



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org

RESERVADA

DP/ID/SER.A/1039
22 julio 1988
ESPAÑOL/INGLES

17003

APLICACION DE LA ENERGIA EOLICA

DP/URU/87/028

URUGUAY

Informe técnico: Aspectos de Evaluación de la Energía Eólica*

Preparado para el Gobierno del Uruguay
por la Organización de las Naciones Unidas para
el Desarrollo Industrial

Basado en el trabajo del Sr. Vicente R. Barros
Experto en Energía Eólica

Oficial encargado: J. Fürkus, Subdivisión de Industrias Mecánicas

Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial
Viena

* El presente documento no ha pasado por los servicios de edición de la Secretaría de la ONUDI.

I N D I C E

	Pág.
Abstract	1
1. Introducción	2
2. Curso sobre el estudio del recurso eólico	2
3. Recomendaciones	3
4. Anexo I: Programa y bibliografía del curso	4-9

ABSTRACT

This report refers to the second mission of the wind energy expert. The mission commenced on March 10 and ended on March 22, 1988, as scheduled.

During the mission the consultant lectured on aspects of wind energy evaluation, including an introduction dealing with meteorological aspects of wind. There were 12 participants from 4 institutions. The course required 20 hours; 250 pages of manuscript notes and figures were handed out to the participants. An appendix with the material covered and references is included in the report.

1. INTRODUCCION

El presente informe corresponde a la segunda misión del experto en Energía eólica dentro del proyecto para ayudar al Uruguay a desarrollar capacidad propia para la instalación de sistemas eólicos conversores de energía en el mediano y el largo plazo.

La misión se realizó desde el 10 al 22 de marzo de 1988 en la sede de la Dirección Nacional de Energía, en la ciudad de Montevideo.

El tema exclusivo de la misión fue dictar un curso relativo a la medición, cálculo, tabulación e interpretación de información relevante por su aplicación a la energía eólica.

Esta segunda misión (de 13 días) surgió como una división en dos de la misión originalmente planificada de 25 días. La primera fue cumplida en enero y febrero de 1988, abarcando todos los temas asignados, excepto el entrenamiento del personal, debido a que por esa fecha un buen número de potenciales participantes estaba haciendo uso de sus licencias anuales.

El consultor desea resaltar el permanente apoyo y comprensión por parte de las autoridades de la Dirección Nacional de Energía, lo cual facilitó el desarrollo exitoso de esta misión.

2. CURSO SOBRE EL ESTUDIO DEL RECURSO EOLICO

Para el estudio del recurso eólico conviene un conocimiento mínimo de la circulación general y de las circulaciones locales del viento y de las leyes físicas que lo gobiernan. En este sentido y debido a que la mayor parte de los participantes eran ingenieros o estudiantes avanzados de ingeniería, se juzgó oportuno dar un curso introductorio sobre Meteorología, orientado específicamente a este auditorio, cubriendo los temas más esenciales para la comprensión posterior de los aspectos concretos del recurso eólico.

En consecuencia, el curso se dictó en dos tramos, cuyos contenidos y bibliografía utilizada están detallados en el Anexo I.

Del curso introductorio participaron los siguientes profesionales :

Ing. Ricardo Cosentino	Dirección Nacional de Energía
Ing. Mario Olagüe	" " "
Ing. Jorge Barbot	" " "
Ing. Cristina Matos	" " "
Ing. Carlos López	Instituto de Mecánica de los Fluidos ; Fac. de Ingeniería
Ing. José Cataldo	" " " "
Ing. Laura Yelpe	" " " "
Estudiante Conrado Langari	" " " "
Estudiante Virginia Xavier	" " " "
Ing. Carlos Miguez	Administración Nacional de Usinas y Transmisiones del Estado

En la segunda parte del curso se sumaron los siguientes profesionales :

Lic. Carlos Serrentino
Lic. Mario Bidegain

Dirección Nacional de Meteorología
"

El curso abarcó 20 horas de clases, y se facilitó la rapidez de la exposición mediante la exhibición de la mayor parte del material a través de transparencias. Asimismo se facilitaron a los participantes apuntes manuscritos con un total de 250 carillas.

3. RECOMENDACIONES

Dado que la zona por estudiar en el proyecto es de topografía compleja, se hace necesario que el estudio del recurso eólico se haga mediante modelos de flujo sobre este tipo de terreno.

Para una mejor comprensión de la metodología por aplicar se RECOMIENDA que durante la próxima misión se incluya un curso sobre el análisis de flujos sobre terrenos complejos y su tratamiento mediante modelos.

Montevideo, 22 de marzo de 1988

PROGRAMA DEL CURSO

SOBRE EL ESTUDIO DEL RECURSO EOLICO

UNIDAD INTRODUCTORA : Elementos de Meteorología.

TEMA 1 - Bases físicas para el estudio de la atmósfera

Ley de conservación del momento en un fluido rotante. Fuerzas inerciales, de gravedad, de presión, viscosas, fuerzas de Coriolis y centrífuga. Ecuación de estado en la atmósfera. Conservación de la masa. Conservación de la energía. Sistemas de ecuaciones hidrodinámicas.

