



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA EN PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO

Autor: Claudia Ríos Marcos

Director: Jacobo Archilla Martín-Sanz

Co-Director: Rafael Abajo Pérez

Madrid

Junio de 2021

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA EN PAÍSES
EN VÍAS DE DESARROLLO**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2º de Máster en Ingeniería Industrial

es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Claudia Ríos Marcos

Fecha: 22 / 06 / 2021



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

**ARCHILLA MARTIN-
SANZ JACOBO -
07253068H**

Digitally signed by ARCHILLA MARTIN-SANZ
JACOBO - 07253068H
DN: c=ES, serialNumber=IDCES-07253068H,
givenName=JACOBO, sn=ARCHILLA MARTIN-SANZ,
cn=ARCHILLA MARTIN-SANZ JACOBO - 07253068H
Date: 2021.06.23 22:50:41 +02'00'

Fdo.: Jacobo Archilla Martín

Fecha: 22 / 06 / 2021



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA EN PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO

Autor: Claudia Ríos Marcos

Director: Jacobo Archilla Martín-Sanz

Co-Director: Rafael Abajo Pérez

Madrid

Junio de 2021

SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA EN PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO

Autor: Ríos Marcos, Claudia

Director: Archilla Martín-Sanz, Jacobo

Entidad colaboradora: Manos Unidas

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

Este proyecto consiste en realizar un estudio de viabilidad de la implantación de sistemas de bombeo de agua accionados por energía eólica en países del África subsahariana. La finalidad del proyecto es crear una guía con los procedimientos a seguir por Manos Unidas para desarrollar este tipo de instalaciones en pequeñas comunidades.

Planteamiento del problema

Actualmente, millones de personas carecen de acceso a agua para beber, de saneamiento y para la higiene. En África subsahariana sólo un 27% de las personas utilizan servicios de agua potable gestionados de forma segura, el 18% de las personas utilizan servicios de saneamiento gestionados de forma segura y sólo el 25% tienen instalaciones básicas para lavarse las manos.

El 3% de la población mundial (207 millones de personas) usa fuentes donde la recolección de agua excede los 30 minutos y dos de cada tres de esas personas viven en el África subsahariana. Además, es habitual que las responsables de la recolección de agua sean las mujeres, incluso las niñas.

La región de África subsahariana se compone de 49 países. Por esta razón, para hacer un estudio de viabilidad riguroso es necesario contemplar múltiples escenarios desde el punto de vista climatológico, social, geológico, biótico y otras particularidades territoriales.

Además, en estos países los recursos económicos son una limitación muy relevante para cualquier proyección tecnológica, por lo que las propuestas que se planteen deben minimizar los costes al máximo y aprovechar el resto de recursos del territorio.

Este proyecto fue propuesto por Manos Unidas y es de muy alto interés porque puede mejorar la calidad de vida de muchas personas. El acceso a agua es uno de los principales problemas en los países en vías de desarrollo y es responsabilidad de los ingenieros plantear soluciones tecnológicas asequibles.

Estado de la cuestión

A día de hoy, por lo general, el bombeo de agua en esta región se realiza de manera manual utilizando diferentes métodos. Algunos de los más habituales son la bomba de pozo profundo Afridev o Indian Mark y la bomba de mecate.

Uno de los principales problemas de estos sistemas es que se accionan utilizando directamente la fuerza del usuario y, además, los pozos en muchas ocasiones se encuentran lejos del poblado, por lo que es necesario andar largas distancias cargando el agua extraída. Por ello, un factor de gran importancia es la situación y el tipo de pozo.

La tecnología utilizada para el aprovechamiento de la energía eólica también es un factor determinante en la mejora de la calidad de vida en lo que respecta a la obtención de agua en los poblados. El motivo es la reducción del esfuerzo físico que hay que realizar, tanto para accionar la bomba como para transportar el agua. Esto se debe a que esta tecnología puede permitir la reducción de la distancia recorrida para recoger el agua si la unión entre la bomba y el aerogenerador es adecuada, para lo cuál se debe tener en cuenta el coste lógicamente.

Los tipos de uniones principales son los siguientes:

- **Unión mecánica**
La transmisión de energía entre el eje del rotor y la bomba se realiza a través de elementos mecánicos.
- **Unión eléctrica**
La energía rotativa del rotor se transforma en electricidad a través de un generador eléctrico y, a continuación, se utiliza la energía eléctrica para alimentar un motor que acciona una bomba.

Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto es generar un documento para Manos Unidas en el que se planteen posibles instalaciones de bombeo de agua utilizando energía eólica según las condiciones que se den en diferentes poblados del África subsahariana. Las instalaciones propuestas en dicho documento deben cumplir los siguientes objetivos:

- **Reducir costes**
Como ya se ha justificado anteriormente, debido a los limitados recursos económicos de esta región, es necesario reducir los costes de fabricación, instalación y mantenimiento.
- **Reducir distancia**
En muchos poblados es necesario crear un acceso a agua que no requiera un largo viaje para la recolección.
- **Aprovechar recursos existentes**
Durante el diseño de las instalaciones se deben tener en cuenta los recursos que se encuentran accesibles en los diferentes poblados, como pueden ser materiales abundantes en la zona, una climatología favorable, instalaciones ya existentes, mano de obra, etc.
- **Facilitar mantenimiento**
Las instalaciones que se planteen deben requerir el mínimo mantenimiento posible, ya que el mantenimiento requiere mano de obra, que probablemente sean habitantes del poblado y la formación debe ser sencilla. Un mantenimiento complicado puede llevar a que se descuide la instalación e incluso a su desuso.
- **Diseño robusto**
Otra manera de evitar el mantenimiento es un diseño que sea resistente a las condiciones en las que se pueda ver expuesto. Para ello hay que analizar los factores que pueden dañar la instalación, como factores climatológicos, la fauna y la flora, el uso, etc. Además, uno de los principales problemas de estas instalaciones es el vandalismo, por lo que se tendrá muy en cuenta en la toma de decisiones.

Metodología

La metodología seguida en el proyecto es la siguiente:

1. Calcular el caudal de agua necesario para el uso doméstico

Se ha hecho una estimación del volumen de agua consumido diariamente para las diferentes actividades domésticas en base a diferentes estudios, de tal manera que se establezca una referencia para proyectos de bombeo de agua.

2. Recopilar referencias para estimar el nivel freático

Se ha recogido información relativa al nivel freático que puede ser útil para situar un pozo de la manera más eficiente posible, incluyendo un mapa de niveles freáticos en África, un listado de humedales, diferentes indicadores del nivel freático y varios métodos para medir el nivel freático con recursos muy limitados,

3. Facilitar la obtención de la previsión de la velocidad del viento

Se han creado unas instrucciones para descargar información del viento en el lugar del proyecto, así como una hoja de cálculo para obtener la velocidad del viento a diferentes alturas.

4. Facilitar el dimensionamiento de la instalación

Se han creado hojas de cálculo para introducir y obtener datos de la instalación. Esto incluye introducir los parámetros que se deben cumplir, obtener las curvas características y el punto de trabajo de la instalación y de la bomba, hacer una previsión del volumen de agua extraído utilizando un aerogenerador comercial, un aerogenerador casero o una aerobomba, dimensionar el tanque de agua, entre otras funciones. Todo esto recibiendo en todo momento advertencias y recomendaciones para dar los siguientes pasos en el proceso.

5. Redactar una guía para el uso de los recursos informáticos creados

El procedimiento para el uso de las hojas de cálculo creadas es complejo, por lo que se ha generado un documento en el cuál se describen detalladamente los pasos a seguir.

Resultados

El resultado final obtenido es una guía con los procedimientos a seguir por Manos Unidas para desarrollar instalaciones de bombeo eólico.

En esta guía se explica detalladamente cómo utilizar los diferentes recursos creados para diseñar el sistema de la manera más eficiente y económica. Estos recursos son los descritos a continuación.

- Siete hojas de cálculo que facilitan la selección y dimensionamiento de los equipos, que contienen:
 - La información y cálculos necesarios para obtener información del viento relevante para el proyecto.
 - Los cálculos para obtener características mínimas que debe cumplir la instalación en cuanto a caudal, altura y potencia.
 - Los cálculos para obtener las curvas de la instalación y de la bomba.
 - Los cálculos para obtener el volumen de agua extraído utilizando un aerogenerador comercial, un aerogenerador casero o una aerobomba.
 - Los cálculos necesarios para obtener el volumen que debe tener el tanque de almacenamiento de agua.
 - Advertencias y recomendaciones sobre la instalación acordes a los datos introducidos hasta el momento.

- Acceso e instrucciones de la aplicación web Global Wind Atlas, para la descarga de datos del viento.
- Indicaciones y recursos para localizar el lugar idóneo para construir el pozo y medir el nivel freático sin necesidad de material especializado.
- Una clasificación de las diferentes configuraciones posibles de la instalación con su correspondiente análisis de ventajas e inconvenientes.
- Múltiples recomendaciones relacionadas con los diferentes pasos a seguir.

Conclusiones

No es posible afirmar qué sistema es más eficiente entre los que se plantean: el sistema eléctrico (bomba eléctrica y aerogenerador, comercial o casero) o el sistema mecánico (aerobomba). Después de realizar diferentes pruebas en las hojas de cálculo con los datos de entrada de varias instalaciones se ha llegado a la conclusión de que, en función de las características de la instalación, puede ser más rentable un sistema u otro. Esta eficiencia no se refiere únicamente a la productividad del sistema a nivel técnico, si no que también se refiere a las razones económicas, los recursos existentes, la instalación previa, las condiciones sociales u otros motivos y circunstancias. Por tanto, lo más recomendable es evaluar todas las posibilidades en cada proyecto de bombeo eólico que se vaya a realizar.

WATER PUMPING SYSTEM USING WIND ENERGY IN DEVELOPING COUNTRIES

Author: Ríos Marcos, Claudia

Director: Archilla Martín-Sanz, Jacobo

Collaborating entity: Manos Unidas

PROJECT SUMMARY

Introduction

This project consists of carrying out a feasibility study of the implementation of water pumping systems powered by wind energy in sub-Saharan African countries. The purpose of the project is to create a guide with the procedures to be followed by Manos Unidas to develop this type of installations in small communities.

Problem Statement

Millions of people currently lack access to water for drinking, sanitation and hygiene. In sub-Saharan Africa, only 27% of people use safely managed drinking water services, 18% of people use safely managed sanitation services, and only 25% have basic hand-washing facilities.

Three percent of the world's population (207 million people) use sources where water collection exceeds 30 minutes and two out of three of these people live in sub-Saharan Africa. In addition, it is common for women, including girls, to be responsible for collecting water.

The sub-Saharan Africa region is made up of 49 countries. For this reason, a rigorous feasibility study needs to consider multiple scenarios from the climatological, social, geological, biotic and other territorial particularities.

Furthermore, in these countries, economic resources are a very relevant limitation for any technological projection, so the proposals must minimize costs as much as possible and take advantage of the rest of the territory's resources.

This project was proposed by Manos Unidas and it is of great interest because it can improve the quality of life of many people. Access to water is one of the main problems in developing countries and it is the responsibility of engineers to come up with affordable technological solutions.

State of the art

Today, water pumping in this region is generally done manually using different methods. Some of the most common are the Afridev or Indian Mark deep well pump and the rope pump.

One of the main problems of these systems is that they are operated directly by the user's power and, in addition, the wells are often located far from the village, so it is necessary to walk long distances carrying the extracted water. Therefore, a very important factor is the location and type of well.

The technology used to harness wind energy is also a determining factor in improving the quality of life in terms of obtaining water in the villages. The reason for this is the reduction in the physical effort required, both to operate the pump and to transport the water. This is because this technology can allow the reduction of the distance traveled to collect the water if the connection between the pump and the wind turbine is adequate, for which the cost must logically be taken into account.

The main types of connections are as follows:

- **Mechanical connection**
The transmission of energy between the rotor shaft and the pump is done through mechanical elements.
- **Electrical connection**
The rotational energy of the rotor is converted into electricity by an electrical generator and the electrical energy is then used to power a motor that drives a pump.

Aims of the project

The objective of this project is to generate a document for Manos Unidas in which possible water pumping installations using wind energy are proposed according to the conditions in different villages in sub-Saharan Africa. The facilities proposed in this document must meet the following objectives:

- **Reduce costs**
As already justified above, due to the limited economic resources of this region, it is necessary to reduce manufacturing, installation and maintenance costs.
- **Reduce distance**
In many villages it is necessary to create access to water that does not require a long trip for collection.
- **Leverage existing resources**
During the design of the facilities, it is necessary to take into account the resources that are accessible in the different villages, such as abundant materials in the area, favorable weather conditions, existing facilities, labor, etc.
- **Facilitate maintenance**
The proposed facilities should require as little maintenance as possible, since maintenance requires manpower, which will probably be local inhabitants, and training should be simple. Complicated maintenance can lead to neglect and even disuse of the facility.
- **Robust design**
Another way to avoid maintenance is a design that is resistant to the conditions to which it may be exposed. To do this, it is necessary to analyze the factors that can damage the installation, such as climatic factors, fauna and flora, use, etc. In addition, one of the main problems of these facilities is vandalism, so it will be taken into account when making decisions.

Methodology

The methodology followed in the project is as follows:

1. Calculating the water flow required for domestic use

An estimate has been made of the volume of water consumed daily for the different domestic activities based on different studies, in order to establish a reference for water pumping projects.

2. Collecting references to estimate the groundwater level

Information regarding the phreatic level has been collected that can be useful to locate a well in the most efficient way possible, including a map of water tables in Africa, a list of wetlands, different water table indicators and various methods to measure the water table with very limited resources,

3. Making it easier to obtain wind speed forecasts

Instructions have been created for downloading wind data at the project site, as well as a spreadsheet for obtaining wind speed at different heights.

4. Facilitating the sizing of the installation

Spreadsheets have been created to enter and obtain data for the installation. This includes entering the parameters to be met, obtaining the characteristic curves and the working point of the installation and the pump, making a forecast of the volume of water extracted using a commercial wind turbine, a home wind turbine or a wind pump, sizing the water tank, among other functions. All this receiving at all times warnings and recommendations to take the next steps in the process.

5. Writing a guide for the use of the created computer resources

The procedure for the use of the created spreadsheets is complex, so a document has been generated in which the steps to follow are described in detail.

Results

The final result obtained is a guide with the procedures to be followed by Manos Unidas to develop wind pumping installations.

This guide explains in detail how to use the different resources created to design the system in the most efficient and economical way. These resources are described below.

- Seven spreadsheets that facilitate the selection and sizing of equipment, containing:
 - The information and calculations necessary to obtain wind information relevant to the project.
 - The calculations to obtain the minimum characteristics that the installation must comply with in terms of flow, head and power.
 - The calculations to obtain the curves of the installation and the pump.
 - The calculations to obtain the volume of water extracted using a commercial wind turbine, a home wind turbine or a wind pump.
 - The necessary calculations to obtain the volume that the water storage tank should have.
 - Warnings and recommendations on the installation according to the data entered so far.

- Access and instructions to the Global Wind Atlas web application for downloading wind data.
- Indications and resources to locate the ideal place to build the well and measure the water table without the need for specialized equipment.
- A classification of the different possible configurations of the installation with their corresponding analysis of advantages and disadvantages.
- Multiple recommendations related to the different steps to follow.

Conclusions

It is not possible to state which system is more efficient among those proposed: the electric system (electric pump and wind turbine, commercial or home-made) or the mechanical system (wind pump). After performing different tests on spreadsheets with the input data of several installations, it has been concluded that, depending on the characteristics of the installation, one system or the other may be more efficient. This efficiency does not only refer to the productivity of the system at the technical level, but also to economic reasons, existing resources, previous installation, social conditions or other reasons and circumstances. Therefore, the most advisable is to evaluate all the possibilities in each wind pumping project to be carried out.

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	20
1.1. Planteamiento del proyecto	21
1.2. Motivación	21
1.3. Objetivos del proyecto	22
1.3.1. Reducir costes	22
1.3.2. Reducir distancia.....	23
1.3.3. Aprovechar recursos existentes.....	23
1.3.4. Facilitar mantenimiento	23
1.3.5. Diseño robusto	23
CAPÍTULO 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN.....	24
2.1. Bombeo de agua manual	25
2.1.1. Bombas de sifón.....	25
2.1.2. Bombas de pistón.....	25
2.1.3. Bombas de diafragma	27
2.1.4. Bombas de cubo y cuerda	27
2.1.5. Bomba de mecate.....	28
2.2. Bombeo eólico	29
2.2.1. Unión mecánica	29
2.2.2. Unión eléctrica.....	30
2.3. Tipos de pozos.....	31
2.3.1. Pozos excavados	31
2.3.2. Pozos hincados, instantáneos o con perforación de drenaje	31
2.3.3. Pozos aforados o perforaciones	31
CAPÍTULO 3. CAUDAL DE AGUA NECESARIO.....	33
3.1. Caudal de agua necesario	34
3.2. Uso doméstico del agua	34
3.2.1. Consumo	34
3.2.2. Higiene.....	35
3.2.3. Comodidades.....	36
3.2.4. Uso productivo.....	36
3.3. Resultados	37
3.4. Tratamiento posterior del agua.....	37
CAPÍTULO 4. NIVELES FREÁTICOS EN ÁFRICA.....	39
4.1. Mapa de niveles freáticos.....	40
4.2. Humedales.....	41

4.3.	Determinación del nivel freático.....	43
4.3.1.	Indicadores del nivel freático	43
4.3.2.	Medición con piezómetro.....	44
4.3.3.	Fabricación de sonda piezométrica	44
CAPÍTULO 5. VELOCIDAD Y POTENCIA DEL VIENTO		47
5.1.	Global Wind Atlas	48
5.1.1.	Obtención de datos de Global Wind Atlas	48
5.2.	Datos de viento en África Subsahariana	51
5.3.	Variación de la velocidad del viento con la altura.....	52
5.3.1.	Exponente de Hellmann, α	52
5.3.2.	Cálculo de la velocidad del viento	52
5.3.3.	Cálculo de la densidad de potencia	53
5.4.	Hoja de cálculo: Velocidad del viento y WPD	53
5.4.1.	Datos de entrada.....	54
5.4.2.	Primera estimación.....	54
5.4.3.	Cálculo exacto	55
CAPÍTULO 6. BOMBA ELÉCTRICA		57
6.1.	Altura efectiva: Bernoulli	58
6.1.1.	Datos de partida.....	58
6.1.2.	Pérdidas en la instalación: $Hr - ext$	60
6.2.	Potencia efectiva de la bomba.....	64
6.3.	Hoja de cálculo: Altura y potencia de la bomba.....	64
6.3.1.	Parámetros de diseño.....	64
6.3.2.	Resultados	65
6.4.	Selección del tipo de bomba	65
6.4.1.	Selección preliminar del modelo de bomba	66
6.5.	Variación de las curvas de la bomba con la velocidad	66
6.5.1.	Curva característica de la bomba	67
6.5.2.	Curva característica de la instalación	67
6.5.3.	Punto de trabajo.....	68
6.5.4.	Leyes de semejanza.....	68
6.6.	Hoja de cálculo: Curvas características	70
6.6.1.	Curva H-Q característica de la instalación	70
6.6.2.	Curva H-Q característica de la bomba ofrecida por el fabricante	73
6.6.3.	Curva H-Q característica de la bomba a la frecuencia del aerogenerador	75
6.6.4.	Punto de trabajo de la bomba	76
6.6.5.	Gráfica de curvas características	77
6.6.6.	Advertencias y recomendaciones	77
CAPÍTULO 7. AEROGENERADOR		79

7.1.	Frecuencias medias del viento.....	80
7.2.	Producción del aerogenerador.....	81
7.3.	Hoja de cálculo: Aerogenerador.....	82
7.3.1.	Parámetros de cálculo	82
7.3.2.	Datos de la instalación	82
7.3.3.	Producción del aerogenerador.....	83
7.3.4.	Recomendaciones	84
CAPÍTULO 8. AEROGENERADOR CASERO.....		85
8.1.	Producción del aerogenerador casero.....	86
8.2.	Hoja de cálculo: Aerogenerador casero	87
8.2.1.	Parámetros de cálculo	88
8.2.2.	Potencia instantánea producida.....	88
8.2.3.	Potencia media producida.....	88
8.2.4.	Velocidad angular de la turbina	89
8.2.5.	TSR – No. de palas – Funciones.....	89
8.2.6.	Datos de la instalación	89
8.2.7.	Producción del aerogenerador y la bomba.....	91
8.2.8.	Advertencias y recomendaciones.....	91
CAPÍTULO 9. AEROBOMBA		93
9.1.	Generalidades.....	94
9.1.1.	Ventajas.....	94
9.1.2.	Inconvenientes	94
9.2.	Producción de la aerobomba	94
9.3.	Hoja de cálculo: Aerobomba.....	95
9.3.1.	Parámetros de cálculo	95
9.3.2.	Especificaciones de la aerobomba	96
9.3.3.	Datos de la aerobomba.....	96
9.3.4.	Datos de la bomba de pistón	97
9.3.5.	Producción de la aerobomba.....	97
9.3.6.	Advertencias y recomendaciones.....	98
CAPÍTULO 10. DIMENSIONAMIENTO CONJUNTO		99
10.1.	Dimensionamiento de aerogenerador y bomba.....	100
Paso 1. Cálculo de la curva característica de la instalación.....		100
Paso 2. Selección preliminar del modelo de bomba suponiendo una frecuencia de la alimentación de 50 Hz		101
Paso 3. Proceso iterativo para la selección de los modelos de bomba y aerogenerador.....		101
Paso 4. Comprobación de los modelos de bomba y aerogenerador seleccionados		106
10.2.	Dimensionamiento de aerogenerador casero.....	106
Paso 1. Cálculo de la curva característica de la instalación.....		106

Paso 2. Selección preliminar del modelo de bomba suponiendo una frecuencia de la alimentación de 50 Hz	107
Paso 3. Proceso iterativo para la selección del modelo de bomba	107
Paso 4. Proceso iterativo para dimensionamiento del aerogenerador	107
10.3. Dimensionamiento de la aerobomba	107
Paso 1. Selección preliminar del modelo de aerobomba	107
Paso 2. Proceso iterativo para la selección de la aerobomba y la bomba de pistón con la que trabaja	108
10.4. Instalación de varios aerogeneradores	108
10.4.1. Instalar varios aerogeneradores con una bomba cada uno.	108
10.4.2. Instalar varios aerogeneradores con una única bomba	109
CAPÍTULO 11. ALMACENAMIENTO DEL AGUA	111
11.1. Regularización y almacenamiento	112
11.2. Sistema de almacenamiento	112
11.3. Consideraciones a tener en cuenta	113
11.3.1. Crecimiento de algas	113
11.3.2. Evaporación del agua	113
11.3.3. Contaminación del agua	113
11.4. Dimensionamiento del tanque elevado	113
11.5. Hoja de cálculo: Almacenamiento de agua	115
11.5.1. Datos del viento	115
11.5.2. Cálculo del volumen del tanque	116
11.5.3. Advertencias	116
CAPÍTULO 12. GUÍA PARA MANOS UNIDAS	117
12.1. Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades	118
BIBLIOGRAFÍA	119
Referencias	120
ANEXOS	122
Anexo I: Alineación con los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS)	123
Anexo II: Datos estadísticos del estudio “Drawers of water II” en viviendas con suministro de agua 125	
Anexo III: Datos estadísticos del estudio “Drawers of water II” en viviendas sin suministro de agua 126	
Anexo IV: Catálogo de plantas freatofitas	127
Anexo V: Densidad de potencia del viento a 10 m de altura	153
Anexo V: Densidad de potencia del viento a 10 m de altura (continuación)	154
Anexo V: Densidad de potencia del viento a 10 m de altura (continuación)	155
Anexo VI: Densidad de potencia del viento a 50 m de altura	156
Anexo VI: Densidad de potencia del viento a 50 m de altura (continuación)	157
Anexo VI: Densidad de potencia del viento a 50 m de altura (continuación)	158

Anexo VII: Velocidad del viento a 10 m de altura.....	159
Anexo VII: Velocidad del viento a 10 m de altura (continuación)	160
Anexo VII: Velocidad del viento a 10 m de altura (continuación)	161
Anexo VIII: Velocidad del viento a 50 m de altura	162
Anexo VIII: Velocidad del viento a 50 m de altura (continuación)	163
Anexo VIII: Velocidad del viento a 50 m de altura (continuación)	164
Anexo IX: Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades.....	165

Capítulo 1. Introducción

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

Este proyecto consiste en realizar un estudio para la implantación de sistemas de bombeo de agua accionados por energía eólica en países del África subsahariana. Se incluye una guía con los procedimientos a seguir por Manos Unidas para desarrollar este tipo de instalaciones en pequeñas comunidades, es decir, un método para verificar la viabilidad en una zona concreta, guiar el diseño de la solución más adecuada y la selección de sus componentes.

La región de África subsahariana incluye todos los países de África que se encuentran a sur del desierto del Sahara. Se compone de un total de 49 países. Por esta razón, para hacer un estudio de viabilidad riguroso es necesario contemplar múltiples escenarios desde el punto de vista climatológico, social, geológico, biótico y otras particularidades territoriales.

Esta región contiene a los diez países más pobres del mundo, nueve de los cuáles están catalogados como emergencias humanitarias, según la ONU. Es decir, los recursos económicos son una limitación muy relevante para cualquier proyección tecnológica, por lo que las propuestas que se planteen deben minimizar los costes al máximo y aprovechar el resto de recursos del territorio.

1.2. MOTIVACIÓN

Actualmente, millones de personas carecen de acceso a agua para beber, de saneamiento y para la higiene.

Según el informe “Progress on household drinking water, sanitation and hygiene” de UNICEF y la Organización Mundial de la Salud, en 2017 en África subsahariana sólo un 27% de las personas utilizan servicios de agua potable gestionados de forma segura, el 18% de las personas utilizan servicios de saneamiento gestionados de forma segura y sólo el 25% tienen instalaciones básicas para lavarse las manos.

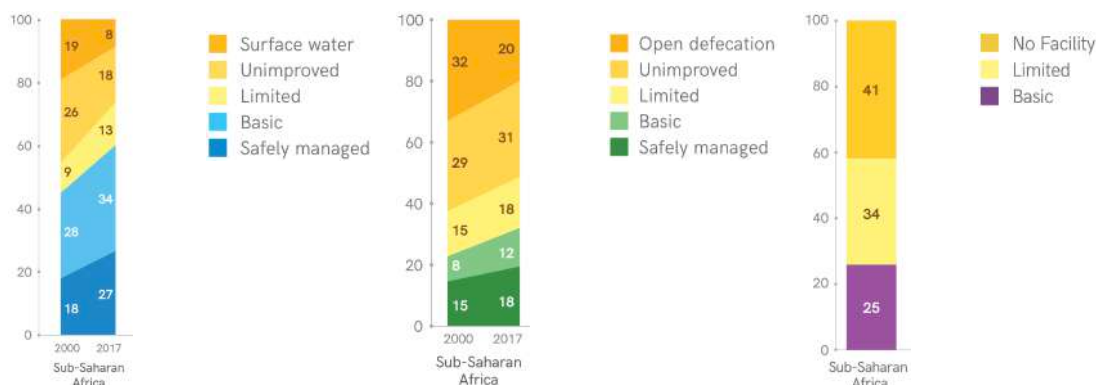


Figura 1.1 Cobertura de agua potable, agua para saneamiento y agua para higiene en el África subsahariana según el informe "Progress on household drinking water, sanitation and hygiene (2000-2017)" de UNICEF y la Organización Mundial de la Salud

Se consideran servicios de agua potable gestionados de forma segura aquellos que proveen de agua:

- Accesible en las instalaciones: ubicados dentro de la vivienda, patio o parcela.
- Disponible cuando sea necesario: suficiente agua disponible o al menos 12 horas al día.
- Libre de contaminación: cumple con las normas de contaminación fecal (E. coli) y contaminación química prioritaria (arsénico y fluoruro).

El 3% de la población mundial (207 millones de personas) usa fuentes donde la recolección de agua excede los 30 minutos al día y dos de cada tres de esas personas viven en el África subsahariana. Además, según encuestas realizadas en hogares, es habitual que las responsables de la recolección de agua sean las mujeres, incluso las niñas.

En la siguiente figura se muestran datos sobre la recolección de agua potable en Sierra Leona, uno de los países que forman parte del África subsahariana.

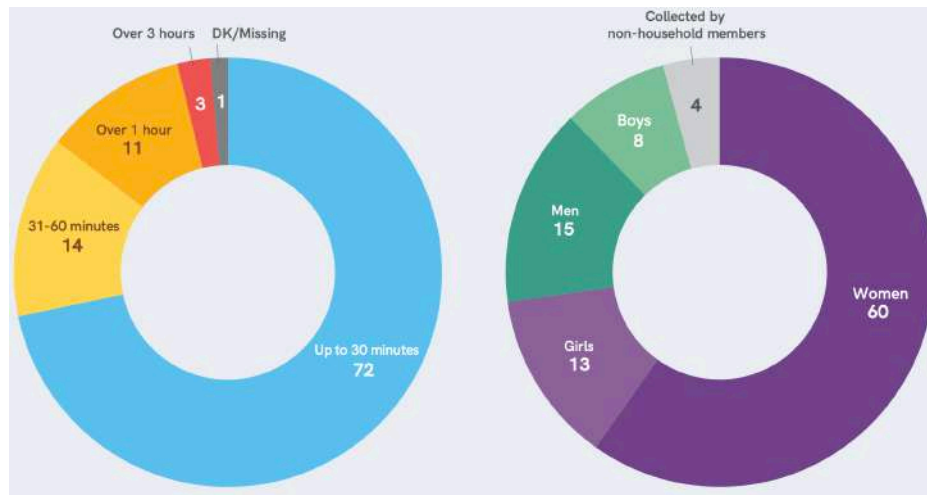


Figura 1.2 Datos sobre la recolección de agua potable fuera de poblados en Sierra Leona en 2017 según el informe "Progress on household drinking water, sanitation and hygiene (2000-2017)" de UNICEF y la Organización Mundial de la Salud

En el siguiente mapa se muestra la proporción y el número de personas sin instalaciones para lavarse las manos en casa. Como se puede observar, hay una concentración muy alta de este problema en la zona del África subsahariana.

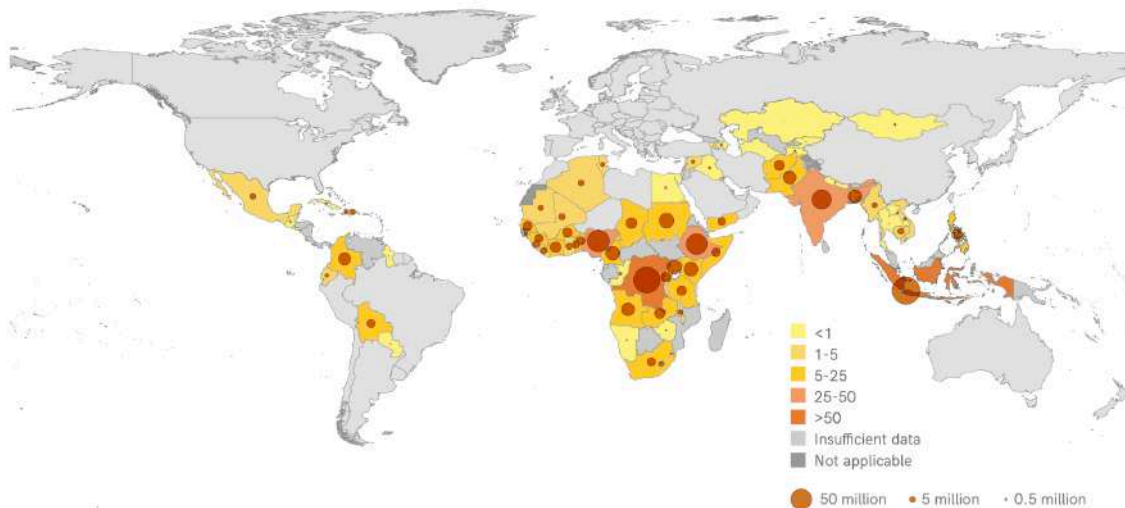


Figura 1.3 Proporción y número de personas sin instalaciones para lavarse las manos en casa en 2017 según el informe "Progress on household drinking water, sanitation and hygiene (2000-2017)" de UNICEF y la Organización Mundial de la Salud

Este proyecto fue propuesto por Manos Unidas y es de muy alto interés porque puede mejorar la calidad de vida de muchas personas. El acceso a agua es uno de los principales problemas en los países en vías de desarrollo y es responsabilidad de los ingenieros plantear soluciones tecnológicas asequibles que permitan a las comunidades una autonomía y un progreso reales.

1.3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es generar un documento para Manos Unidas en el que se planteen posibles instalaciones de bombeo de agua utilizando energía eólica según las condiciones que se den en diferentes poblados del África subsahariana. Las instalaciones que se propongan en dicho documento deben cumplir los siguientes objetivos:

1.3.1. REDUCIR COSTES

Como ya se ha justificado anteriormente, debido a los limitados recursos económicos de esta región, es necesario reducir los costes de fabricación, instalación y mantenimiento.

1.3.2. REDUCIR DISTANCIA

En muchos poblados es necesario crear un acceso a agua que no requiera un largo viaje para la recolección.

1.3.3. APROVECHAR RECURSOS EXISTENTES

Durante el diseño de las instalaciones se deben tener en cuenta los recursos que se encuentran accesibles en los diferentes poblados, como pueden ser materiales abundantes en la zona, una climatología favorable, instalaciones ya existentes, mano de obra, etc.

1.3.4. FACILITAR MANTENIMIENTO

Las instalaciones que se planteen deben requerir el mínimo mantenimiento posible, ya que el mantenimiento requiere mano de obra, que probablemente sean habitantes del poblado y la formación debe ser sencilla. Un mantenimiento complicado puede llevar a que se descuide la instalación e incluso a su desuso.

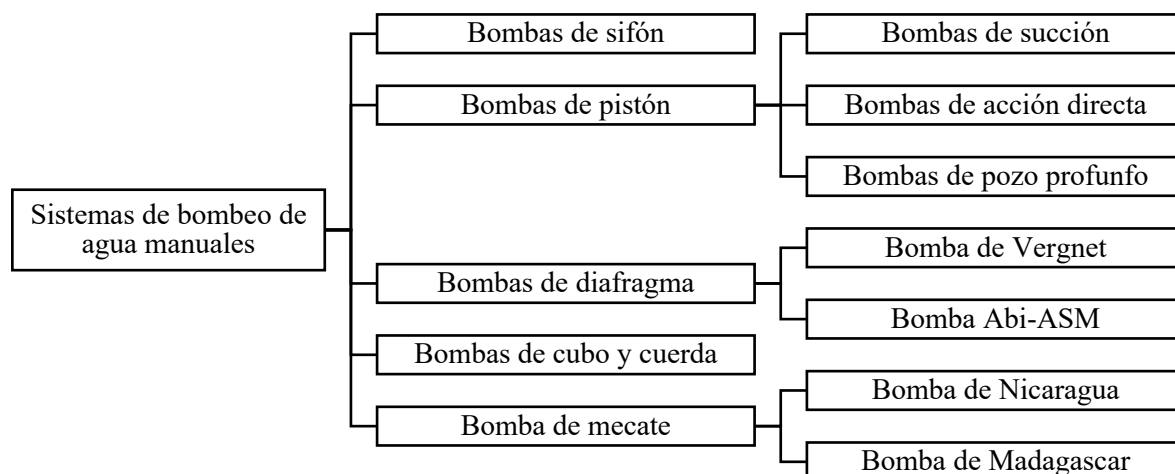
1.3.5. DISEÑO ROBUSTO

Otra manera de evitar el mantenimiento es un diseño que sea resistente a las condiciones en las que se pueda ver expuesto. Para ellos hay que analizar los factores que pueden dañar la instalación, como factores climatológicos, la fauna y la flora, el uso, etc. Además, uno de los principales problemas de estas instalaciones es el vandalismo, por lo que se tendrá muy en cuenta en la toma de decisiones.

Capítulo 2. Estado de la cuestión

2.1. BOMBEO DE AGUA MANUAL

A día de hoy, por lo general, el bombeo de agua en esta región se realiza de manera manual utilizando diferentes métodos. Algunos de los más habituales son los que se describen a continuación.



2.1.1. BOMBAS DE SIFÓN

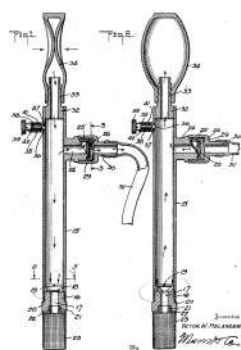


Figura 2.1 Bomba de sifón.
 Fuente: Patente US1582399A

Este sistema de bombeo utiliza una tubería en forma de “U” invertida con uno de sus extremos sumergido en el líquido, que sube por la tubería a mayor altura que la superficie del tubo. Para que se produzca el ascenso del líquido inicialmente, este tipo de bombas incluye algún sistema de vacío. En el caso del ejemplo de la figura, se utiliza una pera de succión. Para que el trasvase de líquido ocurra de manera continua, el orificio de salida debe estar a una altura inferior a la de la superficie libre del líquido. En el caso de que el orificio de salida se encuentre por encima de la superficie del líquido, se puede bombear de manera continua accionando repetidamente el sistema de vacío.

