el Psicrómetro de August ó el de Assman, ambos formados por un ventilador ó aspirador y dos termómetros según sea el caso. [21]

Por su parte la evaporación es el proceso físico mediante el cual el agua se convierte en vapor de agua, bien sea de una superficie líquida, del suelo húmedo, del hielo ó de la nieve. El agua se calienta al absorber energía calórica del sol y cambia de fase, se mide en una cubeta universal ó tina de evaporación.

La fuente principal de la energía de la atmósfera es la radiación solar; luz y calor son formas de energía transmitidas por ondas electromagnéticas semejantes a las hertzianas de la radiotelegrafía, pero muchísimo más cortas, se miden en

micrones. [24], En Venezuela se utiliza para la medición de la radiación solar directa y difusa el actinógrafo Robitzsch.

La energía radiante procedente del sol incide sobre la superficie de la tierra, siendo el motor fundamental del clima, y también puede incidir sobre la superficie exterior de los cerramientos, ya sea directamente, difuminada por la atmósfera o reflejada por el entorno, generando flujos de calor de magnitud considerable.

La magnitud del calentamiento producido depende fundamentalmente de la posición del sol, de la intensidad de la radiación procedente del sol, del estado de la atmósfera y de otros parámetros ambientales. También tiene influencia las características de la superficie absorbente, tales como orientación, inclinación, absorbanza de los cerramientos y el entorno. [24]

La radiación solar al atravesar la atmósfera terrestre, se ve sometida a un proceso de atenuación determinado por la altura y posición del sol, por influencia de las variaciones de la composición atmosférica y los efectos meteorológicos. A un determinado lugar de la superficie terrestre, la radiación solar llega tanto en forma de radiación directa (que no ha sufrido modificación en su dirección desde el Sol) como de radiación difusa (procedente de todas las direcciones de la semiesfera celeste por encima del plano horizontal así como de la reflexión de la radiación por el suelo)[21] (Figura 1.1)

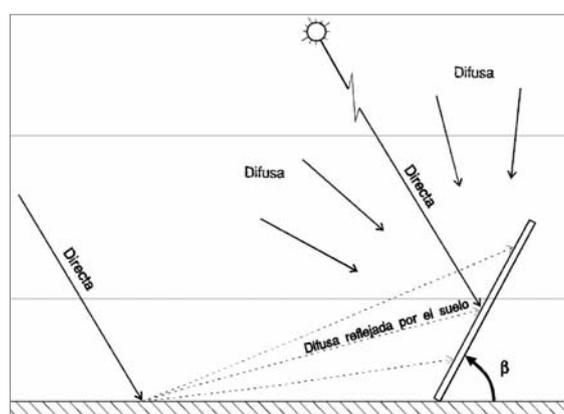


Figura 1.1 Componentes de la radiación global incidente sobre una superficie inclinada.

Existen dos metodologías diferentes [20] que pueden emplearse para la determinación de la radiación incidente sobre la superficie terrestre:

- A partir de la composición de la atmósfera y del estudio de los efectos que causan sobre la radiación solar se establece una modelización a través de una serie de coeficientes atmosféricos, se determinan las componentes directa y difusa y de éstas la global, en cualquier lugar de la superficie terrestre. El tratamiento matemático de estos procesos es bastante complejo, haciéndose necesario acudir a ciertas simplificaciones que afecta sobre todo a los citados coeficientes de transmisión y atenuación atmosféricos. Se caracteriza por su apoyo en fundamentos físicos, al basarse en los procesos que experimenta la radiación solar a su paso por la atmósfera terrestre, y está limitado además por la necesidad de disponer de series temporales de medidas de parámetros meteorológicos.
- A partir de series temporales de valores de irradiación (normalmente irradiación global en plano horizontal) medidos o calculados a partir de series de horas de sol, y del estudio estadístico de estas series, se obtiene también las componentes directa y difusa y de ellas la global, en cualquier lugar de la superficie terrestre, del cual se tenga información medida.

1.2 Relación entre Meteorología y Climatología

La meteorología como ciencia de la atmósfera, es sinónimo de ciencia del tiempo atmosférico (o simplemente tiempo), entendiéndose por tal las características o estado de la atmósfera en cualquier lugar y momento determinados. La variación en un mismo lugar y de un lugar a otro, es el rasgo más resaltante del tiempo meteorológico y cada uno de sus elementos (radiación solar, temperatura, presión, viento, humedad, precipitación, nubes, etc.) varía a consecuencia del movimiento incesante de la atmósfera con su traslado de energía de un lugar a otro. En meteorología, el tiempo atmosférico puede determinarse por la variación combinada de todos los elementos o por las variaciones de cada elemento individual considerado, generalmente en espacio relativamente corto: 10 minutos, una hora o un día. El estado del tiempo se puede generalizar para duraciones mayores; varios días, semanas, etc., al

referirse a determinadas condiciones meteorológicas, por ejemplo, tiempo nublado, lluvioso, seco, cálido, etc., e igualmente para áreas más grandes; una ciudad, un distrito, un estado, que tenga igual tiempo.[20]

Por otra parte, la tendencia general de la atmósfera en un lugar dado, constituye el clima, el cual es estudiado por la Climatología. También se dice que el clima es una generalización, o un promedio de las condiciones del tiempo atmosférico. Las diversas regiones de la superficie terrestre tienen en el clima uno de los elementos del paisaje geográfico que las caracteriza y define, por lo cual la climatología, mucho más que la meteorología, tiene un carácter eminentemente geográfico.

Los términos tiempo y clima significan complejos íntimamente integrados, que representan realidades físicas para las diferentes áreas de la superficie terrestre. Un área tiene diferentes tiempos meteorológicos pero un solo clima. Al cambiar de espacio, cambian los integrantes del complejo y el clima varía sustancial o superficialmente según el caso. Los elementos del tiempo y clima son las diversas características físicas de la atmósfera cuyos valores y variaciones deben conocerse para determinar el tiempo o el clima. Estos elementos son: radiación, temperatura, presión, viento, humedad, nubosidad, insolación, precipitación y evaporación. Mientras los factores o controles del tiempo y clima, son los diferentes fenómenos meteorológicos o geográficos que actuando sobre los elementos anteriores, ocasionan sus diferencias de un lugar a otro con la consiguiente variación del tiempo o del clima. [9]

Los factores más importantes son: la latitud, la altitud, la distribución de tierras y aguas, la proximidad o lejanía del mar, el relieve (en especial la barreras montañosas y su orientación), las corrientes oceánicas, las masas de aire y frentes, los centros semipermanentes de altas y bajas presiones, las tormentas y la vegetación. Ejemplo de la influencia de los diferentes controles sobre las variaciones del tiempo y distinciones del clima, se puede demostrar en los siguientes casos:

- 1 La latitud, actúa como un control al determinar la inclinación de los rayos solares sobre la tierra. Por consiguiente, la radiación disminuirá del ecuador a

los polos, lo mismo que la temperatura, de no existir otra influencia en sentido contrario.

2 La altitud, hace descender los valores de la temperatura.

3 Las tormentas, al producir grandes precipitaciones trae como consecuencia descenso térmico.

4 La vegetación, en grandes masas como bosques y selvas, mantiene temperatura menor que en áreas sin vegetación y además, evita altas oscilaciones, típicas de los desiertos.

5 El relieve, por su altitud y por su orientación, favorece o impide la entrada de vientos que modifican la temperatura. [9]

1.3 Principios de radiación solar

La radiación proveniente del sol es la principal fuente de energía de todos los procesos en el sistema tierra - atmósfera - océano, de ahí su importancia sobre la vida orgánica de nuestro planeta. Puede ser definida como la energía emitida por el sol, que se propaga en todas direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Estas ondas conforman el llamado espectro electromagnético que está compuesto por rayos gamma, rayos X, radiación ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio.

La radiación solar que llega a la parte superior de la atmósfera sufre, en su trayectoria hacia la tierra diferentes procesos de atenuación, y sobre la superficie terrestre se clasifica o tiene los siguientes componentes: radiación directa, radiación difusa, radiación global, radiación reflejada, entre otros. [19]

Se define como radiación solar incidente o global aquella que procedente del sol incide sobre la superficie terrestre (directa y difusa)

La radiación directa es la que llega a la superficie de la tierra en forma de rayos provenientes del sol sin cambios de dirección, mientras que la difusa proviene de otras direcciones (distintas a las del disco solar) debido a la reflexión y dispersión que producen en la radiación solar la atmósfera y las nubes

Las cantidades de radiación incidente se expresan generalmente en términos de irradiancia o irradiación. La irradiación se define como la energía que en forma de radiación se integra o totaliza durante cierto tiempo en una superficie o zona.

Sus unidades son J/m^2 o cal/cm^2 (llamado Langley: Ly) o $kW h/ m^2$. Mientras que irradiancia se define como la potencia de la radiación o energía instantánea que se emite o incide en cierta superficie o zona. Sus unidades son W/ m^2 [19].

1.4 Factores que afectan la cantidad de radiación solar

Sobre la atmósfera se recibe un promedio de radiación solar (constante solar) de $1\ 367\ W/m^2$, valor establecido por la Organización Mundial de Meteorología, pero a nivel del suelo la radiación varía entre 0 a $1000\ W/m^2$. Esta atenuación de los valores de radiación y su variabilidad en el tiempo se debe a varios factores, como son los efectos de absorción y difusión de la atmósfera (debido a polvillo atmosférico, aerosoles y espesor de la masa de aire, entre otros), los astronómicos latitud (φ), longitud, declinación de la tierra (δ), ángulo horario (ω), día del año (i), heliofanía, y los efectos meteorológicos entre los que se reconocen: la temperatura de bulbo seco, humedad relativa, humedad específica absoluta, presión atmosférica, nubosidad, insolación, temperatura de bulbo húmedo, pluviometría, vientos, tipo de vegetación (selva, bosque, etc) y el perfil geográfico (sabana, desierto, montañas, etc). [17]

Es por ello que dos lugares que presenten las mismas características astronómicas (solo variando la longitud), no presentan los mismos niveles de radiación solar global y mucho menos de sus componentes de radiación solar directa (radiación que llega directa, en línea recta desde el sol) y difusa (radiación que se dispersa por efectos de las nubes, aerosoles y moléculas ambientales y llega de todas partes del cielo).

La evaluación de las componentes directa y difusa de la radiación global terrestre y su comportamiento en el tiempo son complejos. Para fines prácticos, su estudio se simplifica introduciendo el concepto de Índice de Claridad (K_T), que relaciona la radiación global medida en la superficie de la tierra (H) con el valor teórico llamado radiación extraterrestre (H_0) que se tiene para ese mismo lugar fuera de la atmósfera terrestre y el cual es una función únicamente de los parámetros astronómicos. Dependiendo del promedio del tiempo de la

evaluación de la radiación solar extraterrestre y de la radiación solar global terrestre, se obtiene el Índice de Claridad (K_T) horario, diario o mensual.[2]

1.5 Instrumentación para medir la Radiación Solar

La radiación solar se mide usualmente mediante instrumentos especiales destinados a tal propósito denominados radiómetros. Existen varias clases de radiómetros, dependiendo del tipo de radiación a medir. La radiación global se mide generalmente sobre una superficie horizontal con un instrumento de medida denominado piranómetro. La radiación difusa se mide también sobre una superficie horizontal con un piranómetro, que incorpora un disco o una banda sombreadora, para evitar la visión del disco solar (lo que elimina la componente directa) en su recorrido diario. La radiación directa se mide sobre una superficie normal a los rayos solares, mediante un instrumento denominado pirheliómetro y que consiste básicamente (igual que los piranómetros) en un par termoeléctrico con una de sus uniones situada sobre una superficie receptora ennegrecida, alojada en el interior de un tubo, que se dirige constantemente hacia el Sol. . [21] Los promedios mensuales de irradiancia, convenientemente tabulados, están publicados para gran número de localidades en todo el mundo. La utilización de promedios mensuales en el diseño y dimensionamiento de instalaciones de energía solar refleja una situación de compromiso entre precisión y esfuerzo de cálculo. Sin embargo, estos métodos simplificados de diseño deben ser complementados con información sobre la distribución estadística de la radiación a lo largo del tiempo.

El Actinógrafo de Robitzsch registra el transcurso de la irradiación global en una superficie horizontal, como suma de la radiación directa del sol y de la radiación difusa del cielo. Consiste en tres tiras bimetálicas ennegrecidas, expuestas a la irradiación, y tres tiras bimetálicas blancas, dispuestas debajo de ellas, cuya tarea es compensar el influjo de la temperatura del aire. El alcance de la sensibilidad abarca el espectro total de la radiación del sol y del cielo, a excepción de las zonas absorbidas por la campana de cristal (las de los rayos ultravioletas e infrarrojos más allá de unos 2μ) . [21]

1.6 Determinación del Índice de Claridad para estimar la radiación Solar Directa y Difusa

Dada la importancia de los valores de la radiación solar directa y difusa para la selección y utilización de sistemas de energía solar en general, la presente investigación, a partir de los datos promedios diarios del Índice de Claridad de las zonas en estudio, genera los datos promedios diarios de la radiación difusa y directa, haciendo uso de un modelo matemático de trayectoria y recomendación en el área científica basado en redes neuronales y utilizando el ambiente Matlab. Se define como Índice de Claridad promedio mensual la razón de la radiación promedia diaria mensual (H) medida sobre una superficie horizontal respecto a la radiación extraterrestre global (H₀) mensual diaria calculada sobre un plano horizontal. [2]. Esto es:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = \bar{K}_T \quad (1.1)$$

De la misma forma el Índice de Claridad promedio diario K_T puede definirse de la forma:

$$\frac{H}{H_0} = K_T \quad (1.2)$$

Donde H es la radiación medida sobre un plano horizontal para un día cualquiera del año y H₀ es la radiación extraterrestre calculada para ese día en particular.

1.7 Modelos Matemáticos de referencia internacional para la estimación del Índice de Claridad promedio mensual

Existen tres modelos lineales cuyas constantes se obtienen por regresión. Estos son los modelos de Page, Hollands y Saunier.

1.7.1 Modelo de Page.

Este modelo utiliza la ecuación 1.3 en la cual la variable independiente es la insolación relativa promedio diaria mensual [18].

$$\frac{\bar{H}}{H_o} = a + b \frac{\bar{n}}{N}$$

(1.3)

H = valor promedio mensual de la radiación global.