Bibliografía :

- G. Haltiner. Numerical weather prediction.
N.York, 1971.
- J. Holton. Introduction to dynamical meteorology.
International Geophysical Series, Vol. 23
Academic Press, 1979.

TEMA 2 - Casos particulares de las ecuaciones hidrodinámicas

Equilibrio hidrostático, variación de la presión con la altura. Equilibrio geostrófico. Viento térmico. Consecuencias del equilibrio geostrófico e hidrostático en la distribución espacial de presión, temperatura y viento. Movimientos inerciales; el jet nocturno de capas bajas.

Análisis de escala de las ecuaciones hidrodinámicas. Condiciones y grado de aproximación del balance geostrófico, número de Rossby. Análisis de la ecuación de continuidad. Aproximación de Boussinesq y otras aproximaciones.

Bibliografía : Idem a tema 1.

TEMA 3 - Circulaciones locales

Ecuación de vorticidad, circulación de brisa de mar y de tierra, de montaña y valle. Modelo de brisa del Río de la Plata.

Bibliografía :

- G. Haltiner y Martin. Dynamical and physical meteorology.
Mc Graw Hill, 1967.
- G. Berri. La circulación de brisa en el Río de la Plata. Tesis UBA, 1987.

TEMA 4 - Estabilidad vertical en la atmósfera

Temperatura potencial. Gradiente adiabático. Criterios de estabilidad. Método de la parcela. Relación entre estabilidad vertical y el perfil vertical del viento.

Bibliografía :

- G. Haltiner y Martin. Dynamical and physical meteorology.
Mc Graw Hill, 1967.

TEMA 5 - Radiación electromagnética en la atmósfera

Radiación solar y terrestre. Radiación incidente en el tope de la atmósfera. Absorción, difusión y reflexión en la atmósfera. Albedo, masa óptica. Emisión desde su superficie. Balance de radiación. Proceso de calentamiento en la atmósfera, ciclo diurno, influencia sobre la estabilidad y el viento. Efecto del tipo de superficie en la temperatura del aire. Características de climas continentales y marítimos.

Bibliografía :

- R.E. Munn. Descriptive micrometeorology.
Academic Press, 1966, N.York.
- G. Haltiner y Martin. Dynamical and physical meteorology.
Mc Graw Hill, 1967.
- K. Y. Kondratiev. Radiation processes in the atmosphere.
WMO N° 309, 1972.
- Antes, Cahir, Fraser y Panofsky. The atmosphere.
Ch. Merric Pub. Co., 1983.

TEMA 6 - Circulación general de la atmósfera

Balance de radiación en función de la latitud. Transporte de calor. Régimen de circulaciones simétricas y turbulentas.

Experiencias con cilindros rotantes ; circulaciones meridionales, transporte de momento angular.

Circulación zonal observada. Estructura térmica vertical de la atmósfera. Relaciones entre la estructura térmica y el viento. El viento en superficie a escala planetaria y el campo de presiones asociado.

Breve descripción del régimen de Rossby de latitudes medias. Zonas frontales. Modelo de ciclón de Bjerknes. Modificación de las condiciones de estabilidad y viento en capas bajas por el desplazamiento de las masas de aire.

Bibliografía :

- E. Lorentz. The nature and theory of the general circulation of the atmosphere.
WMO N° 212 TP 113, 1967.
- Antes, Cahir, Fraser y Panofsky. The atmosphere.

Ch. Merril Publishing Co., 1983.

- H. Critchfield. General climatology.
Prentice Hall, 1979.

TEMA 7 -

La capa límite planetaria; número de Reynolds. Capa de flujo laminar. Flujo turbulento. Derivación de las ecuaciones de movimiento horizontal para flujos turbulentos. Balance de fuerzas en la capa límite planetaria. Solución de Ekman. Comparación con observaciones. La capa de superficie. Caso de estabilidad neutra. Variación vertical del viento logarítmica. Coeficiente de rugosidad.

La capa de superficie en condiciones no neutras de estabilidad vertical. Hipótesis de Monin-Obukov.

Funciones adimensionales empíricas. Modificación del perfil vertical del viento por cambio de rugosidad.

Bibliografía :

- G. Haltiner y Martin. Dynamical and physical meteorology.
Mc Graw Hill, 1967.
- G. Holton. Introduction to dynamical meteorology.
Int. Geo. Series, Vol. 23.
Academic Press, 1979.
- R. Munn. Descriptive micrometeorology.
Academic Press, 1966.
- G. Plate. Atmospheric boundary layer.

UNIDAD : ESTUDIO DEL RECURSO

TEMA 8 - Introducción al estudio del recurso eólico

Necesidad del conocimiento estadístico del viento en el diseño, evaluación de rendimiento, ubicación y operación de máquinas eólicas. Potencia disponible; su dependencia con la densidad y el viento. Potencia extraíble, teorema de Betz. Coeficiente de potencia. Potencia de respuesta de las máquinas en función de la intensidad del viento. Cálculo de la potencia esperada para una máquina en un lugar dado. Uso de la función densidad de probabilidad del viento y de la curva de duración del viento.