2.1.2. BOMBAS DE PISTÓN

Sistemas de bombeo manual que emplean un pistón como elemento principal de su mecanismo de funcionamiento. También denominadas bombas aspirantes, recíprocas o de émbolo.

Bombas de succión

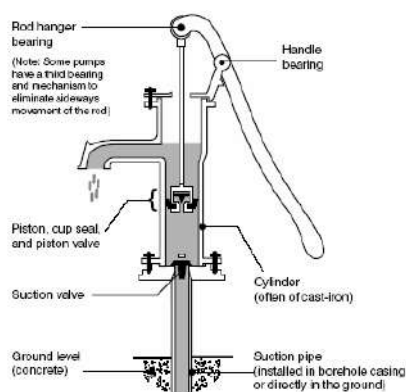
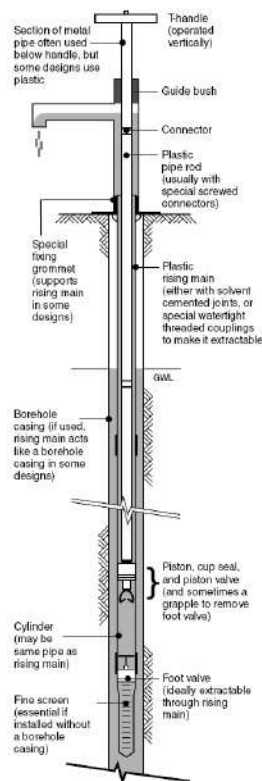


Figura 2.2 Bomba de succión. Fuente: TFG de "Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate" por Javier Tobella Arredondo

Este sistema consiste en un pistón contenido en un cilindro que al elevarse provoca el vacío entre dos válvulas antirretorno, que se encuentran en el pistón y en la parte inferior del cilindro, respectivamente. Este vacío genera una diferencia de presión con respecto al pozo, que permite la elevación del agua por una tubería. El movimiento del pistón se realiza mediante un sistema de palanca. La altura máxima de bombeo es de 7 metros al nivel del mar, reduciéndose a alturas mayores. La bomba debe cebarse antes de cada uso.

Bombas de acción directa



Este sistema consiste en una varilla de plástico que se encuentra contenida a lo largo de un cilindro hasta el agua del pozo. La bomba se acciona mediante movimientos verticales de dicha varilla sin utilizar ninguna ventaja mecánica. En el extremo inferior de la varilla se encuentra un pistón con una válvula antirretorno, así como en la parte inferior del cilindro. En cada descenso de la varilla, el agua atraviesa la válvula quedando contenida en el cilindro por encima del pistón. En cada ascenso, el agua se eleva por el cilindro. Se alcanzan alturas de bombeo de entre 10 y 20 metros. Al elevarse la columna de agua directamente con la fuerza del usuario, el diámetro del cilindro se reduce con respecto a otros sistemas y la varilla es hueca para aprovechar la flotación de la misma. Los modelos más habituales que funcionan con este diseño son la bomba “Tara” desarrollada inicialmente en Bangladesh, la “Nira” de origen finlandés y la “Malda”.

Figura 2.3 Bomba de acción directa. Fuente: TFG de "Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate" por Javier Tobella Arredondo

Bombas de pozo profundo

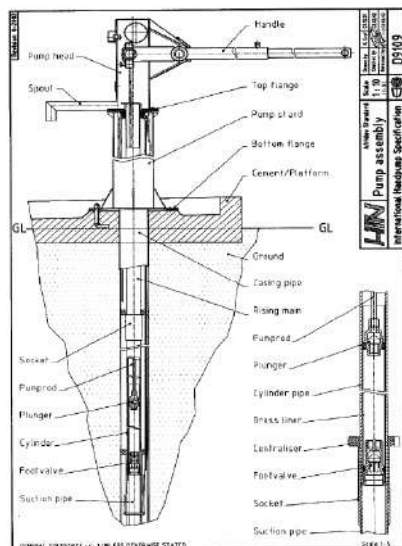


Figura 2.4 Bomba de pozo profundo Afridev. Fuente: TFG de "Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate" por Javier Tobella Arredondo

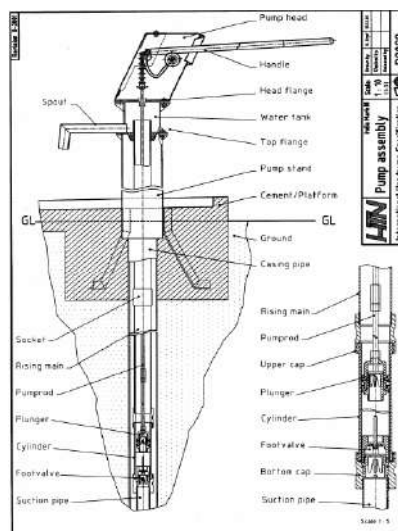


Figura 2.5 Bomba de pozo profundo Indian Mark. Fuente: TFG de "Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate" por Javier Tobella Arredondo

Este diseño utiliza un sistema similar a la bomba de acción directa, pero en este caso la varilla que sujeta el pistón es maciza y metálica, y se aplica la fuerza mediante una palanca. Esto permite que se alcancen profundidades de 45 metros. Además, el mantenimiento es mucho más sencillo porque la válvula de pie es accesible desde el exterior y los tramos de la varilla y la tubería son desmontables sin herramientas. Los modelos más habituales son el “Afridev” y el “Indian Mark”.

2.1.3. BOMBAS DE DIAFRAGMA

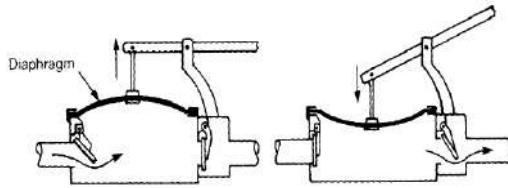


Figura 2.6 Bomba de diafragma. Fuente: TFG de "Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate" por Javier Tobella Arredondo

Este sistema se basa en el movimiento de una membrana elástica en contacto con una cámara delimitada por dos válvulas antirretorno, una de entrada y otra de salida. Al elevarse la membrana se reduce la presión en el interior de la cámara y entra el líquido por una de las válvulas. Al bajar la membrana, aumenta la presión y se expulsa el líquido por la otra válvula.

Bomba de Vergnet

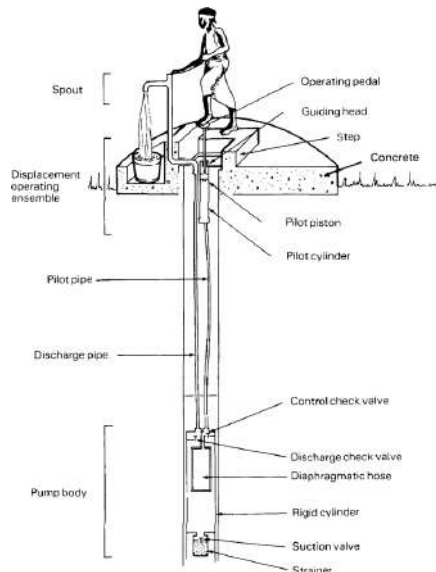


Figura 2.7 Bomba de Vergnet. Fuente: Food and Agriculture Organization of the UN

Este sistema se acciona mediante un pedal y un pistón asociado a él. El diafragma se encuentra en el interior de un cilindro. Al pisar el pedal, baja el pistón y se infla el diafragma a través de la tubería piloto. De esta manera, se aumenta la presión en el cilindro, cerrándose la válvula de succión y abriéndose la de descarga. Así sube el agua por la tubería de descarga. Al retirar la presión del pedal, el diafragma se desinfla y baja la presión en el cilindro, cerrándose la de descarga y abriéndose la válvula de succión, que permitirá la entrada de agua del pozo en el cilindro. La ventaja de este sistema es que la presión se aplica utilizando el peso corporal y, además, la bomba puede ser extraída para su mantenimiento de manera manual.

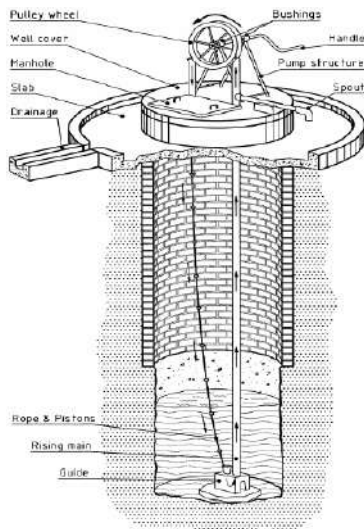
Bomba Abi-ASM

El sistema es el mismo que el de la bomba Vergnet, pero en este caso el accionamiento se realiza a través de una palanca en lugar de un pedal.

2.1.4. BOMBAS DE CUBO Y CUERDA

Este sistema de bombeo consiste en un cubo (o bolsa) vacío que se baja a un pozo mediante una polea y una cuerda, y se sube lleno de agua. El mantenimiento es sencillo y se utilizan materiales y herramientas accesibles. Existen riesgos de contaminación del pozo debido al contacto del agua con el cubo y la tierra exterior. Además, la profundidad de bombeo no supera los 10 metros.

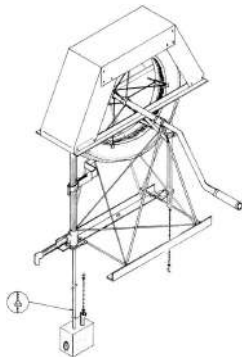
2.1.5. BOMBA DE MECATE



Esta bomba consiste en un sistema de polea en el cual la cuerda tiene una serie de pistones a lo largo. Al girar la polea la parte de la cuerda que está subiendo pasa por dentro de una tubería, de tal manera que los pistones empujan el agua hacia arriba. En la parte inferior hay una guía que facilita la entrada de la cuerda y los pistones en la tubería. El sistema alcanza profundidades de hasta 50 metros. Además, requiere bajo mantenimiento, tiene bajo coste y los requerimientos tecnológicos para su fabricación son bajos.

Figura 2.8 Bomba de mecate. Fuente: TFG de "Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate" por Javier Tobella Arredondo

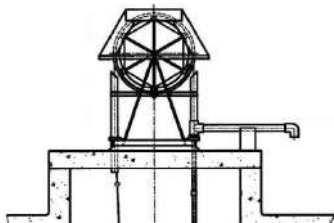
Bomba de Nicaragua



Ésta es una alternativa de diseño en la que se acciona la polea mediante una manivela.

Figura 2.9 Bomba de Nicaragua. Fuente: Grupo de Tecnologías Apropriadas de la Universidad Carlos III de Madrid

Bomba de Madagascar



En este caso, se utiliza un volante para accionar la polea.

Figura 2.10 Bomba de Madagascar. Fuente: Grupo de Tecnologías Apropriadas de la Universidad Carlos III de Madrid

2.2. BOMBEO EÓLICO

Como ya se dijo antes, la tecnología utilizada para el aprovechamiento es la energía eólica, lo que también es un factor determinante en la mejora de la calidad de vida en lo que respecta a la obtención de agua en los poblados. El motivo es la reducción del esfuerzo físico que hay que realizar, tanto para accionar la bomba como para transportar el agua. Esto se debe a que esta tecnología puede permitir la reducción de la distancia recorrida para recoger el agua si la unión entre la bomba y el aerogenerador es adecuada, porque es posible aprovechar al máximo la fuerza del viento con una turbina en el lugar adecuado y bombear agua en un pozo cercano al poblado aunque el agua esté a mayor profundidad. Para esto, se debe elegir tipo de unión entre bomba y turbina más apropiado, para lo cuál se debe tener en cuenta el coste, lógicamente.

Los principales tipos de uniones son los siguientes:

2.2.1. UNIÓN MECÁNICA

La transmisión de energía entre el eje del rotor y la bomba se realiza a través de elementos mecánicos.

Molinos de viento que accionan bombas de pistón

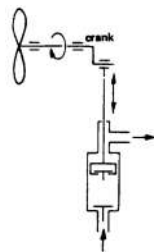


Figura 2.11 Molino de viento accionando una bomba de pistón. Fuente: "Wind Pumping Handbook" por Joop van Meel y Paul Smulders

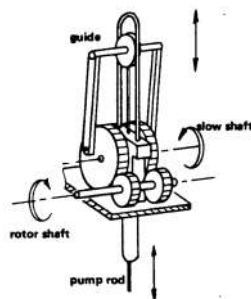


Figura 2.12 Sistema de transmisión de dos varillas impulsoras excéntricas con caja de engranajes simétrica. Fuente: "Wind Pumping Handbook" por Joop van Meel y Paul Smulders

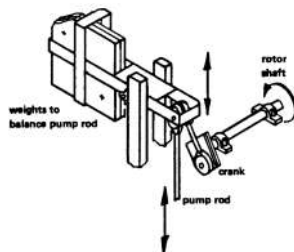


Figura 2.13 Sistema de transmisión directa. Fuente: "Wind Pumping Handbook" por Joop van Meel y Paul Smulders

El eje del rotor se acopla al pistón de la bomba, directamente o mediante una caja de engranajes. Es el sistema de bombeo con energía del viento más habitual.

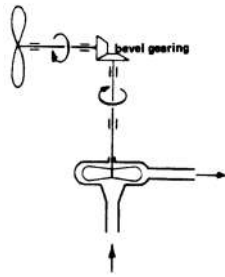
En modelos pequeños, la caja de engranajes reduce las revoluciones del rotor, normalmente por un factor de 3. El sistema de engranajes suele ser doble para garantizar la estabilidad de la transmisión y suele funcionar en un baño de aceite que debe cambiarse una vez al año.

Para transformar el movimiento rotativo del rotor en el movimiento recíproco del pistón, se utiliza una excéntrica. Existen cuatro tipos:

- Dos varillas impulsoras están conectadas excéntricamente al engranaje lento. Una de ellas gira con el engranaje y hace de eje de giro de la otra, cuyo movimiento está supeditado a una guía que fuerza al movimiento lineal. Esta última está conectada a la biela de la bomba.
- El rotor y la biela de la bomba se conectan directamente a través de una manivela.
- El rotor y la biela de la bomba se conectan a través de una manivela con una guía.
- El rotor y la biela de la bomba se conectan a través de una manivela con un sistema de palanca.

Además, el mecanismo incluye un sistema de seguridad como protección en caso de tormenta o de ráfagas de viento fuertes. El diseño del rotor hace que plano de las palas se oriente en perpendicular a la dirección del viento para aprovecharlo al máximo, pero cuando se supera la velocidad máxima, el plano de las palas se gira 90° para reducir la velocidad de giro. También se incluye un sistema de frenado manual.

Molinos de viento con transmisión rotativa



La energía se transmite a través de una transmisión rotativa como puede ser un sistema de engranajes cónicos a una bomba rotativa como puede ser una bomba centrífuga o una bomba de tornillo.

Se suelen utilizar para altura baja y volumen alto.

Figura 2.14 Sistema de transmisión rotativa.
Fuente: "Wind Pumping Handbook" por
Joop van Meel y Paul Smulders

Molinos de viento con transmisión neumática

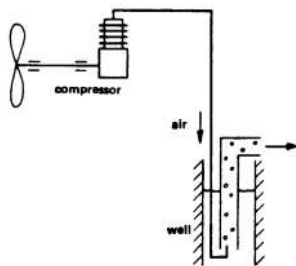


Figura 2.15 Sistema de transmisión
neumática. Fuente: "Wind Pumping
Handbook" por Joop van Meel y Paul
Smulders

El eje del rotor está conectado a un compresor, que acciona una bomba de elevación por aire comprimido. En este tipo de bombas, se inyecta aire por la parte inferior de la tubería de extracción, de tal manera que el agua y el aire se mezclan formando un fluido menos denso que el agua que sube por dicha tubería. Además, tienen una serie de válvulas que garantizan el no-retorno del agua.

Este tipo de transmisión permite que el aerogenerador se instale a cierta distancia del pozo y se eviten piezas móviles en el pozo que podrían deteriorarse.

Molinos de viento con transmisión hidráulica

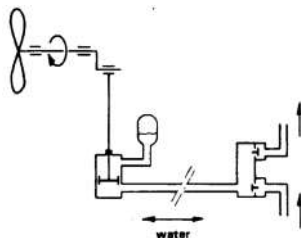


Figura 2.16 Sistema de transmisión
hidráulica. Fuente: "Wind Pumping
Handbook" por Joop van Meel y Paul
Smulders

En la transmisión hidráulica existen dos circuitos independientes de líquido. Uno de ellos contiene el agua del pozo y el otro un líquido de trabajo (agua, habitualmente). Una manivela accionada por el rotor mueve el pistón que separa los dos líquidos. Durante el movimiento de avance, el agua del pozo contenida en el sistema de transmisión atraviesa una válvula antirretorno y sube por la tubería de salida. Durante el movimiento de retorno, el agua se extrae del pozo, atravesando otra válvula antirretorno y llenando el sistema de transmisión. El circuito del líquido de trabajo contribuye al vaivén del pistón, mediante la compresión y descompresión de una cámara hermética de aire.

2.2.2. UNIÓN ELÉCTRICA

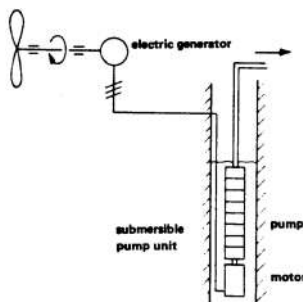


Figura 2.17 Sistema de transmisión por
generación eléctrica. Fuente: "Wind Pumping
Handbook" por Joop van Meel y Paul Smulders

En estos sistemas la energía rotativa del rotor se transforma en electricidad a través de un generador eléctrico y, a continuación, se utiliza la energía eléctrica para alimentar un motor que acciona a su vez una bomba.

Este tipo de transmisión también permite que el aerogenerador se instale lejos del pozo.

2.3. TIPOS DE POZOS

Uno de los principales problemas de estos sistemas es que se accionan utilizando directamente la fuerza del usuario y, además, los pozos en muchas ocasiones se encuentran lejos del poblado, por lo que es necesario andar largas distancias cargando el agua extraída.

Por ello, otro factor de gran importancia es la situación y el tipo de pozo. Para analizar la posibilidad de acceder a él de manera remota o de construir un nuevo pozo más próximo al poblado, se debe tener en cuenta la tipología del pozo y la tipología de la tecnología utilizada para el aprovechamiento de la energía eólica y su conexión al sistema de bombeo.

La clasificación de los pozos se suele realizar en función del método utilizado para su construcción, ya que esta clasificación toma en consideración el tipo de terreno, la profundidad a la que se encuentra el agua y los recursos necesarios para realizar la obra.

2.3.1. POZOS EXCAVADOS

Son hoyos excavados en la tierra con palas o retroexcavadoras. Requieren de suelos blandos. Se suelen reforzar con piedras, ladrillos u otro material para evitar el derrumbe. Tienen una profundidad de entre 10 y 20 metros. Su construcción es de bajo coste. Además, debido a su poca profundidad tienen alto riesgo de contaminación y de secarse.

2.3.2. POZOS HINCADOS, INSTANTÁNEOS O CON PERFORACIÓN DE DRENAJE

Se perforan mediante el hundimiento hasta la capa freática de un tubo perforado con el extremo puntiagudo. En la punta suele haber un filtro o tamiz para permitir que pase el agua y se retengan las partículas finas del terreno. Esta obra se puede realizar en terrenos de arena o grava.

Se emplean tres posibles técnicas: batido, inyección de agua y rozado.

Batido o percusión

Una herramienta pesada, denominada barrena, se deja caer sobre el tubo sistemáticamente. Se obtienen pozos de pequeño diámetro (entre 25 y 100 mm) y profundidades entre 15 y 20 metros, según la dureza del suelo.

Inyección o lanzamiento de agua

Se inyecta agua en el interior del tubo y ésta sale por la punta generando lodos alrededor del tubo. Se obtienen pozos de entre 30 y 40 metros.

Rozado o procedimiento “Benoto”

En este caso el tubo no tiene punta y es de gran diámetro. El proceso consiste en excavar la tierra que se encuentra en el interior del tubo y que éste vaya cayendo por su propio peso. Se obtienen pozos de varios metros de diámetro y profundidades de entre 15 y 20 metros.

2.3.3. POZOS AFORADOS O PERFORACIONES

Son orificios cilíndricos que se excavan verticalmente por percusión o por la acción rotatoria de una herramienta cortante.

Se emplean dos técnicas: manual y mecanizada. La perforación manual es más barata, pero es más lenta y sólo es posible en suelos blandos.

Manual

Se utilizan herramientas manuales, y se obtienen pozos poco profundos.

- **Con ahoyadora**

Consiste en hacer girar un taladro. Se alcanzan profundidades de entre 15 y 25 metros.

- **A percusión**

Consiste en dejar caer una herramienta pesada cortante, llamada barrena, atada a una cuerda o cable sobre el orificio de perforación. Se alcanzan profundidades de hasta 25 metros.

- **Por inyección o lanzamiento de agua**

Existen dos métodos:

- **Lanzamiento rápido a presión o directo.** Consiste en hundir un tubo en el suelo inyectado agua en su interior. La diferencia con los pozos hincados es que en este caso en tamiz se añade al final del proceso. Se alcanzan profundidades de hasta 35 metros.
- **Lanzamiento con agua rotatoria.** El procedimiento es igual al anterior, pero en este caso se utiliza una herramienta tridentada que se hace rotar manualmente desde la superficie con una barra. Se alcanzan profundidades de hasta 40 metros.

Por eliminación de lodos

Una barra de perforación se hunde en el suelo accionando una palanca de manera manual, mientras se hace circular agua para que lleve a la superficie los materiales triturados por la herramienta. Se alcanzan profundidades de hasta 35 metros.

Mecanizada

Se utilizan equipos ligeros o equipos pesados con plataformas de perforación y se obtienen pozos más profundos. Existen dos métodos: por martilleo y por técnica rotatoria.

- **Por martilleo**

Se combina la acción de un martillo picador neumático y de una taladradora provista de barras de perforación con una broca en el extremo. El compresor de aire se utiliza para triturar el terreno durante la fase de percusión y para evacuar desechos durante la fase de descarga.

- **Por técnica rotatoria**

Se utiliza una taladradora con una barra de perforación y una herramienta cortante, llamada tricono, en el extremo.

Capítulo 3. Caudal de agua necesario

3.1. CAUDAL DE AGUA NECESARIO

Para tomar decisiones acerca de la instalación del pozo, el dimensionamiento de la bomba y, por tanto, el dimensionamiento del aerogenerador, así como el del tanque de agua, es necesario conocer el caudal de agua que la instalación ha de suministrar.

En este caso, el suministro de agua se limitará al uso doméstico, ya que la finalidad de la instalación es proporcionar este servicio a poblados con dificultad de acceso al agua, y no se alimentarán instalaciones de usos multitudinarios o grandes consumos de agua como instalaciones industriales, grandes colegios, hospitales, grandes plantaciones agrícolas u otros.

En el supuesto de aprovechar este proyecto para aplicaciones más amplias, el cálculo del caudal tendría que ajustarse a las nuevas finalidades del agua extraída.

3.2. USO DOMÉSTICO DEL AGUA

El agua de uso doméstico, según la Organización Mundial de la Salud, es el agua utilizada para todos los fines domésticos habituales, incluido el consumo, el baño y la preparación de alimentos.

En el estudio “Drawers of water: assessing domestic water use in Africa” por John Thomson y Sandy Cairncross, se estableció una clasificación de los usos domésticos del agua de tres categorías, a la que posteriormente se añadió una cuarta en una actualización del estudio llamada “Drawers of water II”: consumo, higiene, comodidades y uso productivo.

3.2.1. CONSUMO

Incluye el agua para beber y comer.

Según el artículo “Domestic Water Quantity, Service Level and Health” por Guy Howard y Jamie Bartram, la cantidad de agua que es necesario ingerir depende de múltiples factores como la edad, el sexo, las condiciones climatológicas o el ejercicio físico realizado, y hay una gran variabilidad. No obstante, resume los volúmenes diarios necesarios para una hidratación adecuada en la siguiente tabla:

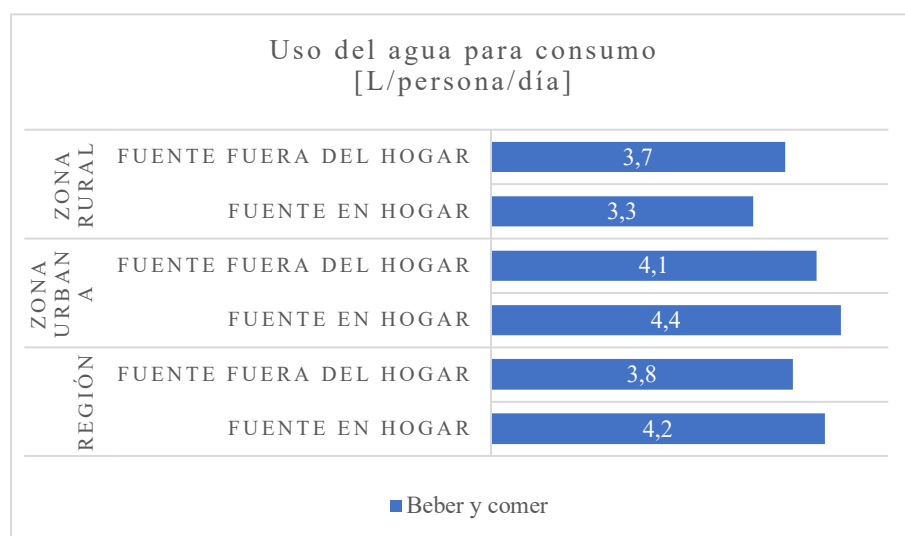
	Volumen (litros/día)		
	Condiciones promedio	Trabajo físico a altas temperaturas	Necesidades totales en embarazo/lactancia
Mujer adulta	2,2	4,5	4,8 (embarazo) 5,5 (lactancia)
Hombre adulto	2,9	4,5	-
Niño/a	1,0	4,5	-

Tabla 3.1 Volumen de agua requerido para hidratación. Fuente: “Domestic Water Quantity, Service Level and Health” por Guy Howard y Jamie Bartram

Según esta tabla, el caso más restrictivo es el caso de una madre lactante, con un consumo de diario de **5,5 litros** de agua.

Por otra parte, el agua también es esencial como medio para preparar comida. La cantidad de agua necesaria para cocinar depende de la dieta y de la función que tenga el agua en la cocina. Sin embargo, en casi todas las culturas la base de la comida es algún vegetal o cereal rico en carbohidratos, como el arroz. La cantidad recomendada diaria por persona de este tipo de alimentos, según la pirámide de alimentos propuesta por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), es de entre 6 y 11 oz., es decir, entre 170 y 300 gramos aproximadamente. Para cocinar esa cantidad de arroz, que es la base alimenticia más usada del mundo, es necesario aproximadamente medio litro de agua. Teniendo en cuenta que también es necesaria el agua para cocinar otros tipos de alimentos se tomará como referencia un volumen de **2 litros** de agua para cocinar.

Según el estudio “Drawer of water II”, el uso de agua para para el consumo se muestra en la gráfica a continuación, basada en datos tomados en Uganda, Tanzania y Kenia.



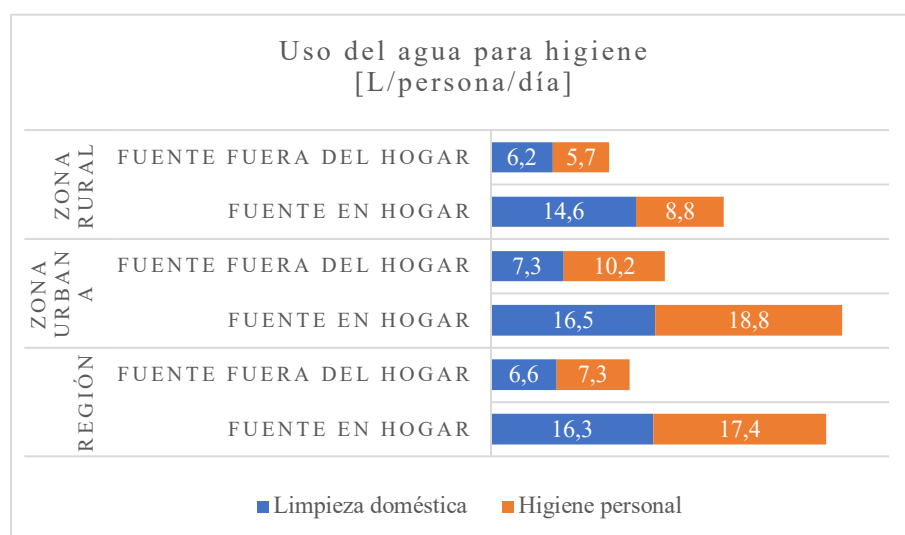
Gráfica 3.1 Uso del agua para el consumo en Uganda, Tanzania y Kenia. Fuente: “Drawer of water II: 30 years of change in domestic water use & environmental health in east Africa” por John Thompson, Ina T Porras, James K Tumwine, Mark R Mujwahuzi, Munguti Katui-Katu

Por lo tanto, es razonable tomar como valor de referencia un volumen diario de agua relativo al consumo de unos **7,5 litros** por persona.

3.2.2. HIGIENE

Incluye el agua para el aseo personal y la limpieza doméstica.

Según el estudio “Drawer of water II”, el uso de agua para para la higiene se muestra en la gráfica a continuación, basada en datos tomados en Uganda, Tanzania y Kenia.



Gráfica 3.2 Uso del agua para la higiene en Uganda, Tanzania y Kenia. Fuente: “Drawer of water II: 30 years of change in domestic water use & environmental health in east Africa” por John Thompson, Ina T Porras, James K Tumwine, Mark R Mujwahuzi, Munguti Katui-Katua, Nick Johnstone y Libby Wood

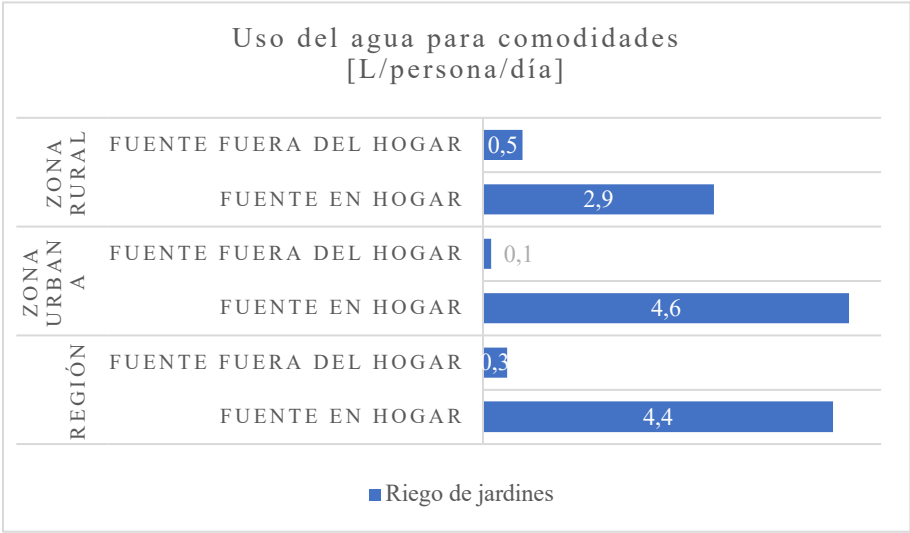
La cantidad de agua consumida para la higiene se muestra por persona y por día, y varía mucho en función de la distancia a la que se encuentre la fuente de agua, siendo alrededor del doble en el caso de encontrarse la fuente consumida en el hogar.

Uno de los objetivos principales de este proyecto es facilitar el acceso al agua y por lo tanto reducir las distancias recorridas para recogerla. Además, esta categoría tiene especial relevancia por su relación directa y muy estrecha con la salud.

Esto quiere decir que el valor debe acercarse lo máximo a la cantidad de agua que se consumiría en el caso de tener la fuente de agua en el hogar, pero teniendo en cuenta que tal cercanía no es posible. Por tanto, se tomará como valor de referencia **30 litros** de agua por persona al día para la higiene.

3.2.3. COMODIDADES

Incluye el agua utilizada, por ejemplo, para el lavado del coche, el riego o una piscina. Según el estudio “Drawer of water II”, el uso de agua para para las comodidades se muestra en la gráfica a continuación, basada en datos tomados en Uganda, Tanzania y Kenia.



Gráfica 3.3 Uso del agua para las comodidades en Uganda, Tanzania y Kenia. Fuente: “Drawer of water II: 30 years of change in domestic water use & environmental health in east Africa” por John Thompson, Ina T Porras, James K Tumwine, Mark R Mujwahuzi, Munguti Katui-Katu

En esta categoría los únicos datos obtenidos fueron del riego de jardines. Es destacable la diferencia de este uso entre el caso de tener la fuente de agua en el hogar y no tenerla, ya que los valores de este último son prácticamente nulos. Además, hay que tener en cuenta que, especialmente en las zonas rurales, estos jardines no siempre tienen una finalidad decorativa, sino que en algunos casos tienen una finalidad productiva, ya que contienen huertos u otras plantaciones para la subsistencia. Por esta razón deberían considerarse parte de la categoría de uso productivo, que se analiza en el siguiente apartado.

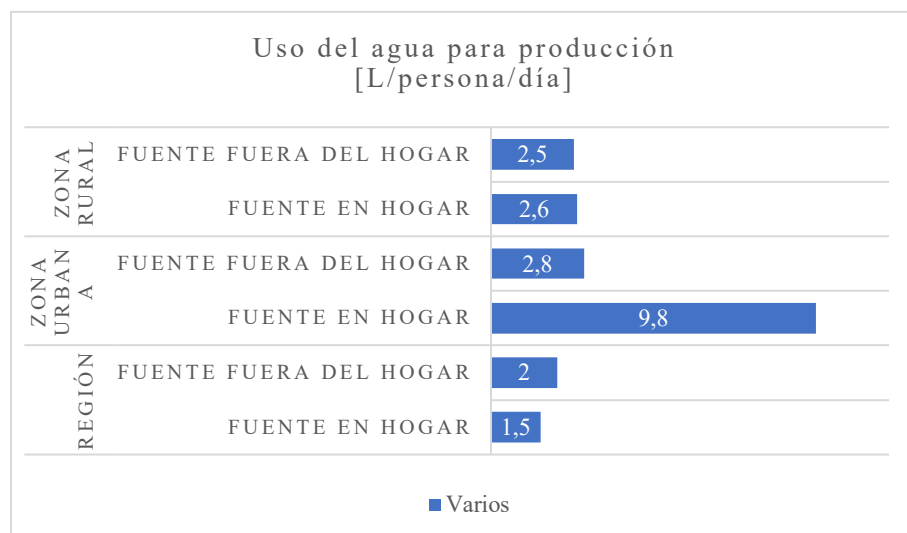
Considerando la posibilidad de que este uso de agua puede ser realmente parte del uso productivo y que, como ya se dijo antes, se trata de reducir las distancias recorridas para la recogida de agua, el valor de referencia de las comodidades debe acercarse al valor correspondiente a tener la fuente de agua en el hogar.

Por lo tanto, se tomará un valor de **4 litros** por persona al día para las comodidades.

3.2.4. USO PRODUCTIVO

Es especialmente relevante para familias pobres en países en vías de desarrollo, e incluye el uso de agua para una gran variedad de actividades como abrevar ganado, regar el huerto, construir casas o producir cerveza.

Según el estudio “Drawer of water II”, el agua para para el uso productivo se muestra en la gráfica a continuación, basada en datos tomados en Uganda, Tanzania y Kenia.



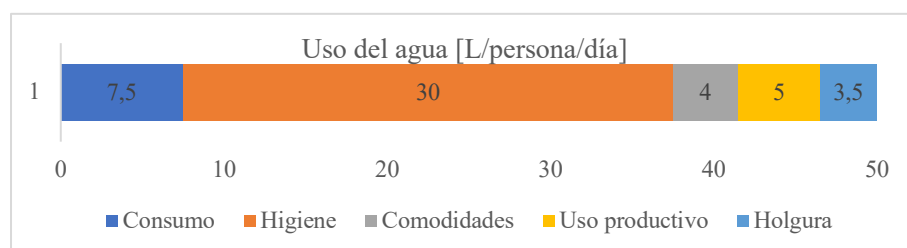
Gráfica 3.4 Uso del agua para la producción en Uganda, Tanzania y Kenia. Fuente: “Drawer of water II: 30 years of change in domestic water use & environmental health in east Africa” por John Thompson, Ina T Porras, James K Tumwine, Mark R Mujwahuzi, Munguti Katui

Estos datos son una referencia, pero de poca precisión, ya que no tienen en cuenta las tareas necesarias para las actividades de esta categoría que se realizan lejos del hogar. Por ejemplo, en algunos casos el ganado se lleva a otros lugares para ser provisto de agua.

En este caso se tomará un valor de referencia de **5 litros** por persona al día.

3.3. RESULTADOS

Según el análisis realizado en el apartado anterior, los resultados son los que se muestran en la siguiente gráfica:



Gráfica 3.5 Valores de referencia de las diferentes categorías del uso del agua. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, se ha añadido una holgura a los valores establecidos anteriormente para alcanzar un caudal total de **50 litros de agua por persona al día**.