H_o = valor promedio mensual de la radiación global para días claros.

\bar{n} = valor promedio mensual de horas de Sol brillante (insolación).

N = valor de la insolación teórica máxima posible diaria para el día promedio del mes.

$\frac{\bar{n}}{N}$ = relación llamada insolación relativa o heliofanía relativa.

1.7.2 Modelo de Hollands

En este modelo la variable independiente es el valor del Índice de Claridad máximo registrado para un mes en estudio. [17]. El mismo basa su desarrollo en las curvas de frecuencias acumuladas de los trabajos de referencia para los Estados Unidos.

$$K_{t,max} = 0.6313 + 0.267 - 11.9(-0.75)^8 \quad (1.4)$$

donde K_{t,max} es el valor máximo que adquiere el Índice de Claridad promedio diario en el mes de estudio.

1.7.3 Modelo de Saunier

La universalidad de las distribuciones en las que se fundamenta el modelo de Hollands, han sido cuestionadas en el caso particular cuando es aplicada a climas tropicales [15]. El investigador Saunier y sus colaboradores propusieron una expresión alternativa para las distribuciones de frecuencias para climas tropicales y como consecuencia lograron la siguiente expresión:[22]

$$K_{t,max} = 0.362 + 0.597 \quad (1.5)$$

donde K_{t,max} sigue siendo el valor máximo que adquiere el Índice de Claridad promedio diario en el mes de estudio.

1.7.4 Modelos de Cálculo de la Radiación Directa y Difusa

Los modelos de cálculo de radiación directa y difusa más referenciados en la literatura consultada son el de Erbs [7] y el desarrollado por Collares-Pereira y Rabl.[3]

Las ecuaciones que describen estos modelos serán desarrolladas en el epígrafe 2.4.

En Venezuela se han desarrollado otros modelos en función de variables meteorológicas para el caso particular de la zona de Bolívar en las estaciones de Macagua [2]. Sin embargo, estos modelos de regresión no son aplicables a otras zonas del país ni consideran la mayoría de las variables que se miden en las estaciones meteorológicas, por otro lado tampoco consideran la clasificación climática de las zonas de estudio.

1.8 Clasificaciones Climáticas

Las clasificaciones son herramientas analíticas que tienen por objeto disponer la información en forma simple y generalizada. Para clasificar es necesario establecer criterios, por lo que existirán tantas clasificaciones como criterios se establezcan. La división del globo en regiones o zonas climáticas delimitadas es difícil de determinar, ya que casi nunca se pasa de un clima a otro atravesando una frontera climática, de ahí que se hable de climas de transición. [20]

En Climatología, es posible organizar las estadísticas climatológicas a fin de que describan y delimiten los principales tipos de clima en términos cuantitativos. Como no existe una clasificación única que pueda ser usada en forma satisfactoria para un número ilimitado de fines, se han desarrollado diversas clasificaciones en función de los elementos de la naturaleza sensibles al clima: el hombre, la vegetación y el suelo.[20]

En general, las clasificaciones climáticas propuestas hasta el presente se pueden considerar en cuatro grupos, según estén fundamentadas en las temperaturas, las precipitaciones, combinaciones de ambos factores, o la distribución de los seres vivos (bioclimáticas)

1.8.1 Clasificación Climática de KÖPEEN

Otras clasificaciones como la de Köppen combinan precipitaciones, temperaturas y caracterizan cada zona climática por la formación vegetal resultante. La clasificación de Köppen es de 1918 aunque posteriormente este científico alemán la siguió perfeccionando y tras su muerte otros geógrafos y climatólogos, como el estadounidense Trewartha la han adaptado y mejorado. Esto permite que en la actualidad siga siendo la clasificación climática más utilizada. [12] El mapa climático resultante sigue siendo el más utilizado para la representación de las distintas regiones climáticas del planeta (America del sur), a pesar del paso de los años.(ver anexo 1)

La de Köppen está basada en la subdivisión de los climas terrestres dentro de cinco grandes tipos, los cuales están representados por las letras mayúsculas A, B, C, D y E. Cada uno de estos tipos de clima, excepto el B, está definido por criterios de temperaturas. (Anexo 2),

En la zona costera venezolana existen en forma generalizada en las estaciones seleccionadas para esta investigación dos tipos de climas predominantes según la clasificación de Köppen: el clima húmedo-seco tropical y el clima (Aw) y Clima de estepas y desiertos tropicales (Bs)

1.8.1.1 Clima húmedo-seco tropical (Aw)

La alternancia de las estaciones húmedas (monzón) y seca origina el desarrollo de una vegetación típica, generalmente conocida con el nombre de Sabana tropical o Sabana húmeda. Está asociada a un régimen climático en el que la aridez es lo suficientemente importante como para impedir que crezcan los árboles que produzcan un elevado grado de cobertura. Los árboles esparcidos, bastante separados uno de otros, permiten el desarrollo de un denso estrato inferior que puede ser de hierbas o arbustos. En este tipo de clima es posible cultivar aquellas especies tropicales no resistentes a heladas como el café, caña de azúcar, bananas, etcétera.

1.8.1.2 Climas Secos (B)

Los climas secos constituyen el reino de las xerófilas, sin bosques altos, con excepción de las cercanías de los ríos, así como reino de los desiertos, estepas y matorrales espinosos cuyas plantas poseen órganos de la más variada índole que sirven para restringir la transpiración.

Climas de estepa (BSh) Desiertos tropicales (BWh)

En fuerte contraste con el húmedo clima de la selva ecuatorial están los climas muy secos, predominantes en las áreas continentales dentro de las fajas de latitud comprendidas entre 13° de 25° centrados aproximadamente en los Trópicos de Cáncer y Capricornio. BWh: es una zona auténticamente árida o desierto tropical. En el desierto los déficits abarcan todo el año y dan lugar a un suelo desprovisto de vegetación que consiste en rocas desnudas, gravas, arenas o dunas móviles. Esto no significa que no existe la vegetación; por el contrario, hay numerosas especies que se extienden muy dispersas y carentes de forraje que proteja u oscurezca el suelo desnudo. Las plantas que viven en el desierto están adaptadas a largos periodos de sequedad mediante tallos y hojas gruesas y carnosas que almacenan el agua durante mucho tiempo y que no permiten la evaporación a través la superficie en contacto con el aire. Los suelos de los desiertos carecen de humus y son de color pardo o rojizo.

1.9 Conclusiones parciales

Según la bibliográfica consultada los investigadores coinciden en que para el correcto dimensionamiento de los sistemas de energía solar es necesario el conocimiento de la radiación solar en sus componentes difusa y directa

Ante la escasez de mediciones de la radiación directa y difusa se reportan en la literatura diversas ecuaciones y modelos en función del índice de claridad.

En Venezuela se han desarrollado estudios para correlacionar el índice de claridad con variables meteorológicas con resultados satisfactorios para la zona del estado Bolívar,

En la literatura consultada no se reporta ningún estudio para modelar el comportamiento de la radiación directa y difusa, y el índice de claridad en la

Zona costera venezolana que tome en cuenta el tipo de clima combinado con las variables meteorológicas disponibles.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO.

El problema que plantea la selección de una tecnología de energía solar para la captación y aprovechamiento de la misma parte del conocimiento del equipamiento existente, del costo, del porcentaje de radiación solar que puede convertirse en el servicio energético deseado, y de los niveles de radiación disponibles en la región que se analice. En este sentido es fundamental tener acceso a datos precisos de la radiación solar para el perfeccionamiento y selección de los sistemas de energía solar. Sin embargo, cuando no se dispone de mediciones de la radiación directa y difusa, estas se pueden calcular a partir de la obtención de los modelos que describen su comportamiento en función de parámetros meteorológicos disponibles.

Se reportan varios modelos para el cálculo de las componentes directa y difusa de la radiación solar pero todos ellos utilizan el índice de claridad. Este índice de claridad se calcula en función de factores astronómicos solamente (latitud, declinación terrestre, ángulo horario y día del año). Las posibilidades para modelar el índice de claridad y por ende la radiación directa y difusa, en función de variables meteorológicas disponibles en las estaciones fue desarrollado por primera vez en Venezuela por [2], no obstante, en la mencionada investigación el modelo estadístico obtenido es válido para el estado Bolívar y no considera la variabilidad del tipo de clima. Por esta razón, es necesaria la búsqueda de nuevos modelos más generales que incorporen además la clasificación climática. En este capítulo se expone una síntesis del método que se propone para la obtención de un modelo neuronal para el cálculo de la radiación directa y difusa en la zona de la costa venezolana.

2.1 Síntesis del método propuesto. Particularidades.

Para resolver este problema se parte de las siguientes consideraciones generales:

1-Se calcula la radiación directa y difusa utilizando el índice de claridad diario (K_T).

2-Se utiliza para la clasificación climática el Sistema de Köppen [12] y consideran los siguientes tipos climáticos para la región estudiada: Coro, Maracaibo, Maiquetía y Mene Grande clima Bs o sea, seco de estepa; Barcelona, Cumana, Margarita y Guiria clima Aw o sea, tropical húmedo y seco. El esquema general se muestra a continuación (Figura 2.1):

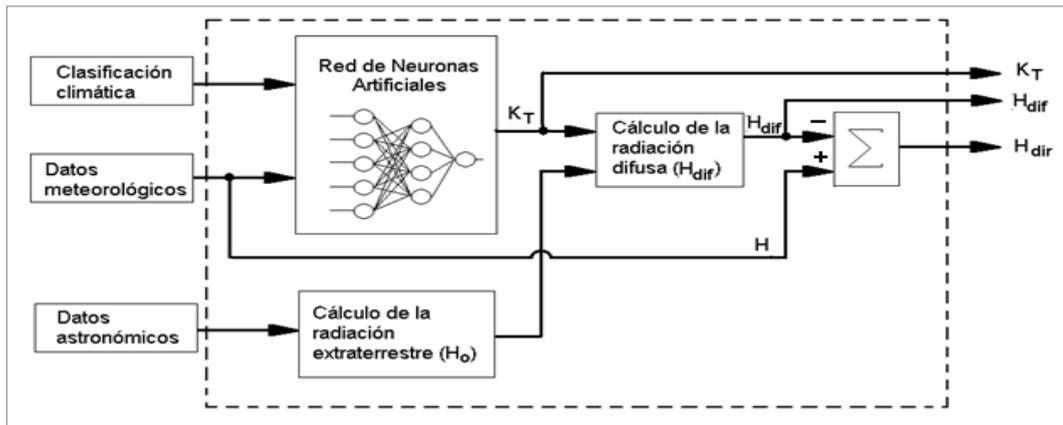


Figura 2.1 Diagrama general del modelo para el cálculo de la radiación directa y difusa.

2.2 Cálculo de la radiación solar extraterrestre sobre un plano horizontal.

La modelación de un sistema es la descripción matemática, con cierto grado de exactitud, del comportamiento del mismo y normalmente se basa en relaciones obtenidas a partir de principios físicos, en ocasiones complejos debido a las no linealidades presentes o a determinadas incertidumbres en el comportamiento de las variables.

Un modelo disponible para el cálculo de la radiación extraterrestre a partir de los datos astronómicos está definido por latitud (Φ), la declinación de la tierra (δ), el ángulo horario (ω) y el día del año (n).

Para ello se calcula la declinación como:

$$\delta = 23.45 \cdot \text{sen} \left[\frac{360 \cdot (n+284)}{365} \right] \quad (2.1)$$

Siendo n el día del año a partir del primero de enero. Se desprecian los días 29 de febrero de los años bisiestos.

A partir de la declinación se calcula para cada día el ángulo horario del ocaso solar por la expresión (2.1):

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\delta) \cdot \tan(\Phi)) \quad (2.2)$$

Con estos valores se calcula la radiación solar extraterrestre como:

$$H_o = \left(\frac{24}{\pi}\right) \cdot I_{CS} \cdot E_o \cdot \cos(\Phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \left(\text{sen}(\omega_s) - \left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot \omega_s \cdot \cos(\omega_s)\right) \quad (2.3)$$

Donde:

I_{CS} es la constante solar igual a 1 367 W/m² o 4 921 kJ/m²h.

E_o es la constante de corrección de la distancia tierra-sol para un día cualquiera del año y se calcula como:

$$E_o = 1 + 0.33 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \quad (2.4)$$

2.3 Cálculo del índice de claridad.

Como se muestra en la Figura 2.1 el índice de claridad se obtendrá de un modelo neuronal cuyas entradas son los datos meteorológicos y la clasificación climática de la zona que se analice, haciéndose independiente de los parámetros astronómicos. Sin embargo debe calcularse el índice de claridad a partir de estos últimos para utilizarlo como prototipo numérico y generar la data de índice de claridad que se utilizará en el entrenamiento de la red.

El índice de claridad (K_T) se calcula como:

$$K_T = \frac{H}{H_o} \quad (2.5)$$

Siendo H la radiación medida sobre un plano horizontal en la superficie de la tierra que es una de las variables meteorológicas medidas.

El K_T calculado por la expresión (2.5) no considera las variables meteorológicas ni la clasificación climática de la zona, y los modelos obtenidos por (tesis de

maestría) son modelos estadísticos pero en función de variables diferentes para cada zona del estado Bolívar. Un modelo general que correlacione variables semejantes para cada zona con el índice de claridad puede obtenerse empleando técnicas de Inteligencia Artificial, en particular las redes neuronales artificiales; (RNA). Las RNA pueden ser aplicadas para conseguir un modelo a partir de los datos meteorológicos reales y los valores de K_T calculados por (2.5) se utilizarán como objetivos (targets) en el entrenamiento de la red.

La utilidad de emplear RNA radica principalmente en que no se necesita conocer el proceso físico del sistema en sí mismo, siendo suficiente realizar un mapeo de las variables de entrada y salida de dicho sistema. A continuación se exponen los fundamentos necesarios para la comprensión del modelo obtenido.

2.3.1 Fundamentos de las RNA.

Las redes neuronales artificiales están inspiradas en el modo en el que las redes de neuronas biológicas del cerebro procesan información y son sistemas compuestos de elementos de cálculo básicos conectados en paralelo. Estos elementos básicos, llamados neuronas (Figura 2.2a), aceptan una entrada y producen un valor de salida basado generalmente en una función no lineal llamada función transferencia.