Bibliografía :

- V. Barros. El recurso eólico en Uruguay - PNUD/ONM, 1986.
- A. Mikhail. Wind power for the developing nations.
Solar Energy Institute, 1981.
- V. Nelson y E. Gilmore. Introduction to wind energy. Alternative energy Institute.
Set 1984.
- V. Barros. Energía eólica.
Boletín Techint, julio/setiembre, 1985.

- G. Johnson. Wind energy systems.
Prentice Hall, 1985.
- D. Le Gourieries. Energía eólica. Teoría, concepción y cálculo práctico de las instalaciones.
Ed. Mason, 1983.
- C.G. Justus. Wind and wind systems performance.
The Franklin Institute Press, 1978.

TEMA 9 - Características estadísticas del viento

La función de distribución de la intensidad del viento. Ajuste a Weibull II y Rayleigh. Características de la distribución de Weibull II, parámetros. Ajuste en los extremos. La velocidad media en función de los parámetros de Weibull. Método de cálculo de los parámetros de Weibull: Ajuste por cuadrados mínimos, método paramétrico, en función de mediana y cuartiles y en función del valor medio. Necesidad de filtrar errores de observación antes del cálculo de los parámetros. Efecto de los errores de observación en el cálculo de la potencia. Cálculo de la potencia disponible por Weibull II y Rayleigh. Distribución de medias mensuales y anuales. Espectro de energía cinética en la atmósfera. Aplicaciones. Tiempo de promedio en las mediciones. Frecuencia de medición. Período mínimo de medición. Métodos de extensión en el tiempo de series de viento.

Bibliografía :

- V. Barros. Clases sobre energía eólica.
Curso latinoamericano de Climatología, UBA, 1984.
- G. Johnson. Wind energy systems.
Prentice Hall, 1985.
- V. Barros. El recurso eólico en Uruguay. PNUD/OMM, 1986.
- C.G. Justus y otros. Methods for estimating the wind speed frequency.
Distribution : J. Appl. Meteor. 17, pp.350-353, 1977.
- W.M.O. Meteorological aspects of the utilization of wind as energy source.
Tech. Note N° 175, 1981.
- Justus y otros. Interannual and month to month variation of wind speed.
J. Appl. Meteor 18, pp.915-926, 1978.
- Corotis y otros. Variance analysis of wind characteristics for energy conversion.
J. Appl. Meteor. 16, pp.1149-1157, 1977.
- Ramsdell y otros. Measurement strategies for estimating long-term average wind speeds.
Solar Energy, 25, pp.495-503, 1980.
- V. Barros y E. Estevan. On the evaluation of wind power from short records.
J. Appl. Meteor 22, pp.1116-1123, 1983.
- W. Barchett y W. Davis. Estimating long-term mean winds from short-term wind data.
Battelle PNL Report 4785, 1983.

TEMA 10 - Variación del viento con la altura.

Perfil logarítmico. Correcciones por estabilidad. Variación diurna del viento. Efecto de la variación del viento con la altura sobre las máquinas eólicas. Fórmula potencial.

Bibliografía :

- G. Johnson. Wind energy systems. Prentice Hall, 1985.
- C.G. Justus. Wind and wind systems performance. The Franklin Institute Press, 1978.

TEMA 11 - Efectos de la rugosidad, obstáculos y topografía en el viento

Caracterización de terreno llano. Efectos en el viento de : rugosidad uniforme, cambios en la rugosidad del terreno, obstáculos, edificios, cortinas vegetales.

Efectos en el viento del terreno complejo : elevaciones, cuchillas, colinas aisladas, montañas, depresiones, valles, cañones, gargantas y pasos.

Bibliografía :

- H. Wegley y otros. A siting handbook for small wind energy conversion systems. Battelle PNL 2521, 1980.

TEMA 12 - Presentación y organización de los datos de viento

Organización de archivos. Presentación de los datos estadísticos.

Bibliografía :

- C.G. Justus. Wind and wind systems performance. The Franklin Institute Press, 1978.
- V. Barros. El recurso eólico en Uruguay. PNUD/OMM, 1986.
- Aiello y otros. Prospección, evaluación y caracterización de la energía eólica. Olade, Quito, 1984.

TEMA 13 - Métodos e instrumentos de medición

Escala Beaufort. Anemómetros : a copelas, a hélice, de tubo de presión, sónico, de hilo caliente. Anemoscopios. Anemocinemógrafos. Distintos tipos de transductores de señales y de registro. Características de los anemómetros a copelas y a hélice que los hacen oportunos para el estudio del recurso eólico y tipos de errores que introducen.

Bibliografía :

- Aiello y otros. Prospección, evaluación y características de la energía eólica. Olade, Quito, 1984.
- C. Justus. Wind and wind systems performance.

- The Franklin Institute Press, 1978.
- Y.Mori. Evaluation of several single-pass estimations of the mean and the standard deviations of wind directions.
J. of Climate and Appl.Meteor, 25, pp.1387-1397, 1986.
 - J.Ramsdel y J. Wetzel. Systems and wind tunnel evaluation of selected instruments. Battelle, PNL 3435, 1981.