Según los datos estadísticos del estudio “Drawers of water II” (Anexo II y III), el promedio de agua total consumida diariamente cuando la fuente se encuentra en el hogar es de 65,8 litros por persona. En el caso de que la fuente no se encuentre en el hogar, en zonas urbanas este valor es de 23,7 litros por persona y en zonas rurales es de 18,3 litros por persona. Por tanto, el valor establecido es razonable en comparación con estos datos.

Además, según la Organización Mundial de la Salud, para tener acceso básico a 20 litros de agua al día, la fuente del agua debe encontrarse a menos de 1 km y el tiempo invertido en la recogida no debe superar los 30 minutos. Teniendo en cuenta esto, el valor establecido supera los mínimos de un acceso básico a agua.

3.4. TRATAMIENTO POSTERIOR DEL AGUA

En este proyecto no se tiene en cuenta el tratamiento posterior a la extracción que el agua debe recibir para alcanzar los estándares de calidad propuestos por la Organización Mundial de la Salud.


~~~~~

## Capítulo 4. Niveles freáticos en África

~~~~~

En este capítulo se explican los conceptos fundamentales y aplicables en este proyecto, de cómo acceder al nivel freático del suelo, es decir, la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea.

Para poder hacer una instalación de este tipo de la manera más eficiente, en el caso de que no exista un pozo construido previamente, es necesario localizar el lugar óptimo para realizar la perforación en el cuál el agua esté lo más cerca posible de la superficie.

4.1. MAPA DE NIVELES FREÁTICOS

Para tener una idea inicial de la profundidad a la que se puede encontrar el agua, se divide el mapa de África en diferentes zonas.

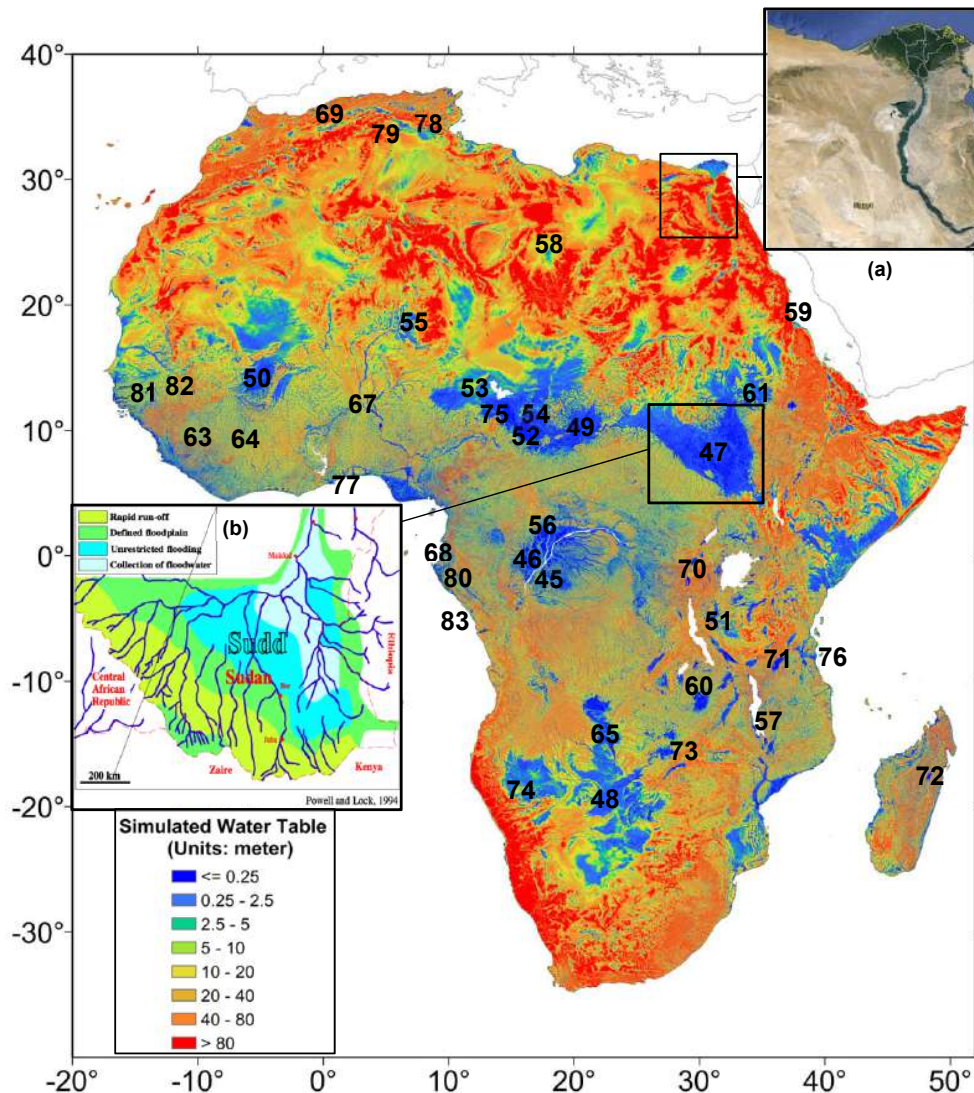


Figura 4.1 Mapa de zonas freáticas en África. Fuente: "Global Patterns of Groundwater Table Depth" por Y. Fan, H. Li y G. Míguez-Macho

En la figura se muestran el mapa de las zonas freáticas en África e imágenes más detalladas del oasis en la desembocadura del Nilo (a) y las características de crecida de la región del Sudd en Sudán (b). Los números indican los mayores humedales Ramsar en este continente.

Como se puede observar, las zonas en las que el nivel freático se encuentra a mayor profundidad son las zonas más alejadas del Ecuador, con profundidades que superan en su mayoría los 20 metros y alcanzan valores superiores a 80 metros en las zonas norte del desierto del Sahara, el Atlas marroquí, la costa del mar Rojo y el norte de la península de Somalia, y en el suroeste en Namibia y Sudáfrica. En las zonas en torno al Ecuador, la profundidad de los niveles freáticos se encuentra en su mayoría en torno a los 20 metros.

4.2. HUMEDALES

Los humedales son zonas en las que el agua se encuentra más cercana a la superficie. La siguiente lista incluye los humedales Ramsar de África, es decir, aquellos designados como de importancia internacional.

	Humedal	País	Estado	Zona protegida	Lat.	Lon.
45	<i>Ngiri-Tumba-Maindombe</i>	Dem Rep Congo	Equateur, Bandundu	65,696	-1.50	17.50
46	<i>Grands affluents</i>	Congo	Plateaux, Cuvette, Sangha, Likouala	59,081	-0.25	16.70
47	<i>Sudd</i>	Sudan	Southern Sudan	57,000	7.57	30.65
48	<i>Okavango Delta System</i>	Botswana	Ngamiland	55,374	-19.28	22.90
49	<i>Plaines d'inondation des Bahr Aouk et Salamat</i>	Chad	Salamat, Bahr Koh	49,220	10.75	20.55
50	<i>Delta Intérieur du Niger</i>	Mali	Mopti, Ségou, Tomboctou	41,195	15.20	-4.10
51	<i>Malagarasi-Muyovozi Wetlands</i>	Tanzania	Kigoma, Shinyanga, & Tabora	32,500	-5.00	31.00
52	<i>Plaines d'inondation du Logone et les depressions Toupouri</i>	Chad	Chari-Baguirmi, Mayo-Kebbi, Tandjilé	29,789	10.50	16.23
	<i>Partie tchadienne du lac Tchad</i>	Chad	Lac, Kenam	16,482	14.33	13.62
	<i>Lake Chad Wetlands in Nigeria</i>	Nigeria	Borno	6,074	13.07	13.80
	<i>Lac Tchad</i>	Niger	Diffa	3,404	14.25	13.33
	<i>Partie Camerounaise du Lac Tchad</i>	Cameroon	Far North Region	1,250	12.77	14.32
53				27,210		
54	<i>Plaine de Massenya</i>	Chad	Baguirmi	25,260	11.25	16.25
55	<i>Gueltas et Oasis de l'Aïr</i>	Niger	Agadez	24,132	18.30	9.50
56	<i>Sangha-Nouabalé-Ndoki</i>	Congo	Sangha, Likouala	15,250	1.68	16.43
57	<i>Lake Niassa and its Coastal Zone (Lago Niassa e Zona Costeira)</i>	Mozambique	Niassa Province	13,637	-12.50	34.85
58	<i>Banc d'Arguin</i>	Mauritania		12,000	20.83	16.75
59	<i>Suakin-Gulf of Agig</i>	Sudan	Red Sea State	11,250	18.57	38.08
60	<i>Bangweulu Swamps</i>	Zambia	Northern Province	11,000	-11.42	29.98
61	<i>Dinder National Park (DNP)</i>	Sudan	Sennar State	10,846	12.32	34.78
62	<i>Niger-Niandan-Milo</i>	Guinea	Kankan	10,464	10.50	-9.50
63	<i>Niger-Mafou</i>	Guinea	Kankan, Faranah	10,155	9.88	-10.62

64	<i>Sankarani-Fié</i>	Guinea	Kankan	10,152	10.42	-8.50
65	<i>Zambezi Floodplains</i>	Zambia	Western Province	9,000	-15.25	23.25
66	<i>Tinkisso</i>	Guinea	Faranah, Kankan	8,960	11.22	-10.58
67	<i>Site Ramsar du Complexe W</i>	Benin	Alibori	8,955	11.83	2.50
68	<i>Site Ramsar Bas Ogooué</i>	Gabon	Moyen Ogooué, Ogooué maritime	8,627	-0.65	10.02
69	<i>Chott Ech Chergui</i>	Algeria	Saïda	8,555	34.45	0.83
70	<i>Parc national des Virunga</i>	Dem Rep Congo	Nord-Kivu	8,000	-1.25	29.50
71	<i>Kilombero Valley Floodplain</i>	Tanzania	Morogoro Region	7,967	-8.67	36.17
72	<i>Le Lac Alaotra: les zones humides et bassins versants</i>	Madagascar	Ambatondrazaka	7,225	-17.47	48.52
73	<i>Kafue Flats</i>	Zambia	Southern & Central Provinces	6,005	-15.68	27.27
74	<i>Etosha Pan, Lake Oponono & Cuvelai drainage</i>	Namibia		6,000	-19.25	15.50
75	<i>The Waza Lagone Floodplain</i>	Cameroon	Far North Region	6,000	11.63	14.62
76	<i>Rufiji-Mafia-Kilwa Marine Ramsar Site</i>	Tanzania	Coast, Lindi Regions	5,969	-8.13	39.63
77	<i>Zones Humides du Littoral du Togo</i>	Togo	Maritime	5,910	6.57	1.42
78	<i>Chott El Jerid</i>	Tunisia	Tozeur, Kebili	5,862	33.70	8.40
79	<i>Chott Melghir</i>	Algeria	El Oued, Biskra, Khenchela	5,515	34.25	6.32
80	<i>Site Ramsar des Monts Birougou</i>	Gabon	Ngounié, Ogooué- lolo	5,368	-0.65	10.02
81	<i>Gambie-Oundou-Liti</i>	Guinea	Labé	5,274	11.55	-12.30
82	<i>Bafing-Falémé</i>	Guinea	Labé	5,173	12.00	-11.50
83	<i>Conkouati-Douli</i>	Congo	Kouilou	5,050	-3.92	11.45

Tabla 4.1 Humedales Ramsar en África. Fuente: "Global Patterns of Groundwater Table Depth" por Y. Fan, H. Li y G. Miguez-Macho

En la tabla se muestran los humedales designados como de importancia internacional bajo la Convención Ramsar. Aquellos que abarcan varios países se muestran sombreados y obtenida la superficie total.

Estas zonas son interesantes porque el agua se encuentra a menos de 2,5 metros de profundidad, por lo que la extracción de agua es mucho más sencilla.

4.3. DETERMINACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO

4.3.1. INDICADORES DEL NIVEL FREÁTICO

El nivel freático se puede estimar a partir de diferentes indicadores que no requieren material especializado ni grandes gastos económicos y que pueden ser identificados por personas sin formación relativa, como la vegetación, el suelo o la proximidad a agua.

Vegetación

En áreas donde el nivel freático está próximo a la superficie, la vegetación suele ser más exuberante y suele abundar la vegetación freatofita. Dicha vegetación se podrá localizar gracias al catálogo de plantas adjunto en el Anexo IV, que se ha obtenido a partir del artículo científico “Phreatophytes” por T. W. Robinson, del cual se han extraído únicamente aquellas variedades que se puedan encontrar en África. Para ello, se ha utilizado la guía fotográfica digital African Plants por medio de un programa informático desarrollado con la ayuda de Rafael Manzano, estudiante de Ingeniería Informática. Dicho programa filtra de la lista de plantas freatofitas obtenida de “Phreatophytes” aquellas que se encuentran en la guía.

Suelo

Existen varios estudios que se pueden hacer del suelo para hacer una previsión de dónde se encuentra el agua.

El relieve del terreno define el recorrido que hace el agua sobre la superficie. Mediante la observación de las curvas de nivel del terreno es posible determinar los flujos de escorrentía y las zonas más susceptibles a acumular agua. Lógicamente, el agua sigue el camino más directo hacia abajo y esto puede ser una referencia para trazar su recorrido. También la experiencia y la observación durante las temporadas de lluvia puede ayudar a localizar las acumulaciones.

Además, las zonas en las que los materiales del suelo sean más porosos tienen mayor facilidad para acumular agua, mientras que en las zonas en las que el suelo sea de materiales impermeables el agua tiende a escurrir hacia otra zona. Una forma de comprobar y comparar la porosidad de varias zonas del suelo es verter la misma cantidad de agua en diferentes puntos y medir el tiempo que tarda en ser absorbida, si bien es cierto que en algunos territorios esto puede ser un malgasto de un bien escaso.

Proximidad a agua

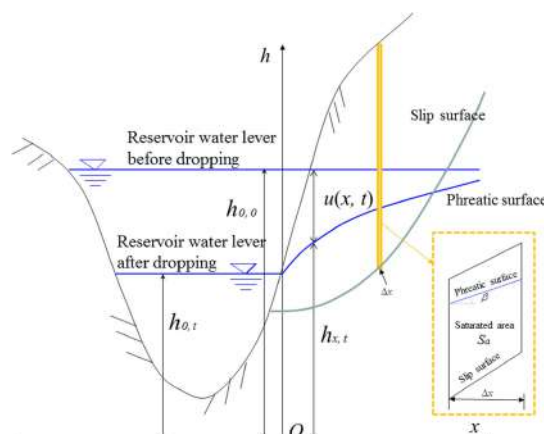


Figura 4.2 Nivel freático en una reserva de agua antes y después de una bajada de nivel. Fuente: “Huangtupo landslide stability under water level fluctuations of the Three Gorges reservoir” por Guanhua Sun, Hong Zheng, Huiming Tang y Fuchu Dai

Las zonas cercanas a ríos o lagos tienen la capa freática más cercana a la superficie.

En la figura, las líneas azules indican la superficie del agua en una reserva de agua y la superficie freática en las zonas próximas a ella, antes y después de bajar de nivel. Como se puede observar, en ambos casos la superficie freática se encuentra más próxima a la superficie de la tierra en las zonas más cercanas a la reserva. Sobre todo en el caso de que la pendiente de la costa sea baja.

Además, aunque el nivel de agua haya bajado, el nivel freático dibuja una curva que empieza en el nivel actual de agua y tiende al nivel de agua original.

La proximidad a agua salada puede suponer un nivel freático próximo a la superficie. Sin embargo, es probable que el agua esté contaminada por el agua salada y, por lo tanto, no sea potable.

4.3.2. MEDICIÓN CON PIEZÓMETRO

Los siguientes pasos muestran cómo tomar medidas de la profundidad freática.

1. Instalación de tubería piezométrica



Figura 4.3 Barrena de suelo manual. Fuente: Catálogo de muestro de suelos de Lapaca

Se realiza una perforación en el suelo para que entre una tubería de unos 5 cm de diámetro. La profundidad de la perforación depende de la estimación del nivel freático que se haya hecho en función de la zona con el mapa de niveles

freáticos y los indicadores expuestos en el apartado anterior. Para perforaciones de hasta 10 m, es posible utilizar una barrena manual similar a la de la imagen.

A continuación, se introduce una tubería de diámetro inferior a la perforación en la que se han realizado segmentos ranurados cada aproximadamente 10 cm en las alturas en las que se espera el ingreso de agua freática. Dichos segmentos ranurados se pueden realizar con una sierra. La tubería debe sobresalir unos 20 cm sobre el nivel de la tierra.

2. Agotamiento del nivel de agua

Se desaloja el agua del interior de la tubería con una sonda o con un piezo que funcione como un pistón, como puede ser una barra de acero maciza de diámetro inferior al diámetro interior de la tubería. Dicha pieza se ata a una cuerda o cadena por un extremo y se deja caer en el interior de la tubería hasta el fondo. A continuación, se extrae empujando el agua hacia el exterior.

Se debe tapar el extremo superior de la tubería para evitar el ingreso de agua de lluvia o de otras fuentes distintas a la capa freática.

3. Aporte de tierra

Para evitar filtraciones de agua desde la superficie por la holgura de la perforación en la tierra con respecto a la tubería, se realiza un aporte de tierra alrededor de la tubería con una pala.

4. Reposo de 48 horas

Se deja reposar la instalación durante 48 horas para estabilizar el agua del interior de la tubería con la del exterior antes de realizar la primera medida.

5. Tomar medida

Se utiliza una sonda piezométrica para tomar la medida de la profundidad a la que se encuentra el agua. Dicho instrumento consiste en una bobina de cable en cuyo extremo se encuentra un sensor de agua. El sensor se deja caer por el interior del tubo. La profundidad del agua se indica a través de un visor o a través de una bombilla que se enciende al detectar el agua y la medida se indica en una regla pintada en el cable.

En caso de no tener acceso a una sonda piezométrica convencional, en el apartado siguiente se muestra cómo fabricarla.

4.3.3. FABRICACIÓN DE SONDA PIEZOMÉTRICA

Sonda piezométrica con cuerda y recipiente

Se ata una cuerda a un recipiente de modo que quede la boca hacia arriba. El tamaño del recipiente deberá ser inferior al diámetro interior de la tubería piezométrica.

El recipiente se dejará caer por el interior de la tubería a profundidades cada vez mayores en intervalos de unos 20 cm. Cada vez que se deje caer se comprobará si el recipiente se ha llenado. En tal caso, se habrá alcanzado la superficie freática y la profundidad a la que se encuentra corresponderá con la longitud de cuerda introducida en la tubería.

Sonda piezométrica con circuito eléctrico

Material

- Percha metálica
- Poliespán u otro material flotante fácil de manipular
- Alambre de cobre
- Cable
- Portapilas (no es estrictamente necesario)
- Zumbador o LED
- Palo de helado o similar
- Pegamento

Montaje

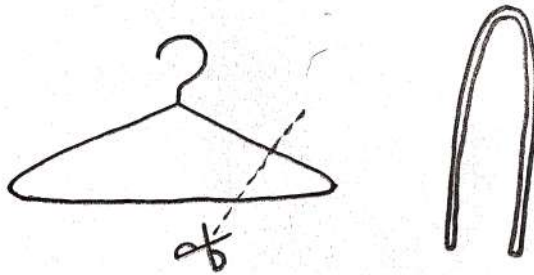


Figura 4.4 Pasos 1 y 2 del montaje de una sonda piezométrica.
Fuente: Elaboración propia

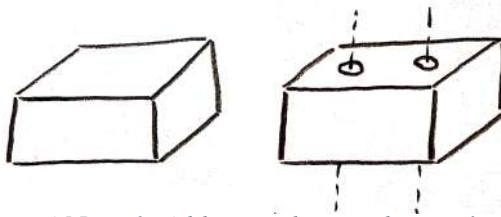


Figura 4.5 Pasos 3 y 4 del montaje de una sonda piezométrica.
Fuente: Elaboración propia

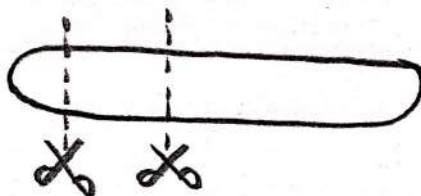


Figura 4.6 Paso 5 del montaje de una sonda piezométrica.
Fuente: Elaboración propia

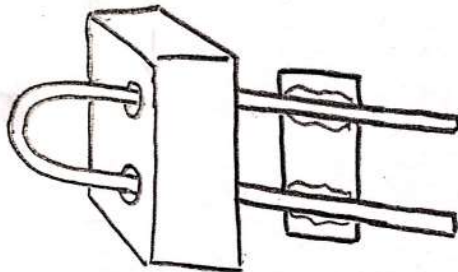


Figura 4.7 Paso 6 del montaje de una sonda piezométrica.
Fuente: Elaboración propia

1. Cortar una parte de la percha preferiblemente de una longitud mayor que 30 cm.
2. Doblar el alambre de la percha por la mitad de tal manera que ambas mitades queden a una distancia de unos 2 ó 3 cm.
3. Cortar una pieza de poliespán de aproximadamente 4x1x2cm.
4. Crear dos agujeros en la pieza a la misma distancia que los extremos del alambre de la percha y de mayor diámetro, de tal manera que se pueda insertar y pasar por ellos libremente.
5. Cortar una pieza del palo de helado de mayor longitud que la distancia entre los extremos del alambre de la percha.
6. Insertar la pieza de poliespán en el alambre de la percha y a continuación pegar la pieza del palo de helado a los extremos del alambre transversalmente.



Figura 4.8 Pasos 7 y 8 del montaje de una sonda piezométrica.
Fuente: Elaboración propia

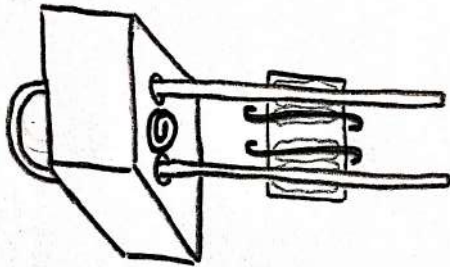


Figura 4.9 Pasos 9 y 10 del montaje de una sonda piezométrica.
Fuente: Elaboración propia

7. Cortar tres segmentos de alambre de cobre: dos de unos 2 ó 3 cm y uno de unos 4 cm.
8. Doblar los tres segmentos como se muestra en la figura.

9. Pegar los dos segmentos cortos en la pieza del palo de helado, como se muestra en la figura.
10. Pegar el segmento largo en la pieza de poliespán, como se muestra en la figura. Los segmentos cortos tienen que poder hacer contacto con el segmento largo desplazando la pieza de poliespán.

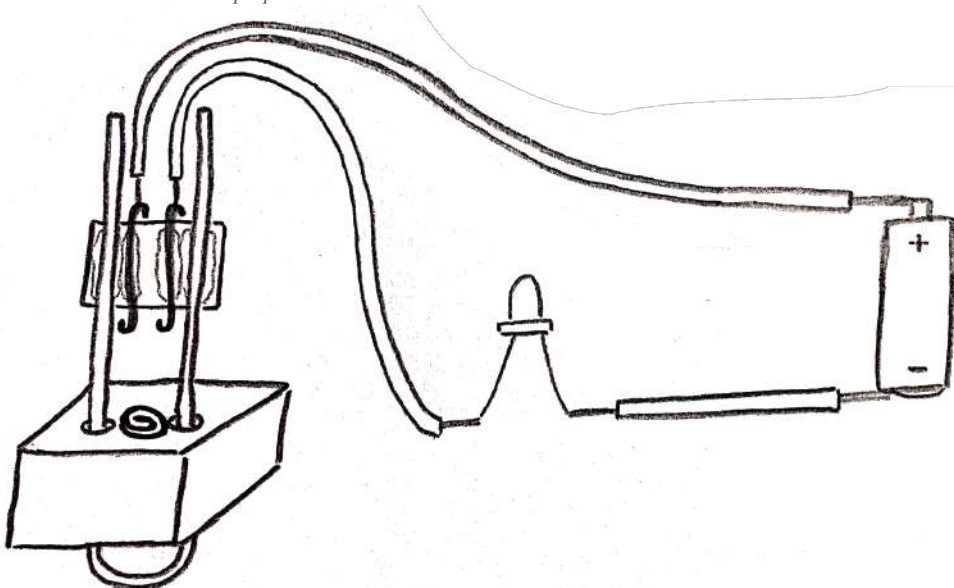


Figura 4.10 Pasos 11, 12 y 13 del montaje de una sonda piezométrica. Fuente: Elaboración propia

11. Conectar un cable a cada segmento de cobre, teniendo en cuenta que no se deben tocar entre ellos y que su longitud debe ser suficientemente larga como para recorrer la tubería piezométrica hasta el agua. En caso de tener un soldador de estaño es recomendable soldar los cables a los segmentos.
12. Conectar un LED o un zumbador al extremo de uno de los cables.
13. Conectar una pila o el portapilas (en caso de tenerlo) entre el LED o zumbador y el cable libre.

Instrucciones de uso

Para conocer la profundidad a la que se encuentra el agua, se dejará caer lentamente la sonda por la tubería piezométrica, dejando en la superficie la pila y el LED o zumbador. Cuando la sonda llegue al agua, la pieza de poliespán flotará y el segmento de cobre pegado a la misma entrará en contacto con los otros dos segmentos, cerrando el circuito. Al cerrarse el circuito se encenderá el LED o pitará el zumbador, en su caso. Cuando esto ocurra se marcará el cable para después medir la sección del mismo que se ha introducido en la tubería. Dicha medida es la profundidad de la capa freática.

Para más detalles sobre la construcción o el uso de la sonda piezométrica consultar:
<https://www.youtube.com/watch?v=ehEzTA5aDj0>.

~~~~~

## Capítulo 5. Velocidad y potencia del viento

~~~~~

En este capítulo se explica la metodología a seguir para obtener la densidad de potencia y velocidad del viento en un emplazamiento, necesarias para conocer la producción energética de cualquier instalación eólica.

5.1. GLOBAL WIND ATLAS

Para conocer la viabilidad del uso de aerogeneradores o de aerobombas para el bombeo de agua, es necesario conocer los datos del viento. Para ello, el procedimiento habitual y recomendado por CIEMAT es tomar medidas de viento en el lugar en el que se vaya a situar el aerogenerador o aerobomba diariamente durante un año. La razón de que se realice este proceso a pesar del tedio es que la velocidad y dirección del viento puede cambiar drásticamente en distancias muy cortas debido a los obstáculos y la forma del terreno.

Sin embargo, muchos de los proyectos que se realicen en África Subsahariana serán urgentes y/o no se dispondrá de los recursos necesarios para tomar medidas de viento diariamente. Por esta razón, se recomienda el uso de la aplicación web Global Wind Atlas para descargar los datos del viento necesarios. Esta herramienta es pública y gratuita, y se puede acceder a ella desde internet a través de la página <https://globalwindatlas.info>.

5.1.1. OBTENCIÓN DE DATOS DE GLOBAL WIND ATLAS

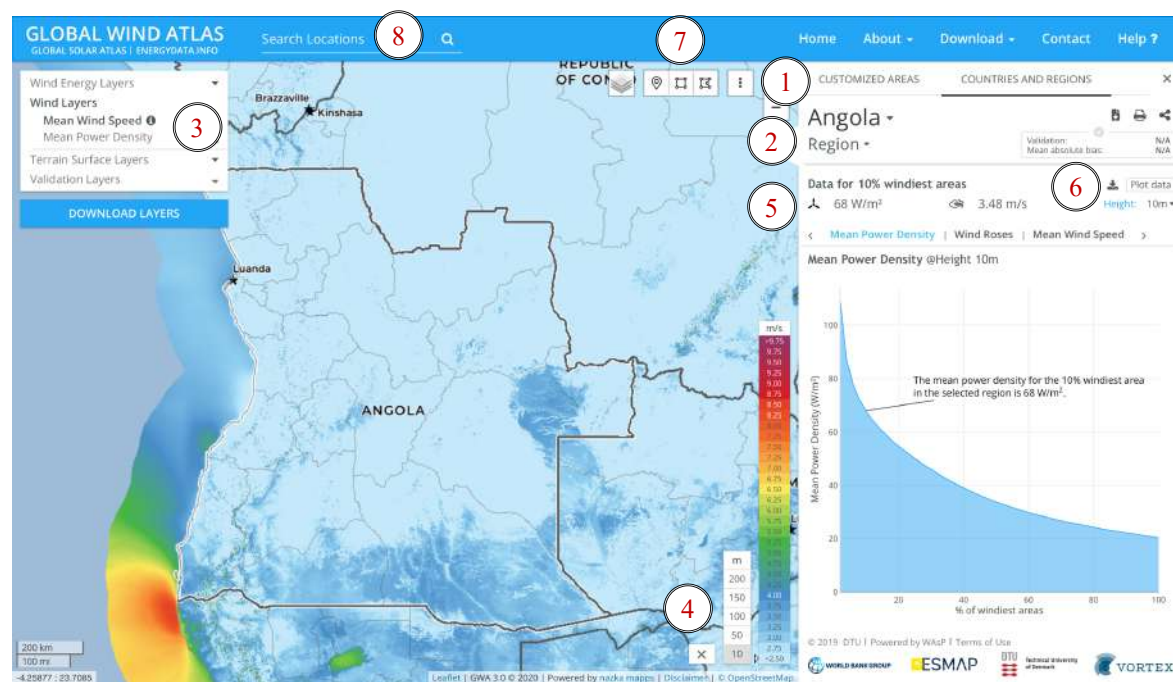


Figura 5.1 Página principal de Global Wind Atlas (con el ejemplo de Angola). Fuente: Global Wind Atlas

En la figura se muestra la página principal de Global Wind Atlas y la numeración indicada servirá para guiar a continuación los pasos a seguir para obtener información sobre el viento en un país o región.

- (1) En primer lugar se puede elegir entre *CUSTOMIZED AREAS* y *COUNTRIES AND REGIONS*. En este caso se selecciona la segunda opción, que permite elegir un país y/o una región.
- (2) Seleccionando el símbolo “▼” se despliega la lista de países y, una vez seleccionado uno, aparece la opción de elegir una región. Es posible seleccionar un país entero, pero en el caso de querer seleccionar una región en particular, se hace desde el símbolo “▼” que aparece al lado de *Region*.
- (3) La página ofrece la opción de mostrar los datos de la velocidad del viento o de la densidad de potencia, que aparecen como *Mean Wind Speed* y *Mean Power Density*, respectivamente.

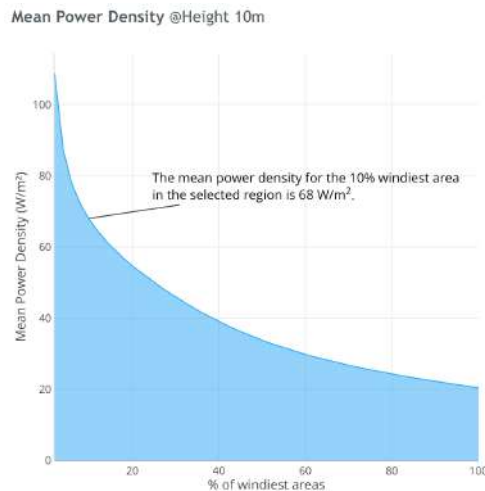
- (4) También se puede seleccionar la altura de los valores del viento. En estos proyectos la altura se encontrará normalmente entre 10 y 50 m.
- (5) Además de los datos que se muestran en el mapa y que permiten orientarse sobre las zonas más ventosas, en el lateral derecho la primera información que aparece son la densidad de potencia y la velocidad del viento medias en el 10% del área con más viento, y se muestra de la siguiente manera.

Data for 10% windiest areas
 68 W/m² 3.48 m/s

Figura 5.2 Datos de viento del 10% de área con más viento (con el ejemplo de Angola).
 Fuente: Global Wind Atlas

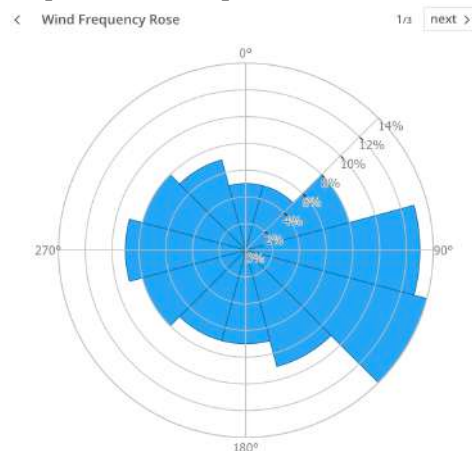
Debajo de esto se pueden seleccionar diferentes formas de observar los datos:

- **Densidad de potencia media**, que se selecciona en *Mean Power Density*. Aparece una gráfica en la que el eje de las ordenadas es la densidad de potencia media en W/m² y el eje de las abscisas es el porcentaje del área con más viento.



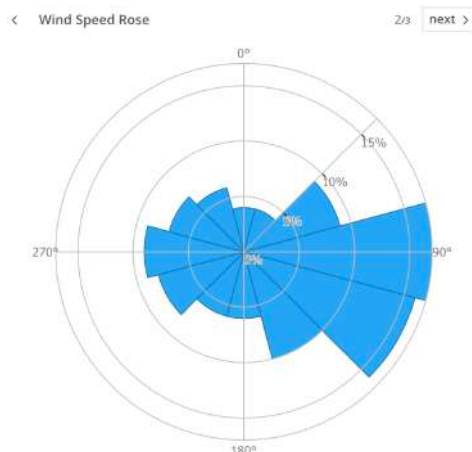
Gráfica 5.1 Densidad de potencia media (con el ejemplo de Angola).
 Fuente: Global Wind Atlas

- **Rosas del viento**, que se selecciona en *Wind Roses*. Estas gráficas circulares permiten conocer la mejor orientación del aerogenerador o aerobomba. En este caso, se crean tres gráficas circulares que se pueden observar seleccionando el botón .
 - **Rosa de la frecuencia del viento**, que aparece como *Wind Frequency Rose*. Esta rosa indica la frecuencia con la que el viento sopla hacia cada dirección.



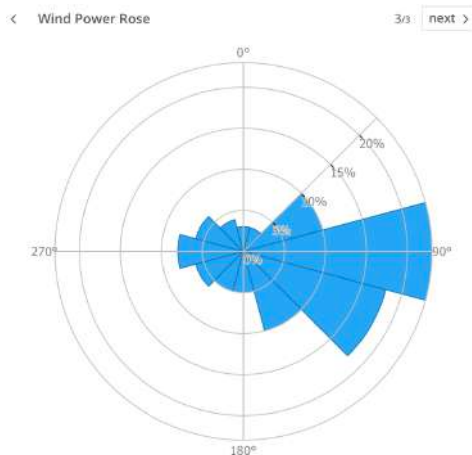
Gráfica 5.2 Rosa de la frecuencia del viento (con el ejemplo de Angola).
 Fuente: Global Wind Atlas

- **Rosa de la velocidad del viento**, que aparece como *Wind Speed Rose*. Esta rosa indica la distribución de la velocidad del viento hacia cada dirección.



Gráfica 5.3 Rosa de la velocidad del viento (con el ejemplo de Angola).
Fuente: Global Wind Atlas

- **Rosa de la potencia del viento**, que aparece como *Wind Power Rose*. Esta rosa indica la distribución de la potencia del viento hacia cada dirección.



Gráfica 5.4 Rosa de la potencia del viento (con el ejemplo de Angola).
Fuente: Global Wind Atlas

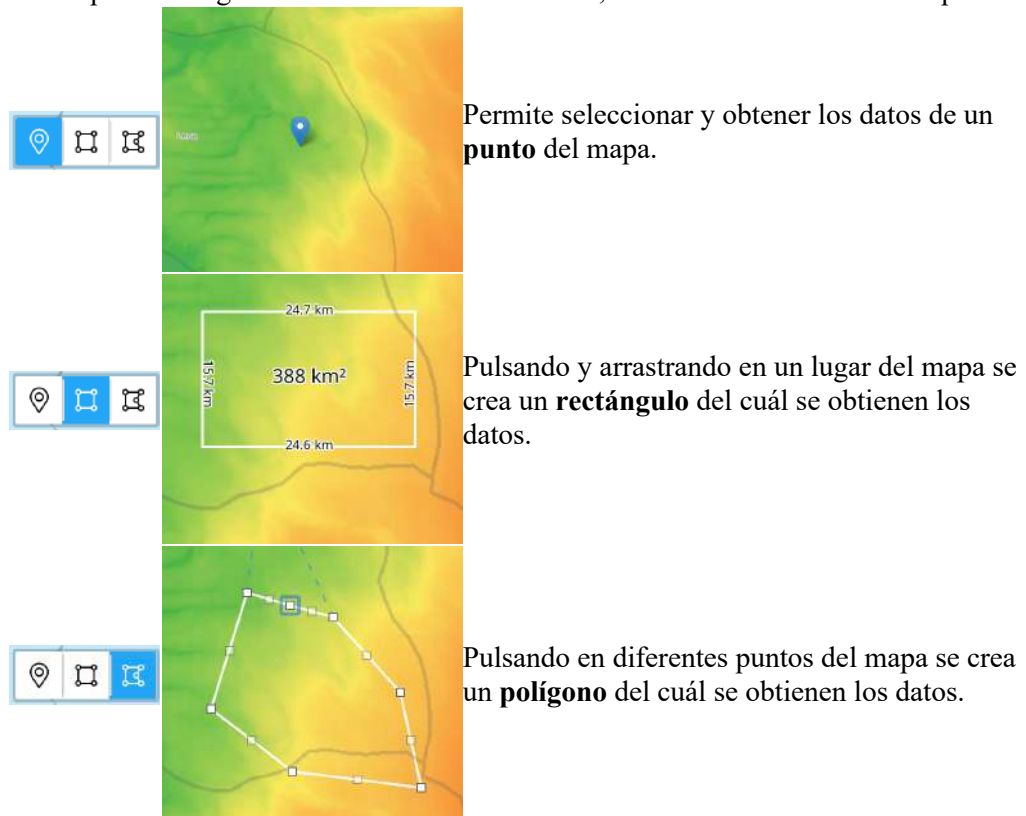
- **Velocidad del viento media**, que se selecciona en *Mean Wind Spee*. Aparece una gráfica en la que el eje de las ordenadas es la velocidad del viento media en m/s y el eje de las abscisas es el porcentaje del área con más viento.
- (6) En el botón  **Plot data** se pueden descargar los datos del país o región seleccionado. Al pulsar sobre él, aparece la siguiente ventana.