Las cantidades de entrada x_i se combinan con los pesos w_i y constituyen el argumento de la función transferencia para obtener las salidas. Se emplean diferentes tipos de funciones como la sigmoideal, lineal, hiperbólica, tangente, etc.

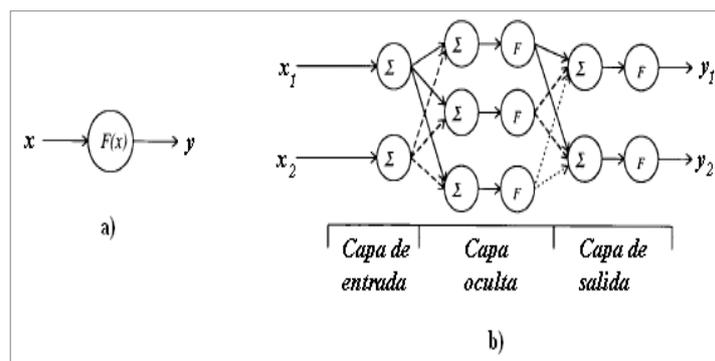


Figura 2.2 Neurona con función de activación $F(x)$ y red neuronal de tres capas.

Las neuronas simples se combinan para construir una red cuya arquitectura puede ser muy variada. En la Figura 2.2b) se aprecia que una red está compuesta por múltiples conexiones serie de neuronas individuales conectadas en paralelo (nodos). El conjunto de neuronas conectadas en paralelo se denomina capa.

La topología, las características de los nodos y las reglas de aprendizaje o entrenamiento, caracterizan el modelo de una RNA. La literatura técnica sugiere una red de alimentación progresiva que emplea el mecanismo matemático de retropropagación para “aprender y ajustar”, o sea, adaptar los pesos [10].

Los nodos empleados en la capa de entrada normalmente dependen del tipo y cantidad de los datos de entrada. El número de nodos en la capa oculta determina, en general, la capacidad de la red de aprender relaciones complejas entre las entradas y las salidas, siendo necesarias gran número de neuronas para el aprendizaje de patrones complejos. Aunque no se muestra en la Figura 2.2b), pueden ser necesarias múltiples capas ocultas para aumentar la capacidad de aprendizaje de la red. No existen reglas para tener un conocimiento previo del número de neuronas de la capa oculta o del número de capas ocultas necesarias, por lo que se requiere recurrir a una aproximación del método de prueba y error durante el diseño. El número de nodos en la capa de salida depende únicamente del número de salidas de la red. Las funciones transferencias, así como los algoritmos de entrenamiento y funciones de comportamiento así como el resto de las herramientas necesarias para el diseño, entrenamiento, simulación y manejo de redes neuronales se encuentra disponible en el Toolbox de redes neuronales del Matlab 10.0, empleado en esta aplicación [6].

2.3.2 Diseño y entrenamiento de las RNA.

Para el diseño y entrenamiento de las RNA se emplea la herramienta de redes neuronales **nftool** del Toolbox del Matlab 10.0. Las redes propuestas son de tres capas con propagación hacia adelante y algoritmo de aprendizaje con retropropagación. El vector de entrada está definido por los valores de la

radiación media diaria (H), la temperatura media (Tmed), humedad máxima (Humax), humedad mínima (Humin), humedad media (Humed), nubosidad (Nub), insolación (Insol), temperatura de bulbo húmedo (Tbh) y velocidad del viento (Vv). La salida de la red es el índice de claridad (K_T) calculado de los parámetros astronómicos de la región.

Para el diseño de la red se toma la propuesta predeterminada en el Matlab con 20 neuronas en la primera capa y en la última capa igual al número de variables salida. En la Figura 2.3 se muestra la arquitectura de las redes.

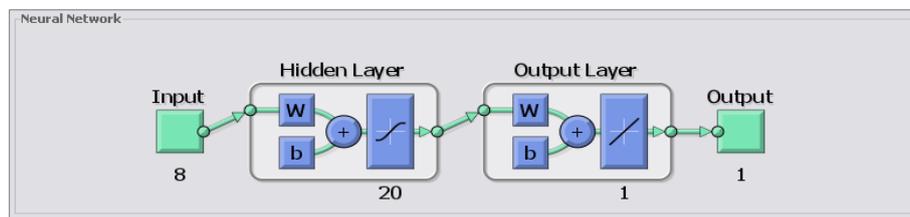


Figura 2.3. Arquitectura de las redes diseñadas.

La función transferencia de las neuronas de la capa oculta es *tansig* y la de la neurona de la última capa es *purelin*.

Las variables para el entrenamiento y validación se corresponden con valores experimentales medidos en las estaciones de la costa (Coro, Barcelona, Maiquetia, Margarita, Cumana, Guiria, Maracaibo y Mene Grande) en el periodo comprendido 2005-2009. Los datos fueron procesados eliminando los días en que no se encontraban completos y normalizándolos a los valores máximos dados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Valores máximos en el periodo analizado utilizados para la normalización

H	Tmed	Humax	Humin	Humed	Nub	Insol	Tbh	Vv
(MJ/m ²)	(°C)	(%)	(%)	(%)	(octavos)	(h)	(°C)	(m/s)
37.7	37.2	100	99	100	8.8	18.7	33.2	18.8

Los datos normalizados para las estaciones con clima Bs se muestran en el Anexo 3 y para las estaciones con clima Aw en el Anexo 4.

Para el entrenamiento se selecciona un 15% de los datos para validación y un 15% para prueba, dejando el 70% para entrenamiento.

Los datos de prueba permiten comprobar durante la etapa de entrenamiento la capacidad de generalizar que tiene la red diseñada, o sea cuán bien responde ante datos que no se encuentran dentro del conjunto de entrenamiento. Los datos e validación tienen el mismo propósito, pero son capaces de abortar el entrenamiento cuando las tendencias de comportamiento son diferentes.

Función de entrenamiento: El algoritmo de entrenamiento es Levenberg-Marquart (TRAINLM).

Función de comportamiento: La función de comportamiento empleada es el error medio cuadrático (MSE).

Las características del comportamiento de la red durante el entrenamiento para las estaciones con clima Bs y Aw de la costa venezolana se muestran en las Figuras 2.4 y 2.5. En estas figuras la curva en color rojo se corresponde con el comportamiento de la red para el conjunto de datos de prueba, la verde para los de validación y la curva en color azul para el conjunto de datos de entrenamiento. Como puede apreciarse, en ambos casos el perfil de la curva de prueba y validación sigue al de entrenamiento con un valor de comportamiento similar por lo que la red generaliza muy bien los resultados.

Los errores medios obtenidos para las redes se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Comportamiento del error medio cuadrático de las redes diseñadas

RNA	Clima_Bs	Clima_Aw
Conjunto de datos de entrenamiento	6.29×10^{-4}	7.67×10^{-4}
Conjunto de datos de validación	7.88×10^{-4}	9.06×10^{-4}
Conjunto de datos de prueba	7.61×10^{-4}	1.29×10^{-3}

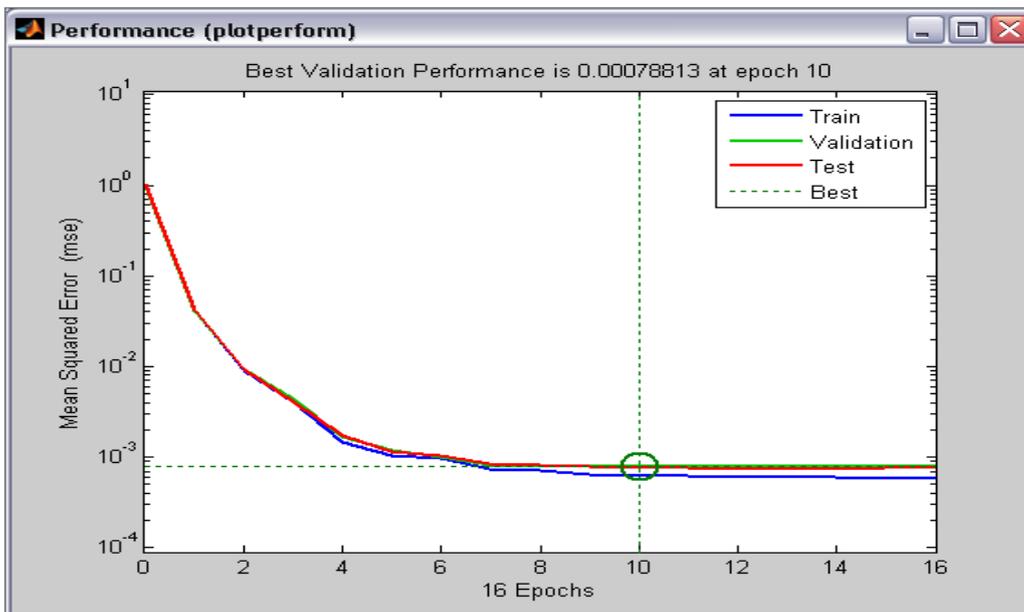


Figura 2.4 Comportamiento del entrenamiento de la RNA Clima_Bs.

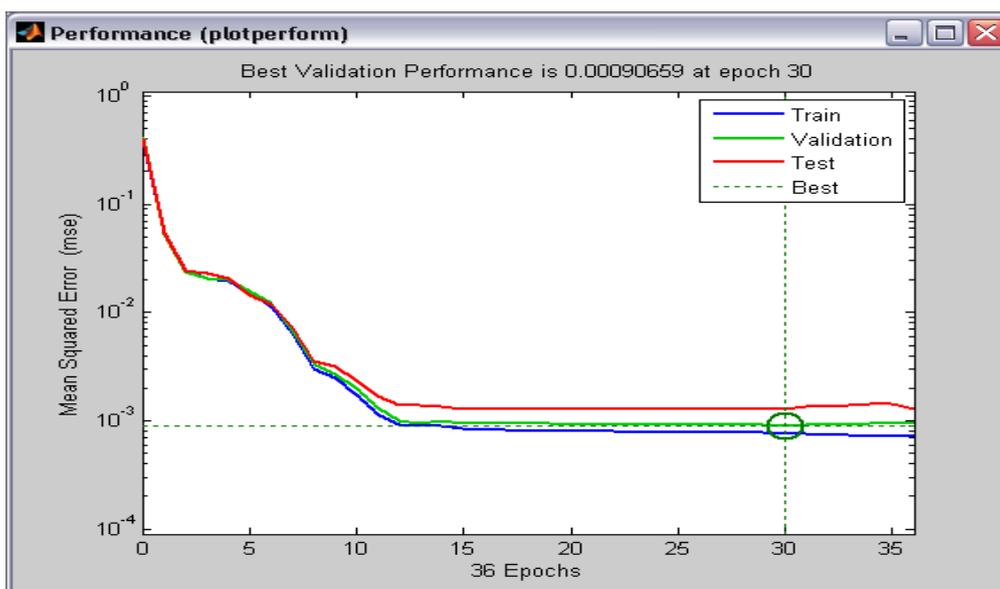


Figura 2.5 Comportamiento del entrenamiento de la RNA Clima_Aw.

2.3.3 Análisis post-entrenamiento.

A continuación se hacen algunos análisis de la respuesta de la red. El primer análisis que se realiza con la herramienta de redes neuronales del Matlab consiste en simular la red para todo el universo de datos disponibles

(entrenamiento, prueba y validación) y realizar una regresión lineal entre la salida de la red y los objetivos correspondientes (valores experimentales). Los resultados se muestran en las Figuras 2.6 y 2.7.

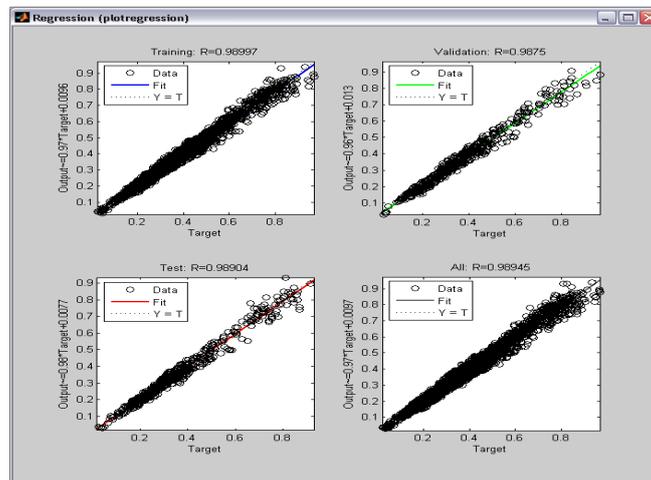


Figura 2.6 Correlación entre la salida de la red Clima_Bs y los objetivos.

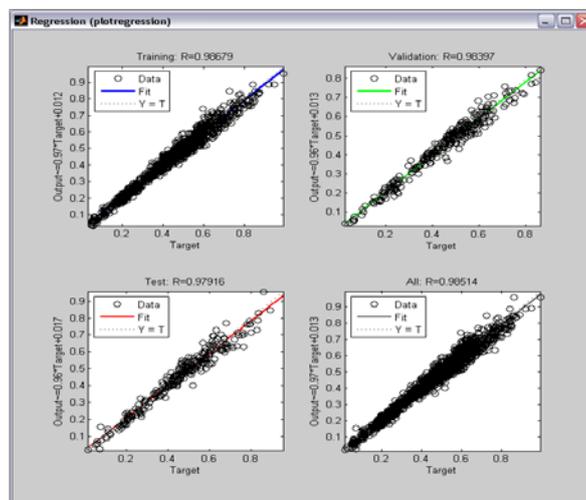


Figura 2.7 Correlación entre la salida de la red Clima_Aw y los objetivos.

Se puede apreciar que a pesar de ser este un problema complejo, los valores de índice de claridad obtenidos por los modelos neuronales siguen razonablemente bien el consumo real de los turbogeneradores con coeficientes de correlación R^2 mayores que 0.98 lo que sirve de validación al modelo obtenido.

Los errores obtenidos se ajustan a una distribución normal (Figuras 2.8 y 2.9) con los parámetros que se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros de la distribución de los errores de las redes neuronales.