Select data	Select format
☒ Aerial Plots	☒ JSON
☒ Temporal Plots	☒ CSV
CANCEL DOWNLOAD	

Figura 5.3 Ventana de selección del formato del archivo de datos. Fuente: Global Wind Atlas

La opción *Aerial Plots* debe estar seleccionada. Y las opciones *JSON* y *CSV* permiten seleccionar los formatos en los que se descargan los datos. Para introducir los datos en una hoja de cálculo de Excel, lo más apropiado es el formato CSV. Una vez seleccionadas las opciones pertinentes y pulsa *DOWNLOAD*.

- (7) Además de la opción de elegir el país y/o la región de los cuáles se quieren conocer los datos, también es posible elegir áreas determinadas. Para ello, Global Wind Atlas da tres opciones.



- (8) Por último, también es posible escribir en el buscador una dirección en particular o las coordenadas del lugar del cual se quieran conocer los datos. Para introducir coordenadas, se escriben de la siguiente forma:



Figura 5.4 Introducción de coordenadas en el buscador de Global Wind Atlas.
 Fuente: Global Wind Atlas

5.2. DATOS DE VIENTO EN ÁFRICA SUBSAHARIANA

Para tener una idea inicial sobre la viabilidad del uso de energía eólica en un proyecto es útil conocer los datos del país en el que se quiere llevar a cabo. De esta forma, se puede descartar el proyecto antes empezar los cálculos o saber en qué país es más probable que sea viable o que sea necesario complementarlo con otros recursos energéticos.

Los datos de cada país se han descargado en una hoja de cálculo de Excel, que se encuentra en los Anexos V, VI, VII y VIII. En estas tablas están incluidos los datos de densidad de potencias y de velocidad del viento a 10 m y a 50 m de altura, en los diferentes percentiles del área de cada país. Los colores de las tablas están condicionados por los valores de las casillas. El verde indica valores más altos y el rojo indica valores más bajos. Es decir, los países con más casillas en verde son los que tienen más posibilidad de ser viables para un proyecto eólico.

5.3. VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO CON LA ALTURA

Debido al rozamiento del aire con la superficie de la Tierra, la velocidad del viento varía con la altura hasta una determinada a la que la velocidad no se ve afectada. Esta variación depende de diferentes factores como la rugosidad del terreno u obstáculos cercanos. El perfil de la velocidad depende de la **ley exponencial de Hellmann**, con la siguiente forma:

$$\frac{v}{v_r} = \left(\frac{h}{h_r}\right)^\alpha$$

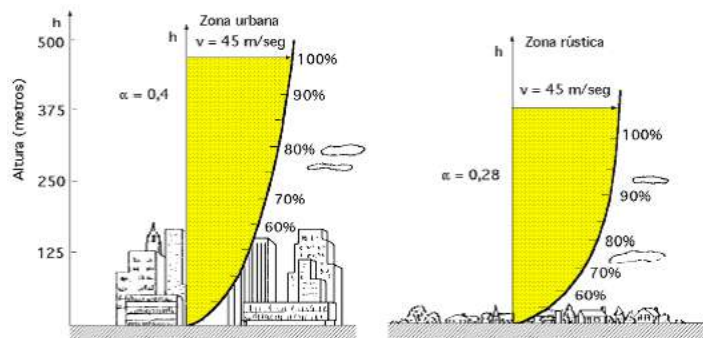


Figura 5.5 Variación de la velocidad del viento (capa límite) con la altura sobre el terreno. Fuente: <http://energieeolica-walter.blogspot.com>

Donde v : velocidad del viento a una altura h [m/s]

v_r : velocidad del viento a una altura de referencia h_r [m/s]

h : altura[m]

h_r : altura de referencia [m]

α : exponente de Hellmann [adimensional]

A mayor altura, mayor será el recurso eólico para un mismo emplazamiento. Por tanto, lo más recomendable es situar el aerogenerador o la aerobomba en una zona elevada, como en un tejado, o montarlo sobre una torre lo más alta posible.

5.3.1. EXPONENTE DE HELLMANN, α

El exponente de Hellmann define el grosor de la capa límite de velocidades. Cuanto mayor sea el valor del parámetro α , a menor altura se estabiliza el viento. Este parámetro depende del tipo de terreno y se encuentra tabulado. Sin embargo, gracias a los datos obtenidos de Global Wind Atlas es posible calcular su valor conociendo la velocidad del viento a 10 m y a 50 m de la siguiente manera:

$$\frac{v}{v_r} = \left(\frac{h}{h_r}\right)^\alpha \rightarrow \alpha = \log_{\frac{h}{h_r}} \left(\frac{v}{v_r}\right) = \log_{\frac{50\text{ m}}{10\text{ m}}} \left(\frac{v_{50\text{ m}}}{v_{10\text{ m}}}\right) = \log_5 \left(\frac{v_{50\text{ m}}}{v_{10\text{ m}}}\right)$$

De esta manera se obtiene el exponente de Hellmann para cada percentil del área de cada país.

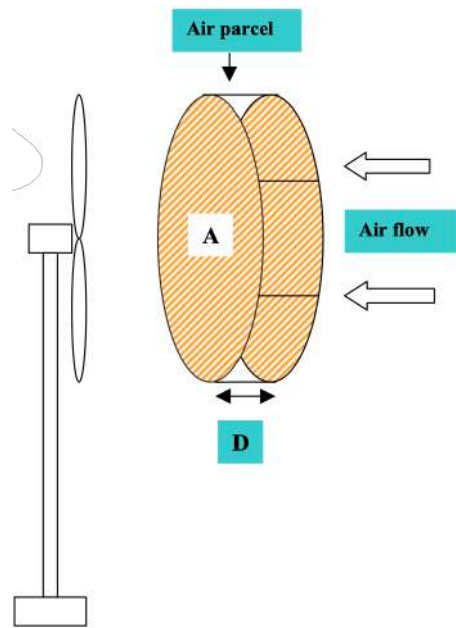
5.3.2. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

Una vez calculado el valor del exponente del Hellmann, se pueden obtener los datos de la velocidad del viento a cualquier altura de la siguiente forma:

$$\frac{v}{v_r} = \left(\frac{h}{h_r}\right)^\alpha \rightarrow v = \left(\frac{h}{h_r}\right)^\alpha \cdot v_r = \left(\frac{h}{10\text{ m}}\right)^\alpha \cdot v_{10\text{ m}}$$

5.3.3. CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE POTENCIA

La densidad de potencia del viento se calcula como se muestra a continuación.



La **energía cinética** (E_c [J]) es:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

- Donde la **masa** (m [kg]) es: $m = \rho \cdot Vol$
 - Donde el **volumen** (Vol [m^3]) es: $Vol = A \cdot D$, siendo A [m^2] la **superficie** barrida por las aspas de la hélice y D [m] la **profundidad** ocupada por las palas.
- La **velocidad** v [m/s] es: $v = D/t$, siendo t [s] el **tiempo** que tarda el viento en recorrer la distancia D .

Por tanto, la energía cinética se puede expresar como:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot t$$

La **potencia** (P [W]) es:

$$P = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A$$

Y la **densidad de potencia** (WPD [W/m^2]) es:

$$WPD = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3$$

Por tanto, la densidad de potencia depende tanto de la velocidad del viento como de la densidad del aire. La velocidad depende únicamente de la altura y se calcula con la ley de Hellmann como se muestra en el apartado anterior. Sin embargo, la densidad depende de la altura y de la temperatura pero para simplificar el cálculo se asumirá una relación lineal entre la densidad y la velocidad. Entonces:

$$WPD_h = \frac{1}{2} \cdot \rho_h \cdot v_h^3$$

Donde $\rho_h = \frac{v_h - v_{10m}}{v_{50m} - v_{10m}} \cdot (\rho_{50m} - \rho_{10m}) + \rho_{10m}$: densidad a una altura h [kg/m^3]

$$v_h = \left(\frac{h}{10m} \right)^\alpha \cdot v_{10m}$$
: velocidad a una altura h [m/s]

5.4. HOJA DE CÁLCULO: VELOCIDAD DEL VIENTO Y WPD

Los cálculos necesarios relativos al viento tratan de discernir la viabilidad del uso de un aerogenerador en función del viento disponible. Para conocer el viento disponible, se ha creado una hoja de cálculo Excel que permite dos cosas: obtener una primera estimación del viento disponible en el país en el que se desea llevar a cabo un proyecto eólico y un cálculo más preciso del viento disponible en las coordenadas concretas en las que se va a situar el aerogenerador.

A continuación se muestra el contenido de esta hoja de cálculo Excel.

5.4.1. DATOS DE ENTRADA

Datos de entrada		
Completar las casillas destacadas en amarillo		
Primera estimación		
Completar para obtener los datos del país entero		
País	-	República Democrática del Congo
Altura del aerogenerador	m	15
Cálculo exacto		
Completar para obtener los datos de la localización seleccionada		
A 10 m de altura		
Densidad de potencia	W/m2	229
Velocidad del viento	m/s	5,54
A 50 m de altura		
Densidad de potencia	W/m2	357
Velocidad del viento	m/s	6,88

Tabla 5.1 Tabla de "Datos de entrada" de la hoja de cálculo "Velocidad del viento y WPD".

Fuente: Elaboración propia

Esta tabla permite introducir los datos de entrada necesarios para conocer los datos de viento tanto de la primera estimación como del cálculo exacto. Para la primera estimación es posible elegir un país de África subsahariana y la altura a la que se desean conocer los datos del viento. Para obtener el cálculo exacto de los datos de viento en unas coordenadas específicas, primero es necesario también introducir la altura. Además, es necesario introducir la densidad de potencia y la velocidad del viento a 10 m y a 50 m de altura. Esta información se obtiene de Global Wind Atlas siguiendo las instrucciones detalladas en apartados anteriores.

5.4.2. PRIMERA ESTIMACIÓN

Estas tablas contienen los datos relacionados con la primera estimación. Esta información es muy útil para evaluar la viabilidad de un proyecto eólico en un país. En función de los resultados será posible tener una idea a priori de si la aerogeneración es una fuente de energía apropiada o si es recomendable estudiar la posibilidad de utilizar otras tecnologías, como podría ser la energía solar. Los datos de la primera estimación se dividen en dos tablas: "Parámetros de cálculo" y "Resultados".

PRIMERA ESTIMACIÓN

Parámetros de cálculo		
A 10 m de altura		
Densidad de potencia máxima	W/m2	72,39
Densidad de potencia media	W/m2	7,57
Velocidad del viento máxima	m/s	3,29
Velocidad del viento media	m/s	1,36
Densidad del aire a velocidad máxima	kg/m3	4,066
Densidad del aire a velocidad media	kg/m3	6,019
A 50 m de altura		
Densidad de potencia máxima	W/m2	154,94
Densidad de potencia media	W/m2	24,71
Velocidad del viento máxima	m/s	4,82
Velocidad del viento media	m/s	2,39
Densidad del aire a velocidad máxima	kg/m3	2,767
Densidad del aire a velocidad media	kg/m3	3,620

Resultados		
Exponente de Hellmann		
A velocidad máxima	-	0,2373
A velocidad media	-	0,3503
Densidad del aire		
A velocidad máxima	kg/m ³	3,784
A velocidad media	kg/m ³	5,535
Densidad de potencia máxima	W/m ²	89,91
Densidad de potencia media	W/m ²	10,66
Velocidad del viento máxima	m/s	3,622
Velocidad del viento media	m/s	1,568

Tabla 5.2 Tablas de "Primera estimación" de la hoja de cálculo "Velocidad del viento y WPD".
Fuente: Elaboración propia

Parámetros de cálculo

La tabla de "Parámetros de cálculo" contiene datos del viento en el país seleccionado a 10 m y a 50 m de altura. Estos datos incluyen la densidad de potencia y la velocidad del viento máximas y medias, y la densidad del aire correspondiente. Esta información ha sido obtenida de Global Wind Atlas y tabulada por países en pestañas complementarias de la hoja de cálculo. Puede encontrarse en los Anexos V, VI, VII y VIII de este documento.

Resultados

La tabla de "Resultados" contiene los resultados de los cálculos realizados. Dichos cálculos siguen el procedimiento para la obtención de la densidad de potencia y la velocidad del viento descritos en apartados anteriores. Por ello, en la tabla aparece el exponente de Hellman y la densidad del aire a velocidades máxima y media, como cálculos intermedios para la obtención de la densidad de potencia y la velocidad del viento máximas y medias a la altura y en el país seleccionados.

5.4.3. CÁLCULO EXACTO

Estas tablas contienen los datos relacionados con el cálculo exacto. Esta información es muy útil para evaluar la viabilidad de un proyecto eólico en unas coordenadas específicas y para comparar distintas localizaciones. Estos cálculos están pensados para obtener información del viento una vez conocido el poblado en el que se va a llevar a cabo el proyecto y tener la posibilidad de localizar el lugar más recomendable para situar el aerogenerador en el terreno disponible.

CÁLCULO EXACTO		
Parámetros de cálculo		
A 10 m de altura		
Densidad de potencia	W/m ²	229
Velocidad del viento	m/s	5,54
Densidad del aire a velocidad máxima	kg/m ³	2,694
A 50 m de altura		
Densidad de potencia	W/m ²	357
Velocidad del viento	m/s	6,88
Densidad del aire a velocidad máxima	kg/m ³	2,192

Resultados		
Exponente de Hellmann	-	0,1346
Densidad del aire	kg/m ³	2,577
Densidad de potencia	W/m ²	258,10
Velocidad del viento	m/s	5,851

*Tabla 5.3 Tablas de "Cálculo exacto" de la hoja de cálculo "Velocidad del viento y WPD".
Fuente: Elaboración propia*

Parámetros de cálculo

La tabla de "Parámetros de cálculo" contiene los datos de viento a partir de los cuales se realizan los cálculos de esta sección. Estos datos parten de los datos introducidos en los "Datos de entrada" e incluyen la densidad de potencia, la velocidad del viento y la densidad del aire a velocidad máxima a 10 m y a 50 m.

Resultados

La tabla de "Resultados" contiene el exponente de Hellman y la densidad del aire, como cálculos intermedios para la obtención de la densidad de potencia y la velocidad del viento medias a la altura seleccionada y en las coordenadas cuyos datos se han introducido.

Capítulo 6. Bomba eléctrica

En este capítulo se desarrollan los cálculos necesarios para obtener las características de la instalación de bombeo y el punto de trabajo de una bomba eléctrica.

6.1. ALTURA EFECTIVA: BERNOULLI

El primer paso para obtener los datos de la bomba que se debe utilizar en la instalación es calcular la altura efectiva, H . Para ello, se aplica Bernoulli.

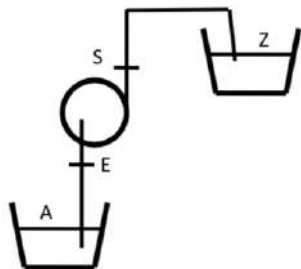


Figura 6.1 Esquema del sistema de bombeo. Fuente: "Mecánica de Fluidos: Fluido viscoso en conductos" por ICAI

$$H = \frac{p_Z - p_A}{\rho \cdot g} + \frac{v_Z^2 - v_A^2}{2 \cdot g} + z_Z - z_A + H_{r-ext}$$

Donde

p : presión [Pa]

ρ : densidad [kg/m^3]

g : aceleración de la gravedad [m/s^2]

v : velocidad media del fluido [m/s]

z : altura [m]

H_{r-ext} : pérdidas en la instalación [m]

Subíndices

A: superficie del agua del pozo

Z: salida de agua o superficie de agua del tanque

En este caso el punto A se encuentra en la superficie del agua del pozo, es decir, el nivel freático.

El punto Z es la superficie del agua del depósito cuando está lleno, en caso de que éste se llene desde abajo, la salida del agua, en caso de que se llene desde arriba o no haya depósito.

6.1.1. DATOS DE PARTIDA

Lo normal es que la **diferencia de presiones**, $p_Z - p_A$, sea nula, ya que el pozo está abierto al exterior y que el tanque no está presurizado, si lo hay. Sin embargo, según el Código Técnico de la Edificación, Documento Básico HS Salubridad, sección HS 4 Suministro de agua, apartado 2.1.3. Condiciones mínimas de suministro, la **presión mínima en los grifos** comunes debe ser de **1 bar** para evitar problemas en la instalación como la cavitación. Por tanto el término queda de la siguiente forma:

$$\frac{p_{GRIFO}}{\rho \cdot g}$$

La **velocidad de entrada**, v_A , y la de salida, v_Z , suelen ser iguales o muy similares, a no ser que el diámetro de entrada y el de salida sean muy dispares. Como no es el caso, el término se considera **despreciable**.

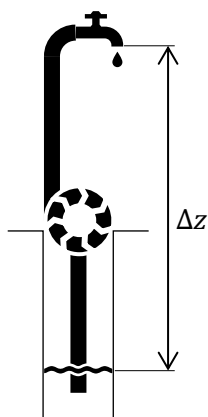


Figura 6.2 Altura geométrica en sistema de bombeo. Fuente: Elaboración propia

La **diferencia de alturas**, $z_Z - z_A$, depende del nivel freático y de la altura a la que se encuentre el tanque o el grifo.

Por último, hay que sumar a la altura que debe proporcionar la bomba las **pérdidas en la instalación**, H_{r-ext} . Este término es muy variable debido a que depende de las características de los elementos que comunican el pozo con la bomba y la bomba con el depósito de agua, y se analizará más adelante.

Por tanto, la ecuación resultante para el cálculo de la altura efectiva es la siguiente:

$$H = \frac{p_{GRIFO}}{\rho \cdot g} + \Delta z + H_{r-ext}$$

Otros datos de partida que serán necesarios para el cálculo de las pérdidas en la instalación son la **longitud**, el **diámetro** y el **material** de la tubería, y la **velocidad** del agua.

Longitud de la tubería

La longitud de la tubería dependerá de la profundidad del pozo y del recorrido que haga la tubería por tierra. Para evitar aumentar innecesariamente las pérdidas, lo más recomendable es que el recorrido desde la bomba hasta el depósito o la salida de agua, en su caso, sea lo más corto posible. En el caso de querer alcanzar mayor distancia con las tuberías, se añadirá tubería a la salida del depósito. De esta manera se aprovecha la gravedad en lugar de añadir potencia a la bomba, reduciendo así los costes.

Diámetro de la tubería

En las aplicaciones previas en proyectos de Manos Unidas, el diámetro de las tuberías ha rondado los 40 ó 50 mm. No obstante, se contemplará la posibilidad de que alcancen hasta 150 mm, debido a que es un diámetro que razonablemente no se sobrepasará y para el que son válidas las hipótesis de partida.

Material de la tubería

El material más utilizado en proyectos previos de Manos Unidas es el PVC. Sin embargo, se contemplará la posibilidad de utilizar otros materiales, que se muestran en el apartado de “Pérdidas de carga primarias o por fricción: h_f ”.

Velocidad del agua

Como ya se analizó en apartados anteriores, el caudal de agua necesario es de 50 litros por persona al día. Sin embargo, este caudal no debe suministrarse a lo largo de las 24 horas del día, sino durante las primeras horas de la mañana para evitar aglomeraciones y esperas por parte de las personas que recojan el agua. Por tanto, el caudal que debe suministrar la bomba debe ser mayor.

Como primera aproximación, se supone que el sistema suministra agua a una población de 60 personas, que es un número de personas razonable alojadas en un colegio internado. En el caso de suministrar el agua necesaria para todo el día en las primeras 4 horas, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Agua total al día} &\rightarrow 60 \text{ personas} \cdot 50 \frac{L}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 3000 \frac{L}{\text{día}} \\ \text{Caudal de la bomba} &\rightarrow \frac{3000 \frac{L}{\text{día}}}{4 \frac{h}{\text{día}}} = 750 \frac{L}{h} = 12,5 \frac{L}{\text{min}} \end{aligned}$$

Según las hojas de características de diferentes fabricantes de **bombas eléctricas**, como Bomba de Agua o Electrobombas, este caudal con alturas de elevación de más de 30 m se alcanzan sin problemas.

Para evaluar la validez del caudal obtenido, se compara con algunos de los modelos más habituales de **bombas manuales**:

- India Mark II $\rightarrow$ 1000 L/h
- Afridev $\rightarrow$ 1400 L/h
- Bluepump $\rightarrow$ 1300 L/h
- Canzee $\rightarrow$ 1200 – 1500 L/h
- Emas $\rightarrow$ 2500 L/h

Por tanto, todas ellas son capaces de suministrar el agua para 60 personas en 4 horas, si bien es cierto que el caudal que proporcionan depende de la altura que alcancen. Por este motivo, se analizará más adelante la viabilidad y conveniencia de cada tipo de bomba en cada caso.

6.1.2. PÉRDIDAS EN LA INSTALACIÓN: H_{r-ext}

Las pérdidas de carga se producen por el rozamiento de los fluidos a su paso por tuberías, válvulas y demás accesorios de la instalación.

Estas pérdidas se componen de dos términos: las pérdidas por fricción y las pérdidas en singularidades.

$$H_{r-ext} = h_f + h_m$$

Pérdidas de carga primarias o por fricción: h_f

Las pérdidas por fricción son la altura equivalente que aporta la rugosidad del material de la tubería, y la densidad y viscosidad del fluido, en este caso agua.

Se obtienen de la expresión de **Darcy-Weisbach**:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Donde f : coeficiente de fricción [adimensional]
 L : longitud de la tubería [m]
 D_h : diámetro hidráulico [m]
 v : velocidad media del fluido [m/s]
 g : aceleración de la gravedad [m/s²]

Coeficiente de fricción: f

Este coeficiente se ha formulado en forma de diferentes expresiones y gráficos. La expresión más precisa y universal es la de **Colebrook-White**:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D_h} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$$

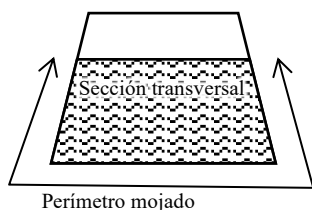
El problema de esta ecuación es que se presenta de forma implícita, es decir, es necesario el uso de métodos iterativos para resolverla. Esto complica su resolución en una hoja de cálculo Excel. Por este motivo, para obtener el factor de fricción de manera directa, aunque sacrificando el 1% de la precisión de la expresión anterior, se utilizará la expresión de **Swamee-Jain**:

$$f = \frac{0,25}{\left(\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D_h} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right)^2}$$

Donde ε : rugosidad absoluta de la tubería [m]
 D_h : diámetro hidráulico [m]
 Re : número de Reynolds

Diámetro hidráulico: D_h

Se calcula de la siguiente manera:



$$D_h = \frac{4 \cdot \text{Sección transversal}}{\text{Perímetro mojado}}$$

Figura 6.3 Esquema de diámetro hidráulico.
Fuente: Elaboración propia

En este caso, las tuberías estarán completamente llenas siempre que la bomba esté bombeando y la sección de la tubería será redonda. Por tanto, el diámetro hidráulico será el **diámetro interior de la tubería**.

Rugosidad absoluta: ϵ

Este valor caracteriza al material de la tubería y su valor suele estar tabulado. En la siguiente tabla se muestran los valores tabulados contrastados con distintas fuentes de información de los materiales más habituales en tuberías bajo el nombre de “Rugosidad absoluta”. En algunos materiales la rugosidad puede variar y por eso se muestra un rango de valores. Para esos casos, se ha tomado el valor mayor, con el que se obtiene un valor mayor de pérdidas de carga, de tal manera que se supone el caso más crítico. Los valores utilizados aparecen en la tabla bajo el nombre de “Rugosidad absoluta estimada”.

Material	Rugosidad absoluta	Rugosidad absoluta estimada
Plástico (PE, PVC)	0,0015 mm	0,0015 mm
Tubos de latón o cobre	0,0015 mm	0,0015 mm
Polietileno reticulado (PEX)	0,007 mm	0,007 mm
Acero comercial y soldado	0,03-0,09 mm	0,09 mm
Hierro galvanizado	0,06-0,24 mm	0,24 mm

Tabla 6.1 Rugosidad absoluta de materiales. Fuente: UCLM

Número de Reynolds: Re

Se define como:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu}$$

Donde ρ : densidad [kg/m^3]
 v : velocidad media del fluido [m/s]
 D_h : diámetro hidráulico [m]
 μ : viscosidad dinámica [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

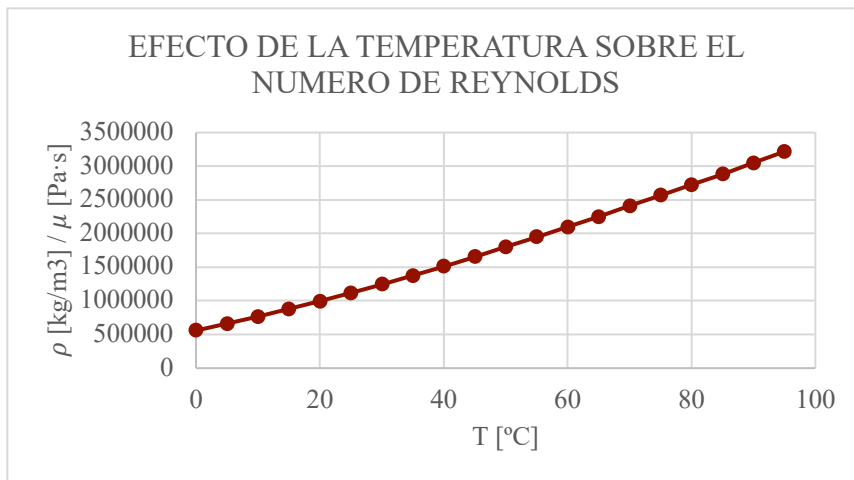
Tanto la viscosidad como la densidad dependen del fluido, en este caso agua, y de la temperatura a la que se encuentre. Dichos datos se muestran en la siguiente tabla:

Temperatura, T [°C]	Densidad, ρ [kg/m^3]	Viscosidad dinámica, μ [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
0	999,9	0,001792
5	1000,0	0,001519
10	999,7	0,001308
15	999,1	0,001140
20	998,2	0,001005
25	997,1	0,000894
30	995,7	0,000801
35	994,1	0,000723
40	992,2	0,000656
45	990,2	0,000599
50	988,1	0,000549
55	985,7	0,000506
60	983,2	0,000469
65	980,6	0,000436
70	977,8	0,000406
75	974,9	0,000380
80	971,8	0,000357
85	968,6	0,000336
90	965,3	0,000317
95	961,9	0,000299

Tabla 6.2 Densidad y viscosidad del agua a diferentes temperaturas.
Fuente: Campus virtual de la UCM

En la instalación real el agua puede no estar limpia. Puede estar mezclada con arena u otros objetos. Esto puede variar la viscosidad y la densidad. Sin embargo, no se tendrá en cuenta en el cálculo de la instalación. No obstante, es recomendable la instalación de un filtro en la aspiración.

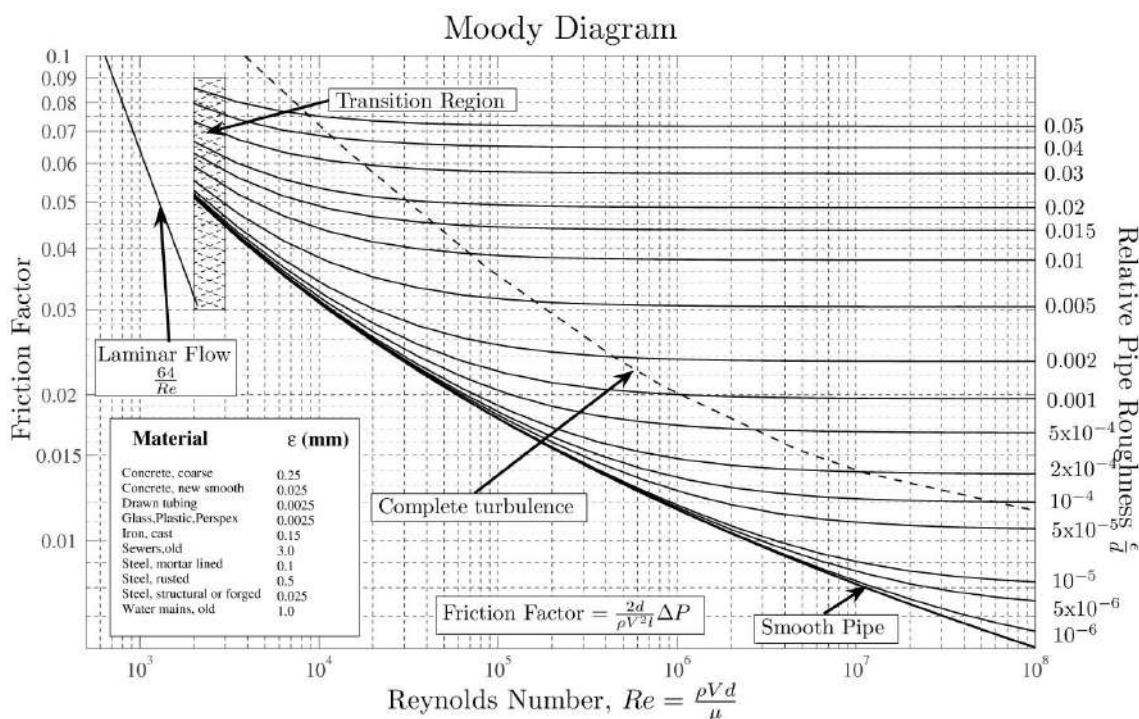
El número de Reynolds, como se muestra en la fórmula, es directamente proporcional a la densidad e inversamente proporcional a la viscosidad dinámica. Por ello, para tener en cuenta el efecto de la temperatura sobre el mismo, se ha elaborado la siguiente gráfica.



Gráfica 6.1 Efecto de la temperatura sobre el número de Reynolds. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, el valor del número de Reynolds aumenta con la temperatura.

Por otra parte, en el diagrama de Moody, que relaciona el coeficiente de fricción con el Reynolds, se puede comprobar que el coeficiente de fricción disminuye con el Reynolds.



Gráfica 6.2 Diagrama de Moody. Fuente: Departamento de Ingeniería Civil UNAH

Por tanto, para obtener el valor más crítico del factor de fricción, es decir, el valor más alto, se debe tener en cuenta la temperatura más baja. Se tomará para los cálculos los valores correspondientes a una temperatura de 5°C.

Temperatura, T [°C]	Densidad, ρ [kg/m³]	Viscosidad dinámica, μ [Pa·s]
5	1000,0	0,001519

Pérdidas de carga secundarias o localizadas: h_m

Se producen en los puntos singulares de las tuberías como entradas o salidas de tuberías, ensanchamientos o contracciones, curvas, codos, “tes”, válvulas y otros accesorios.

El cálculo de estas pérdidas es muy complejo y depende de las características específicas de cada accesorio. Al desconocerse a priori dichas características, se simplificará el cálculo estimándose un porcentaje de las pérdidas de carga primarias.

Para obtener el porcentaje aproximado que representan estas pérdidas en relación a las pérdidas por fricción, se plantean los datos necesarios en una instalación crítica.

Factor K

Como la obtención de las pérdidas de carga localizadas suele ser experimental, están tabuladas en forma del llamado factor K, a partir del cual se calculan de la siguiente forma:

$$h_m = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Donde K : coeficiente de resistencia [adimensional]
 v : velocidad media del fluido [m/s]
 g : aceleración de la gravedad [m/s²]

Para obtención del factor K, se ha utilizado la tabla de coeficientes de accesorios del “Manual para la elaboración y revisión de proyectos ejecutivos de sistemas de riego parcelario” de CONAGUA, 2002. En dicha tabla aparecen los valores estimados de este factor.

Al desconocerse a priori los accesorios que van a ser necesarios en este proyecto, para hacer una estimación de las pérdidas secundarias se han seleccionado los accesorios que se incluirían en el caso más crítico.

Pieza, conexión o dispositivo	K	Cantidad	K total
Rejilla de entrada	0,8	1	0,8
Válvula de globo abierta	10	2	20
Entrada de borda o reentrada	1	1	1
Ampliación gradual	0,3	2	0,6
Codo corto de 90°	0,9	5	4,5
TOTAL:			26,9

Tabla 6.3 Factor K en el caso del diseño de la instalación más crítica. Fuente: Elaboración propia

Relación porcentual

El siguiente término es comparable en las pérdidas por fricción al factor K, ya que ambos están multiplicados por $\frac{v^2}{2 \cdot g}$.

$$f \cdot \frac{L}{D_h} \quad \text{Donde:} \quad f = \frac{0,25}{\left(\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D_h} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right)^2} \quad Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu}$$

Se supone:

- $L \rightarrow 40 \text{ m}$ (profundidad máx. del pozo) + 20 m (recorrido por tierra) = 60 m
- $D_h \rightarrow 40 \text{ mm} = 0,04 \text{ m}$ (valor crítico razonable)
- $v \rightarrow \frac{1,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} (\text{Caudal mínimo de la bomba Afridev})}{\frac{\pi \cdot (0,04 \text{ m})^2}{4}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \approx 0,31 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- $\rho \rightarrow 995,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (agua a 30°C, $\uparrow T \Rightarrow \downarrow \rho$)
- $\mu \rightarrow 0,000801 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (agua a 30°C, $\uparrow T \Rightarrow \downarrow \mu$)
- $\varepsilon \rightarrow 0,0015 \text{ mm}$ (PVC) = 0,0000015 m

Se obtiene:

- $Re \approx 15388$
- $f \approx 0,0277$
- $f \cdot \frac{L}{D_h} \approx 41,53$
- $\frac{K_{TOTAL}}{f \cdot \frac{L}{D_h}} \cdot 100 = \frac{26,9}{41,53} \approx 65\%$

Para ser conservador, se tomará un valor de las pérdidas secundarias del 65% de las pérdidas primarias.

$$h_m \approx 0,65 \cdot h_f$$

6.2. POTENCIA EFECTIVA DE LA BOMBA

Por último, la potencia efectiva de la bomba se puede obtener a partir de la altura efectiva de la siguiente forma:

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H$$

6.3. HOJA DE CÁLCULO: ALTURA Y POTENCIA DE LA BOMBA

Para el cálculo de la bomba en este proyecto, al ser de carácter genérico, es necesario partir de datos variables y crear una hoja de cálculo que permita obtener las características que debe cumplir la bomba en función de las diferentes circunstancias de la instalación.

Para ello, se han creado las siguientes tablas en una hoja de cálculo Excel.

6.3.1. PARÁMETROS DE DISEÑO

Esta tabla permite introducir los datos de partida de la instalación. Las celdas destacadas en amarillo son las que deben rellenarse y las celdas en blanco, en principio, son valores fijos. No obstante, pueden editarse también en caso de que fuera necesario. Por ejemplo, el agua abastecida por persona al día se ha establecido en 50 L, como se justificó en apartados anteriores. Pero, eventualmente, podría modificarse en el caso de que se requiriera ahorrar en gastos o de que las circunstancias permitiesen un abastecimiento mayor.

Parámetros de diseño		
Completar sólo las celdas destacadas en amarillo		
Profundidad de la superficie freática	m	150
Altura de la salida de agua al exterior o al tanque	m	0
Altura geométrica	m	150
Presión en el grifo	bar	1
Altura por diferencia de presión	m	10,19367992
Longitud total de tubería	m	200
Diámetro interior de la tubería	mm	40
Material de la tubería	-	Plástico (PE, PVC)
Rugosidad absoluta de la tubería	mm	0,0015
Número de personas abastecidas	personas	60
Densidad del fluido	kg/m3	1000
Viscosidad dinámica	Pa·s	0,001519
Agua abastecida	L/(pers·día)	50
Tiempo de abastecimiento (*)	h/día	1
Aceleración de la gravedad	m/s2	9,81

Tabla 6.4 "Parámetros de Diseño" de la hoja de cálculo "Altura y potencia de la bomba".

Fuente: Elaboración propia

La casilla de selección del material de la tubería es una lista desplegable de la que depende el valor de la rugosidad absoluta de la tubería. La cual puede completarse añadiendo materiales a la tabla “Materiales de la tubería”, mostrada a continuación.