RNA	Clima_Bs	Clima_Aw
μ	0.000551044	0.000919705
Σ	0.0259438	0.0294483

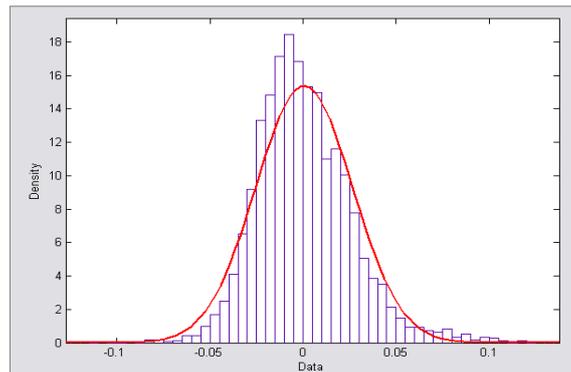


Figura 2.8. Distribución de los errores del modelo neuronal del índice de claridad Clima_Bs

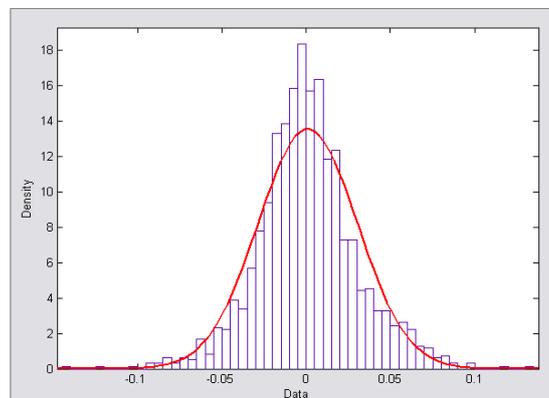


Figura 2.9. Distribución de los errores del modelo neuronal del índice de claridad Clima_Aw

La incertidumbre del resultado del modelo para la red se puede calcular con un 95% de confianza como:

$$\mu \pm 2\sigma$$

Donde μ es el valor medio de los errores del modelo y σ la desviación estándar. Para el caso de la red Clima_Bs este intervalo es (-0.1043, 0.1032)

Para el caso de la red Clima_Aw este intervalo es (-0.058, 0.0598)

2.4 Cálculo de la radiación directa y difusa.

La radiación difusa se calcula en función de la radiación global y del 'índice de claridad, o sea:

$$H_{dif} = f(H, K_T) \quad (2.6)$$

Entre los modelos internacionalmente aceptados se encuentran:

Modelo de Erbs [7] para el cálculo de radiación difusa:

Para $w_s \leq 81.4^\circ$ y $K_T <$

0.715

$$\frac{H_{dif}}{H} = 1 - 0.2727 \cdot K_T + 2.4495 \cdot K_T^2 - 11.9514 \cdot K_T^3 + 9.3879 \cdot K_T^4 \quad (2.7)$$

Para $w_s \leq 81.4^\circ$ y $K_T \geq 0.715$

$$\frac{H_{dif}}{H} = 0.143 \quad (2.8)$$

Para $w_s > 81.4^\circ$ y $K_T < 0.722$

$$\frac{H_{dif}}{H} = 1 + 0.2832 \cdot K_T - 2.5557 \cdot K_T^2 + 0.8448 \cdot K_T^3 \quad (2.9)$$

Para $w_s > 81.4^\circ$ y $K_T \geq 0.722$

$$\frac{H_{dif}}{H} = 0.175 \quad (2.10)$$

Modelo de Collares-Pereira y Rabl [5] para el cálculo de radiación difusa:

Para $K_T \leq 0.17$

$$\frac{H_{dif}}{H} = 0.99$$

(2.11)

Para $0.17 < K_T < 0.75$

$$\frac{H_{dif}}{H} = 1.188 - 2.272 \cdot K_T + 9.473 \cdot K_T^2 - 21.865 \cdot K_T^3 + 14.648 \cdot K_T^4 \quad (2.12)$$

Para $0.75 < K_T < 0.8$

$$\frac{H_{dif}}{H} = 0.632 - 0.54 \cdot K_T \quad (2.13)$$

Para $K_T \geq 0.8$

$$\frac{H_{dif}}{H} = 0.2 \quad (2.14)$$

A los efectos de esta investigación se emplean ambos con el propósito de comparar resultados.

La radiación directa se calcula como la diferencia entre la radiación global y la difusa, o sea:

$$H_{dir} = H - H_{dif} \quad (2.15)$$

2.5 Software en Matlab.

Para propósitos prácticos se automatizó el procedimiento descrito mediante el desarrollo de una aplicación en lenguaje Matlab denominada **Radiacion.m**.

Esta aplicación contiene un módulo de entrada de datos en el cual se introducen las variables meteorológicas y la clasificación climática de la zona. Posteriormente llama al modelo neuronal para el cálculo del índice de claridad y la rutina de cálculo de la radiación directa y difusa.

Los resultados que devuelve el programa se muestran en un modulo de salida en la ventana de comandos como se muestra en la Figura 2.10.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
*****
SOFTWARE PARA CALCULAR LA RADIACION SOLAR DIRECTA Y DIFUSA EN FUNCION
DE VARIABLES METEOROLOGICAS PARA LA ZONA DE LA COSTA VENEZOLANA
*****

ENTRADA DE DATOS

Introduzca entre comillas el nombre de la estacion meteorologica a la
que pertenece la zona a analizar. Estas son:Coro, Maiquetia, Guiria,
Margarita, Cumana, Barcelona, Maracaibo y Mene Grande

* Estacion = 'Margarita'

Datos meteorologicos

* Radiacion global media diaria en MJ/m^2, H = 6.4
* Temperatura media diaria en oC, Tmed = 22.9
* Humedad maxima media, (%), Humax = 92
* Humedad minima media, (%), Humin = 82
* Humedad media, (%), Humed = 91
* Nubosidad media, (octavos), Nub = 8
* Insolacion media diaria, (h), Insol = 2.5
* Temperatura de Bulbo humedo, (oC), Tbh = 21.7
* Velocidad media del viento, (m/s), Vv = 10.5
*****

RESULTADOS

Indice de claridad, KT = 0.177
Radiacion global medida, H = 6.400
Radiacion difusa por el modelo de Erbs, Hdif = 6.240
Radiacion directa por el modelo de Erbs, Hdir = 0.160
fx >>

```

Figura 2.10. Ventana de comando de Matlab mostrando la entrada de datos y los resultados del software Radiación.m

Las líneas de código del programa desarrollado son:

```

%Software para calcular radiacion directa y difusa en la costa de Venezuela
clear
clc
disp('          Universidad de Cienfuegos          ')
disp('    Centro de Estudios de Energia y Medio Ambiente    ')
disp('*****
**')
disp('SOFTWARE PARA CALCULAR LA RADIACION SOLAR DIRECTA Y DIFUSA
EN FUNCION')
disp(' DE VARIABLES METEOROLOGICAS PARA LA ZONA DE LA COSTA
VENEZOLANA  ')
disp('*****
**')
disp('*****
**')

```

```

%Modulo de entrada de datos
disp('')
disp('ENTRADA DE DATOS')
disp('')
disp('Introduzca entre comillas el nombre de la estacion meteorologica a la')
disp('que pertenece la zona a analizar. Estas son:Coro, Maiquetia, Guiria, ')
disp('Margarita, Cumana, Barcelona, Maracaibo y Mene Grande ')
disp('')
Estacion=input('* Estacion = ');
Cor=strcmp('Coro',Estacion);
Mar=strcmp('Maracaibo',Estacion);
Maiq=strcmp('Maiquetia',Estacion);
MenG=strcmp('Mene Grande',Estacion);
Barc=strcmp('Barcelona',Estacion);
Cum=strcmp('Cumana',Estacion);
Marg=strcmp('Margarita',Estacion);
Guir=strcmp('Guiria',Estacion);
while Cor==0 && Mar==0 && Maiq==0 && MenG==0 && Barc==0 && Cum==0 &&
Marg==0 && Guir==0
disp('El nombre de la estacion no ha sido correctamente escrito')
Estacion=input('* Estacion = ');
Cor=strcmp('Coro',Estacion);
Mar=strcmp('Maracaibo',Estacion);
Maiq=strcmp('Maiquetia',Estacion);
MenG=strcmp('Mene Grande',Estacion);
Barc=strcmp('Barcelona',Estacion);
Cum=strcmp('Cumana',Estacion);
Marg=strcmp('Margarita',Estacion);
Guir=strcmp('Guiria',Estacion);
end
disp('')
disp('Datos meteorologicos');
disp('')
H=input('* Radiacion global media diaria en MJ/m^2, H = ');
Tmed=input('* Temperatura media diaria en oC, Tmed = ');
Humax=input('* Humedad maxima media, (%), Humax = ');
Humin=input('* Humedad minima media, (%), Humin = ');
Humed=input('* Humedad media, (%), Humed = ');
Nub=input('* Nubosidad media, (octavos), Nub = ');
Insol=input('Insolacion media diaria, (h), Insol = ');
Tbh=input('* Temperatura de Bulbo humedo, (oC), Tbh = ');
Vv=input('* Velocidad media del viento, (m/s), Vv = ');
%Cargar las redes neuronales
load('Clima_Bs.mat');
load('Clima_Aw.mat');
% Valores maximos para normalizar

```

```

H_max=37.7; Tmed_max=37.2; Humax_max=100; Humin_max=99; Humed_max=100;
Nub_max=8.8;
Insol_max=18.7; Tbh_max=33.2; Vv_max=18.8;
% Vector de entrada
Entrada=[H/H_max; Tmed/Tmed_max; Humax/Humax_max; Humin/Humin_max;
Humed/Humed_max; Insol/Insol_max; Nub/Nub_max; Tbh/Tbh_max; Vv/Vv_max];
% Calculo del indice de claridad (KT)
if Cor==1 || Mar==1 || Maiq==1 || MenG ==1
    KT=sim(Clima_Bs,Entrada);
elseif Barc ==1 || Cum ==1 || Marg ==1 || Guir ==1
    KT=sim(Clima_Aw,Entrada);
end
% Calculo de la radiacion directa y difusa por el modelo de Erbs
% Como el angulo de ocaso solar Ws>81.4 grados para esta zona entonces el modelo se
reduce
% en funcion de KT.
if KT<0.722
    Hdif_H_erbs=1+0.2832*KT-2.5557*KT^2+0.8448*KT^3;
else
    Hdif_H_erbs=0.175;
end
Hdif_erbs=Hdif_H_erbs*H; % Radiacion difusa por modelo de erbs
Hdir_erbs=H-Hdif_erbs; % Radiacion directa por modelo de erbs