Materiales de la tubería	
Incluir en la lista nuevos materiales si fuera necesario	
Material	Rugosidad [mm]
Plástico (PE, PVC)	0,0015
Tubos de latón o cobre	0,0015
Polietileno reticulado (PEX)	0,007
Acero comercial y soldado	0,09
Hierro galvanizado	0,24

Tabla 6.5 “Materiales” de la hoja de cálculo “Altura y potencia de la bomba”.
Fuente: Elaboración propia

El tiempo de abastecimiento es el tiempo diario máximo durante el cual se va a extraer el agua necesaria para todo el día. Por ejemplo, si el tiempo de abastecimiento son 4 horas y se empieza a bombear a las 7:00 ininterrumpidamente, a las 11:00 se habrá extraído el total del agua necesaria para ese día. Este valor depende de las condiciones meteorológicas, ya que las horas que la bomba esté en funcionamiento dependen de si hay viento suficiente como para alimentarla por medio del aerogenerador.

6.3.2. RESULTADOS

Esta tabla muestra los resultados obtenidos en el proceso de cálculo de la altura efectiva de la bomba, que es dato objetivo.

Resultados		
Caudal	m ³ /h	3,0000
Velocidad del fluido	m/s	0,6631
Número de Reynolds	-	17.462,69
Coefficiente de fricción	-	0,02680
Pérdidas de carga primarias	m	3,00399
Pérdidas de carga secundarias	m	1,95259
Pérdidas de carga totales	m	4,95658
Altura efectiva de la bomba	m	165,150
Potencia efectiva de la bomba	W	1350,103

Tabla 6.6 “Resultados” de la hoja de cálculo “Altura y potencia de la bomba”.
Fuente: Elaboración propia

6.4. SELECCIÓN DEL TIPO DE BOMBA

Para seleccionar el tipo de bomba más adecuado se partirá de la aplicación de la misma. Según varios fabricantes de bombas, como Grundfos (proveedor de bombas habitual en Manos Unidas) o Bomba De Agua, para el bombeo de aguas subterráneas para el abastecimiento de comunidades el tipo de bomba más apropiado es la **bomba sumergible**.

La bomba sumergible está compuesta por **rodetes de tipo centrífugo** con los álabes curvados hacia atrás. Estos rodets están conectados a un mismo eje, que es impulsado por un **motor de inducción** que puede ser monofásico o trifásico. Al estar inmersas en el fluido de trabajo, este tipo de bombas **no requieren cebado** previo a su utilización y además se reducen los problemas de cavitación porque el lado de la aspiración se encuentra a presión debido al propio peso del fluido. Además, estas bombas permiten la succión de aguas residuales, fluidos viscosos y lodos, por lo que en el caso de que se bombeasen partículas del suelo como arena o barro, la bomba no se deterioraría ni atascaría.



Figura 6.4 Bomba sumergible Mophorn. Fuente: Amazon



Figura 6.5 Esquema interno de la bomba sumergible. Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=WsUE563Olig>

6.4.1. SELECCIÓN PRELIMINAR DEL MODELO DE BOMBA

Dentro de las bombas sumergibles existen múltiples modelos dependiendo de la marca y de las características específicas de la bomba. Para hacer una selección preliminar del modelo adecuado se debe observar:

- El **caudal**, que debe ser igual o superior al requerido en la instalación. En Grundfos se recomienda verificar que el caudal es mayor del 20% superior al punto teórico.
- La **altura**, que también debe ser igual o superior a la requerida en la instalación.
- La **potencia**. Habitualmente, en las hojas de características de las bombas, la potencia que aparece es la absorbida, no la ejercida en el eje. Esto quiere decir se debe aplicar el rendimiento de la bomba, que es un dato que a priori se desconoce porque depende de cada bomba. Sin embargo, se tendrá en cuenta que debe existir un margen considerable entre la potencia efectiva teórica y la potencia de la bomba ya que el rendimiento puede ser del 50% o incluso del 25%.

Estos datos se encuentran en la tabla de resultados de la hoja de cálculo “Altura y potencia de la bomba”.

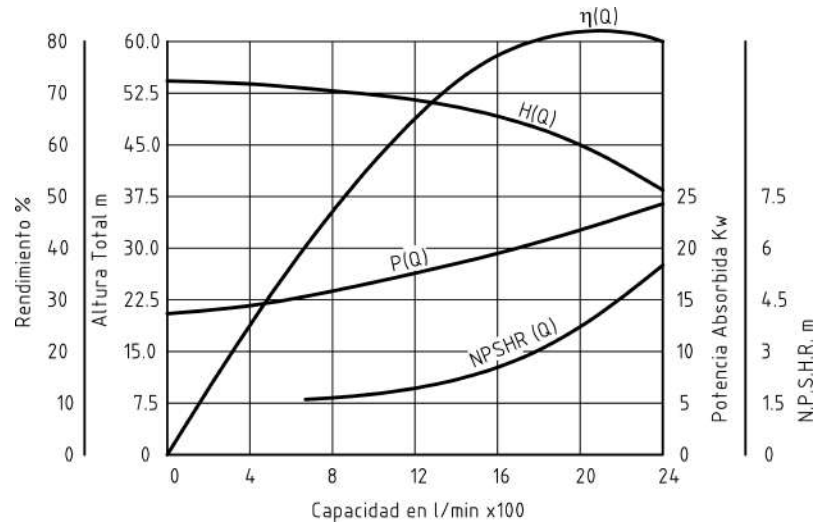
Esta selección es preliminar porque se está suponiendo que la bomba trabaja a 50Hz, hecho que no necesariamente es cierto, como se explica a continuación. Sin embargo, es necesario para tener datos de partida de las curvas de la bomba.

6.5. VARIACIÓN DE LAS CURVAS DE LA BOMBA CON LA VELOCIDAD

La producción de la bomba depende de la producción del aerogenerador: **el punto de trabajo de la bomba depende del punto de funcionamiento del aerogenerador**. A continuación, se detalla cómo varía el punto de funcionamiento de la bomba en función de las condiciones.

6.5.1. CURVA CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA

Para conocer el punto de trabajo de una bomba se utilizarán las curvas características de la misma. En este caso, como se dijo en apartados anteriores, la bomba más adecuada es la bomba sumergible que es un tipo de bomba centrífuga. Este tipo de bombas tienen unas curvas características similares a las de la siguiente gráfica:



Gráfica 6.3 Curvas características de una bomba centrífuga. Fuente: areamecanica.wordpress.com

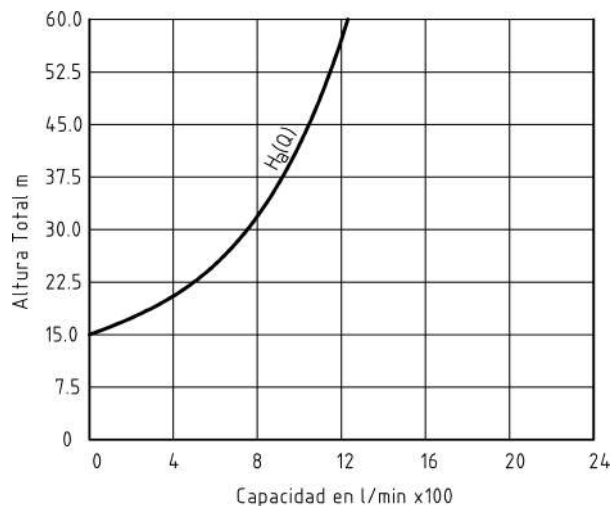
- La curva $H(Q)$ representa la altura que da la bomba en función del caudal y es una parábola:

$$H = A - B \cdot Q^2$$
- donde A y B se obtienen por técnicas de ajuste a partir de los puntos (H,Q) obtenidos para una determinada bomba en el banco de pruebas (ensayo elemental a velocidad constante).
- La curva $P(Q)$ es la potencia que absorbe la bomba en función del punto de trabajo en el que se encuentre. La $P(Q=0)$ es la potencia necesaria para el arranque de la bomba.
- La curva $\eta(Q)$ es el rendimiento de la bomba en el punto de trabajo. El punto de mayor rendimiento es el punto nominal.
- La curva $NPSHR(Q)$ es la altura neta positiva de aspiración requerida.

6.5.2. CURVA CARACTERÍSTICA DE LA INSTALACIÓN

La curva característica de la instalación es una expresión resultante de aplicar la ecuación de Bernoulli, como se mostró en los cálculos de la altura efectiva de la bomba, y también es una parábola:

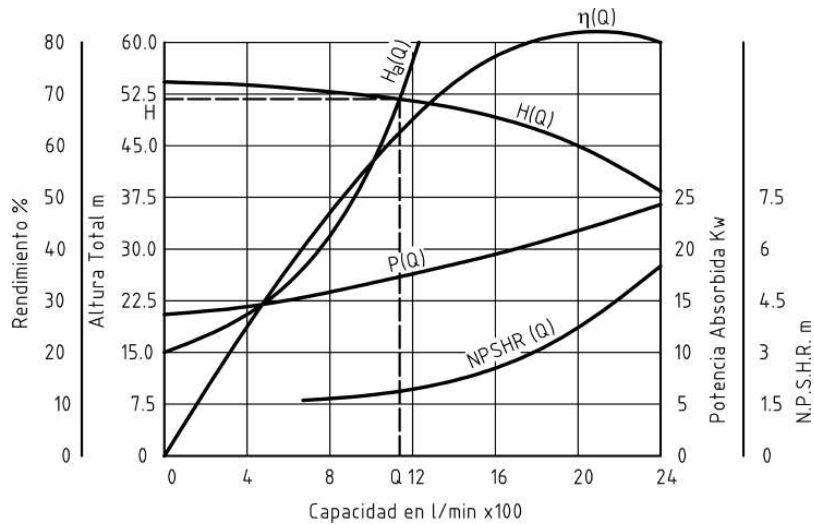
$$H = C + D \cdot Q^2$$



Gráfica 6.4 Curva característica de la instalación. Fuente: areamecanica.wordpress.com

6.5.3. PUNTO DE TRABAJO

El punto de trabajo de la bomba se encuentra en la intersección entre la curva de la altura de la bomba y la curva de la altura de la instalación.



Gráfica 6.5 Punto de trabajo de la bomba. Fuente: areamecanica.wordpress.com

6.5.4. LEYES DE SEMEJANZA

Las curvas de la bomba se han obtenido para una velocidad de giro del eje del motor característica. Esta velocidad de giro del eje depende de la frecuencia de la corriente que alimenta el motor de inducción y de la carga. Habitualmente la frecuencia de la red de suministro es de 50 ó 60 Hz. Sin embargo, en este caso la alimentación proviene de un aerogenerador, por lo que la potencia disponible y la velocidad son variables. Para ajustar las curvas a estas variaciones se aplican las leyes de semejanza, que se cumplen para bombas geoméricamente semejantes trabajando en puntos homólogos:

1. $\frac{Q'}{Q''} = \frac{n'}{n''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^3$
2. $\frac{H'}{H''} = \left(\frac{n'}{n''}\right)^2 \left(\frac{D'}{D''}\right)^2$
3. $\frac{P'}{P''} = \frac{\rho'}{\rho''} \left(\frac{n'}{n''}\right)^3 \left(\frac{D'}{D''}\right)^5$

donde ' y '' hacen referencia a los valores de dos puntos homólogos, siendo n la velocidad, Q el caudal, H la altura de la bomba, P la potencia absorbida por la bomba, ρ la densidad del fluido y D el diámetro de la bomba.

En este caso el fluido va a ser agua siempre, por lo que $\rho' = \rho''$, y la bomba será la misma, por lo que $D' = D''$. De esta manera las leyes de semejanza se pueden simplificar a la siguiente relación:

$$\frac{n'}{n''} = \frac{Q'}{Q''} = \sqrt{\frac{H'}{H''}} = \sqrt[3]{\frac{P'}{P''}}$$

Con las leyes de semejanza se desplazan las curvas de la bomba. Por ejemplo, se supone una bomba cuyas curvas al estar conectada a una red de 50 Hz sean las que se muestran en la gráfica en color negro. En el caso de que el motor de inducción de la bomba tuviera cuatro polos, la velocidad de giro del eje se calcularía de la siguiente forma:

$$n = \frac{2 \cdot f \cdot 60}{p} \cdot (1 - s) = \frac{2 \cdot 50 \cdot 60}{8} \cdot (1 - 0,03) = 727,5 \text{ rpm}$$

donde f es la frecuencia, p el número de polos y s el deslizamiento (se supondrá del 3%).

Si la velocidad del aerogenerador fuera de 450 rpm, que es un valor nominal razonable en el caso de los aerogeneradores Bornay, y no tuviera un multiplicador de vueltas, el desplazamiento de las curvas sería el siguiente.

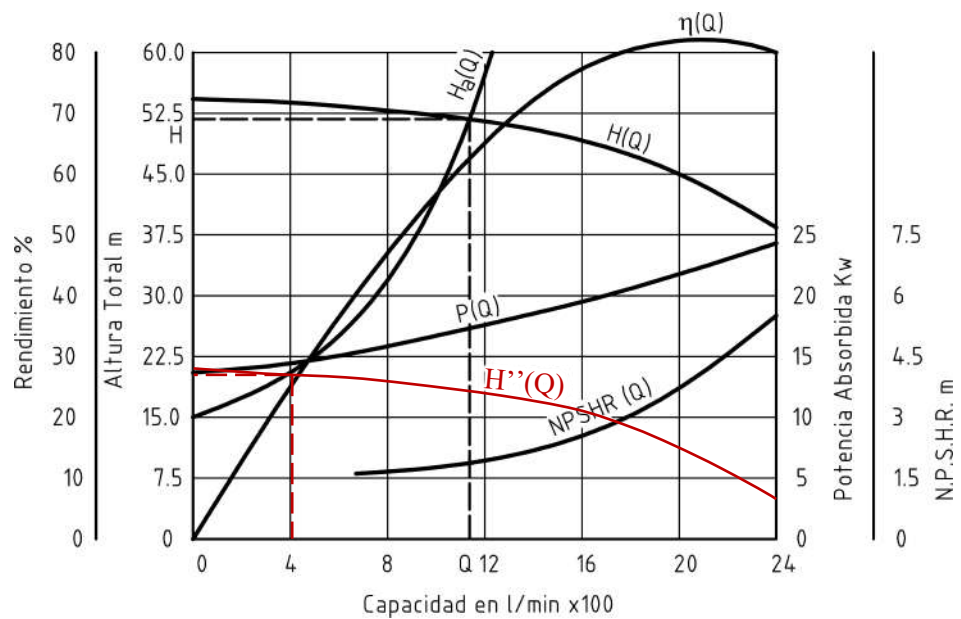
Altura

$$H' = A - B \cdot Q'^2 \rightarrow H'' = \frac{A}{\left(\frac{n'}{n''}\right)^2} - B \cdot Q''^2$$

En el ejemplo:

- $H' = A - B \cdot Q'^2 \rightarrow H' = 54 - 0,0225 \cdot Q'^2$
- $H'' = \frac{54}{\left(\frac{727,5}{450}\right)^2} - 0,0225 \cdot Q''^2 = 20,66 - 0,0225 \cdot Q''^2$

En la gráfica se muestra en rojo la nueva curva de la altura y el nuevo punto de funcionamiento.



Gráfica 6.6 Curvas de la altura de la bomba a diferentes velocidades

Potencia absorbida

$$\frac{n'}{n''} = \frac{Q'}{Q''} \rightarrow Q' = \frac{n'}{n''} \cdot Q''$$

$$H'' = \frac{H'}{Q'^2} \cdot Q''^2 = k_{\beta 1} \cdot Q''^2$$

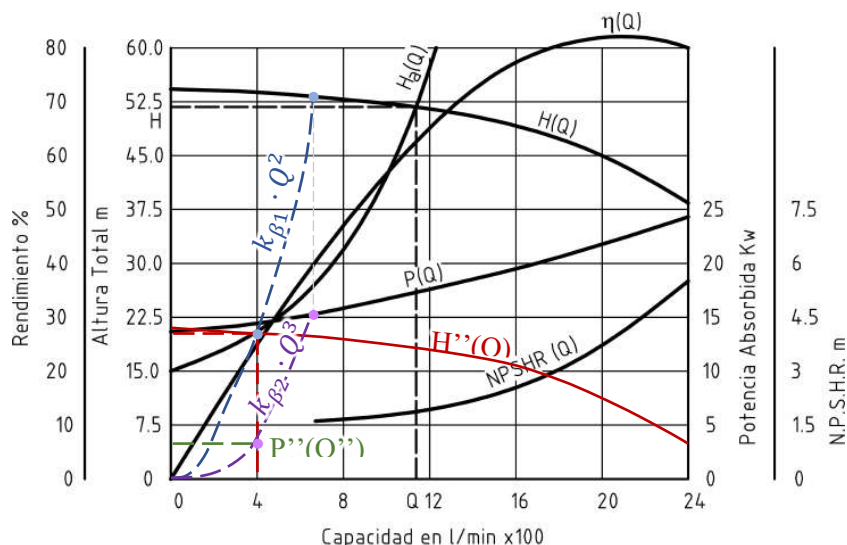
$$\frac{n'}{n''} = \sqrt[3]{\frac{P'}{P''}} \rightarrow P'' = \left(\frac{n''}{n'}\right)^3 \cdot P'$$

$$\frac{Q'}{Q''} = \sqrt[3]{\frac{P'}{P''}} \rightarrow P'' = \frac{P'}{Q'^3} \cdot Q''^3 = k_{\beta 2} \cdot Q''^3$$

En el ejemplo:

- $Q' = \frac{n'}{n''} \cdot Q'' = \frac{727,5}{450} \cdot 4 = 6,47$
- $H'(Q' = 6,47) = 53,06$
- $H'' = \frac{H'}{Q'^2} \cdot Q''^2 = \frac{53,06}{6,47^2} \cdot 4^2 = 20,30$
- $P'(Q' = 6,47) = 23$
- $P'' = \frac{P'}{Q'^3} \cdot Q''^3 = \frac{23}{6,47^3} \cdot 4^3 = 5,44$

A continuación se muestra en color azul la curva de los puntos homólogos de las curvas de la altura, y en morado la curva de puntos homólogos de las curvas de potencia absorbida.



Gráfica 6.7 Curvas de puntos homólogos de la altura y la potencia de la bomba a velocidades diferentes

Como se puede observar, al reducir la velocidad, tanto la altura como la potencia absorbida se reducen considerablemente.

6.6. HOJA DE CÁLCULO: CURVAS CARACTERÍSTICAS

Para obtener las curvas características tanto de la instalación como de la bomba se han creado las siguientes tablas y gráficas en una hoja de cálculo de Excel.

6.6.1. CURVA H-Q CARACTERÍSTICA DE LA INSTALACIÓN

Para obtener la curva de la instalación, es necesario obtener dos puntos: el punto 1 se obtiene en la hoja de cálculo “Altura y potencia de la bomba” y el punto 2 se obtiene en las siguientes tablas.

Cálculos del punto 2		
Las casillas de esta tabla se rellenan automáticamente		
Profundidad de la superficie freática	m	150
Altura de la salida de agua al exterior o al tanque	m	0
Altura geométrica	m	150
Presión en el grifo	bar	1
Altura por diferencia de presión	m	10,1936799
Longitud total de tubería	m	200
Diámetro interior de la tubería	mm	40
Material de la tubería	-	Plástico (PE, PVC)
Rugosidad absoluta de la tubería	mm	0,0015
Número de personas abastecidas	personas	60
Densidad del fluido	kg/m ³	1000
Viscosidad dinámica	Pa·s	0,001519
Agua abastecida	L/(pers·día)	1E-10
Tiempo de abastecimiento (*)	h/día	1
Aceleración de la gravedad	m/s ²	9,810

Resultados		
Caudal	m ³ /h	0,0000
Velocidad del fluido	m/s	0,0000
Número de Reynolds	-	0,00
Coefficiente de fricción	-	0,00448
Pérdidas de carga primarias	m	0,00000
Pérdidas de carga secundarias	m	0,00000
Pérdidas de carga totales	m	0,00000
Altura efectiva de la bomba	m	160,194
Potencia efectiva de la bomba	W	0,000

Tabla 6.7 "Cálculos del punto 2" de la hoja de cálculo "Curvas características".

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, son las mismas tablas que las de "Parámetros de diseño" y "Resultados" de la hoja de cálculo "Curvas características", pero en este caso el valor introducido en el agua abastecida es próximo a cero.

Gracias a estos cálculos se obtiene la siguiente tabla en la que se muestra el resultado de dichos cálculos, es decir, los puntos 1 y 2.

Curva H-Q característica de la instalación			
Las celdas de esta tabla se rellenan automáticamente			
		Punto 1	Punto 2
Altura	m	165,150256	160,194
Caudal	m ³ /h	3	0,0000

Tabla 6.8 "Curva H-Q característica de la instalación" (Puntos 1 y 2) de la hoja de cálculo "Curvas características".

Fuente: Elaboración propia

A partir de los puntos, se obtienen los valores C y D de la curva característica de la instalación, que se muestran de la siguiente manera en la hoja de cálculo.

C		D	
H =	160,194	+	0,55073062 *Q ²

Tabla 6.9 "Curva H-Q característica de la instalación" (Valores de C y D) de la hoja de cálculo "Curvas características".

Fuente: Elaboración propia

Una vez conocida la curva, se obtienen los valores de la altura para distintos valores del caudal, de tal manera que pueda dibujarse la gráfica de la curva más adelante.

Q	H
m ³ /h	m
0	160,19368
0,1	160,199187
0,2	160,215709
0,3	160,243246
0,4	160,281797
0,5	160,331363
0,6	160,391943
0,7	160,463538
0,8	160,546148
0,9	160,639772

Q	H
m ³ /h	m
5,1	174,518183
5,2	175,085436
5,3	175,663703
5,4	176,252985
5,5	176,853281
5,6	177,464592
5,7	178,086918
5,8	178,720258
5,9	179,364613
6	180,019982

1	160,744411	6,1	180,686366
1,1	160,860064	6,2	181,363765
1,2	160,986732	6,3	182,052178
1,3	161,124415	6,4	182,751606
1,4	161,273112	6,5	183,462049
1,5	161,432824	6,6	184,183506
1,6	161,60355	6,7	184,915978
1,7	161,785291	6,8	185,659464
1,8	161,978047	6,9	186,413965
1,9	162,181817	7	187,17948
2	162,396602	7,1	187,956011
2,1	162,622402	7,2	188,743555
2,2	162,859216	7,3	189,542115
2,3	163,107045	7,4	190,351689
2,4	163,365888	7,5	191,172277
2,5	163,635746	7,6	192,003881
2,6	163,916619	7,7	192,846498
2,7	164,208506	7,8	193,700131
2,8	164,511408	7,9	194,564778
2,9	164,825324	8	195,44044
3	165,150256	8,1	196,327116
3,1	165,486201	8,2	197,224807
3,2	165,833161	8,3	198,133512
3,3	166,191136	8,4	199,053233
3,4	166,560126	8,5	199,983967
3,5	166,94013	8,6	200,925717
3,6	167,331149	8,7	201,878481
3,7	167,733182	8,8	202,842259
3,8	168,14623	8,9	203,817052
3,9	168,570293	9	204,80286
4	169,00537	9,1	205,799683
4,1	169,451462	9,2	206,80752
4,2	169,908568	9,3	207,826371
4,3	170,376689	9,4	208,856238
4,4	170,855825	9,5	209,897119
4,5	171,345975	9,6	210,949014
4,6	171,84714	9,7	212,011924
4,7	172,359319	9,8	213,085849
4,8	172,882513	9,9	214,170788
4,9	173,416722	10	215,266742
5	173,961945		

Tabla 6.10 "Curva H-Q característica de la instalación" (Valores de H y Q) de la hoja de cálculo "Curvas características".
Fuente: Elaboración propia

6.6.2. CURVA H-Q CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA OFRECIDA POR EL FABRICANTE

Para obtener esta curva primero se incluye la siguiente tabla en la que se muestran los valores mínimos que la bomba debe cumplir, según las características de la instalación, y es posible introducir un rendimiento estimado de la bomba una vez observados los modelos disponibles en el mercado.

Valores de referencia de la bomba		
Completar únicamente la celda destacada en amarillo		
Rendimiento	%	50
Seleccionar una bomba que cumpla los siguientes valores		
Caudal mínimo	m ³ /h	4
Altura mínima	m	170
Potencia mínima	W	2030

Tabla 6.11 "Valores de referencia de la bomba" de la hoja de cálculo "Curvas características".
Fuente: Elaboración propia

Con estos valores como referencia, se seleccionará una bomba cuyos datos se introducirán en la siguiente tabla, incluyendo la frecuencia de alimentación para la que está diseñada y los puntos 3 y 4, que permiten obtener la curva característica de la bomba que aparece en la hoja de características del fabricante.

Curva H-Q característica de la bomba ofrecida por el fabricante			
Completar las celdas destacadas en amarillo con datos de la curva de la hoja de características de la bomba			
Frecuencia de la red		Hz	50
El punto 3 es el origen y el 4 es un punto arbitrario de la curva			
		Punto 3	Punto 4
Altura	m	320	250,000
Caudal	m3/h	0	6,4210

Tabla 6.12 "Curva H-Q característica de la bomba ofrecida por el fabricante" (frecuencia de red y puntos 3 y 4) de la hoja de cálculo "Curvas características". Fuente: Elaboración propia

Gracias a los puntos 3 y 4 es posible obtener los valores de A y B que caracterizan la curva de la bomba y se muestran en la hoja de cálculo de la siguiente forma.

A		B	
H =	320,000	-	1,69782412 *Q ²

Tabla 6.13 "Curva H-Q característica de la bomba ofrecida por el fabricante" (Valores de A y B) de la hoja de cálculo "Curvas características". Fuente: Elaboración propia

Una vez conocida la curva, se obtienen los valores de la altura para distintos valores del caudal, de tal manera que pueda dibujarse la gráfica de la curva más adelante.

Q	H
m ³ /h	m
0	320
0,1	319,983022
0,2	319,932087
0,3	319,847196
0,4	319,728348
0,5	319,575544
0,6	319,388783

Q	H
m ³ /h	m
5,1	275,839595
5,2	274,090836
5,3	272,30812
5,4	270,491449
5,5	268,64082
5,6	266,756235
5,7	264,837694

0,7	319,168066	5,8	262,885196
0,8	318,913393	5,9	260,898742
0,9	318,624762	6	258,878332
1	318,302176	6,1	256,823964
1,1	317,945633	6,2	254,735641
1,2	317,555133	6,3	252,613361
1,3	317,130677	6,4	250,457124
1,4	316,672265	6,5	248,266931
1,5	316,179896	6,6	246,042781
1,6	315,65357	6,7	243,784675
1,7	315,093288	6,8	241,492612
1,8	314,49905	6,9	239,166593
1,9	313,870855	7	236,806618
2	313,208704	7,1	234,412686
2,1	312,512596	7,2	231,984797
2,2	311,782531	7,3	229,522952
2,3	311,01851	7,4	227,027151
2,4	310,220533	7,5	224,497393
2,5	309,388599	7,6	221,933679
2,6	308,522709	7,7	219,336008
2,7	307,622862	7,8	216,70438
2,8	306,689059	7,9	214,038796
2,9	305,721299	8	211,339256
3	304,719583	8,1	208,605759
3,1	303,68391	8,2	205,838306
3,2	302,614281	8,3	203,036896
3,3	301,510695	8,4	200,20153
3,4	300,373153	8,5	197,332207
3,5	299,201654	8,6	194,428928
3,6	297,996199	8,7	191,491692
3,7	296,756788	8,8	188,5205
3,8	295,48342	8,9	185,515351
3,9	294,176095	9	182,476246
4	292,834814	9,1	179,403184
4,1	291,459576	9,2	176,296166
4,2	290,050382	9,3	173,155191
4,3	288,607232	9,4	169,98026
4,4	287,130125	9,5	166,771373
4,5	285,619061	9,6	163,528529
4,6	284,074042	9,7	160,251728
4,7	282,495065	9,8	156,940971
4,8	280,882132	9,9	153,596258
4,9	279,235243	10	150,217588
5	277,554397		

Tabla 6.14 "Curva H-Q característica de la bomba ofrecida por el fabricante" (Valores de H y Q) de la hoja de cálculo "Curvas características". Fuente: Elaboración propia

6.6.3. CURVA H-Q CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA A LA FRECUENCIA DEL AEROGENERADOR

Para desplazar la curva obtenida en el apartado anterior se debe introducir en la siguiente tabla la frecuencia a la que se alimenta, es decir, la del aerogenerador.

Curva H-Q característica de la bomba a la frecuencia del aerogenerador		
Completar la celda destacadas en amarillo con datos proporcionados por el fabricante del aerogenerador		
Frecuencia del aerogenerador	Hz	40

Tabla 6.15 "Curva H-Q característica de la bomba a la frecuencia del aerogenerador" (frecuencia del aerogenerador) de la hoja de cálculo "Curvas características". Fuente: Elaboración propia

A partir de esta frecuencia se pueden obtener los valores de A' y B' que caracterizan la nueva curva de la bomba, que se muestra de la siguiente forma.

A'	B
H = 204,800	- 1,69782412 *Q ²

Tabla 6.16 "Curva H-Q característica de la bomba a la frecuencia del aerogenerador" (Valores de A' y B') de la hoja de cálculo "Curvas características". Fuente: Elaboración propia

Una vez conocida la curva, se obtienen los valores de la altura para distintos valores del caudal, de tal manera que pueda dibujarse la gráfica de la curva más adelante.

Q	H
m ³ /h	m
0	204,8
0,1	204,7830218
0,2	204,732087
0,3	204,6471958
0,4	204,5283481
0,5	204,375544
0,6	204,1887833
0,7	203,9680662
0,8	203,7133926
0,9	203,4247625
1	203,1021759
1,1	202,7456328
1,2	202,3551333
1,3	201,9306772
1,4	201,4722647
1,5	200,9798957
1,6	200,4535702
1,7	199,8932883
1,8	199,2990498
1,9	198,6708549
2	198,0087035
2,1	197,3125956
2,2	196,5825312

Q	H
m ³ /h	m
5,1	160,639595
5,2	158,890836
5,3	157,10812
5,4	155,291449
5,5	153,44082
5,6	151,556235
5,7	149,637694
5,8	147,685196
5,9	145,698742
6	143,678332
6,1	141,623964
6,2	139,535641
6,3	137,413361
6,4	135,257124
6,5	133,066931
6,6	130,842781
6,7	128,584675
6,8	126,292612
6,9	123,966593
7	121,606618
7,1	119,212686
7,2	116,784797
7,3	114,322952

2,3	195,8185104	7,4	111,827151
2,4	195,020533	7,5	109,297393
2,5	194,1885992	7,6	106,733679
2,6	193,3227089	7,7	104,136008
2,7	192,4228621	7,8	101,50438
2,8	191,4890589	7,9	98,8387964
2,9	190,5212991	8	96,139256
3	189,5195829	8,1	93,4057592
3,1	188,4839102	8,2	90,6383059
3,2	187,414281	8,3	87,8368961
3,3	186,3106953	8,4	85,0015298
3,4	185,1731531	8,5	82,132207
3,5	184,0016545	8,6	79,2289278
3,6	182,7961993	8,7	76,291692
3,7	181,5567877	8,8	73,3204998
3,8	180,2834196	8,9	70,3153511
3,9	178,9760951	9	67,2762459
4	177,634814	9,1	64,2031843
4,1	176,2595765	9,2	61,0961661
4,2	174,8503824	9,3	57,9551915
4,3	173,4072319	9,4	54,7802604
4,4	171,930125	9,5	51,5713728
4,5	170,4190615	9,6	48,3285287
4,6	168,8740415	9,7	45,0517281
4,7	167,2950651	9,8	41,7409711
4,8	165,6821322	9,9	38,3962576
4,9	164,0352428	10	35,0175876
5	162,3543969		

Tabla 6.17 "Curva H-Q característica de la bomba a la frecuencia del aerogenerador" (Valores de H y Q) de la hoja de cálculo "Curvas características". Fuente: Elaboración propia

6.6.4. PUNTO DE TRABAJO DE LA BOMBA

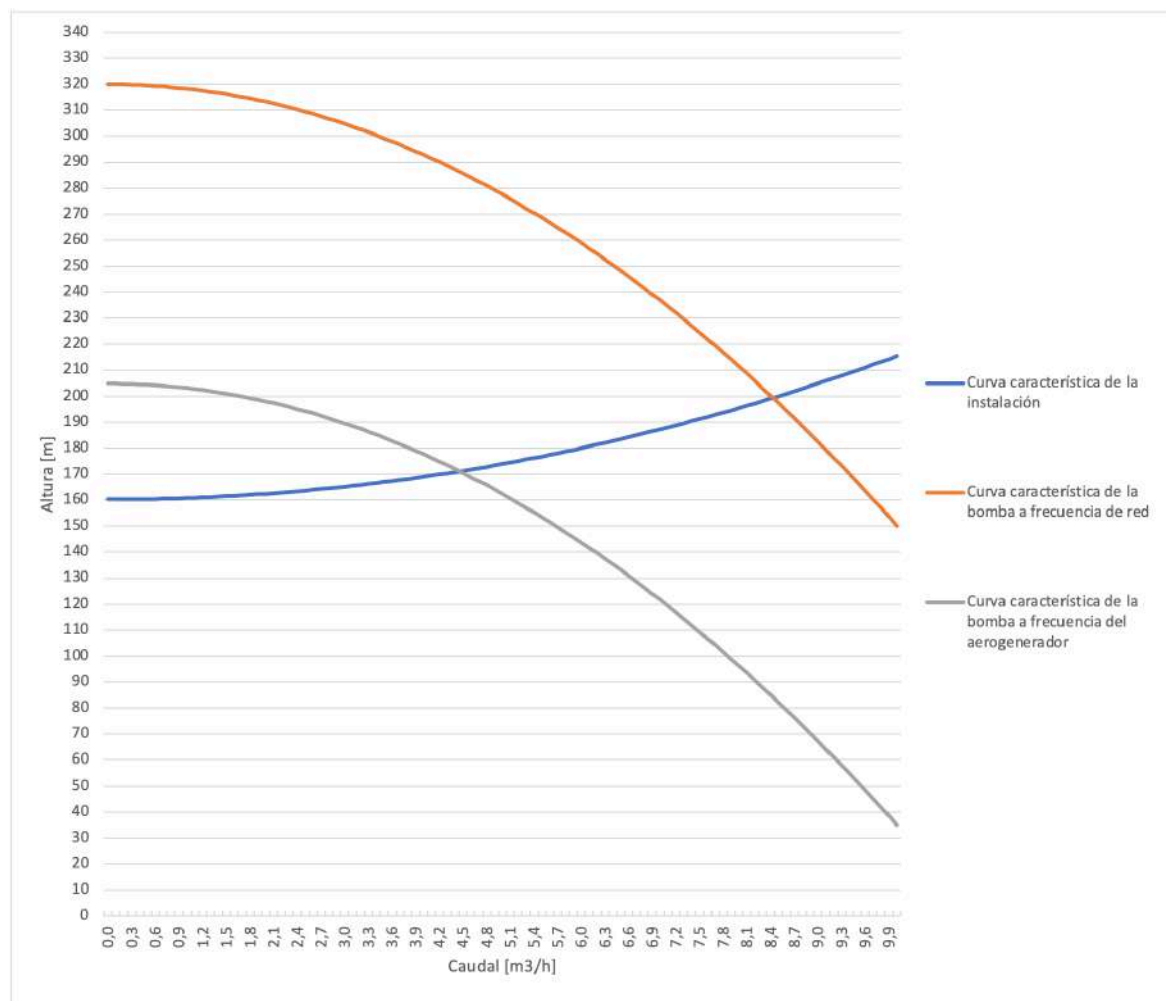
A partir de la curva de la instalación y la curva de la bomba se obtiene el punto de trabajo, que se muestra en la siguiente tabla.

Punto de trabajo de la bomba		
Las celdas de esta tabla se rellenan automáticamente		
Altura	m	171,118949
Caudal	m3/h	4,45396157

Tabla 6.18 "Punto de trabajo de la bomba" de la hoja de cálculo "Curvas características". Fuente: Elaboración propia

6.6.5. GRÁFICA DE CURVAS CARACTERÍSTICAS

En la siguiente gráfica se encuentran dibujadas las curvas características de la instalación, de la bomba a frecuencia de red y de la bomba a la frecuencia del aerogenerador.



Gráfica 6.8 Curvas características de la instalación, de la bomba a frecuencia de red y de la bomba a la frecuencia del aerogenerador.
 Fuente: Elaboración propia

6.6.6. ADVERTENCIAS Y RECOMENDACIONES

Para realizar el dimensionamiento de la bomba con mayor facilidad, en la hoja de cálculo aparecen los siguientes cuadros en los que se muestran las diferentes advertencias y recomendaciones relacionadas con el estado actual de la instalación.

ADVERTENCIA	RECOMENDACIÓN
Ninguna.	Puede concluir las iteraciones. La bomba y el aerogenerador seleccionados cumplen las características mínimas.

Tabla 6.19 "Advertencias" y "Recomendaciones" de la hoja de cálculo "Curvas características".
 Fuente: Elaboración propia

Advertencias

En función de la situación en la que se encuentre la instalación con la bomba seleccionada pueden aparecer los siguientes mensajes de advertencia:

- Error.
- No existe intersección entre la curva de la instalación y la de la curva.
- No se alcanzan la altura ni el caudal mínimos.
- No se alcanza el caudal mínimo.
- No se alcanza la altura mínima.
- La bomba está sobredimensionada.
- Ninguna.

Recomendaciones

Para dar al usuario una guía para realizar la próxima iteración, pueden aparecer las siguientes recomendaciones:

- Puede concluir las iteraciones. La bomba y el aerogenerador seleccionados cumplen las características mínimas.
- La bomba está sobredimensionada.
- Se recomienda seleccionar una bomba de menor potencia y, si fuera posible, un aerogenerador de menor potencia.
- Se recomienda seleccionar una bomba de mayor potencia y, si fuera necesario, un aerogenerador de mayor potencia.
- Ninguna.

Capítulo 7. Aerogenerador

En este capítulo se describen los criterios a seguir para la elección de un aerogenerador adecuado.

7.1. FRECUENCIAS MEDIAS DEL VIENTO

En los apartados anteriores se muestra cómo obtener la densidad de potencia y velocidad del viento medias en un lugar específico. Sin embargo, para un aprovechamiento eficiente de la energía eólica, es necesario conocer la frecuencia anual con la que se presentan ciertas velocidades en el emplazamiento. De esta forma se podrá estimar el número de horas en las que se supera la velocidad mínima de funcionamiento del aerogenerador o la aerobomba, para determinar así el número de horas que la bomba de agua estará en funcionamiento.

Aunque cada emplazamiento cuenta con sus propias frecuencias de viento, siendo estas distintas en cada lugar, la siguiente tabla refleja las frecuencias de aparición medias en horas/años para diversas velocidades medias.

Velocidad del viento [m/s]	Horas al año para zonas de velocidad media anuales de:				
	3,5 m/s	4 m/s	4,5 m/s	5 m/s	6 m/s
0-1,5	1453,18	1099,65	784,25	560,85	290,31
2	1750,29	1469,26	1021,66	966,11	606,31
3	1711,42	1614,42	1458,27	1276,79	920,65
4	1396,21	1469,21	1458,95	1386,57	1142,47
5	996,03	1163,82	1268,24	1308,15	1233,58
6	635,57	821,18	980,77	1098,49	1189,95
7	367,59	522,85	683,32	831,42	1038,82
8	194,37	302,86	432,25	571,31	826,34
9	94,54	160,51	249,49	358,00	601,16
10	42,50	78,14	131,85	205,16	400,75
11	17,72	35,06	63,96	107,73	245,02
12	6,87	14,53	28,54	51,90	137,43
13	2,49	5,57	11,73	22,96	70,70
14	0,84	1,98	4,44	9,34	33,35
15	0,26	0,65	1,55	3,49	14,41
16	0,08	0,20	0,50	1,20	5,70
17	0,02	0,06	0,14	0,37	2,06
18	0,01	0,02	0,04	0,11	0,68
19	0,00	0,00	0,01	0,03	0,21
30	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06
> 20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02

Tabla 7.1 Frecuencias medias del viento (horas/año). Fuente: Manual de Energía Eólica

Por tanto, es posible hacer una estimación de la frecuencia con la que se alcanza la velocidad necesaria para que el aerogenerador funcione conociendo la velocidad media del viento. En este caso, como el caudal de agua necesario se expresa por día, se ha creado la siguiente tabla que muestra la misma información que la anterior pero en horas al día.

Velocidad del viento [m/s]	Horas al día para zonas de velocidad media anuales de:				
	3,5 m/s	4 m/s	4,5 m/s	5 m/s	6 m/s
0-1,5	3,981	3,013	2,149	1,537	0,795
2	4,795	4,025	2,799	2,647	1,661
3	4,689	4,423	3,995	3,498	2,522
4	3,825	4,025	3,997	3,799	3,130
5	2,729	3,189	3,475	3,584	3,380
6	1,741	2,250	2,687	3,010	3,260
7	1,007	1,432	1,872	2,278	2,846

8	0,533	0,830	1,184	1,565	2,264
9	0,259	0,440	0,684	0,981	1,647
10	0,116	0,214	0,361	0,562	1,098
11	0,049	0,096	0,175	0,295	0,671
12	0,019	0,040	0,078	0,142	0,377
13	0,007	0,015	0,032	0,063	0,194
14	0,002	0,005	0,012	0,026	0,091
15	0,001	0,002	0,004	0,010	0,039
16	0,000	0,001	0,001	0,003	0,016
17	0,000	0,000	0,000	0,001	0,006
18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002
19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
> 20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 7.2 Frecuencias medias del viento (horas/día). Fuente: Elaboración propia

Las casillas con el fondo gris son aquellas en las que el valor que contienen es menor que 1. Estas casillas corresponden con la zona crítica de la tabla, ya que si el suministro de agua se debe realizar en menos de una hora que sería el tiempo diario que estaría activo el aerogenerador la instalación requerirá unas características complejas de alcanzar en las condiciones en las que se suele desarrollar este tipo de proyectos.

7.2. PRODUCCIÓN DEL AEROGENERADOR

Debido a que la velocidad del viento es variable, la producción eléctrica del aerogenerador también varía. La potencia generada es menor cuando la velocidad del viento disminuye. Como ya se justificó en apartados anteriores, la relación entre la potencia del aerogenerador y la velocidad del viento es la siguiente:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A$$

Donde P : potencia del aerogenerador [W]
 ρ : densidad del aire [kg/m³]
 v : velocidad del viento [m/s]
 A : área barrida por las aspas de la hélice [m²]

Por tanto, conociendo la potencia nominal de un generador y la velocidad a la que alcanza dicha potencia, y suponiendo constante la densidad del aire, se puede obtener la potencia que proporciona a diferentes velocidades de la siguiente forma:

$$P = \frac{P_N}{v_N^3} \cdot v^3$$

Donde P : potencia del aerogenerador [W]
 P_N : potencia nominal del aerogenerador [W]
 v : velocidad del viento [m/s]
 v_N : velocidad del viento a la que el aerogenerador alcanza la potencia nominal [m/s]

Sabiendo esto y la velocidad media del viento en el emplazamiento, a partir de la tabla de frecuencias medias del viento es posible estimar durante cuántas horas el aerogenerador va a generar qué potencia a lo largo el día.

7.3. HOJA DE CÁLCULO: AEROGENERADOR

Para obtener la producción de un aerogenerador determinado con la bomba seleccionada, se han creado las siguientes tablas en una hoja de cálculo de Excel.

7.3.1. PARÁMETROS DE CÁLCULO

Esta tabla incluye los datos de partida necesarios para los cálculos del aerogenerador relativos a la velocidad del viento y las características que la instalación y la bomba deben cumplir.

Parámetros de cálculo		
Las casillas de esta tabla se rellenan automáticamente		
Velocidad del viento media	m/s	5,85074231
Velocidad de referencia	m/s	6
Tiempo de abastecimiento teórico	horas/día	1
Volumen bombeado objetivo	m3/día	3
Bomba		
Altura de trabajo	m	171,118949
Caudal de trabajo	m3/h	4,45396157
Frecuencia de la red	Hz	50
Frecuencia del aerogenerador	Hz	40

Tabla 7.3 "Parámetros de cálculo" de la hoja de cálculo "Aerogenerador".
Fuente: Elaboración propia

Estos datos provienen de las hojas de cálculo "Velocidad del viento y WPD", "Altura y potencia de la bomba" y "Curvas características".

7.3.2. DATOS DE LA INSTALACIÓN

En la siguiente tabla se introduce información sobre la bomba y el aerogenerador seleccionados y cuyas características se quieren poner a prueba en la instalación.

Datos de la instalación		
Completar únicamente las casillas destacadas en amarillo		
Bomba		
Completar con datos de la hoja de características de la bomba		
Potencia nominal	W	7844
Caudal homólogo	m3/h	5,56745196
Potencia homóloga (*1)	W	7500
Potencia de trabajo	W	3840
Aerogenerador		
Potencia inicial recomendada (*2)	W	15700
Completar con datos de la curva de la hoja de características del aerogenerador		
Potencia nominal	W	9000
Velocidad del viento		
Para arranque	m/s	3
Para potencia nominal	m/s	12
Para frenado automático	m/s	14

Tabla 7.4 "Datos de la instalación" de la hoja de cálculo "Aerogenerador".
Fuente: Elaboración propia

La potencia homóloga es necesaria para los cálculos de las leyes de semejanza y se obtiene de la curva de la bomba de la hoja de características proporcionada por el fabricante y es la potencia absorbida correspondiente al caudal homólogo.

La potencia inicial recomendada es la potencia del aerogenerador que se recomienda para comenzar las iteraciones, y corresponde con el cuádruple de la potencia nominal de la bomba según recomendación profesional.

7.3.3. PRODUCCIÓN DEL AEROGENERADOR

A partir de la información recogida, se obtiene la siguiente tabla.

PRODUCCIÓN DEL AEROGENERADOR Y LA BOMBA					
Velocidad del viento	Frecuencia de aparición	Potencia del aerogenerador	Bomba activa	Tiempo de bombeo	Volumen bombeado
m/s	horas/día	W	-	horas/día	m3
1	0,795	0,00	No	0,000	0,000
2	1,661	0,00	No	0,000	0,000
3	2,522	0,00	No	0,000	0,000
4	3,130	333,33	No	0,000	0,000
5	3,380	651,04	No	0,000	0,000
6	3,260	1125,00	No	0,000	0,000
7	2,846	1786,46	No	0,000	0,000
8	2,264	2666,67	No	0,000	0,000
9	1,647	3796,88	No	0,000	0,000
10	1,098	5208,33	Sí	1,098	6,113
11	0,671	6932,29	Sí	0,671	3,737
12	0,377	9000,00	Sí	0,377	2,096
13	0,194	11442,71	Sí	0,194	1,078
14	0,091	0,00	No	0,000	0,000
15	0,039	0,00	No	0,000	0,000
16	0,016	0,00	No	0,000	0,000
17	0,006	0,00	No	0,000	0,000
18	0,002	0,00	No	0,000	0,000
19	0,001	0,00	No	0,000	0,000
20	0,000	0,00	No	0,000	0,000
> 20	0,000	0,00	No	0,000	0,000
Total				m3/día	13,025

Tabla 7.5 "Producción del aerogenerador y la bomba" de la hoja de cálculo "Aerogenerador". Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, la tabla incluye la distribución del viento particular de esta localización, obtenida a partir de los datos de viento anteriormente elaborados.

En la siguiente columna aparece la potencia generada por el aerogenerador, obtenida según los cálculos descritos en el apartado "Producción del aerogenerador".

A partir de esta potencia se comprueba si la bomba estará activa en los diferentes puntos de la distribución del viento, comparando la potencia generada por el aerogenerador con la potencia de trabajo de la bomba.

Sabiendo esto, se puede obtener el tiempo de bombeo y el volumen bombeado, datos que también se muestran en la tabla.

7.3.4. RECOMENDACIONES

En la hoja de calculo aparece un cuadro como el siguiente:

RECOMENDACIÓN
Puede concluir las iteraciones. La instalación ya se encuentra ajustada.

*Tabla 7.6 "Recomendación" de la hoja de cálculo "Aerogenerador".
Fuente: Elaboración propia*

Para dar al usuario una guía para realizar la próxima iteración, pueden aparecer las siguientes recomendaciones:

- Error.
- Se deben completar las iteraciones de la hoja de cálculo CURVAS CARACTERÍSTICAS.
- Se recomienda seleccionar un aerogenerador de mayor potencia.
- Puede concluir las iteraciones. La instalación ya se encuentra ajustada.
- Se recomienda seleccionar un aerogenerador de menor potencia.

Capítulo 8. Aerogenerador casero

En este capítulo se describen los criterios a seguir para el dimensionamiento de un aerogenerador casero. Gracias a construir un sistema casero, se pueden utilizar los materiales y herramientas disponibles en el entorno del proyecto e instruir a personas locales que podrán repararlo en caso de ser necesario.

8.1. PRODUCCIÓN DEL AEROGENERADOR CASERO

El dimensionamiento de aerogenerador casero se basa en el libro “Wind Power Workshop” de Hugh Piggot, en el que se detallan los pasos a seguir para construir un aerogenerador.

En el libro, se muestran dos tablas que permiten conocer la potencia que se puede esperar de un aerogenerador casero:

Average windspeed:	3 m/s 7 mph	4.5m/s 10 mph	6 m/s 13 mph
Blade diameter 1m	4	13	30
Blade diameter 2m	15	51	121
Blade diameter 3m	34	115	272
Blade diameter 4m	60	204	483

Tabla 8.1 Potencia media producida en función de la velocidad del viento media.
Fuente: “Wind Power Workshop” por Hugh Piggot

Windspeed:	2.2m/s 5 mph	4.5m/s 10 mph	10 m/s 22 mph	20m/s 44 mph
Blade diameter 1m	1	6	70	560
Blade diameter 2m	3	25	280	2,300
Blade diameter 3m	7	60	630	5,000
Blade diameter 4m	12	100	1,120	9,000

Tabla 8.2 Potencia instantánea producida en función de la velocidad del viento.
Fuente: “Wind Power Workshop” por Hugh Piggot

Con la primera tabla, y a partir de la velocidad media del viento, es posible elegir un diámetro del aerogenerador y conocer la potencia media que éste va a generar. Con esta potencia se debe cubrir la potencia de trabajo de la bomba, calculada anteriormente.

Con la segunda tabla se puede obtener la distribución de potencia producida a lo largo del día, conocida la distribución de la velocidad del viento. La bomba se considerará activa cuando se alcance su potencia absorbida en el punto de trabajo.

Por otro lado, para saber qué relación de multiplicación debe tener la multiplicadora para alcanzar los 50 Hz a la salida, el primer paso es elegir el ratio de velocidad de la punta de las palas del aerogenerador o Tip Speed Ratio (TSR). Este ratio se define como:

$$TSR = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{60 \cdot V}$$

Donde TSR : Tip Speed Ratio [adimensional]
 n : velocidad angular del rotor [rpm]
 D : diámetro de palas [m]
 V : velocidad lineal de la punta de las palas [m/s]

Para elegir el TSR, Hugh Piggot propone la siguiente tabla:

Tip Speed Ratio	No. of Blades	Functions
1	6 - 20	Slow pumps
2	4 - 12	Faster pumps
3	3 - 6	Dutch 4-bladed
4	2 - 4	Slow generators
5 - 8	2 - 3	Generators
8 - 15	1 - 2	Fastest possible

Tabla 8.3 TSR - No. de palas - Función. Fuente: "Wind Power Workshop" por Hugh Piggot

En este caso, la idea es conectar el rotor a un generador, por lo que el TSR se encontrará entre 5 y 8, y el número de palas, entre 2 y 3.

Después es posible conocer la velocidad angular del rotor gracias a la siguiente tabla:

Power (watts)	Diameter (metres)	TSR=4	TSR=6	TSR=8	TSR=10
10	0.4	2032	3047	4063	5079
50	0.8	909	1363	1817	2271
100	1.2	642	964	1285	1606
250	1.9	406	609	813	1016
500	2.7	287	431	575	718
1000	3.8	203	305	406	508
2000	5.3	144	215	287	359
5000	8.4	91	136	182	227

Tabla 8.4 RPM en función de la potencia, el diámetro y el TSR con una velocidad del viento de 10 m/s. Fuente: "Wind Power Workshop" por Hugh Piggot

La segunda columna de esta tabla se corresponde con una velocidad de viento de 10 m/s, por lo que se ignorará y se tendrán en cuenta únicamente para los cálculos posteriores, la potencia y el TSR.

Conocida la velocidad angular del rotor, se calcula la frecuencia de la corriente que produciría el generador sin multiplicadora de la siguiente forma:

$$f_{\text{sin multiplicadora}} = \frac{p \cdot n}{2 \cdot 60}$$

donde $f_{\text{sin multiplicadora}}$ es la frecuencia, n son las revoluciones por minuto del rotor y p el número de polos del generador. El número de polos dependerá del diseño del generador, en el libro proponen tanto la posibilidad de dos polos como de cuatro. Puede ser interesante utilizar cuatro polos cuando la velocidad angular del rotor sea baja.

Por tanto la relación de la multiplicadora deberá ser la siguiente:

$$r = \frac{f_{\text{aero}}}{f_{\text{sin multiplicadora}}}$$

donde f_{aero} es la frecuencia que sale del aerogenerador, idealmente 50 Hz.

8.2. HOJA DE CÁLCULO: AEROGENERADOR CASERO

Para obtener la producción de un aerogenerador casero, siguiendo las indicaciones del libro "Wind Power Workshop" de Hugh Piggot, con la bomba seleccionada, se han creado las siguientes tablas en una hoja de cálculo de Excel.

8.2.1. PARÁMETROS DE CÁLCULO

Al igual que en el caso del aerogenerador comercial, se incluye esta tabla con los datos de partida necesarios para los cálculos del aerogenerador casero relativos a la velocidad del viento y las características que la instalación y la bomba deben cumplir.

Parámetros de cálculo		
Las casillas de esta tabla se rellenan automáticamente		
Velocidad del viento media	m/s	5,85074231
Velocidad de referencia	m/s	6
Tiempo de abastecimiento teórico	horas/día	1
Volumen bombeado objetivo	m ³ /día	3
Bomba		
Altura de trabajo	m	171,118949
Caudal de trabajo	m ³ /h	4,45396157
Frecuencia de la red	Hz	50
Frecuencia del aerogenerador	Hz	40

Tabla 8.5 "Parámetros de cálculo" de la hoja de cálculo "Aerogenerador casero".

Fuente: Elaboración propia

Estos datos provienen de las hojas de cálculo "Velocidad del viento y WPD", "Altura y potencia de la bomba" y "Curvas características".

8.2.2. POTENCIA INSTANTÁNEA PRODUCIDA

Esta tabla se ha obtenido del libro de Hugh Piggot y permite conocer la potencia instantánea producida en función de la velocidad del viento y del diámetro de las palas del aerogenerador.

Potencia instantánea producida					
Velocidad del viento	m/s	2,2	4,5	10	20
Diámetro de las palas		Potencia instantánea			
m		W			
1		1	6	70	560
2		3	25	280	2300
3		7	60	630	5000
4		12	100	1120	9000

Tabla 8.6 "Potencia instantánea producida" de la hoja de cálculo "Aerogenerador casero".

Fuente: "Wind Power Workshop" por Hugh Piggot

8.2.3. POTENCIA MEDIA PRODUCIDA

Esta tabla también se ha obtenido del libro de Hugh Piggot y es similar a la anterior, pero en este caso contiene la potencia media producida en función de la velocidad del viento media y del diámetro de las palas del aerogenerador.

Potencia media producida				
Velocidad del viento media	m/s	3	4,5	6
Diámetro de las palas		Potencia media		
m		W		
1		4	13	30
2		15	51	121
3		34	115	272
4		60	204	483

Tabla 8.7 "Potencia media producida" de la hoja de cálculo "Aerogenerador casero".

Fuente: "Wind Power Workshop" por Hugh Piggot

8.2.4. VELOCIDAD ANGULAR DE LA TURBINA

La siguiente tabla del libro de Hugh Piggot permite obtener la velocidad angular del aerogenerador en función del TSR y de la potencia.

Velocidad angular de la turbina				
TSR	4	6	8	10
Potencia	Velocidad angular			
W	rpm			
10	2032	3047	4063	5079
50	909	1363	1817	2271
100	642	964	1285	1606
250	406	609	813	1016
500	287	431	575	718

Tabla 8.8 "Velocidad angular de la turbina" de la hoja de cálculo "Aerogenerador casero".
Fuente: "Wind Power Workshop" por Hugh Piggot

8.2.5. TSR – NO. DE PALAS – FUNCIONES

En la siguiente tabla aparecen los valores propuestos por Hugh Piggot para elegir el TSR adecuado para la instalación, estos valores dependen de la función que vaya a desempeñar el aerogenerador.

TSR - No. palas - Funciones		
TSR	Palas	Funciones
1	6 - 20	Bomba lenta
2	4 - 12	Bomba rápida
3	3 - 6	Dutch de 4 palas
4	2 - 4	Generador lento
5 - 8	2 - 3	Generador
8 - 15	1 - 2	Velocidad máxima

Tabla 8.9 "TSR – No. de palas - Funciones" de la hoja de cálculo "Aerogenerador casero".
Fuente: "Wind Power Workshop" por Hugh Piggot

Como se puede observar, además aparece el rango adecuado del número de palas.

8.2.6. DATOS DE LA INSTALACIÓN

En la siguiente tabla aparecen los datos de la bomba, el aerogenerador y la mutiplicadora.

Datos de la instalación		
Completar las celdas destacadas en amarillo		
Bomba		
Completar con datos de la hoja de características de la bomba		
Potencia nominal	W	7844
Caudal homólogo	m ³ /h	5,56745
Potencia homóloga (*)	W	7500
Potencia de trabajo	W	400
Aerogenerador		
Velocidad de referencia	m/s	6
Potencias medias disponibles		
W		

Diámetro de las palas 1 m	1	30
Diámetro de las palas 2 m	2	121
Diámetro de las palas 3 m	3	272
Diámetro de las palas 4 m	4	483
Diámetro de las palas mínimo	m	4
Potencia media mínima	W	483
Seleccionar un diámetro de palas tal que la potencia media sea suficiente para alimentar la bomba		
Diámetro de palas elegido	m	4
Potencia media	W	483
Potencias instantáneas disponibles		
W		
Velocidad del viento 2,2 m/s	2,2	12
Velocidad del viento 4,5 m/s	4,5	100
Velocidad del viento 10 m/s	10	1120
Velocidad del viento 20 m/s	20	9000
Multiplicadora		
Seleccionar TSR siguiendo las recomendaciones de la tabla "TSR - No. palas - Funciones"		
TSR	-	4
Velocidades angulares disponibles		
rpm		
Potencia 10 W	10	2032
Potencia 50 W	50	909
Potencia 100 W	100	642
Potencia 250 W	250	406
Potencia 500 W	500	287
Potencia de referencia	W	500
Velocidad angular	rpm	287
Polos del generador	-	2
Frecuencia sin multiplicadora	Hz	4,78333
Relación de multiplicación ideal	-	10,453
Relación de multiplicación real	-	10
Frecuencia del aerogenerador real	Hz	47,8333

Tabla 8.10 "Datos de la instalación" de la hoja de cálculo "Aerogenerador casero".
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, gran parte de la tabla se auto-rellena con datos de las tablas del libro de Hugh Piggot anteriormente descritas.

Entre los datos aparecen las relaciones de multiplicación ideal y real que permiten ajustar la instalación hasta obtener el valor final de dicha relación.

La potencia homóloga, igual que en el caso anterior, se obtiene de la curva de la bomba de la hoja de características proporcionada por el fabricante y es la potencia absorbida correspondiente al caudal homólogo.

8.2.7. PRODUCCIÓN DEL AEROGENERADOR Y LA BOMBA

A partir de la información recogida, se obtiene la siguiente tabla.

PRODUCCIÓN DEL AEROGENERADOR Y LA BOMBA					
Velocidad del viento	Frecuencia de aparición	Potencia del aerogenerador	Bomba activa	Tiempo de bombeo	Volumen Bombeado
m/s	horas/día	W	-	horas/día	m3
1	0,795	0,00	No	0,000	0,000
2	1,661	0,00	No	0,000	0,000
3	2,522	12,00	No	0,000	0,000
4	3,130	12,00	No	0,000	0,000
5	3,380	100,00	No	0,000	0,000
6	3,260	100,00	No	0,000	0,000
7	2,846	100,00	No	0,000	0,000
8	2,264	100,00	No	0,000	0,000
9	1,647	100,00	No	0,000	0,000
10	1,098	1120,00	Sí	1,098	4,890
11	0,671	1120,00	Sí	0,671	2,990
12	0,377	1120,00	Sí	0,377	1,677
13	0,194	1120,00	Sí	0,194	0,863
14	0,091	1120,00	Sí	0,091	0,407
15	0,039	1120,00	Sí	0,039	0,176
16	0,016	1120,00	Sí	0,016	0,070
17	0,006	1120,00	Sí	0,006	0,025
18	0,002	1120,00	Sí	0,002	0,008
19	0,001	1120,00	Sí	0,001	0,003
20	0,000	9000,00	Sí	0,000	0,001
> 20	0,000	9000,00	Sí	0,000	0,000
			Total	m3/día	11,109

Tabla 8.11 "Producción del aerogenerador y la bomba" de la hoja de cálculo "Aerogenerador casero".
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, la tabla incluye la distribución del viento particular de esta localización, obtenida a partir de los datos de viento anteriormente elaborados.

En la siguiente columna aparecen la potencia generada por el aerogenerador, obtenida según los datos del libro de Hugh Piggot mencionados en el apartado "Producción del aerogenerador casero".

A partir de esta potencia se comprueba si la bomba estará activa en los diferentes puntos de la distribución del viento, comparando la potencia generada por el aerogenerador con la potencia de trabajo de la bomba.

Sabiendo esto, se puede obtener el tiempo de bombeo y el volumen bombeado, datos que también se muestran en la tabla.

8.2.8. ADVERTENCIAS Y RECOMENDACIONES

Para realizar el dimensionamiento del aerogenerador casero y la multiplicadora con mayor facilidad, en la hoja de cálculo aparecen los siguientes cuadros en los que se muestran las diferentes advertencias y recomendaciones relacionadas con el estado actual de la instalación.

RECOMENDACIÓN

Se recomienda seleccionar un aerogenerador de mayor diámetro.

ADVERTENCIA

Se debe introducir la frecuencia real del aerogenerador obtenida en los datos de la multiplicadora en la hoja de CURVAS CARACTERÍSTICAS para seleccionar la bomba más adecuada.

*Tabla 8.12 "Recomendación" y "Advertencia" de la hoja de cálculo "Aerogenerador casero".
Fuente: Elaboración propia*

Advertencias

En función de la situación en la que se encuentre la instalación con los datos introducidos pueden aparecer los siguientes mensajes de advertencia:

- Se debe introducir la frecuencia real del aerogenerador obtenida en los datos de la multiplicadora en la hoja de CURVAS CARACTERÍSTICAS para seleccionar la bomba más adecuada.
- Ninguna.

Recomendaciones

Para dar al usuario una guía para realizar la próxima iteración, pueden aparecer las siguientes recomendaciones:

- Error.
- Se deben completar las iteraciones de la hoja de cálculo CURVAS CARACTERÍSTICAS.
- Se recomienda seleccionar un aerogenerador de mayor diámetro.
- Puede concluir las iteraciones. La instalación ya se encuentra ajustada.
- Se recomienda seleccionar un aerogenerador de menor diámetro.

Capítulo 9. Aerobomba

9.1. GENERALIDADES

La aerobomba, al igual que el aerogenerador, utiliza el recurso eólico del emplazamiento para proporcionar la energía necesaria para extraer el agua del pozo, con la diferencia de que en este caso el acoplamiento entre la turbina y la bomba es mecánico, es decir, la energía no se transforma en electricidad en ningún momento. La transmisión de una aerobomba es el elemento que convierte el movimiento de rotación del rotor en un movimiento adecuado para la bomba. Normalmente se utilizan bombas de pistón, por lo que la rotación horizontal del rotor se transforma en el movimiento lineal alternativo vertical del pistón.

Este sistema puede ser una alternativa al sistema aerogenerador – bomba. A continuación, se analizarán los factores a tener en cuenta a la hora de valorar la posibilidad de su uso.

9.1.1. VENTAJAS

- Un sistema completamente mecánico evita problemas asociados con el sistema eléctrico. Algunos ejemplos son:
 - El uso de dispositivos que no se encuentran disponibles en el país en el que se realiza el proyecto.
 - El aislamiento y protección de elementos susceptibles a la lluvia o el calor.
 - El uso de baterías, con un ciclo de vida corto y riesgo de ser corrompidas o robadas.
 - La seguridad asociada a los riesgos eléctricos.
- Al ser un sistema sencillo, los usuarios pueden aprender su funcionamiento y ser capaces de repararlo, incluso sustituyendo piezas dañadas por otras que se encuentren en el entorno. Esto refuerza la autonomía del poblado, valor que es muy importante para Manos Unidas.
- Los costes tanto de instalación como de mantenimiento son bajos.
- Estos sistemas ya se utilizan en algunos lugares de África, por lo que es posible que no sea necesario importar sus elementos o que la importación se realice desde un lugar más cercano.
- Estos sistemas son más sencillos de acoplar a bombas de accionamiento mecánico existentes.

9.1.2. INCONVENIENTES

- El gran inconveniente de este tipo de sistemas es que la turbina se encuentra en el mismo emplazamiento que la bomba. El problema de esto es que el lugar con mayor viento no necesariamente es el lugar con el agua más cerca de la superficie. De hecho, suele ocurrir lo contrario, ya que los lugares en los que el agua está más próxima a la superficie son los de menor altura, como los valles, mientras que los lugares de mayor viento son aquellos que se encuentran más elevados. Por esta razón, no es recomendable su uso en las zonas en las que el terreno sea muy abrupto o en el que haya muchas construcciones que puedan obstaculizar el viento.
- No se puede aprovechar la altura de otras construcciones como edificios para elevar la turbina, porque la bomba debe encontrarse en su vertical y no puede haber obstrucciones intermedias.

9.2. PRODUCCIÓN DE LA AEROBOMBA

Habitualmente, en las hojas de características de las bombas aparecen los siguientes datos necesarios para el cálculo de su producción:

- **Longitud del golpe.** Es la distancia que va a recorrer el pistón de la bomba en cada recorrido. Esta distancia depende del radio de giro del extremo superior de la pieza que une el rotor de la turbina y el pistón de la bomba. Además, en algunos modelos se pueden montar las piezas con varias configuraciones diferentes para obtener la longitud del golpe más apropiada.

- **Frecuencia de golpes.** Es el número de vueltas que da el rotor en un tiempo determinado. Esta velocidad depende de la geometría de las palas y de la velocidad del viento. Sin embargo, habitualmente en las hojas de características sólo aparece su valor máximo.
- **Velocidades del viento de trabajo.** Es el rango de velocidades para el cual la aerobomba funciona.

En la tabla que sigue se muestran las características de varios modelos de aerobomba de la marca Bornay.

Modelo 802*	Diámetro Rotor. (Pies)	Longitud del golpe		Nº. de palas	Peso del embalaje del molino (Pounds)	Back Geared	Golpes máximos por minuto	Para una velocidad de viento de	RPM máx. del rotor	Peso del embalaje del motor
		Largo	Corto							
X	6	5"	3 ¾"	18	210	3.91-1	32	15-18 mph	125	100
A	8	7 1/8"	5 ½"	18	355	3.29-1	32	15-18 mph	105	175
B	10	9 ¼"	7 ¼"	18	655	3.29-1	26	15-18 mph	85	330
D	12	11 ¼"	8 ¼"	18	1130	3.50-1	21	18-20 mph	73	540
E	14	13 ½"	9 ¾"	18	1870	3.43-1	18	18-20 mph	62	805
F	16	14 7/8"	11 3/8"	18	2585	3.29-1	16	18-20 mph	53	1180

* El Modelo 802 se empezó a fabricar en 1981 y las piezas de recambio son compatibles con el modelo 702 introducido en 1933.

Tabla 9.1 Especificaciones de la aerobomba.

Fuente: "Manual de instalación y mantenimiento de una aerobomba" de Bornay

Para dimensionar correctamente la bomba, lo primero que se debe tener en cuenta es que la longitud del golpe de la aerobomba no puede superar la carrera de la bomba para no dañar la instalación, ya que el recorrido del pistón está limitado por la carrera. De hecho, para proteger la instalación, el pistón no debe alcanzar el tope ni el fondo del cilindro. Por esta razón se establecerá al menos un límite de 1 cm de diferencia entre la longitud del golpe y la carrera del pistón, siendo esta última mayor.

El volumen bombeado en cada golpe se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Volumen bombeado} = \text{Área interior del cilindro} \cdot \text{Longitud del golpe}$$

Conociendo dicho volumen y el número de golpes se puede obtener el volumen total bombeado. Para ello, se parte de la distribución del viento que corresponde a la zona en la que se sitúa la aerobomba. En el caso de que la velocidad del viento se encuentre dentro del rango de velocidades de viento de trabajo de la aerobomba, se considerará que se encuentra activa. Entonces:

$$\text{Volumen bombeado} = \text{No. de golpes} \cdot \text{Frecuencia de golpes}$$

De esta manera se obtiene el volumen total bombeado y es posible compararlo con el volumen bombeado objetivo.

9.3. HOJA DE CÁLCULO: AEROBOMBA

Para obtener la producción de la aerobomba se han creado las siguientes tablas en una hoja de cálculo de Excel.

9.3.1. PARÁMETROS DE CÁLCULO

Esta tabla con los datos de partida necesarios para los cálculos de la aerobomba relativos a la velocidad del viento y las características que la instalación debe cumplir.

Parámetros de cálculo		
Las celdas de esta tabla se rellenan automáticamente		
Velocidad del viento media	m/s	5,85074231
Velocidad de referencia	m/s	6
Tiempo de abastecimiento teórico	horas/día	1
Volumen bombeado objetivo	m3/día	3

Tabla 9.2 "Parámetros de cálculo" de la hoja de cálculo "Aerobomba".

Fuente: Elaboración propia

Estos datos provienen de las hojas de cálculo “Velocidad del viento y WPD” y “Altura y potencia de la bomba”.

9.3.2. ESPECIFICACIONES DE LA AEROBOMBA

En la siguiente tabla aparecen las especificaciones de varios modelos de aerobombas.

ESPECIFICACIONES DE LA AEROBOMBA						
Modelos de Bornay						
Modelo	Diámetro	Longitud del golpe		Frecuencia de golpes	Velocidad de viento	
		Largo	Corto		Mínima	Máxima
	m	m	m	golpes/min	m/s	m/s
X	6	0,1270	0,0953	32	6,705	8,046
A	8	0,1810	0,1397	32	6,705	8,046
B	10	0,2350	0,1842	26	6,705	8,046
D	12	0,2858	0,2096	21	8,046	8,941
E	14	0,3429	0,2477	18	8,046	8,941
F	16	0,3778	0,2889	16	8,046	8,941
Otros modelos						
Completar con información de la hoja de características de la aerobomba, sólo es necesario completar las celdas destacadas en amarillo						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Tabla 9.3 "Especificaciones de la aerobomba" de la hoja de cálculo "Aerobomba".
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, se han incluido los datos de los modelos de aerobombas que ofrece Bornay, pero también es posible completar los datos de otros modelos para compararlos.

9.3.3. DATOS DE LA AEROBOMBA

En esta tabla aparecen los datos de la aerobomba seleccionada.

Datos de la aerobomba		
Completar únicamente las celdas destacadas en amarillo		
Modelo	-	X
Configuración del golpe	-	Largo
Longitud del golpe	m	0,12700025
Frecuencia de golpes	golpes/min	32
Velocidad del viento		
Mínima	m/s	6,70540903
Máxima	m/s	8,04649084

Tabla 9.4 "Datos de la aerobomba" de la hoja de cálculo "Aerobomba".
Fuente: Elaboración propia

Una vez seleccionado el modelo de bomba y la configuración del golpe, se completan los demás datos automáticamente.

9.3.4. DATOS DE LA BOMBA DE PISTÓN

Como ya se comentó anteriormente, la bomba utilizada en este tipo de instalación suele ser una bomba de pistón. En la siguiente tabla se pueden introducir las medidas de la misma.

Datos de la bomba de pistón		
Completar únicamente las celdas destacadas en amarillo		
Diámetro interior del cilindro	m	0,1
Carrera del pistón	m	0,3
Capacidad máxima de bombeo	m3	0,00235619
Capacidad real de bombeo	m3	0,00099746

Tabla 9.5 "Datos de la bomba de pistón" de la hoja de cálculo "Aerobomba".

Fuente: Elaboración propia

9.3.5. PRODUCCIÓN DE LA AEROBOMBA

A partir de la información recogida, se obtiene la siguiente tabla:

PRODUCCIÓN DE LA AEROBOMBA				
Velocidad del viento	Frecuencia de aparición	Aerobomba activa	No. de golpes	Volumen bombeado
m/s	horas/día	-	golpes	m3
1	0,795	No	0	0,000
2	1,661	No	0	0,000
3	2,522	No	0	0,000
4	3,130	No	0	0,000
5	3,380	No	0	0,000
6	3,260	No	0	0,000
7	2,846	Sí	5465	5,451
8	2,264	Sí	4347	4,336
9	1,647	No	0	0,000
10	1,098	No	0	0,000
11	0,671	No	0	0,000
12	0,377	No	0	0,000
13	0,194	No	0	0,000
14	0,091	No	0	0,000
15	0,039	No	0	0,000
16	0,016	No	0	0,000
17	0,006	No	0	0,000
18	0,002	No	0	0,000
19	0,001	No	0	0,000
20	0,000	No	0	0,000
> 20	0,000	No	0	0,000
Total			m3/día	9,787

Tabla 9.6 "Producción de la aerobomba" de la hoja de cálculo "Aerobomba".

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, la tabla incluye la distribución del viento particular de esta localización, obtenida a partir de los datos de viento anteriormente elaborados.