disp('*****
**')
disp(' ')
disp('RESULTADOS')
disp(' ')
fprintf('Indice de claridad, KT = %6.3f\n',KT)
fprintf('Radiacion global medida, H = %6.3f\n',H)
fprintf('Radiacion difusa por el modelo de Erbs, Hdif = %6.3f\n',Hdif_erbs)
fprintf('Radiacion directa por el modelo de Erbs, Hdir = %6.3f\n',Hdir_erbs)

```

2.6 Conclusiones parciales.

1- El modelo desarrollado para el cálculo del índice de claridad de la costa venezolana está basado en redes neuronales artificiales y considera los factores meteorológicos que se miden normalmente en las estaciones existentes, por lo que es fácil de implementar.

2- Los modelos obtenidos para los dos tipos de clima existentes en la zona costera responden satisfactoriamente y los resultados de la simulación se correlacionan con los datos experimentales con un $R^2 > 0.97$ para ambos casos.

3- A partir de la información disponible y de los modelos neuronales del índice de claridad se calcula la radiación directa y difusa utilizando los modelos internacionalmente reconocidos. El modelo en su conjunto incorpora de manera implícita la clasificación climática de la zona al diseñar una red para el tipo de clima Bs y otra para el tipo Aw.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Para verificar la calidad del método de cálculo de la radiación directa y difusa se procede a realizar un análisis comparativo entre los resultados arrojados por el programa y los resultados obtenidos por otros autores para diferentes regiones durante los años comprendidos entre el 2005 y el 2009.

La aplicación en Matlab descrita en el capítulo anterior que incorpora los modelos neuronales para el cálculo del Índice de claridad (K_T), puede ser utilizado también para la realización de pronósticos. Actualmente existen diferentes métodos para realizar un pronóstico que dependen básicamente de la experiencia de los especialistas, de la cantidad de información disponible, del nivel de dificultad que presenta la situación y del grado de exactitud o confianza necesaria. Para comprobar la utilidad del modelo como pronosticador se comparan los resultados del mismo con los obtenidos para el año 2010 cuya data meteorológica no ha sido tenido en cuenta en la elaboración del modelo.

Debido a que se utilizan distintas ecuaciones de cálculo para estimar la radiación directa y difusa y que generalmente la modelación de estas magnitudes depende del índice de claridad (K_T) y de la combinación de este y del ángulo del ocaso solar, se hace difícil realizar una comparación directa de los resultados, no obstante, es posible realizar una comparación en órdenes de magnitud. Por esta razón se comparará los resultados del software con los cálculos realizados para el modelo de Erbs y el de Collares-Pereira y Rabl.[5]

3.1 Comportamiento de la radiación difusa con el índice de claridad.

Internacionalmente se han realizado diferentes investigaciones que muestran un comportamiento similar de la fracción de la radiación difusa sobre superficies horizontales en función del índice de claridad. Una correlación semejante se plantea en la Figura 3.1 para la zona de la costa Venezolana a partir de los resultados del modelo neuronal desarrollado y se observa que sigue el mismo comportamiento que el especificado por los estudios realizados para distintas regiones del planeta lo que corrobora la calidad del modelo desarrollado.

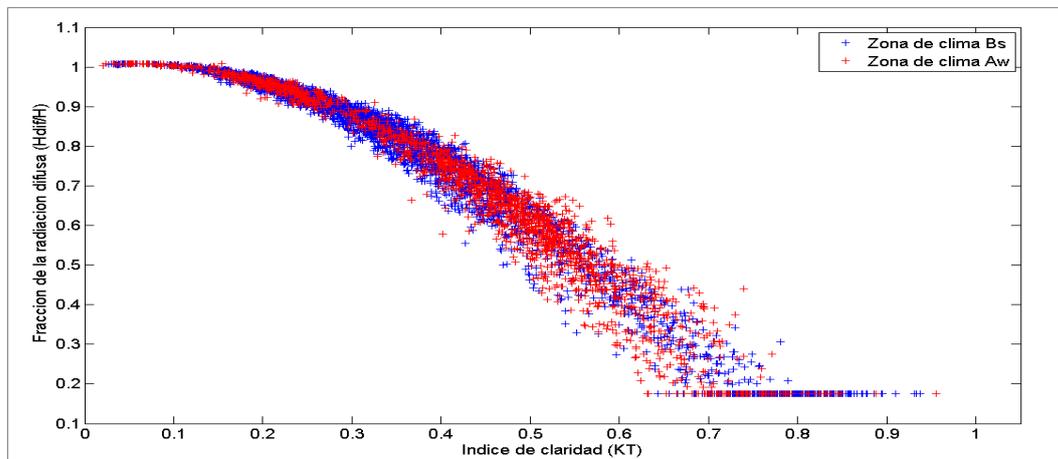


Figura 3.1 Comportamiento de la fracción difusa de la radiación diaria en función del índice de claridad K_T calculado por la red neuronal artificial para las zonas climáticas de la costa Venezolana.

El comportamiento del índice de claridad o transparencia de la atmósfera se ajusta a una distribución gaussiana con $\mu=0.44$ y $\sigma=0.16$. La curva de probabilidad acumulativa se muestra en la Figura 3.2 donde se puede observar que la probabilidad de que el índice de claridad sea menor de 0.5 es del orden del 64% aproximadamente. Si esto se asocia con los resultados mostrados en la Figura 3.1, se puede entonces inferir que hay un 64% de probabilidad de que la fracción de radiación difusa sea igual o superior a la fracción de radiación directa para esta zona.

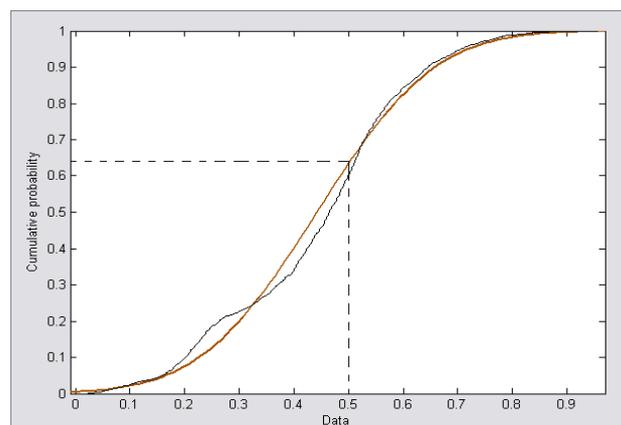


Figura 3.2. Distribución del índice de claridad para la zona con clima Aw.

3.2 Selección del tamaño de la muestra a analizar

Es necesario determinar la calidad de la estimación de la radiación directa y difusa en la zona de la costa utilizando el modelo desarrollado para el periodo 2005-2009.

Con el objetivo de aumentar la rapidez del estudio y no realizar cálculos excesivos se considerara solo una muestra de toda la data disponible. Una expresión para el cálculo del tamaño de la muestra para datos globales es la siguiente:

$$n = \frac{k^2 \cdot N \cdot p \cdot q}{e^2 \cdot (N - 1) + k^2 \cdot p \cdot q} \quad (3.1)$$

N: es el tamaño de la población.

k: es una constante que depende del nivel de confianza que asignemos. El nivel de confianza indica la probabilidad de que los resultados de nuestra investigación sean ciertos: un 95,5 % de confianza es lo mismo que decir que nos podemos equivocar con una probabilidad del 4,5%.

Los valores k más utilizados y sus niveles de confianza son:

k	1,15	1,28	1,44	1,65	1,96	2	2,58
Nivel de confianza	75%	80%	85%	90%	95%	95%	99%

(Por tanto si pretendemos obtener un nivel de confianza del 95% necesitamos poner en la ecuación (3.1) k=1,96)

e: es el error muestral deseado. El error muestral es la diferencia que puede haber entre el resultado que obtenemos preguntando a una muestra de la población y el que obtendríamos si preguntáramos al total de ella.

p: proporción de individuos que poseen en la población la característica de estudio. Este dato es generalmente desconocido y se suele suponer que $p=q=0.5$ que es la opción más segura.

q: proporción de individuos que no poseen esa característica, es decir, es 1-p.

n: tamaño de la muestra.

Para el caso de esta investigación se considera como población (N) el total de mediciones completas de que se disponen para una región con una clasificación climática determinada. Para el caso del clima Bs se dispone de una data con N=3467 y para el caso del clima Aw con N=1895.

El error aceptable (e) fijado para esta investigación es del 5% y el nivel de confianza del 95%.

El tamaño de la muestra se selecciona para ambos casos por la expresión (3.1) como:

Para clima Bs

$$n = \frac{1.96^2 \cdot 3467 \cdot 0.5 \cdot 0.5}{0.05^2 \cdot (3467 - 1) + 1.96^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5} = 345.92 \approx 346$$

Para clima Aw

$$n = \frac{1.96^2 \cdot 1895 \cdot 0.5 \cdot 0.5}{0.05^2 \cdot (1895 - 1) + 1.96^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5} = 319.54 \approx 320$$

3.3 Selección de la muestra.

Una vez que se ha determinado el tamaño de la muestra probabilística con base a estimados de la población, es necesario determinar cómo seleccionar los elementos muestrales. Las unidades de análisis o los elementos muestrales se eligen siempre aleatoriamente para asegurar que cada elemento tenga la misma probabilidad de ser elegido.

Aunque pueden emplearse tablas de números aleatorios existentes, una excelente alternativa para generar números aleatorios está disponible con Matlab, que contiene un comando para ello y evita el uso de las tablas. El comando utilizado es **randi(N,n,1)**. Con este comando se genera un vector columna de tamaño n con números aleatorios comprendidos entre un límite inferior que siempre será 1 y un límite superior igual al último número de la población (N). Estos son los casos que pasaran a integrar la muestra probabilística con la que se realizaran los análisis de comportamiento tanto para el caso de la data de clima Bs como para clima Aw.

3.4 Análisis de resultados con la data de clima Bs.

3.4.1. Comparación con el método de Erbs.

Con los 346 elementos muestrales seleccionados para la data de clima Bs se calculó la radiación directa y difusa tanto por el método de Erbs como el de Collares-Pereira y Rabl.

Para el caso de la radiación difusa por el método de Erbs se aprecia en la Figura 3.3 que hay correspondencia entre los resultados obtenidos por el modelo propuesto que incluye las RNA y el método convencional que calcula el índice de claridad directamente por la ecuación (2.5).

Si se considera el método convencional en el cual se mide H y se calcula H_0 con los datos astronómicos como el cálculo más acertado y se toma como referencia, entonces la diferencia entre ellos podemos considerarla como el error del modelo y su distribución se muestra en la Figura 3.4. Esta distribución muestra que los errores son pequeños del orden de $\pm 1 \text{ MJ/m}^2$.

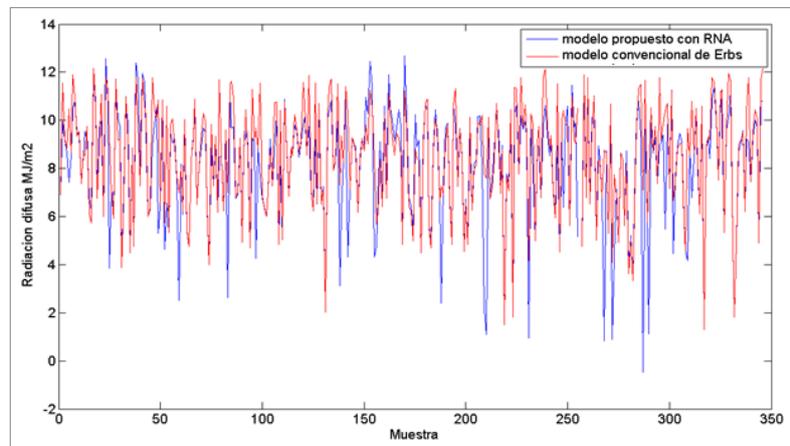


Figura 3.3. Radiación difusa según Erbs por el modelo neuronal y por el método convencional.

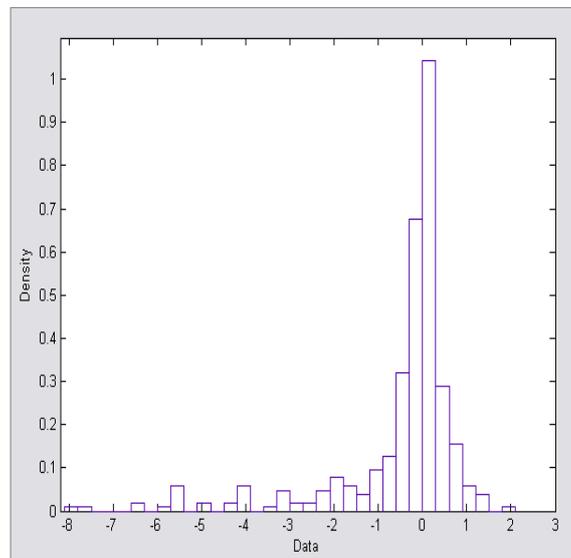


Figura 3.4. Distribución de los errores del modelo propuesto con relación al convencional para la radiación difusa por el método de Erbs.

La radiación directa también exhibe el mismo comportamiento como se aprecia en las Figuras 3.5 y 3.6 respectivamente.

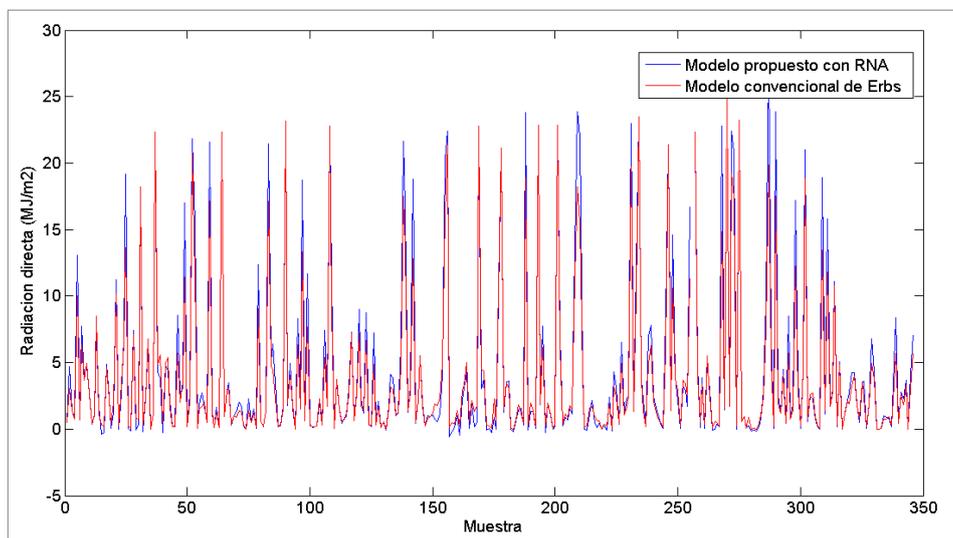


Figura 3.5. Radiación directa según Erbs por el modelo neuronal y por el método convencional.

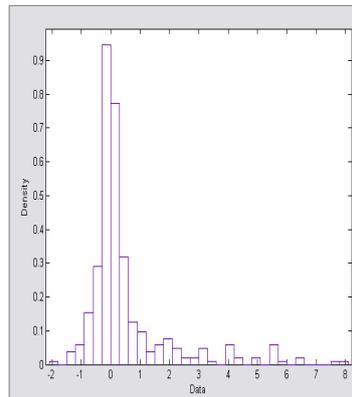


Figura 3.6. Distribución de los errores del modelo propuesto con relación al convencional para la radiación directa por el método de Erbs.

3.4.2. Comparación con el método de Collares-Pereira y Rabl.

Para el caso del modelo propuesto por Collares-Pereira y Rabl la diferencia entre el modelo propuesto y el convencional es significativa obteniéndose resultados completamente erróneos y excesivamente altos con el modelo propuesto. Esto se explica en virtud de que Collares-Pereira y Rabl no consideran el ángulo del ocaso solar, solo el valor de K_T y las desviaciones en el cálculo del mismo resultantes de la RNA conducen a este comportamiento erróneo (Figura 3.7).

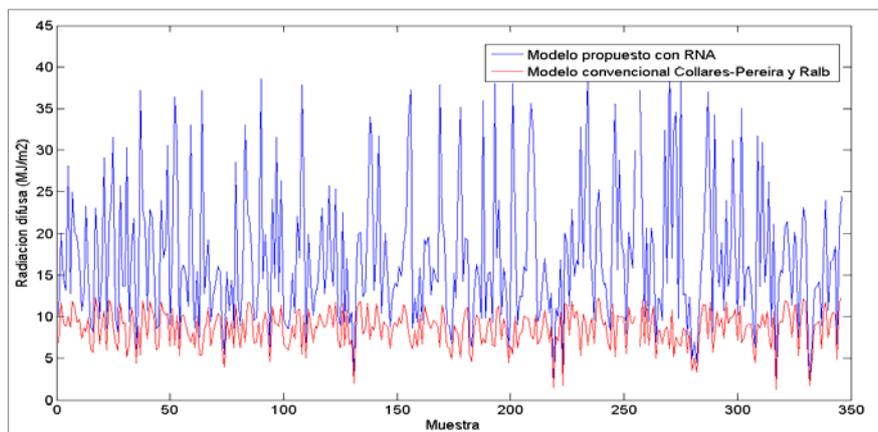


Figura 3.7. Radiación difusa según Collares-Pereira y Rabl por el modelo neuronal y por el método convencional.

Los errores del modelo para la radiación difusa se concentran en valores que están en el orden de 4 a 10 MJ/m² como se aprecia en la Figura 3.8.

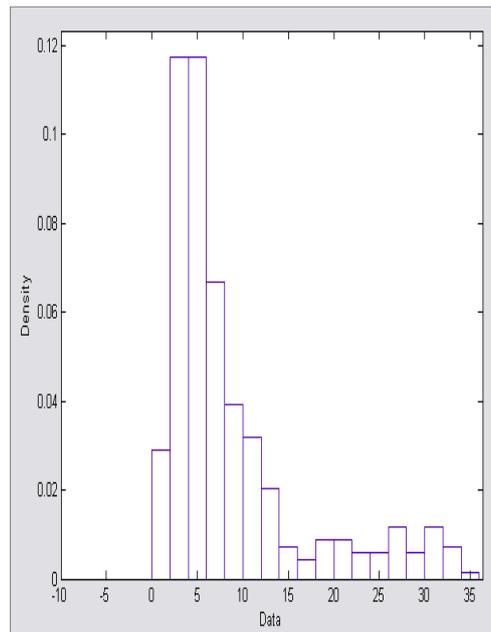


Figura 3.8. Distribución de los errores del modelo propuesto con relación al convencional para la radiación difusa por el método de Collares-Pereira y Rabl.

Como la radiación directa se calcula por diferencia entre la radiación global y la difusa, por supuesto que el perfil de la radiación directa obtenida por el modelo propuesto tampoco se ajusta a los resultados calculados por el modelo de Collares-Pereira y Rabl (Figura 3.9) y los errores en este caso son del mismo orden que para la difusa pero por defecto (Figura 3.10) ya que por lo anteriormente explicado la radiación difusa da resultados superiores incluso a la global, o sea el modelo no es correcto ya que es muy sensible a pequeñas variaciones del K_T .

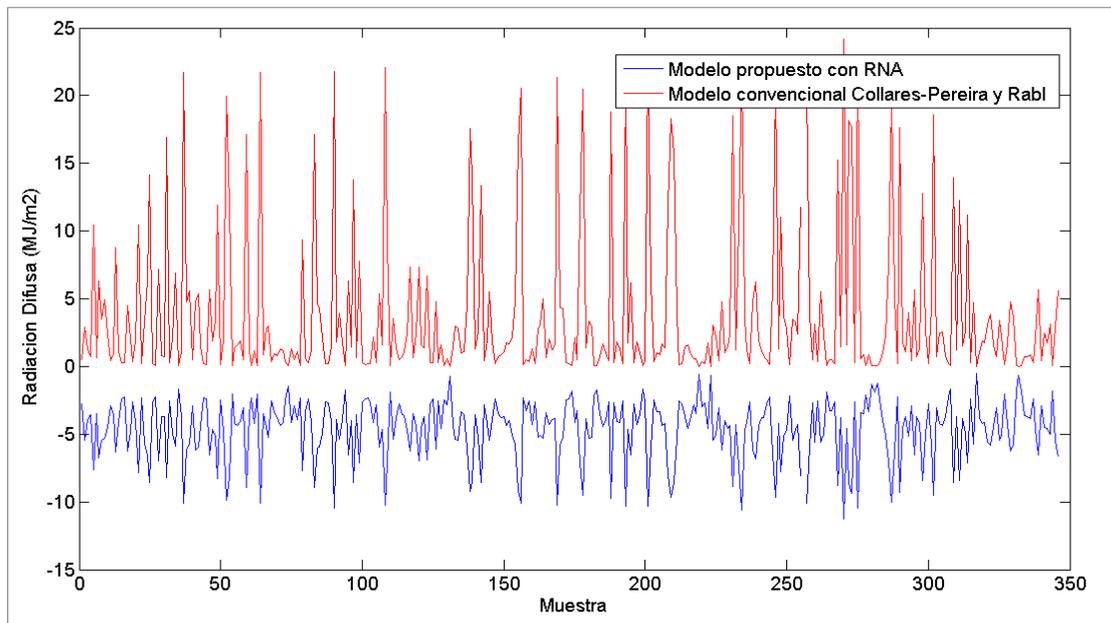


Figura 3.9. Radiación directa según Collares-Pereira y Rabl por el modelo neuronal y por el método convencional.

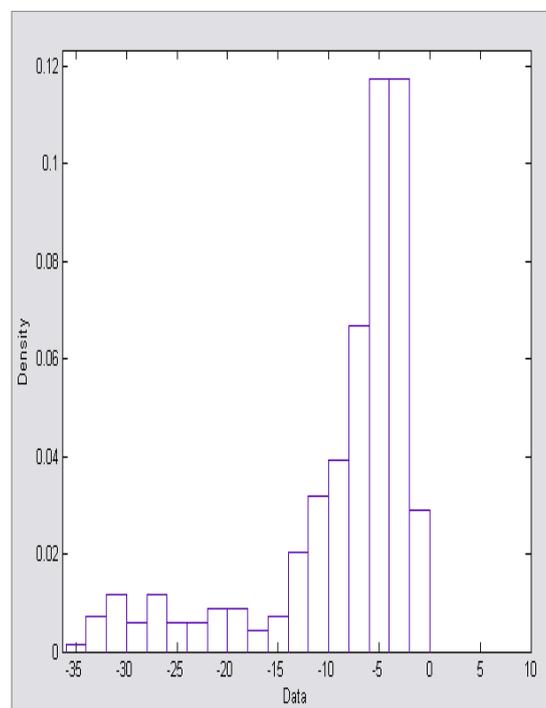


Figura 3.10. Distribución de los errores del modelo propuesto con relación al convencional para la radiación directa por el método de Collares-Pereira y Rabl.

3.5 Análisis de resultados con la data de clima Aw.

3.5.1. Comparación con el método de Erbs.

Para comprobar el modelo para la zona de la costa venezolana con clasificación climática Aw se selecciona una muestra de 320 elementos según se explicó en los epígrafes 3.2 y 3.3.

Con esta muestra se calculó la radiación directa y difusa por el método de Erbs. Se debe aclarar que como se explicó el modelo de Collares-Pereira y Rabl son muy sensibles a las variaciones de K_T (ya que solo dependen de esta variable) y por lo tanto las desviaciones resultantes de la red de neuronas artificiales (RNA) invalidan su uso ya que los resultados finales son completamente erráticos como se evidenció en el epígrafe anterior para la muestra de la data para zona climática Bs. Por esta razón no se hará el análisis para el modelo de Collares-Pereira y Rabl,

Para el caso de la radiación difusa se aprecia en la Figura 3.11 que hay correspondencia entre los resultados obtenidos por el modelo propuesto con RNA y el método convencional con el índice de claridad calculado por (2.5).

Igualmente la distribución de los errores con relación al método convencional en el cual se mide H y se calcula H_o con los datos astronómicos, indica que el modelo es adecuado y puede ser utilizado para estimar la radiación difusa partiendo de los datos meteorológicos que normalmente se miden en las estaciones.

El valor esperado de los errores es de 0.35 MJ/m^2 (Ver Figura 3.12).

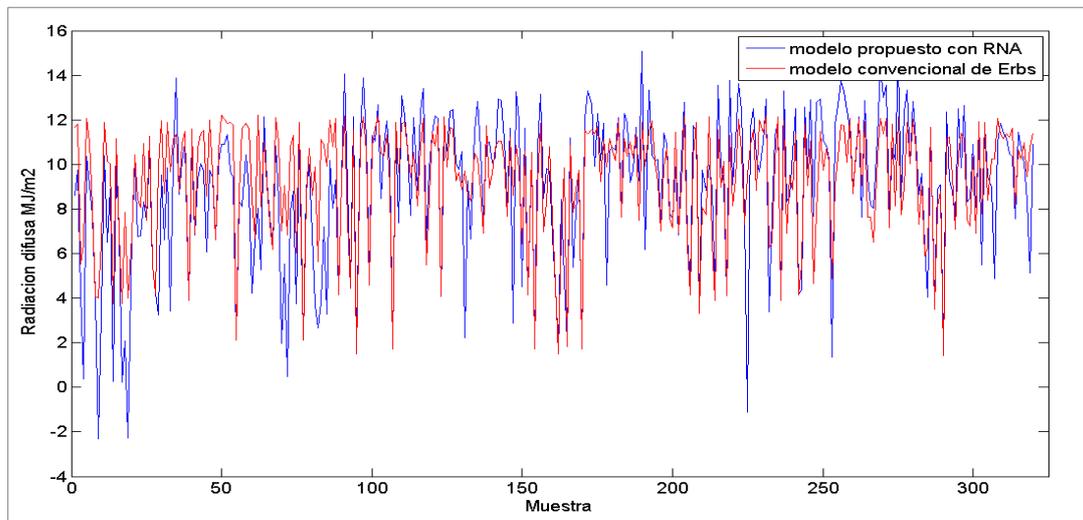


Figura 3.11. Radiación difusa según Erbs por el modelo neuronal para la zona con clima Aw y por el método convencional.

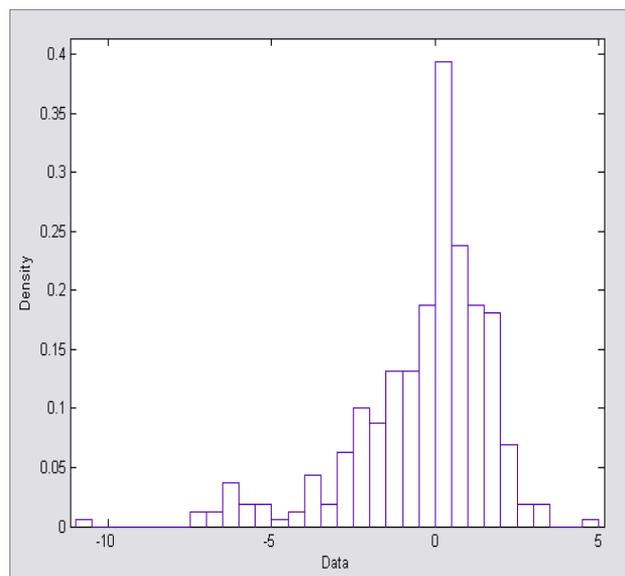


Figura 3.12. Distribución de los errores del modelo propuesto para clima Aw con relación al convencional para la radiación difusa por el método de Erbs.

Para el caso de la radiación directa, los resultados son similares ya que esta es el resultado de la diferencia entre la radiación global diaria y la difusa. En la

Figura 3.13 se observa la concordancia entre los resultados del modelo propuesto y el método convencional de Erbs para la muestra seleccionada. La distribución de los errores se aprecia en la Figura 3.14.

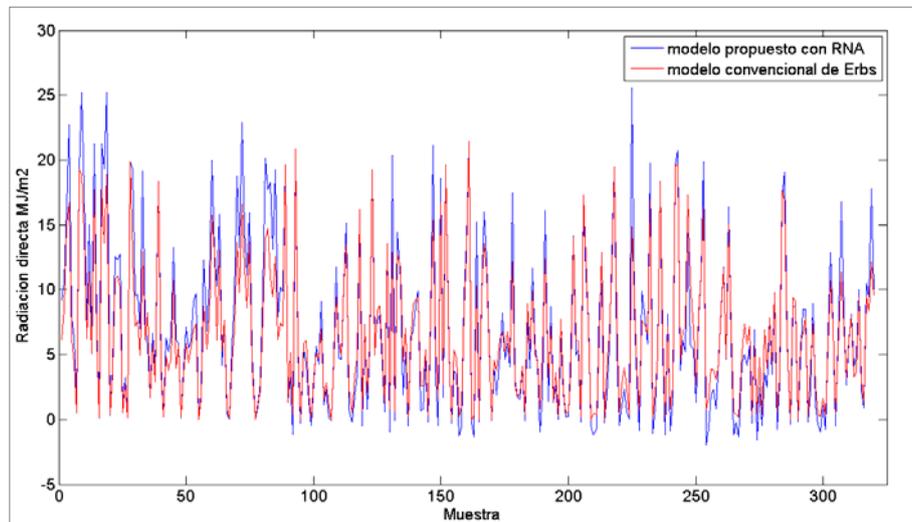


Figura 3.13 Radiación directa según Erbs por el modelo neuronal para la zona con clima Aw y por el método convencional.

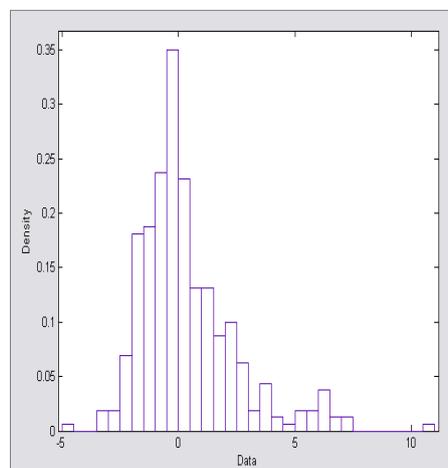


Figura 3.14. Distribución de los errores del modelo propuesto para clima Aw con relación al convencional para la radiación directa por el método de Erbs.

Hay que destacar que los resultados mostrados son válidos para los sitios geográficos donde están ubicadas las estaciones meteorológicas y que cubren la costa venezolana. Para ampliar el estudio a otras regiones del país es necesario realizar un estudio más profundo y un procesamiento geoestadístico.

3.6 Resultados con los datos del 2010

Con el modelo propuesto se pueden realizar pronósticos de la radiación si se conoce el de las variables meteorológicas involucradas. Con el objetivo de verificar la calidad de un pronóstico con el modelo desarrollado se utilizan los datos del año 2010, los cuales no fueron utilizados ni para el entrenamiento, ni para la validación ni para la prueba durante el proceso de aprendizaje de las redes neuronales artificiales.

En el Anexo 5 se muestran los datos del año 2010 para la estación de Mene Grande que fue seleccionada como caso de estudio.

Los resultados comparativos de los dos modelos se observan en la Figura 3.15 y 3.16 para la radiación difusa y directa respectivamente en esta estación meteorológica.

Se puede observar que la respuesta de los dos modelos consigue el mismo comportamiento para ambos tipos de radiaciones de manera que el método puede ser empleado como un predictor en el caso de que se tenga un pronóstico de las variables meteorológicas y se requiera estimar la radiación. La diferencia media calculada entre los dos modelos para las componentes difusa y directa es de 0.13 MJ/m^2 y la desviación estándar es de 0.73 .

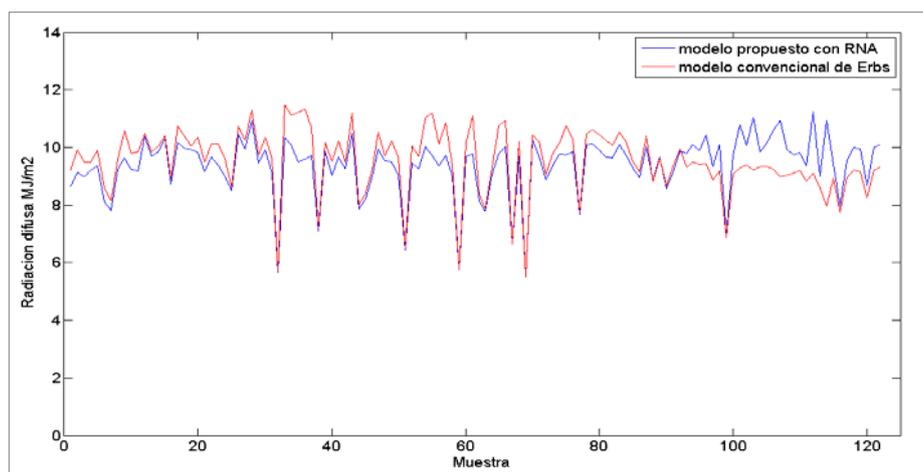


Figura 3.15. Radiación difusa estimada por el modelo con RNA y el método convencional de Erbs estación de Mene Grande.

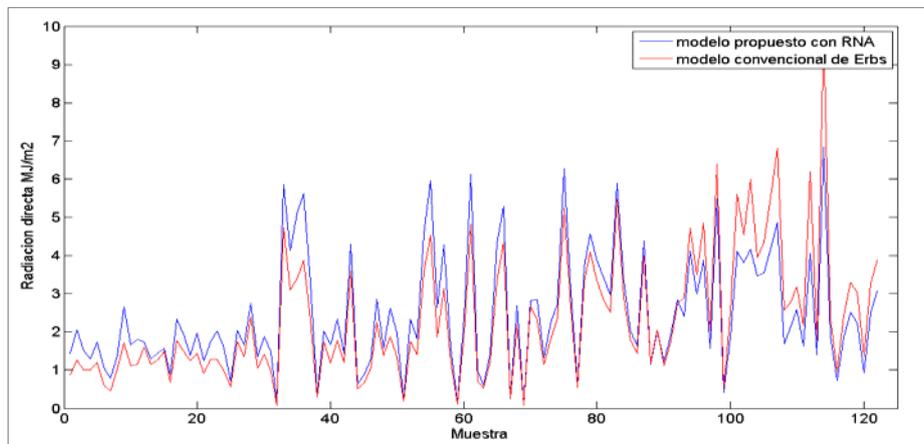


Figura 3.16. Radiación directa estimada por el modelo con RNA y el método convencional de Erbs estación de Mene Grande.