En la siguiente columna se comprueba si la bomba estará activa en los diferentes puntos de la distribución del viento, lo cual ocurre cuando éste se encuentra dentro del rango de funcionamiento de la aerobomba.

Sabiendo esto, se puede obtener el número de golpes y el volumen bombeado, datos que también se muestran en la tabla.

9.3.6. ADVERTENCIAS Y RECOMENDACIONES

Para realizar el dimensionamiento de la aerobomba con mayor facilidad, en la hoja de cálculo aparecen los siguientes cuadros en los que se muestran las diferentes advertencias y recomendaciones relacionadas con el estado actual de la instalación.

ADVERTENCIAS
Se debe tener en cuenta que, para comparar la producción del aerogenerador con la de la aerobomba, los datos de viento de la hoja de cálculo VELOCIDAD DE VIENTO Y WPD deben corresponder a la localización de cada uno.
La carrera del cilindro es mucho mayor que la longitud del golpe. Se está desaprovechando más del 20% de la capacidad de la bomba.
RECOMENDACIONES
Las recomendaciones llevadas a cabo deben ser compatibles entre sí
Se recomienda seleccionar la configuración de golpe LARGO, una bomba de menor carrera o una aerobomba de mayor longitud de golpe.
Se recomienda seleccionar una aerobomba de mayor diámetro o una bomba de mayor capacidad.

Tabla 9.7 "Advertencias" y "Recomendaciones" de la hoja de cálculo "Aerobomba".
Fuente: Elaboración propia

Advertencias

En función de la situación en la que se encuentre la instalación con los datos introducidos pueden aparecer los siguientes mensajes de advertencia:

- Se debe tener en cuenta que, para comparar la producción del aerogenerador con la de la aerobomba, los datos de viento de la hoja de cálculo VELOCIDAD DE VIENTO Y WPD deben corresponder a la localización de cada uno.
- La carrera del pistón es menor que la longitud del golpe. La instalación se puede ver dañada.
- La carrera del pistón es muy similar a la longitud del golpe. El pistón del cilindro no debe alcanzar ni el tope ni el fondo del cilindro.
- La carrera del cilindro es mucho mayor que la longitud del golpe. Se está desaprovechando más del 20% de la capacidad de la bomba.
- Ninguna.

Recomendaciones

Para dar al usuario una guía para realizar la próxima iteración, pueden aparecer las siguientes recomendaciones, las dos primeras relacionadas con la relación entre la carrera del pistón y la longitud del golpe, y las demás relacionadas con el volumen bombeado:

- Se recomienda seleccionar la configuración de golpe CORTO, una bomba de mayor carrera o una aerobomba de menor longitud de golpe.
- Se recomienda seleccionar la configuración de golpe LARGO, una bomba de menor carrera o una aerobomba de mayor longitud de golpe.
- Se recomienda seleccionar una aerobomba que se active para mayor rango de velocidades.
- Se recomienda seleccionar una aerobomba de mayor diámetro o una bomba de mayor capacidad.
- Se alcanza el volumen bombeado objetivo.
- Se recomienda seleccionar una aerobomba de menor diámetro.

~~~~~

## Capítulo 10. Dimensionamiento conjunto

~~~~~

10.1. DIMENSIONAMIENTO DE AEROGENERADOR Y BOMBA

La selección de los equipos es un proceso iterativo que consta de varias fases descritas a continuación.

PASO 1. CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA INSTALACIÓN

La curva característica de la instalación es la expresión resultante de aplicar la Ec. de Bernoulli entre la aspiración y la impulsión considerando las velocidades en estas nulas. Se obtiene de la misma manera que se obtuvo anteriormente la altura efectiva de la bomba, ya que el punto de trabajo teórico de la bomba se encuentra en la curva de la instalación. **Esta curva es aproximadamente una parábola** y se calcula de la siguiente forma:

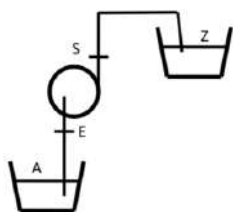
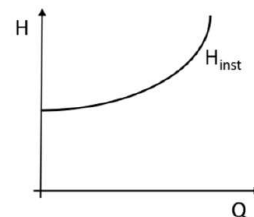


Figura 10.1 Esquema del sistema de bombeo. Fuente: "Mecánica de Fluidos: Fluido viscoso en conductos" por ICAI

$$H_{inst} = \frac{p_z - p_A}{\rho \cdot g} + z_z - z_A + H_{rA-e} + H_{rs-z} = C + D \cdot Q^2$$

$$\neq f(Q) = C = f(Q, \lambda, L, \zeta, D) = D$$

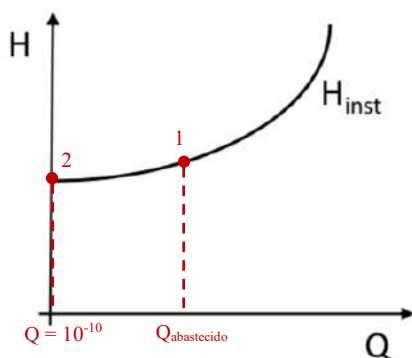


Gráfica 10.1 Curva de la instalación. Fuente: "Mecánica de Fluidos: Fluido viscoso en conductos" por ICAI

Por tanto, conociendo dos puntos de la curva es posible obtener la ecuación:

- El punto 1 se puede obtener directamente de la hoja de cálculo "Altura y potencia de la bomba", una vez completada con las características de la instalación.
- El punto 2 será el punto inicial de la curva y se obtiene a partir de unas tablas similares a las de "Altura y potencia de la bomba", en las cuáles los cálculos serán los mismos pero en este caso el caudal será próximo a cero. Se debe tener en cuenta que la ecuación de la parábola es una aproximación de la curva en la que no se tiene en cuenta la presencia del número de Reynolds en el coeficiente de fricción. Por esta razón, no es posible introducir $Q = 0$ en la tabla para obtener el punto inicial de la curva, porque en tal caso aparecería un error por una división entre cero en el cálculo del coeficiente de fricción. Por tanto, se introducirá el valor de $Q = 10^{-10}$.

De esta manera se define totalmente la curva:



Gráfica 10.2 Obtención de la curva de la instalación a partir de los puntos 1 y 2. Fuente: Elaboración propia

$$C = H_2$$

$$D = \frac{H_1 - H_2}{Q_1^2}$$

$$H_{inst} = H_2 + \frac{H_1 - H_2}{Q_1^2} \cdot Q^2$$

PASO 2. SELECCIÓN PRELIMINAR DEL MODELO DE BOMBA SUPONIENDO UNA FRECUENCIA DE LA ALIMENTACIÓN DE 50 HZ

Las bombas sumergibles normalmente están pensadas para conectarse a la red, por tanto a una frecuencia de 50Hz en Europa y en caso todo África. Por este motivo, las hojas de características ofrecidas por los fabricantes muestran los datos y gráficas de las bombas en estas condiciones.

Para comenzar este proceso de selección de los equipos adecuados, se partirá de una bomba que cumpla las condiciones necesarias estando alimentada a una frecuencia de 50 Hz. Para ello, el primer paso es elegir un fabricante de bombas sumergibles, que ofrezca las curvas H-Q de la bomba. Hasta ahora en Manos Unidas se han utilizado bombas Grundfos. A continuación se debe buscar una bomba sumergible adecuada, para lo cual se debe observar:

- El **caudal**, que debe ser igual o superior al requerido en la instalación. En Grundfos se recomienda verificar que el caudal es mayor del 20% superior al punto teórico.
- La **altura de la bomba**, que también debe ser igual o superior a la requerida en la instalación.
- La **potencia de la bomba**. Habitualmente, en las hojas de características de las bombas, la potencia que aparece es la absorbida, no la ejercida en el eje. Esto quiere decir se debe aplicar el rendimiento de la bomba, que es un dato que a priori se desconoce porque depende de cada bomba. Sin embargo, se tendrá en cuenta que debe existir un margen considerable entre la potencia efectiva teórica y la potencia de la bomba, ya que el rendimiento puede ser del 50% o incluso del 25%.

El caudal teórico, la altura requerida en la instalación y la potencia efectiva teórica de la bomba se encuentran en la tabla de “Resultados” de la hoja de cálculo “Altura y potencia de la bomba”.

PASO 3. PROCESO ITERATIVO PARA LA SELECCIÓN DE LOS MODELOS DE BOMBA Y AEROGENERADOR

Partiendo de esta primera selección de la bomba, se debe elegir el aerogenerador correspondiente para comenzar las iteraciones. El primer paso es elegir un fabricante de aerogeneradores de minieólica (<100kW), como puede ser Bornay o Enair. Después hay que elegir la potencia del aerogenerador. Según CIEMAT lo más recomendable es elegir **un aerogenerador que cuadruple la potencia de la bomba**.

En este punto se puede optar por varias alternativas:

A. Utilizar un inversor

Estos dispositivos permiten controlar la frecuencia de la alimentación de la bomba de tal manera que se mantenga en 50 Hz aunque la frecuencia de la corriente de salida del aerogenerador sea variable. Se suelen utilizar para conectar aerogeneradores a la red. Estos aparatos suelen ser convertidores AC-DC-AC, que transforman la corriente de entrada en corriente continua y a continuación generan la señal deseada. Este control se realiza normalmente mediante la relación voltaje-frecuencia, de tal manera que se conserva la proporcionalidad V/f a la entrada y a la salida del convertidor. Esto quiere decir que para subir la frecuencia a la alimentación de la bomba, es necesario subir la tensión, por lo que es posible que sea preciso en este caso instalar algún dispositivo que proteja a la bomba de sobretensiones. Este dispositivo de protección puede estar incluido en la caja del inversor.

Habitualmente, los fabricantes de aerogeneradores también proveen de los inversores y en función de las necesidades del usuario se pueden definir las características de los mismos.

Las **ventajas** de usar un inversor son que la bomba se alimenta a una frecuencia constante, por lo que el suministro de agua es también más constante y la se preserva mejor la salud de la bomba, y que se alimenta a una frecuencia mayor, por lo que se saca mayor partido de la bomba, obteniendo valores más altos de caudal y altura. Además, sería posible conectarse a una línea eléctrica en el caso de haberla y conectar otros dispositivos.

Las **desventajas** son el aumento de precio del sistema y el aumento de la complejidad de instalación. Además, este tipo de dispositivos puede limitar la potencia del aerogenerador y de la bomba.

En el caso de los aerogeneradores Bornay, la conexión sería la siguiente:

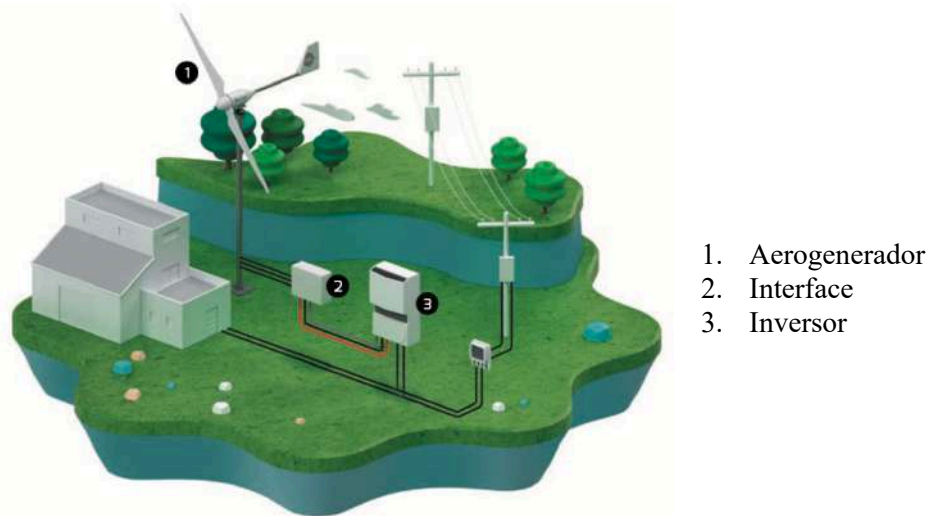


Figura 10.2 Conexión de aerogenerador con inversor.
Fuente: Catálogo de Bornay

B. Utilizar la interfaz Wind+

Este dispositivo lo ofrece Bornay y sirve específicamente para conectar el aerogenerador directamente a una bomba, y gestiona y controla el funcionamiento del aerogenerador así como la energía entregada a la bomba. Además, se recomienda en el catálogo de Bornay utilizar la bomba tipo Grundfos SQFlex, lo cual simplifica la selección de equipos. También permite que la salida sea en corriente continua para alimentar una bomba de CC.

Las **ventajas** de este sistema son que es de fácil instalación y que con un único dispositivo se saca el mayor partido posible a la bomba, protegiendo su salud.

Las **desventajas** son el aumento de precio y que limita las posibilidades a un único fabricante. Esto implica que si alguna parte del sistema se corrompe, sólo es sustituible por el mismo modelo. Lo cuál crea una codependencia.

La conexión es la siguiente:



Figura 10.3 Conexión de aerogenerador con interfaz Wind+.
Fuente: Catálogo de Bornay

C. Conectar directamente la bomba al aerogenerador

En este caso, es importante elegir bien la bomba y el aerogenerador para aprovechar al máximo ambos. Por esta razón, el proceso de selección es más complejo y se describirá más adelante.

Las **ventajas** de este sistema son el ahorro de costes en dispositivos electrónicos y la simplicidad del sistema. En el caso de que alguna parte del sistema se corrompa, es más fácil repararla o sustituirla, ya que no hay electrónica de por medio y todos los elementos son relativamente sencillos.

Una de las **desventajas** es que la bomba se alimenta a frecuencias más bajas, por lo que se pierde gran parte de su potencial. Esto puede suponer que el ahorro que implica no incluir dispositivos electrónicos se compense por el precio de una bomba de mayor potencia. Además, al estar la bomba expuesta a mayores variaciones de frecuencia se compromete su salud y probablemente sea necesario incluir un dispositivo de protección.

Las variaciones de frecuencia de este sistema se pueden limitar utilizando **aerogeneradores de paso variable**. Estos aerogeneradores regulan la posición de las palas para mantener unas revoluciones constantes. Sin embargo, tienen la desventaja de que las variaciones de la velocidad del viento se traducen en fluctuaciones del par mecánico y que producen menor potencia que los aerogeneradores de paso fijo.

En caso de optar por la opción A o por la opción B, se pasará directamente al Paso 4, ya que no es necesario hacer un ajuste de las curvas de la bomba a frecuencias distintas de 50 Hz, ya que la electrónica se encarga de mantener dicha frecuencia.

En caso de optar por la opción C se deben seguir los siguientes pasos para asegurar la viabilidad del sistema y el máximo aprovechamiento de sus elementos.

Paso 3.1. Preguntar al fabricante del aerogenerador qué frecuencia de salida se obtiene.

Habitualmente existe una correlación entre la velocidad de rotación de las palas y la frecuencia de la corriente generada. Esta relación depende de la multiplicadora, que es un sistema de engranajes que multiplica la velocidad del eje por un factor para aumentar la frecuencia de la corriente de salida. Este factor puede ser muy diverso en función de los tipos y la combinación de multiplicadoras. En el caso de un sistema de ejes planetarios puede estar entre 10 y 15, y en el caso de un sistema de ejes paralelos puede estar entre 2 y 3.

En las hojas de características de los aerogeneradores suelen aparecer las RPMs del rotor en condiciones nominales. Pero sin conocer la relación de la multiplicadora no es posible saber la frecuencia que alimenta la bomba, dato que es imprescindible para elegir la bomba adecuada.

- Lo más recomendable es tomar como referencia la **frecuencia de salida del aerogenerador a la velocidad del viento media de la zona**. De esta manera se simplifican los cálculos posteriores evitando la complejidad de las fluctuaciones en la velocidad del rotor. Además, los aerogeneradores de minieólica suelen ser de paso variable por lo que la velocidad de rotación se mantiene relativamente constante, lo que hace que esta aproximación sea razonable.
- En caso de que el fabricante no proporcione esta información, se puede optar por solicitar la relación de la multiplicadora y el número de polos del generador, de tal manera que sea posible calcular la **frecuencia de salida del aerogenerador en condiciones nominales** de la siguiente forma:

$$f_n = \frac{p \cdot n \cdot r}{2 \cdot 60}$$

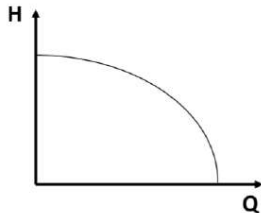
donde f_n es la frecuencia en condiciones nominales, n son las revoluciones por minuto del rotor, p el número de polos y r la relación de la multiplicadora.

- Si el fabricante no proporciona ninguna información acerca de la frecuencia de salida del aerogenerador, lo mejor es **optar por utilizar un inversor o una interfaz Wind+**, porque el riesgo de elegir la bomba sin conocer esta información es muy alto.

Paso 3.2. Obtener la curva de la bomba a la frecuencia de salida del aerogenerador.

Una vez conocida la frecuencia de la alimentación de la bomba, es posible obtener las nuevas curvas características de la misma con las leyes de semejanza, explicadas anteriormente.

Lo primero es obtener la ecuación de la **curva H-Q de la bomba a 50Hz**, que es aproximadamente una parábola con la siguiente forma:

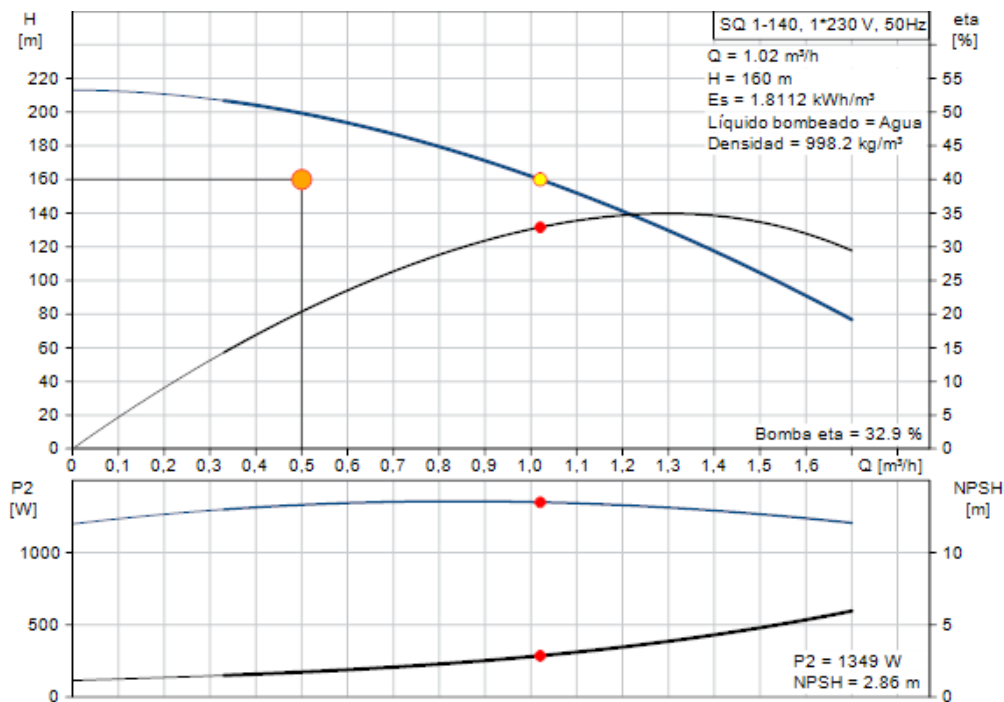


$$H = A - B \cdot Q^2$$

Gráfica 10.3 Curva de la bomba. Fuente: "Mecánica de Fluidos: Fluido viscoso en conductos" por ICAI

Para definir la curva, se tomarán dos puntos de la curva H-Q que aparece en la hoja de características de la bomba:

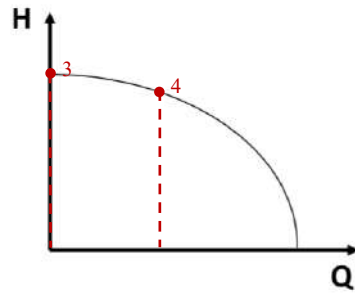
- El punto 3 será cualquier otro punto de la curva H-Q. En el caso de las bombas Grundfos suele aparecer el punto nominal destacado y sus valores exactos en la leyenda de la gráfica, como se muestra en la figura a continuación. Dicho punto puede ser utilizado como punto 3.



Gráfica 10.4 Curvas de bomba sumergible SQ 1-140 de Grundfos.
Fuente: <https://product-selection.grundfos.com>

- El punto 4 será el de $Q = 0$.

Así se obtiene lo siguiente:



$$A = H_3 \quad B = \frac{H_3 - H_4}{Q_4^2}$$

$$H = H_3 - \frac{H_3 - H_4}{Q_4^2} \cdot Q^2$$

Gráfica 10.5 Obtención de la curva de la instalación a partir de los puntos 1 y 2. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se obtiene la **curva de la bomba a la frecuencia de la alimentación**, es decir, a la frecuencia de salida del aerogenerador. Se obtiene de la siguiente manera:

$$H = \frac{H_3}{\left(\frac{f_{red}}{f_{aero}}\right)^2} - \frac{H_3 - H_4}{Q_4^2} \cdot Q^2$$

donde f_{red} es la frecuencia de la red (50 Hz) y f_{aero} es la frecuencia de la salida del aerogenerador.

La intersección entre la curva de la instalación y la nueva curva de la bomba es el **punto de trabajo de la bomba a la frecuencia del aerogenerador**.

$$C + D \cdot Q^2 = \frac{A}{\left(\frac{f_{red}}{f_{aero}}\right)^2} - B \cdot Q^2 \rightarrow (D + B) \cdot Q^2 = \frac{A}{\left(\frac{f_{red}}{f_{aero}}\right)^2} - C \rightarrow$$

$$Q_{trabajo} = \sqrt{\frac{\frac{A}{\left(\frac{f_{red}}{f_{aero}}\right)^2} - C}{D + B}} \Leftrightarrow H_{trabajo} = C + D \cdot \left(\frac{A / \left(\frac{f_{red}}{f_{aero}}\right)^2 - C}{D + B} \right)$$

- Si el punto de trabajo obtenido se encuentra **por debajo de la altura o del caudal requeridos**, se debe escoger una bomba de mayor potencia y, si fuera necesario, elegir un nuevo aerogenerador de tal manera que su potencia sea alrededor de cuatro veces mayor que la de la bomba. Y repetir los pasos 3.1. y 3.2. hasta que se alcancen la altura y el caudal requeridos.
 - Si durante las iteraciones la **potencia del aerogenerador requerida sube desorbitadamente** y no es posible alcanzarlo con un único aerogenerador, se tendrá que valorar la posibilidad de instalar varios aerogeneradores. Para esto, la instalación requerirá del uso de baterías (descripción detallada en el apartado “Instalación de varios aerogeneradores”) o la construcción de varios pozos con una bomba y un aerogenerador cada uno, en cuyo caso se realizarán los cálculos de la altura y potencia de la bomba con la mitad de caudal, es decir, introduciendo en la hoja de cálculo “Altura y potencia de la bomba” la mitad de personas abastecidas o la mitad de agua abastecida por persona.
 - Si la **altura o caudal suben desorbitadamente** y no es posible alcanzarlos con la gama de bombas ofertada, existen dos opciones:
 - **Reducir el agua abastecida por persona**, lo cual supone renunciar a cierta calidad de vida de las personas a las que abastece.
 - **Aumentar el tiempo de abastecimiento**, teniendo en cuenta que en la realidad esto sólo será posible si hay suficientes horas de viento, lo cual se comprobará en los pasos posteriores.

- Si finalmente se alcanza un punto de trabajo en el que **se cumplan la altura y el caudal requeridos**, se calculará la potencia absorbida por la bomba en dicho punto siguiendo las leyes de semejanza.
 - Primero se obtendrá el valor de la potencia absorbida por la bomba en el punto homólogo al de trabajo **en la curva de 50 Hz**, es decir:

$$P_{homologo} = P(Q_{homologo} = \frac{f_{red}}{f_{aero}} \cdot Q_{trabajo})$$

- Después se calculará la potencia absorbida en el punto de trabajo como punto homólogo del anterior, es decir:

$$P_{trabajo} = \frac{P_{homologo}}{Q_{homologo}^3} \cdot Q_{trabajo}^3$$

PASO 4. COMPROBACIÓN DE LOS MODELOS DE BOMBA Y AEROGENERADOR SELECCIONADOS

Se utilizarán los datos recogidos relativos a la bomba, el viento y el aerogenerador para comprobar el agua extraída por la bomba.

Para ello, se obtendrá la distribución del viento en el día a partir de los datos del viento de la zona como se describe en los “Cálculos del aerogenerador”. A partir de esto y de los datos del aerogenerador se obtendrá la distribución de la potencia producida por el aerogenerador en el día. Después se comprobará dentro de esta distribución cuándo se alcanza la potencia absorbida por la bomba y se calculará el volumen bombeado.

- Si **el volumen bombeado es mayor que el volumen bombeado objetivo**, quiere decir que el sistema está sobredimensionado. En este aspecto, un cierto nivel de sobredimensionamiento es aconsejable para cubrir las variaciones en la cantidad de lluvia y en la frecuencia de la alimentación de la bomba. Sin embargo, si hay una gran diferencia, es posible reducir la potencia de la bomba y el aerogenerador, y volver al paso 3.1.. Se recomienda el siguiente ratio de sobredimensionamiento:

$$\frac{Volumen\ bombeado}{Volumen\ bombeado\ objetivo} = 4$$

- Si **el ratio de sobredimensionamiento se encuentra por debajo** de 4, quiere decir que la potencia generada por el aerogenerador debe alcanzar la potencia absorbida por la bomba durante más horas al día. En este caso existen varias opciones:
 - **Reducir el agua abastecida**, con las consecuencias correspondientes.
 - **Aumentar la potencia del aerogenerador**, en cuyo caso habría que comprobar que la bomba puede aguantar la potencia máxima que se le va a suministrar y añadir alguna protección si fuera necesario.
 - **Instalar varios aerogeneradores**, conectándolos a una batería (descripción detallada en “Instalación de varios aerogeneradores”) o construyendo varios pozos con una bomba y un aerogenerador cada uno.

10.2. DIMENSIONAMIENTO DE AEROGENERADOR CASERO

En los siguientes pasos se explicará como dimensionar el aerogenerador casero para utilizarlo para alimentar una bomba.

PASO 1. CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA INSTALACIÓN

Primero se obtendrá la curva de la instalación de la misma forma que en el caso anterior.

PASO 2. SELECCIÓN PRELIMINAR DEL MODELO DE BOMBA SUPONIENDO UNA FRECUENCIA DE LA ALIMENTACIÓN DE 50 HZ

Una de las ventajas de fabricar el aerogenerador es que, a diferencia del caso del aerogenerador comercial, es posible elegir la multiplicadora que se va a utilizar. De esta manera es posible tratar de alcanzar los 50 Hz para los que está diseñada la bomba comercial durante el máximo de tiempo posible. Por esta razón, para la elección de la bomba se supondrá una frecuencia del aerogenerador de 50 Hz como dato de partida. Sabiendo esto, se realizará el dimensionamiento de la bomba de la misma manera que con el aerogenerador comercial. Por tanto, el paso 2 del proceso anterior es exactamente igual en este caso.

PASO 3. PROCESO ITERATIVO PARA LA SELECCIÓN DEL MODELO DE BOMBA

Partiendo del modelo de bomba seleccionado, se realizarán una serie de iteraciones como en el paso 3 del caso del aerogenerador comercial, pero sin realizar el ajuste de frecuencia ya que se tratará de alcanzar los 50 Hz a la hora de elegir en última instancia la multiplicadora del aerogenerador. De esta manera se obtendrá el punto de trabajo de la bomba.

PASO 4. PROCESO ITERATIVO PARA DIMENSIONAMIENTO DEL AEROGENERADOR

De manera similar al caso del aerogenerador comercial, se utilizarán los datos recogidos relativos a la bomba, el viento y el aerogenerador para comprobar el agua extraída por la bomba.

Para ello, se definirá el diámetro del aerogenerador, de tal manera que la potencia media del mismo supere la potencia de trabajo de la bomba. Después se definirá el TSR, siguiendo las indicaciones del libro de Hugh Piggot, y los polos del aerogenerador. A partir de esta información se obtendrá la relación de la multiplicadora.

- Si la **relación calculada no se puede obtener**, se utilizará la relación más próxima a ésta posible y se volverá al paso 3 pero teniendo en cuenta la frecuencia de salida del aerogenerador que se obtiene de la nueva relación de la multiplicadora.

Una vez obtenida una relación de la multiplicadora razonable, a partir del tiempo de bombeo diario y el caudal de trabajo de la bomba se comprobará si se alcanza el volumen bombeado objetivo.

- Si el **volumen bombeado es mayor que el volumen bombeado objetivo**, se considerará aceptable un ratio de sobredimensionamiento de 4, como en el caso anterior.
- Si el **ratio de sobredimensionamiento se encuentra por debajo** de 4, quiere decir que la potencia generada por el aerogenerador debe alcanzar la potencia absorbida por la bomba durante más horas al día. En este caso existen varias opciones:
 - **Reducir el agua abastecida**, con las consecuencias correspondientes.
 - **Aumentar la potencia del aerogenerador**, para lo cual se debe aumentar el diámetro.
 - **Instalar varios aerogeneradores**, conectándolos a una batería (descripción detallada en “Instalación de varios aerogeneradores”) o construyendo varios pozos con una bomba y un aerogenerador cada uno.

10.3. DIMENSIONAMIENTO DE LA AEROBOMBA

A continuación se explicará como dimensionar la aerobomba.

PASO 1. SELECCIÓN PRELIMINAR DEL MODELO DE AEROBOMBA

Debido a que la información ofrecida por los fabricantes de aerobombas no contiene datos que permitan elegir una aerobomba sin hacer los cálculos pertinentes, lo más recomendable es recoger información de varios modelos para hacer los cálculos con todos ellos y así poder compararlos.

La única forma de escoger el modelo de partida es seleccionar el más barato, que habitualmente será el de menor diámetro.

PASO 2. PROCESO ITERATIVO PARA LA SELECCIÓN DE LA AEROBOMBA Y LA BOMBA DE PISTÓN CON LA QUE TRABAJA

Puesto que el aprovechamiento de la aerobomba es mayor en la configuración de golpe largo se partirá de ésta. Seguidamente se buscará una bomba cuya carrera sea mayor que la longitud del golpe de la aerobomba, pero sin ser excesivamente mayor.

A partir de los datos del viento y de la instalación, se obtendrá el número de golpes y el volumen bombeado.

- Si el **volumen bombeado es mayor que el volumen bombeado objetivo**, se considerará aceptable un ratio de sobredimensionamiento de 4, como en los casos anteriores.
- Si el **ratio de sobredimensionamiento se encuentra por debajo de 4**, existen varias opciones:
 - **Reducir el agua abastecida**, con las consecuencias correspondientes.
 - Seleccionar una **aerobomba de mayor diámetro** y una **bomba de mayor carrera**, si fuera necesario.
 - Seleccionar una **bomba de mayor diámetro**.

Lo más eficiente es que la diferencia entre la carrera del pistón y la longitud de golpe sea pequeña, por lo que, si la con la configuración de golpe corto se obtiene el caudal deseado, es una opción factible.

10.4. INSTALACIÓN DE VARIOS AEROGENERADORES

En algunos casos, no se obtiene suficiente potencia con único aerogenerador debido a las limitaciones de los modelos ofrecidos en el mercado. Esto puede deberse a que el agua bombeada es escasa o que se quiere utilizar la energía producida para otros fines además del bombeo de agua. Se recomienda realizar un estudio hidrológico del terreno en el caso de que el volumen de agua bombeado sea muy alto, ya que el recurso hídrico subterráneo puede ser escaso.

En estos casos existen dos posibilidades:

10.4.1. INSTALAR VARIOS AEROGENERADORES CON UNA BOMBA CADA UNO.

Esta opción permite realizar el mismo proceso que se ha desarrollado en este proyecto, sencillamente dividiendo el volumen de agua necesario entre el número de instalaciones que se necesiten para cubrir el total.

Ventajas

- No es necesario el uso de baterías.
- Es posible realizar una conexión directa entre el aerogenerador y la bomba, evitando aparatos electrónicos como inversores.
- La generación es en alterna, por lo que se podría usar para alimentar otros aparatos que requieran AC.

Inconvenientes

- Se requiere una bomba y un pozo por aerogenerador.

10.4.2. INSTALAR VARIOS AEROGENERADORES CON UNA ÚNICA BOMBA

Esta opción consiste en alimentar una batería con varios aerogeneradores y que ésta alimente una bomba. Este tipo de instalación debe tomarse como última opción, ya que el uso de baterías es algo poco recomendado por Manos Unidas (las razones se recogerán en las desventajas).

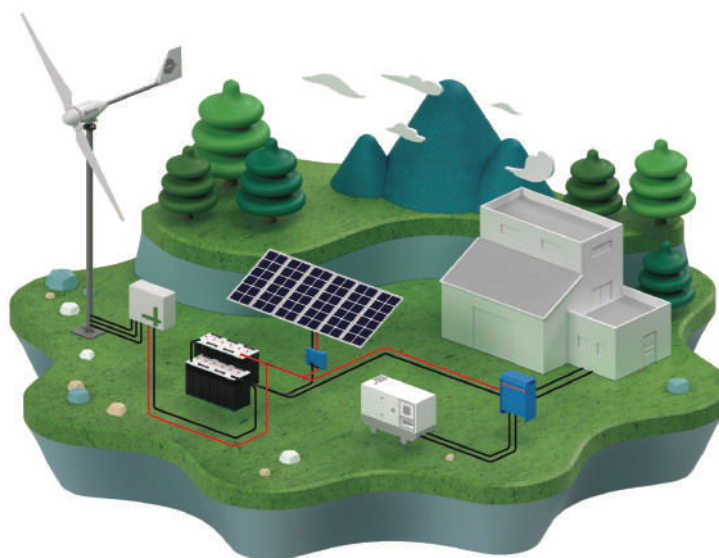
Ventajas

- Es posible utilizar una bomba de mayor potencia en lugar de varias de menor potencia, lo cuál es más rentable a nivel de precio.
- No es necesario cavar más que un único pozo.
- La energía generada se almacena en la batería, lo cuál permite utilizarla cuando se necesite y aprovechar la energía generada en exceso.
- La energía almacenada puede utilizarse para otros fines.
- Facilita la combinación de energía eólica con energía solar.

Desventajas

- Es necesario el uso de baterías, lo cual supone varios problemas por los cuáles Manos Unidas prefiere evitar su uso:
 - Son un blanco fácil para el vandalismo.
 - Son delicadas.
 - Son caras.
 - Tienen un ciclo de vida relativamente corto.
 - No se pueden reparar.
 - Crean codependencia, ya que en la mayoría de los casos sólo se pueden sustituir por medio de Manos Unidas u otra ONG.
- Es necesario utilizar aerogeneradores de continua, un rectificador de corriente, o una interfaz Wind+ para obtener CC en la alimentación de la batería.
- Es necesario utilizar un regulador que proteja el estado de la batería, previniendo la sobrecarga y descarga de la misma.
- Si se alimenta una bomba u otro aparato que requiera AC, será necesario instalar un inversor que transforme la corriente de salida de la batería en alterna. Si no, será necesario utilizar una bomba de continua.

Se muestra ahora un ejemplo de Bornay de este tipo de instalaciones. En este caso no se incluyen varios aerogeneradores pero sí se combina energía eólica y solar, de manera que se requiere el uso de baterías y otros elementos similares.



1. Aerogenerador
2. Paneles solares
3. Regulador
4. Batería
5. Inversor

Figura 10.4 Conexión de aerogenerador y paneles solares con batería. Fuente: Catálogo de Bornay


~~~~~

## Capítulo 11. Almacenamiento del agua

~~~~~

11.1. REGULARIZACIÓN Y ALMACENAMIENTO

El agua que se capta de la fuente de abastecimiento no necesariamente se obtiene en el régimen de la demanda. La extracción del agua se realizará únicamente durante los periodos en los que la velocidad del viento sea suficiente para que se alcance la producción energética necesaria para activar la bomba. Estos periodos pueden ser más o menos largos y más o menos frecuentes en función de la zona en la que se realice el proyecto, la época del año y otros factores influyentes. Para aprovechar los excesos cuando el volumen bombeado sea mayor que la demanda y cubrir la misma cuando el volumen bombeado sea menor, es necesario incluir en la instalación un sistema de almacenamiento. Además, con los tanques se logra mantener una determinada presión en la red de distribución.

11.2. SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

Para determinar el tipo de tanque y el lugar idóneo para instalarlo, se deben tener en cuenta las condiciones de topografía y de geotécnica. Existen dos tipos de tanques según su situación:

- **Tanques superficiales**

Estos tanques se construyen a nivel de suelo. Se suelen utilizar cuando la topografía del terreno es inclinada, de tal manera que el tanque se construye en la zona más elevada para obtener la presión necesaria en la red de distribución. De otra manera sería necesario instalar un sistema de bombeo para extraer el agua del tanque. También se utilizan para almacenar grandes cantidades de agua, cuyo peso es demasiado para almacenarse en altura.