3.7 Conclusiones parciales.

- 1- De acuerdo a la relación establecida entre la fracción de radiación difusa y el índice de claridad calculado por el modelo neuronal desarrollado, se puede deducir que la variabilidad del tipo climático para la región de la costa venezolana tiene poca influencia y el comportamiento de ambas RNA es similar.
- 2- El perfil de la curva de los datos de la fracción de radiación difusa con respecto al índice de claridad sigue el mismo comportamiento que las correlaciones de estas magnitudes establecidas por otros investigadores lo que indica una respuesta acertada desde el punto de vista físico de las redes neuronales desarrolladas.
- 3- Se utiliza un muestreo aleatorio simple para seleccionar una muestra de la data meteorológica para ambos tipos de clima y realizar los análisis comparativos de los resultados. No obstante existir una buena asociación entre las variables meteorológicas y la radiación directa y difusa utilizando RNA para la determinación del índice de claridad, esto solo se logra empleando el modelo de Erbs ya que el propuesto por Collares-Pereira y Rabl es solamente dependiente de K_T y por lo tanto los resultados son afectados por los errores introducidos por las RNA.

4- El modelo propuesto se puede utilizar con el propósito de pronosticar la radiación o realizar estudios prospectivos si se dispone de las variables meteorológicas. Los resultados aplicados a la estación de Mene Grande para los datos del 2010 dan diferencias entre los modelos distribuidas alrededor de un valor esperado de 0.13 MJ/m^2 y con una desviación estándar de 0.73.

CONCLUSIONES.

- 1- En la bibliografía consultada se constata que debido a la poca disponibilidad de los datos de radiación solar, los investigadores han optado por desarrollar modelos y ecuaciones que permitan estimar esta variable a partir de otros factores que pueden ser astronómicos o meteorológicos o ambos.
- 2- Los modelos desarrollados en Venezuela para la determinación de la radiación difusa y directa en función de variables meteorológicas son modelos matemáticos polinomios que correlacionan el índice de claridad con la insolación y otras variables como la humedad relativa, la presión atmosférica o la temperatura de bulbo seco. No se reporta hasta el momento un estudio para la zona de la costa venezolana que correlacione variables meteorológicas medidas en las estaciones con el índice de claridad de la zona.
- 3- Para la región estudiada el comportamiento de la fracción difusa de la radiación media diaria con relación al índice de claridad presenta el mismo patrón que los referenciados en otros estudios internacionales para diferentes zonas del planeta. En este caso la influencia del tipo de clima sobre el índice de claridad es despreciable ya que para ambas zonas climáticas el comportamiento es similar.
- 4- Los modelos neuronales desarrollados tienen la ventaja de que pueden ser reentrenados con datos actualizados por lo que cada cierto tiempo se puede corregir cualquier desviación en los mismos. Con la combinación de estos modelos y las ecuaciones de Erbs se puede conocer las componentes difusa y directa de la radiación solar y el índice de claridad.
- 5- El modelo matemático de Collares-Pereira y Rabl que sirve para la estimación de la radiación solar difusa presentó resultados erróneos al ser combinados con el modelo neuronal del índice de claridad ya que es altamente sensible a variaciones de este último, siendo el de Erbs el adecuado que considera también el ángulo de ocaso solar.

6- En la zona de la costa venezolana existe un 64% de probabilidad de que la fracción de radiación difusa sea igual o mayor a la fracción de radiación directa durante todo el año.

7- La radiación difusa diaria para esta zona permanece aproximadamente constante y es del orden de 8.54 MJ/m^2 para clima Bs y 9.12 MJ/m^2 para clima Aw.

8- El modelo propuesto se comporta con excelente capacidad de predicción lo que se constata en los resultados obtenidos para la estación de Mene Grande con la información meteorológica del año 2010 dando diferencias entre los modelos distribuidas alrededor de un valor esperado de 0.13 MJ/m^2 y con una desviación estándar de 0.73.

RECOMENDACIONES

1. Aplicación de esta modelación para ser utilizada en los cálculos pronósticos para otras regiones de Venezuela.
2. Utilización de los cálculos de índice de claridad y radiación directa y difusa para la selección de sistemas de energía solar.
3. Debido a las características climáticas y geográficas de la zona costera de Venezuela y su similitud en cuanto a la radiación solar se sugiere la utilización de un modelo único para ambos tipos de climas,
4. Obtener la modelación de las diferentes zonas climáticas de Venezuela utilizando la metodología de utilizada a fin de obtener de forma predictiva el Índice de claridad, para dimensionar los sistemas de energía solar a utilizar.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Algelvis, R. y Lazarde, C. 1990. "Curvas características de la distribución de la radiación solar en la región central de Venezuela". Tesis. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
2. Amézquita, U. 2005, "Estudio estadístico de la radiación Solar global en el Estado Bolívar y la influencia de las variables meteorológicas en el índice de claridad", Tesis. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
3. Bendt, P., Collares-Pereira, M. and Rabl, A. 1981. "The Frequency Distribution of Daily Insolation Values", Solar Energy, Vol 27. pp. 1- 5.
4. Brinkworth, B.J. 1982. Energía Solar para el Hombre. Blume Editorial. Primera Reimpresión.
5. Collares-Pereira, M. and Rabl, A. 1979. "The Average Distribution of Solar Radiation Correlations between Difusse and Hemisferical and between Daily and Hourly Insolation Values", Solar Energy. Vol 22. pp. 155- 164.
6. Demuth, H., Beale, M. Neural network toolbox for use with Matlab. User's Guide. Version 3.0. Enero 1998.
7. Erbs, D.G., Klein, S.A. and Duffie, J.A. 1982. "Estimation of The Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly – Average Global Radiation", Solar Energy. Vol 28. N° 4. pp. 293- 302.183.
8. Guevara Díaz, J. M. Meteorología. 1995. Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Primera Reimpresión.
9. Guevara Díaz, J. M. 2003. Métodos de Estimación y Ajuste de Datos Climatológicos. Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Segunda Edición.
10. Halpin, S. M., Burch, R. F. "Applicability of neural networks to industrial and commercial power systems: A tutorial overview". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 5, Sept. 1997. pp 1355-1361

11. Hollands, K.G.T and Huget, R.G. 1983. "A Probability Density Function for The Clearness Index with Applications", Solar Energy. Vol 30. pp. 195- 200.
12. Köppen. 1931. Grundrisse der Klimakunde. Berlin, Walter de Gruyter Co.
13. Lafontant, J. Y Flores, M. 1990. Distribución Territorial del Potencial Solar en Venezuela. Ministerio de Energía Y Minas. División de Nuevas Energías. Cota Tj810.f56. 1990 (biblioteca).
14. Lui, B.J.H y Jordan, R.C. 1960. The Internationship and Caharacteristic Distribution of Direc, Diffuse an Total Solar Radiation.Solar Energy. N° 4. 1-19
15. Layrisse, M.E. y Ledanois, J.M. 1983. Distribución entre la Radiación Total y Directa en un Clima Tropical Húmedo de Montaña. Su Aplicación a la Selección de un Sistema de Producción de Electricidad. Universidad Simón Bolívar. Departamento de conversión de Energía. Cota 621.471 I846. 1983.
16. Limones, Y. y Fariñas, J. 1989. "Distribución Solar en la Zona Este de Venezuela". Tesis. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería Mecánica.
17. Orgill, J. F and Hollands, K.G.T. 1977. "Correlation Equation for Hourly Diffuse Radiation on a Horizontal Surface", Solar Energy. Vol 19. pp. 357-359.185
18. Page, J. K. 1961 The Estimacion of Monthly Mean Values of Daily Total Shot-Ware Radiation on Vertical and Inclined Surfaces from Sunshine Records for Latitudes.Paper N° 35/5/98.
19. Rodríguez. A. y Ovando, G. 2003. Estimación de la Radiación Solar Global en la provincia de Córdoba, Argentia y su empleo en un modelo de rendimiento potencial de papa. INta, Argentina 45- 62
20. Rojas y Saluso J. 1987. Informe Climático de la Provincia. Publicación Técnica N° 14. INTA Parana.
21. Rodriguez, H. y González, F. 1992 "Manual de Radiación Solar En Colombia, Bogota.

22. Saunier, G. Y and Reddy, T.A. 1987. "A Monthly Probability Distribution Funtion of Daily Global Irradiation Values Appropriate for Both Tropical and Temperate Locations", Solar Energy. Vol 38. N° 3. pp. 169- 177.

23. Sidrahch de Carmona, M y Mora López, L. 2002. "Generación de Años Tipo de radiación Global y de Temperatura para su Uso en el Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos". Jornadas Fier 2002. Universidad de Málaga..

24. Torres, B. y Chacin, R. 1988. "Curvas Características de Radiación Solar del Oriente del País". Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería Mecánica

OTRAS REFERENCIAS CONSULTADAS

<http://www.estadistico.com/articulos>

http://www.scep.ensmp.fr/eng/tele/datafusion/abs_beyer1997.html

<http://www.censolar.org/>

<http://espanol.weather.com/>

<http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/Insolacion.pdf>

<http://www.sciencedirect.com/>

[http://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/fotomet/CLA/Gacetilla%20CL%20\(1\).pd](http://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/fotomet/CLA/Gacetilla%20CL%20(1).pdf)

f

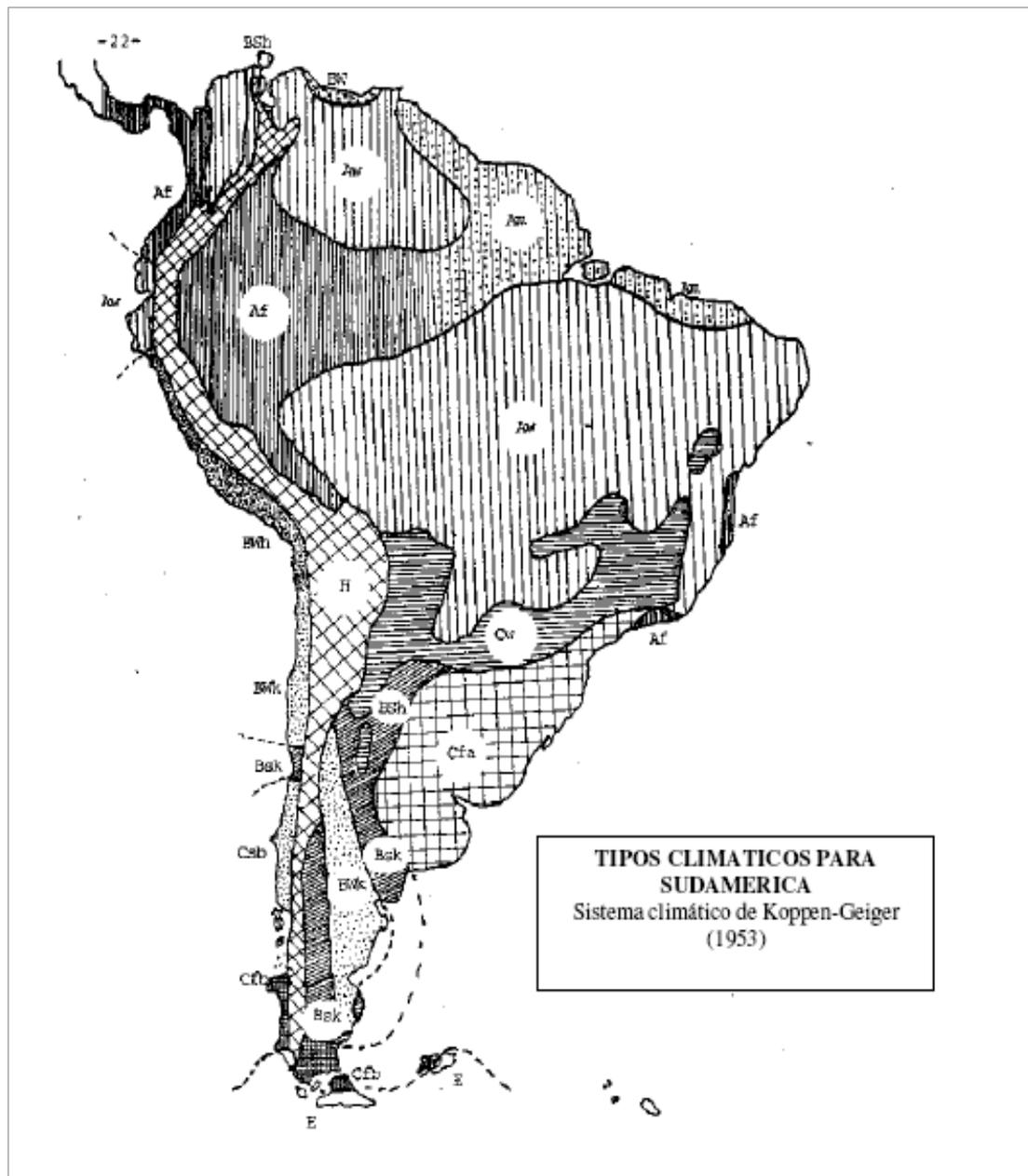
http://www.soda-is.com/eng/helioclim/helioclim_principle_decomposition.html

http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n clim%C3%A1tica de K%C3%

[B6ppen](#)

ANEXOS

Anexo 1



Anexo 2

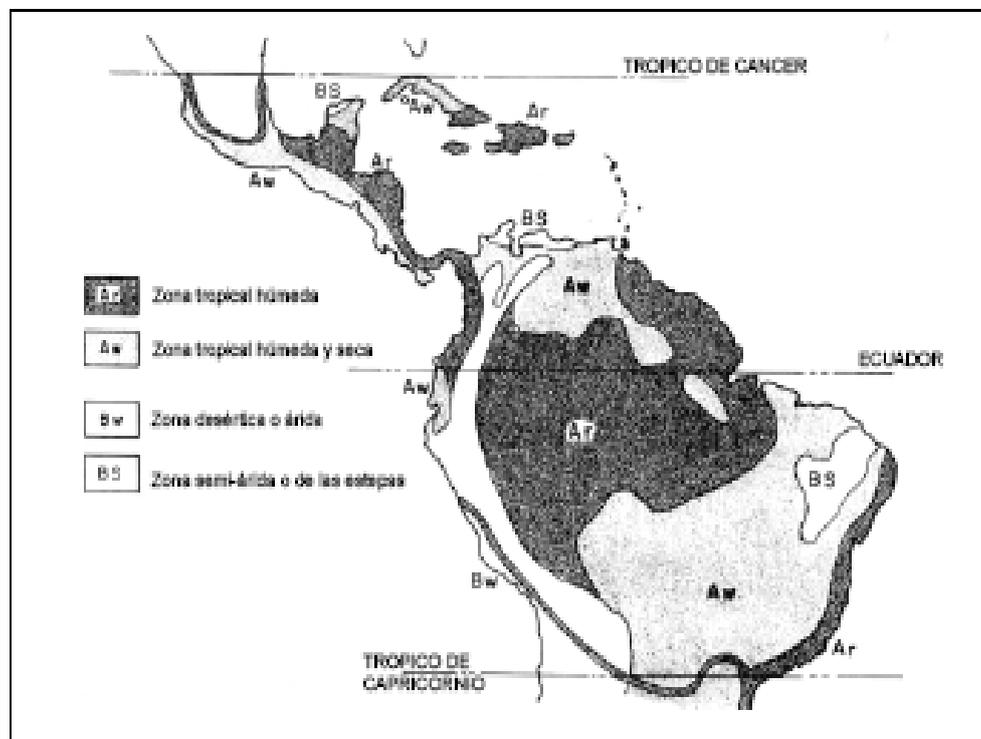


Fig. B-1. — Zonas climáticas de Köppen, según las modificaciones de Trewanth (1968) para el neotrópico

**Grupos climáticos
fundamentales**

Tipos climáticos

Clima tropicales lluviosos	A..... Af: sin estación seca sin invierno Aw: con invierno seco
Climas secos	B..... BS: climas de estepas BW: climas de desiertos tropicales
Climas templados lluviosos con invierno suave.	C..... Cf: sin estación seca Cw: con invierno seco Cs: con verano seco
Climas boreales o de nieve	D..... Df: sin estación seca y de bosque(*) Dw: con invierno seco
Climas polares	E..... ET: tundra EW: desierto polar hielos perpetuos.

(*) Los climas boreales o de nieve y de bosque no existen en el hemisferio sur.

Anexo 3

Datos normalizados para las estaciones con clima Bs

ver archivo

Anexo 4

Datos normalizados para las estaciones con clima Aw

ver archivo

Anexo 5

Datos del año 2010 para la estación de Mene Grande

[Ver archivo](#)

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Algelvis, R. y Lazarde, C. 1990. "Curvas características de la distribución de la radiación solar en la región central de Venezuela". Tesis. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
2. Amézquita, U. 2005, "Estudio estadístico de la radiación Solar global en el Estado Bolívar y la influencia de las variables meteorológicas en el índice de claridad", Tesis. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
3. Bendt, P., Collares-Pereira, M. and Rabl, A. 1981. "The Frequency Distribution of Daily Insolation Values", Solar Energy, Vol 27. pp. 1- 5.
4. Brinkworth, B.J. 1982. Energía Solar para el Hombre. Blume Editorial. Primera Reimpresión.
5. Collares-Pereira, M. and Rabl, A. 1979. "The Average Distribution of Solar Radiation Correlations between Difusse and Hemisferical and between Daily and Hourly Insolation Values", Solar Energy. Vol 22. pp. 155- 164.
6. Demuth, H., Beale, M. Neural network toolbox for use with Matlab. User's Guide. Version 3.0. Enero 1998.
7. Erbs, D.G., Klein, S.A. and Duffie, J.A. 1982. "Estimation of The Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly – Average Global Radiation", Solar Energy. Vol 28. N° 4. pp. 293- 302.183.
8. Guevara Díaz, J. M. Meteorología. 1995. Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Primera Reimpresión.
9. Guevara Díaz, J. M. 2003. Métodos de Estimación y Ajuste de Datos Climatológicos. Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Segunda Edición.
10. Halpin, S. M., Burch, R. F. "Applicability of neural networks to industrial and commercial power systems: A tutorial overview". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 5, Sept. 1997. pp 1355-1361

11. Hollands, K.G.T and Huget, R.G. 1983. "A Probability Density Function for The Clearness Index with Applications", Solar Energy. Vol 30. pp. 195- 200.
12. Köppen. 1931. Grundrisse der Klimakunde. Berlin, Walter de Gruyter Co.
13. Lafontant, J. Y Flores, M. 1990. Distribución Territorial del Potencial Solar en Venezuela. Ministerio de Energía Y Minas. División de Nuevas Energías. Cota Tj810.f56. 1990 (biblioteca).
14. Lui, B.J.H y Jordan, R.C. 1960. The Internationship and Caharacteristic Distribution of Direc, Diffuse an Total Solar Radiation.Solar Energy. Nº 4. 1-19
15. Layrisse, M.E. y Ledanois, J.M. 1983. Distribución entre la Radiación Total y Directa en un Clima Tropical Húmedo de Montaña. Su Aplicación a la Selección de un Sistema de Producción de Electricidad. Universidad Simón Bolívar. Departamento de conversión de Energía. Cota 621.471 l846. 1983.
16. Limones, Y. y Fariñas, J. 1989. "Distribución Solar en la Zona Este de Venezuela". Tesis. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería Mecánica.
17. Orgill, J. F and Hollands, K.G.T. 1977. "Correlation Equation for Hourly Diffuse Radiation on a Horizontal Surface", Solar Energy. Vol 19. pp. 357-359.185
18. Page, J. K. 1961 The Estimacion of Monthly Mean Values of Daily Total Short-Wave Radiation on Vertical and Inclined Surfaces from Sunshine Records for Latitudes.Paper Nº 35/5/98.
19. Rodríguez. A. y Ovando, G. 2003. Estimación de la Radiación Solar Global en la provincia de Córdoba, Argentina y su empleo en un modelo de rendimiento potencial de papa. INta, Argentina 45- 62
20. Rojas y Saluso J. 1987. Informe Climático de la Provincia. Publicación Técnica Nº 14. INTA Parana.
21. Rodriguez, H. y González, F. 1992 "Manual de Radiación Solar En Colombia, Bogota.

22. Saunier, G. Y and Reddy, T.A. 1987. "A Monthly Probability Distribution Funtion of Daily Global Irradiation Values Appropriate for Both Tropical and Temperate Locations", Solar Energy. Vol 38. N° 3. pp. 169- 177.

23. Sidrahch de Carmona, M y Mora López, L. 2002. "Generación de Años Tipo de radiación Global y de Temperatura para su Uso en el Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos". Jornadas Fier 2002. Universidad de Málaga..

24. Torres, B. y Chacin, R. 1988. "Curvas Características de Radiación Solar del Oriente del País". Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería Mecánica

OTRAS REFERENCIAS CONSULTADAS

<http://www.estadistico.com/articulos>

http://www.scep.ensmp.fr/eng/tele/datafusion/abs_beyer1997.html

<http://www.censolar.org/>

<http://espanol.weather.com/>

<http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/Insolacion.pdf>

<http://www.sciencedirect.com/>

[http://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/fotomet/CLA/Gacetilla%20CL%20\(1\).pd](http://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/fotomet/CLA/Gacetilla%20CL%20(1).pdf)

f

http://www.soda-is.com/eng/helioclim/helioclim_principle_decomposition.html

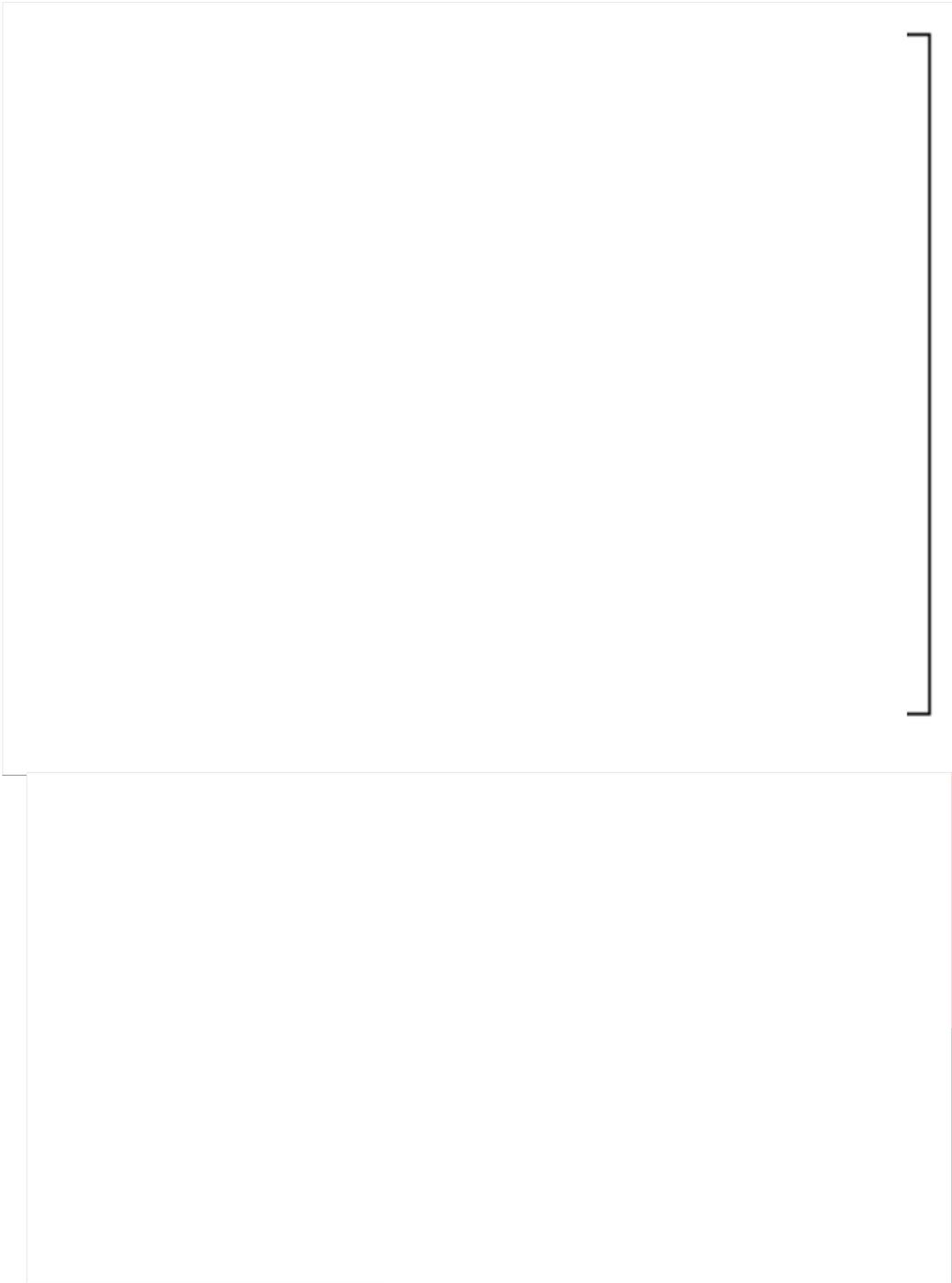
http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n clim%C3%A1tica de K%C3%

[B6ppen](#)

ANEXOS

Anexo 1

Anexo 2



Anexo 3

Datos normalizados para las estaciones con clima Bs

ver archivo

Anexo 4

Datos normalizados para las estaciones con clima Aw

ver archivo

Anexo 5

Datos del año 2010 para la estación de Mene Grande

[Ver archivo](#)