- **Tanques elevados**

Estos tanques se utilizan cuando la topografía del terreno es plana, de tal manera que por gravedad se obtenga presión en la red de distribución, evitando el uso de sistemas de bombeo para extraer el agua del tanque.

El sistema de almacenamiento más apropiado consiste en un **tanque elevado combinado con un tanque superficial**. La bomba de agua alimenta el tanque elevado, del cual se extrae la red de distribución. El tanque superficial recoge el exceso de agua que se produce cuando el tanque elevado se encuentra completamente lleno. Se debe tener en cuenta que el exceso de agua no se debe devolver al pozo, puesto que esto puede provocar su contaminación.

En Manos Unidas se suelen utilizar tanques de **polietileno rígido** en el caso del tanque elevado y el tanque superficial suele ser **tipo piscina**. Además, el agua del tanque elevado es potable y la del tanque superficial es de menor calidad, por lo que no se puede usar para consumo humano, pero sí como abrevadero o para otros fines.

Aquí se muestra un esquema del sistema de almacenamiento.

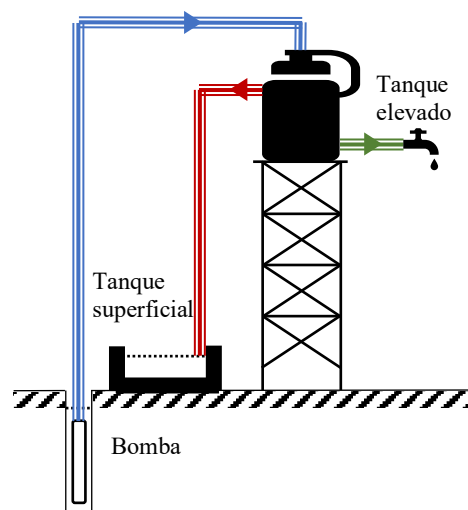


Figura 11.1 Esquema del sistema de almacenamiento de agua.
Fuente: Elaboración propia

11.3. CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA

Al almacenar agua pueden surgir varios problemas. Los principales son los siguientes:

11.3.1. CRECIMIENTO DE ALGAS

Las algas pueden aparecer en agua almacenada. La entrada de luz solar al tanque estimula su crecimiento y la floración será más severa a temperaturas altas o en presencia de altas concentraciones de nitratos y fosfatos. Para evitar el crecimiento de algas lo más recomendable es utilizar tanques opacos o coberturas que no permitan la entrada de luz de tal manera que se impida la fotosíntesis.

11.3.2. EVAPORACIÓN DEL AGUA

Debido a las altas temperaturas se puede producir la evaporación del agua y, por tanto, su pérdida. En este aspecto también es recomendable evitar la entrada de luz solar al tanque utilizando tanques opacos o coberturas. De esta manera se reduce la temperatura del agua y se pierde menos agua por evaporación.

Otra manera de mantener la temperatura del agua más baja es utilizando depósitos subterráneos o de tipo piscina, ya que la temperatura del suelo es más estable que la temperatura del aire.

11.3.3. CONTAMINACIÓN DEL AGUA

La contaminación del agua puede provocar que el agua deje de ser apta para su consumo. Además, puede conducir a la acumulación de sedimentos que obstruyan la salida del tanque o la red de distribución. Según el grado de estanqueidad del tanque se pueden evitar que algunos contaminantes entren en el agua. Para alcanzar el mayor grado de estanqueidad posible, se pueden utilizar tanques en los que el cierre sea de rosca o cubiertas que se puedan atar firmemente a las paredes.

11.4. DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE ELEVADO

El volumen del tanque ideal es aquel que abarca la demanda de agua durante los días en los que el viento es escaso y no se produce bombeo. Este volumen corresponde con el consumo total de agua durante el número de días seguidos máximo en los que no hay bombeo. Es decir, si según la distribución del viento a lo largo del año, el máximo número de días seguidos en los que no va a haber bombeo fuera n , la capacidad del tanque se calcularía de la siguiente forma:

$$V_{\text{tanque}} = n \cdot D_{\text{diaria}}$$

Donde V_{tanque} : volumen del tanque [m^3]
 n : número de días seguidos sin bombeo [días]
 D_{diaria} : demanda diaria de agua [$\text{m}^3/\text{día}$]

Gracias a la distribución de probabilidad de la velocidad del viento, es posible obtener la distribución de probabilidad del caudal extraído. Sin embargo, esta distribución no permite conocer la distribución a lo largo del año. Esta información es muy variable dependiendo de la zona en la que se encuentra la instalación. Por esta razón, para obtener el volumen del tanque ideal es necesario utilizar información meteorológica precisa de la localización del aerogenerador.

Esta información meteorológica debe incluir la distribución de la velocidad del viento a lo largo del año, de tal manera que, conociendo el rango de velocidades del viento para las cuales la bomba se activa (disponible en la hoja de cálculo del aerogenerador), se pueda obtener la distribución de los días en los cuáles no se alcanza dicha velocidad. La concentración máxima de días en los que la bomba está inactiva será el valor de n .

Ahora bien, este cálculo tiene varias limitaciones que lo convierten en poco preciso.

- Como ya se comentó anteriormente, las condiciones de viento son muy variables en función de la zona, el terreno, los obstáculos del entorno, la altura, etc. En consecuencia, los datos meteorológicos que se obtengan de una estación meteorológica pueden ser muy distintos a los reales. Además, la estación meteorológica más cercana puede no serlo demasiado, debido a los escasos recursos de los países de África Subsahariana.
- Por otro lado, el agua extraída del pozo puede ser potable, pero la duración de esta potabilidad depende mucho de las condiciones en las que se encuentre. El agua tratada con cloro puede almacenarse hasta 6 meses en un tanque suficientemente estanco, pero el agua extraída de un pozo no debe almacenarse más de unos pocos días.

Esto implica que existen las siguientes opciones:

- **Almacenar el agua en un tanque cuyo volumen sea el correspondiente a la demanda de pocos días**, de tal manera que el agua del interior del tanque se renueve con suficiente frecuencia como para mantenerla potable y no sea necesario tratarla después para que sea apta para consumo.

Ventajas

- Se evita el tratamiento posterior del agua, lo que permite su uso inmediato y reduce costes.
- El coste del tanque será menor por su reducido tamaño.
- La estructura de elevación del tanque será también más barata y sencilla de construir.
- La renovación frecuente del agua también evita el calentamiento excesivo, lo cual reduce la severidad de floración de algas y las pérdidas por evaporación del agua.

Inconvenientes

- Pueden producirse faltas de agua si las condiciones de viento provocan que la bomba esté inactiva durante más días que para los que está pensado el almacenamiento.
- La disponibilidad de agua para los días en los que la demanda aumente será menor.
- Si se produce un descenso de la demanda y el agua queda estancada temporalmente, la velocidad de floración de las algas y las pérdidas por evaporación serán mayores que en tanques más grandes debido a la mayor velocidad de calentamiento.
- **Almacenar el agua en un tanque tal que se pueda cubrir la demanda durante el número de días seguidos máximo en los que no hay bombeo.** Este planteamiento en algunos casos supondrá un volumen del tanque mucho mayor.

Ventajas

- Se asegura la disponibilidad de agua durante todos los días del año.

Inconvenientes

- Es necesario mantener un control de calidad de agua mediante el mantenimiento del tanque.
- Se debe realizar el tratamiento del agua extraída del mismo para su potabilización en caso de que se vaya a utilizar para consumo humano.
- Para prolongar el buen estado del agua en el interior del tanque y el resto de la instalación es recomendable el uso de químicos como la adición de cloro al agua.
- El coste del tanque será mayor debido a su tamaño.
- El coste de la estructura de elevación también será mayor.
- Si el tamaño del tanque es muy excesivo no será posible elevarlo con una estructura.
- Es recomendable que el agua se renueve por completo y se proceda a la limpieza del interior del tanque cada 6 meses.
- El cálculo necesario para obtener el volumen del tanque es complejo y los datos necesarios para realizarlo pueden no estar disponibles o ser difíciles de conseguir.

Debido a los numerosos inconvenientes de la segunda opción, lo más recomendable es utilizar un **tanque de un tamaño reducido**. De hecho, habitualmente en Manos Unidas se utilizan tanques de 10000 litros, es decir, 10 m^3 . En el ejemplo base, utilizado anteriormente para ilustrar los parámetros de diseño de la instalación, en el que se realizaba un abastecimiento de $50 \text{ L}/(\text{persona} \cdot \text{día})$ a 60 personas con una instalación razonable, se requería un suministro de agua de $3 \text{ m}^3/\text{día}$. Esto quiere decir que con el tanque de 10000 litros se podría almacenar agua para algo más de tres días, lo cual es suficientemente poco como para que la calidad del agua no se deteriore y sea posible su consumo.

En caso de que no existan otras fuentes de agua, es muy recomendable consultar los datos meteorológicos más cercanos a la zona de la instalación para hacer una previsión de si se pueden producir faltas de agua en la instalación. De todos modos esta opción es poco probable, porque habitualmente los lugares en los que se realizan estos proyectos suelen tener una fuente de agua e, instalando los sistemas adecuados, se facilita su recogida, se aumenta el suministro, se mejora la calidad del agua, etc.

11.5. HOJA DE CÁLCULO: ALMACENAMIENTO DE AGUA

Para obtener el periodo máximo sin bombeo y el volumen del tanque se han creado las siguientes tablas en una hoja de cálculo de Excel.

11.5.1. DATOS DEL VIENTO

No es necesario completar la siguiente tabla para obtener el volumen del tanque. Sin embargo, se incluye en la hoja de cálculo porque es recomendable. En el caso de tener acceso a los datos meteorológicos correspondientes, la tabla sirve para contar el número de días seguidos en los que el viento no se encuentra en el rango de trabajo de la instalación seleccionada. A continuación, sólo se muestra parte de la tabla a modo ilustrativo, por su excesiva extensión.

Datos del viento						
Completar con datos meteorológicos disponibles lo más próximos posibles al proyecto						
Año	1			2		
Periodo	Velocidad media	Bomba activa	Contador	Velocidad media	Bomba activa	Contador
días	m/s	-	días	m/s	-	días
1	7,4	No	1			
2	1,1	No	2			
3	2,2	No	3			
4	3,3	No	4			
5	4,4	No	5			
6	6,4	No	6			
7	40	No	7			
8	11	Sí	0			
9	1	No	1			
10	2	No	2			
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						

Tabla 11.1 "Datos de viento" de la hoja de cálculo "Almacenamiento de agua". Fuente: Elaboración propia

11.5.2. CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TANQUE

La siguiente tabla permite elegir el tipo de instalación que se va a ejecutar, dato que se utiliza para comprobar si la bomba está activa o no en la tabla anterior. Por otro lado, permite introducir el periodo de almacenamiento en tanque, que es el número de días máximo en los que se puede cubrir la demanda con el contenido del tanque lleno. Este dato se puede estimar a partir del máximo periodo sin bombeo, valor que aparece en la tabla automáticamente al completar la tabla anterior. A partir del periodo de almacenamiento en tanque, se obtiene el volumen del tanque.

Cálculo del volumen del tanque		
Completar celdas destacadas en amarillo		
Tipo de aerogenerador	-	Aerobomba
Máximo periodo sin bombeo	días	Desconocido
Periodo de almacenamiento en tanque (*)	días	3
Volumen del tanque	m3	9

Tabla 11.2 "Cálculo del volumen del tanque" de la hoja de cálculo "Almacenamiento de agua".
Fuente: Elaboración propia

11.5.3. ADVERTENCIAS

Para realizar el dimensionamiento del tanque con mayor facilidad, en la hoja de cálculo aparece el siguiente cuadro en el que se muestran las diferentes advertencias relacionadas con el volumen establecido.

ADVERTENCIAS
El periodo de almacenamiento en tanque es menor que el máximo periodo sin bombeo. Puede haber faltas de agua si se produce un periodo de viento débil mayor que el periodo de almacenamiento en tanque.
-

Tabla 11.3 "Advertencias" de la hoja de cálculo "Almacenamiento de agua".
Fuente: Elaboración propia

En función de la situación en la que se encuentre la instalación con los datos introducidos pueden aparecer los siguientes mensajes de advertencia:

- El periodo de almacenamiento en tanque es menor que el máximo periodo sin bombeo. Puede haber faltas de agua si se produce un periodo de viento débil mayor que el periodo de almacenamiento en tanque.
- El periodo de almacenamiento en tanque es alto. Si no se realiza un tratamiento apropiado del agua almacenada, esta puede perder calidad e incluso dejar de ser potable.


~~~~~

## Capítulo 12. Guía para Manos Unidas

~~~~~

12.1. GUÍA PARA PROYECTOS DE BOMBEO EÓLICO EN PEQUEÑAS COMUNIDADES

La guía del Anexo IX contiene el procedimiento a seguir por Manos Unidas para llevar a cabo proyectos de bombeo eólico. Gracias a esta guía es posible analizar la instalación, dimensionar sus elementos y hacer una previsión de la producción de la misma, siguiendo unos sencillos pasos.

En esta guía se contempla la posibilidad de ejecutar el sistema eléctrico (bomba eléctrica y aerogenerador, comercial o casero) o el sistema mecánico (aerobomba), ya que en función de las características de cada proyecto particular será más rentable uno u otro.

~~~~~  
**BIBLIOGRAFÍA**  
~~~~~

REFERENCIAS

- [1] Patente US1582399A de Victor W. Helander, 1925
- [2] “Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate” por Javier Tobella Arredondo, 2011
- [3] “Wind pumping handbook” por J. J. E. A. van Meels y P. T. Smulders, 1987
- [4] “Drawers of water: assessing domestic water use in Africa” por John Thomson y Sandy Cairncross, 2002
- [5] “Drawer of water II: 30 years of change in domestic water use & environmental health in east Africa” por John Thompson, Ina T Porras, James K Tumwine, Mark R Mujwahuzi, Munguti Katui-Katua, Nick Johnstone y Libby Wood, 2001
- [6] “Domestic Water Quantity, Service Level and Health” por Guy Howard y Jamie Bartram, 2003
- [7] “The Food Pyramid And Disease Prevention” por John Neustadt, 2005
- [8] “Supplementary Materials for Global Patterns of Groundwater Table Depth” por Y. Fan, H. Li y G. Miguez-Macho, 2013
- [9] “Phreatophytes” por T. W. Robinson, 1958
- [10] “Huangtupo landslide stability under water level fluctuations of the Three Gorges reservoir” por Guanhua Sun, Hong Zheng, Huiming Tang y Fuchu Dai, 2015
- [11] “Mecánica de Fluidos: Fluido viscoso en conductos” por Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI
- [12] “Manual para la elaboración y revisión de proyectos ejecutivos de sistemas de riego parcelario” por CONAGUA, 2002
- [13] “Diagrama de moody” por Erick Francisco, 2015
- [14] “Manual de Energía Eólica” del Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía por Cayetano Hernández González, 1992
- [15] “Wind Power Workshop” por Hugh Piggott, 1997
- [16] “Manual de instalación y mantenimiento de una aerobomba” de Bornay, 2002
- [17] “Aerobomba para captación de aguas subterráneas. Aplicación de tecnología social de bajo coste en Mozambique” por Alicia Corcuera Martínez, 2014
- [18] “Power converter with maximum power point tracking MPPT for small wind-electric pumping systems” por David Lara, Gabriel Merino y Lautaro Salazar, 2015
- [19] Catálogo Bornay 2020
- [20] “Almacenamiento y regulación de agua en el sistema de distribución” por Luis de Anda Valades, 2017
- [21] “Ficha técnica: Almacenamiento de agua” de Fertinnowa, 2019
- [22] “Ficha técnica: Control y prevención de algas” de Fertinnowa, 2019
- [23] UNE-EN 1508:1999 Abastecimiento de agua. Requisitos para sistemas y componentes para el almacenamiento de agua, 2014
- [24] <https://eacnur.org/es/actualidad/noticias/emergencias/africa-subsahariana-el-hogar-de-18-millones-de-refugiados>
- [25] <https://data.unicef.org/resources/progress-drinking-water-sanitation-hygiene-2019/>
- [26] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/globalpartnerships/>
- [27] <http://www.fao.org/3/ah810e/AH810E06.htm>
- [28] http://portal.uc3m.es/portal/page/portal/grupos_investigacion/grupo_tecnologias_apropiadas/proyectos_cooperacion_internacional/LaTeX1PosterPortrait_Mecate-ilovepdf-compressed.pdf
- [29] <https://wikiwater.fr/rubrique62>
- [30] <https://www.bbcgoodfood.com>
- [31] <https://geotecniafacil.com/que-es-el-nivel-freatico-definicion-piezometrico/>
- [32] <http://www.lapacacr.com/images/Eijkelpkamp/Barrenos-low.pdf>
- [33] <https://www.youtube.com/watch?v=Bi1pitgBC7Q>
- [34] <https://www.youtube.com/watch?v=ehEzTA5aDj0>
- [35] http://www.africanplants.senckenberg.de/root/index.php?page_id=81
- [36] <https://globalwindatlas.info>

- [37] <http://energiaeolica-walter.blogspot.com>
- [38] <https://www.uclm.es>
- [39] <https://ucm.es/campusvirtual>
- [40] <https://www.blansol.es/wp-content/uploads/Blansol-manual-PEX-es.pdf>
- [41] <https://www.hidrotec.com/blog/tipos-de-tuberias-de-agua/>
- [42] <https://www.electrobombas.es/ffgrande/FH4-G1.jpg>
- [43] <https://www.bombadeagua.es/bombas-de-pozo>
- [44] <https://www.manomano.es/cat/bomba+pozo+profundo>
- [45] <https://areamecanica.wordpress.com/>
- [46] <https://www.bornay.com/es/productos/aerogeneradores/wind-plus>
- [47] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5189/fichero/7.+Cap%C3%ADtulo+2.pdf>
- [48] http://www.energiza.org/index.php?option=com_k2&view=item&id=1293:¿cómo-es-y-cómo-funciona-la-multiplicadora-de-un-aerogenerador
- [49] <https://product-selection.grundfos.com>

~~~~~

# ANEXOS

~~~~~

ANEXO I: ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DEL DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

En la siguiente tabla se muestran los Objetivos del Desarrollo Sostenible y las metas correspondientes a cada uno de ellos a los que contribuye este proyecto, así como la justificación de su inclusión.

	1.1 Para 2030, erradicar la pobreza extrema para todas las personas en el mundo, (...).	Se generará trabajo para la población local durante los procesos de fabricación, instalación y mantenimiento.
	1.4 Para 2030, garantizar que todos los hombres y mujeres, en particular los pobres y los más vulnerables, tengan (...) acceso a los servicios básicos, la propiedad y el control de las tierras y otros bienes, la herencia, los recursos naturales, las nuevas tecnologías y los servicios económicos, (...).	Se trata de asegurar el acceso a agua potable, que es un servicio y un recurso natural básico.
	2.3 Para 2030, duplicar la productividad agrícola (...), entre otras cosas mediante un acceso seguro y equitativo a las tierras, a otros recursos de producción e insumos (...).	El agua de riego es un recurso fundamental para la producción agrícola.
	3.3 Para 2030, poner fin a las (...) enfermedades transmitidas por el agua y otras enfermedades transmisibles.	Crear accesos de agua limpia ayude a combatir las enfermedades transmitidas por agua.
	3.8 Lograr la cobertura sanitaria universal, (...) el acceso a servicios de salud esenciales de calidad y el acceso a medicamentos y vacunas seguros, eficaces, asequibles y de calidad para todos.	Un servicio de salud de calidad incluye agua sanitaria gestionada de forma segura.
	3.9 Para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por (...) la contaminación del aire, el agua y el suelo.	La construcción de pozos no expuestos a contaminación externa y más accesibles contribuye a la reducción de muertes por consumo de agua contaminada.
	5.2 Eliminar todas las formas de violencia contra todas las mujeres y las niñas (...), incluidas la trata y la explotación sexual y otros tipos de explotación.	La recolección de agua en algunos poblados es una forma de explotación de las mujeres y niñas.
	6.1 De aquí a 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos.	Se tiene como prioridad la asequibilidad de las instalaciones.

	6.2 De aquí a 2030, lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos (...).	Se facilita el suministro de servicios de saneamiento e higiene.
	6.4 De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua.	Se trata de mejorar la eficiencia de los recursos hídricos para reducir la falta de agua.
	6.b Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento.	Las instalaciones de cada poblado serán autogestionadas por las comunidades locales.
	7.b De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, (...).	Se utilizará energía eólica para el accionamiento de la bomba que es un recurso energético renovable.
	9.1 Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad (...) para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos.	La fiabilidad, sostenibilidad, resiliencia y calidad son objetivos de la instalación.
	12.2 De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.	El aprovechamiento de la energía eólica fomenta la sostenibilidad y la eficiencia de la extracción de agua.
	15.1 Para 2020, velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y los servicios que proporcionan, (...).	El análisis de viabilidad incluye un estudio del entorno natural para no perjudicar el ecosistema.
	17.7 Promover el desarrollo de tecnologías ecológicamente racionales y su transferencia, divulgación y difusión a los países en desarrollo en condiciones favorables, (...).	Se promueve la difusión de la aerogeneración en el África subsahariana.

ANEXO II: DATOS ESTADÍSTICOS DEL ESTUDIO “DRAWERS OF WATER II” EN VIVIENDAS CON SUMINISTRO DE AGUA

Piped Households (Same Sites Only)

	Percent of Households	Average Number of Years of Education		Average Daily Per Capita Water Use (litres)		Average Total Water Use in Household Per Day (litres)		Average Daily Cost of Water (1997 US\$ pcm)		Receive 24-hour Supply (% households)		Principal Alternative Source if Piped System Breaks		Reported Diarrhoea Incidence During the Previous Week (% households)	
		DOW II	DOW I	DOW II	DOW I	DOW II	DOW I	DOW II	DOW I	DOW II	DOW I	DOW II	DOW I	DOW II	DOW I
Kenya	27.8	22.8	12.0	47.4	121.6	240	934	0.40	0.70	80	87.5	Kiosk	Well	12.4	0
Tanzania	46.1	50.3	14.1	80.2	141.8	442	667	0.73	0.77	32.5	100	Vendor	Rain	3.1	5.7
Uganda	26.1	26.9	14.4	64.7	108.3	398	551	0.81	0.80	72.5	100	Well	Rain	9.9	2.4
Total (percent)	100	100	13.6	65.8	128.1	368	691	0.64	0.77	55.7	97			7.4	3.5
Total (obs)	349	312													
By Site (all urban)															
Karuri, Kenya	6.0	4.8	12.0	28.4	28.5	148	193	0.41	1.25	24	0	Kiosk	Well	9.5	0
Moshi, Tanzania	5.2	8.0	11.2	40.7	108.2	222	778	0.87	0.32	0	96	Spring	Spring	11.1	4.0
Dodoma, Tanzania	10.0	15.1	13.8	62.1	72.1	366	474	0.41	0.95	11.4	100	Other	Rain	2.9	10.6
Iganga, Uganda	1.4	6.1	10.4	34.2	78.7	273	389	0.58	0.89	0	100	Kiosk	Rain	0.0	0.0
Kamuli, Uganda	5.4	7.4	12.7	32.4	76.2	177	399	1.82	1.06	0	100	Well	Rain	21.1	4.3
Tororo, Uganda - L	11.2	8.7	15.7	110.7	160.9	692	843	0.57	0.59	97	100	Other	Rain	5.1	0.0
Tororo, Uganda - MH	8.0	4.8	14.4	27.8	100.1	160	465	0.57	0.69	100	100	Reservoir	Rain	10.7	6.7
Nairobi, Kenya - Parklands, ML	7.4	5.1	13.3	60.9	176.9	334	1165	0.46	0.53	100	100	Kiosk	Well	7.7	0.0
Nairobi, Kenya - Pangani, MH	8.6	9.6	11.9	52.9	167.3	274	1237	0.39	0.56	93	100	Well	Stream	3.3	0.0
Nairobi, Kenya - Makadara, H	5.7	3.2	10.6	41.6	26.3	162	934	0.30	0.58	90	100	Vendor	Hydrant	35.0	0.0
DeS, Tanzania - Oyster Bay, L	8.6	9.9	17.2	164.3	243.9	791	925			70	100	Vendor	Well	6.7	6.5
DeS, Tanzania - Upanga, ML	8.6	8.3	14.7	n/a	157.7	n/a	637			73	100	Vendor	Stream	0.0	3.8
DeS, Tanzania - Changombe, MH	8.0	7.1	14.7	43.7	161.1	431	541	0.97	0.81	11	100	Vendor	Spring	0.0	0.0
DeS, Tanzania - Temeke, H	5.7	1.9	12.6	64.4	153.5	264	1157	1.01	0.83	10	100	Vendor	Hydrant	0.0	0.0

Note: DeS – Dar es Salaam

L – Low density population; ML – Medium-Low; M – Medium; MH – Medium-High; H – High

For urban households with piped connections, the density of housing was taken as a measure of material wealth

ANEXO III: DATOS ESTADÍSTICOS DEL ESTUDIO “DRAWERS OF WATER II” EN VIVIENDAS SIN SUMINISTRO DE AGUA

Unpiped Households (Same Sites Only)																				
	Percent of Households		Average Number of Years of Education	Average Equipment Index	Average Per Capita (Water Use) (litres) Per Day	Average Cost (1997 US\$ pcm)	Principal Water Source	Average Time per Trip (Minutes)	Average Distance to Water Source (metres)	Average Number of Trips	Reported Incidence During Previous Week (% households)									
	DOW II	DOW I	DOW II	DOW I	DOW II	DOW I	DOW II	DOW I	DOW II	DOW I	DOW II									
Urban Households	12.1	18.3	10.0	0.3	12.5	3.1	22.9	11.3	1.42	1.43	Kiosk	Hydrant	33.1	11.0	400.3	384.0	3.4	2.9	0.0	26.3
	18.2	34.6	8.4	5.8	7.3	4.0	25.1	17.8	1.24	1.37	Hydrant, Kiosk	Hydrant	34.4	13.9	152.6	236.5	3.8	3.1	22.2	13.9
	69.7	47.1	9.9	5.1	6.2	5.7	23.5	14.3	1.45	0.68	Hydrant, Well	Hydrant	15.2	6.1	182.6	177.2	4.1	2.2	14.5	18.4
	100	100	9.7	4.9	7.2	4.8	23.7	15.4	1.41	1.06			21.4	9.3	204.2	222.4	4.0	2.6	14.1	18.3
	99.0	104.0																		
Rural Households	45.2	46.6	9.9	4.9	7.3	3.3	22.3	8.2	0.93	0.76	Spring, stream	Spring, stream	24.9	17.6	445.5	554.9	4.4	2.6	22.1	23.8
	13.9	15.0	4.7	4.7	4.1	3.3	16.0	10.1	0.95	1.25	Spring, stream	Reservoir, Hydrant	44.7	17.8	769.4	569.4	3.7	2.9	21.7	32.6
	40.9	38.4	7.4	3.3	5.8	3.7	14.8	11.5	0.71	0.52	Spring, stream	Spring, well	18.9	12.9	381.2	343.6	3.2	2.3	37.8	26.3
	100.0	100.0	8.2	4.3	6.2	3.4	18.3	9.7	0.84	0.74			25.3	15.8	466.0	477.3	3.8	2.5	28.5	26.1
	330	307																		
Urban Sites	11.1	9.6	10.3	7.6	13.0	4.0	22.3	9.3	1.16	1.87	Kiosk	Hydrant	36.1	13.5	436.6	288.0	3.7	2.9	0.0	10.0
	1.0	8.7	7.0	0.3	7.0	3.1	29.8	11.3	4.29	0.93	Vendor	Hydrant	0.0	11.0	0.0	384.0	0.0	2.9	0.0	44.4
	6.1	14.4	8.0	7.8	8.7	6.1	19.3	13.3	1.65	1.74	Kiosk	Hydrant	33.2	9.3	118.3	270.1	4.2	2.9	0.0	13.3
	12.1	20.2	8.6	4.3	6.7	2.6	28.3	21.0	1.04	1.14	Other, Neighbour	Hydrant	35.1	20.7	171.3	186.2	3.6	3.5	33.3	14.3
	31.3	17.3	9.3	4.9	5.5	5.7	22.2	13.8	1.91	0.68	Hydrant	Hydrant	14.7	3.7	117.4	114.9	3.1	1.5	19.4	11.1
Rural Sites	26.3	15.4	8.9	4.4	5.1	5.9	25.8	16.0	0.77	0.20	Well	Hydrant	16.4	5.9	293.7	221.9	4.2	1.3	7.7	37.5
	12.1	14.4	13.9	6.1	10.6	5.3	21.6	13.1	1.77	1.21	Hydrant	Spring	13.7	9.9	104.5	233.5	6.6	4.1	16.7	6.7
	100.0	100.0	9.7	5.2	7.2	4.7	23.7	14.8	1.41	1.06			21.4	9.8	204.2	230.2	4.0	2.6	14.1	18.3
	6.4	6.2	9.1	7.1	10.3	3.5	24.6	11.1	0.88	1.39	Well	Spring	19.5		513.0	811.3	3.9	2.6	4.8	0.0
	9.7	7.5	10.1	4.8	5.9	3.3	9.3	8.2	2.14	1.23	Spring	Stream	26.1	25.9	637.4	1012.9	2.9	2.5	12.5	13.0
Mo'i's (Hoye's) Bridge, Kenya	9.1	7.8	11.2	5.0	6.1	2.8	12.0	6.9	0.75	0.97	Reservoir	Stream	30.5	25.1	636.5	1007.1	2.8	3.3	50.0	100.0
	2.4	5.5	10.6	5.4	8.6	3.6	29.8	10.4	0.88	1.11	Spring, Stream	Spring, Stream	20.8	16.1	242.2	305.9	5.9	3.4	50.0	29.4
	9.7	9.8	10.2	3.2	8.7	3.1	45.3	6.1	0.28	0.22	Well	Spring, Stream	36.8	13.1	370.2	249.9	7.8	1.9	0.0	6.7
	7.9	9.8	8.2	4.1	5.6	3.5	20.5	7.7	0.16	0.21	Well, other	Well, Hydrant	7.3	11.7	98.0	205.1	4.5	2.2	34.6	0.0
	3.3	7.8	6.7	6.6	6.8	4.4	14.2	7.8	0.59	1.95	Hydrant	Hydrant	31.2	28.6	342.8	1015.5	3.9	3.0	18.2	12.5
Kipanga, Tanzania	10.6	7.2	4.1	2.6	3.2	2.0	16.6	12.7	1.06	0.48	Stream	Reservoir	49.2	4.8	903.5	34.2	3.6	2.7	22.9	54.5
	12.1	12.1	5.9	3.3	4.8	3.0	15.7	17.6	0.62	1.18	Spring	Well	25.3	13.3	459.5	423.2	4.0	2.7	80.0	62.2
	9.1	9.1	6.3	3.9	5.1	4.2	15.5	12.7	0.45	0.09	Spring, Well	Spring	22.8	6.7	442.3	191.2	3.4	1.8	30.0	10.7
	10.6	8.5	7.4	2.0	4.7	2.4	9.1	4.5	0.64	0.09	Spring	Spring	15.3	20.9	368.4	328.7	2.0	2.0	14.3	11.5
	9.1	8.8	10.6	4.0	8.9	5.2	19.5	8.8	1.20	0.48	Spring, Well	Spring	9.9	10.8	200.7	414.7	3.4	2.9	16.7	7.4
Total	100.0	100.0	8.2	4.2	6.2	3.4	18.3	9.7	0.84	0.74			25.3	15.8	466.0	483.7	3.8	2.5	28.5	26.1

Note: Equipment Index – A measure of relative wealth based upon an index of observable physical equipment and tools was used as a partial surrogate of income in unpiped households

ANEXO IV: CATÁLOGO DE PLANTAS FREATOFITAS

ADENIA LOBATA (JACQ.) ENGL.



ADENIA LOBATA SUBSP. RUMICIFOLIA (ENGL. & HARMS) LYE



AEOLLANTHUS PUBESCENS BENTH.



ANTHEPHORA PUBESCENS NEES



ASTRAEA LOBATA (L.) KLOTZSCH



BABIANA STRICTA (AITON) KER GAWL.



BAPHIA PUBESCENS HOOK. F.



BRACHYCORYTHIS PUBESCENS HARV.



BRILLANTAISIA PUBESCENS T. ANDERSON EX OLIV.



CAROXYLON TETRANDRUM (FORSSK.) AKHANI & ROALSON



CAROXYLON VERMICULATUM (L.) AKHANI & ROALSON



CARPHALEA PUBESCENS (KLOTZSCH) VERDC.



CENTAUREA PUBESCENS SUBSP. OMPHALOTRICA BATT.



CENTAUREA PUBESCENS SUBSP. SAHARAE (POMEL) DOBIGNARD



CENTAUREA PUBESCENS WILLD.



CENTROSEMA PUBESCENS BENTH.



COGNIAUXIA TRILOBATA COGN.



COLA FLAVO



COTYLEDON VELUTINA HOOK. F.



CYNODON DACTYLON (L.) PERS.



DIGITARIA VELUTINA (FORSSK.) P. BEAUV.



DISA STRICTA SOND.



ECHINOPS SPINOSISSIMUS SUBSP. SPINOSUS GREUTER



ECHINOPS SPINOSUS L.



ERICA EREMIOIDES SUBSP. *PUBESCENS* (E.G.H. OLIV.) E.G.H. OLIV.



ERIGERON TRILOBUS (DECNE.) BOISS.



EUPHORBIA HIRSUTA L.



EUPHORBIA SCHIMPERIANA VAR. VELUTINA N.E. BR.



FAGONIA GLUTINOSA DELILE



FERRARIA GLUTINOSA (BAKER) RENDLE



FRANKENIA LAEVIS SUBSP. VELUTINA (DC.) MAIRE



FUIRENA STRICTA STEUD.



HAEMANTHUS PUBESCENS SUBSP. LEIPOLDTII SNIJMAN



HELIOTROPIMUM CURASSAVICUM L.



HERMANNIA STRICTA (E. MEY. EX TURCZ.) HARV.



HOLARRHENA PUBESCENS (BUCH.)



HYPERICUM PUBESCENS BOISS.



HYPOESTES PUBESCENS BALF.F.



IXIA STRICTA (ECKL. EX KLATT) G.J. LEWIS



KALLSTROEMIA PUBESCENS (G.DON) DANDY



KNIPHOFIA STRICTA CODD



LACTUCA VIMINEA (L.) J. PRESL & C. PRESL



LANNEA RUBRA (HIERN) ENGL.



LANNEA VELUTINA A.RICH.



LAVANDULA PUBESCENS DECNE.



LEPTACTINA BENGUELENSIS (BENTH. & HOOK. F.) R.D. GOOD



LEPTADENIA LANCEOLATA (POIR.) GOYDER



LINUM PUBESCENS BANKS & SOL.



LOBELIA PUBESCENS AITON



MAERUA TRIPHYLLA VAR. PUBESCENS (KLOTZSCH) DEWOLF



MELHANIA VELUTINA FORSSK.



MORAEA STRICTA BAKER



ONONIS PUBESCENS L.



OTOGLYPHIS MAROCCANA (BALL) DOBIGNARD



OTOGLYPHIS PUBESCENS (DESF.) POMEL



PHYLICA PUBESCENS AITON



PLUMERIA RUBRA L.



POLYSTACHYA PUBESCENS (LINDL.) RCHB. F.



POLYSTACHYA STRICTA VAR. *LAXIFLORA* (LINDL.) PEREZ



PROSOPIS JULIFLORA (SW.) DC.



RAPHIONACME VELUTINA SCHLTR.



RHYNCHOSIA SUBLOBATA (SCHUMACH. & THONN.) MEIKLE



ROEPERA PUBESCENS (SCHINZ) BEIER & THULIN



SALSOLA APHYLLA L. F.



SALSOLA KALI L.



SAMBUCUS CANADENSIS L.



SAMBUCUS EBULUS L.



SAMBUCUS EBULUS SUBSP. AFRICANA (ENGL.) BOLLI



SAPONARIA GLUTINOSA M. BIEB.



SILENE GALLICA L.



SMEATHMANNIA PUBESCENS SOL. EX R.BR.



SOLANUM WRIGHTII BENTH.



SPHAGNETICOLA TRILOBATA (L.) PRUSKI



TAMARIX APHYLLA (L.) H. KARST.



URENA LOBATA L.



UTRICULARIA PUBESCENS SM.



VASCONCELLEA PUBESCENS A. DC.



WURMBEA STRICTA (BURM. F.) J. C. MANNING & VINNIKOVA



ANEXO V: DENSIDAD DE POTENCIA DEL VIENTO A 10 M DE ALTURA

		Angola	Benin	Botswana	Burkina Faso	Burundi	Cabo Verde	Camerun	Chad	Comoras	Costa de Marfil	Eritrea	Etiopía	Gabón	Gambia	Ghana
Percentile																
Max	2	108,68	69,85	103,56	91,37	97,71	809	90,66	500,65	186,67	50,04	565,48	227,55	29,15	97,02	87,23
	4	87	61,37	91,22	87,06	81,29	663,33	74,26	434,06	151,09	42,69	461,46	183,54	24,47	87,37	72,31
	6	77,64	57,3	84,2	84,28	72,65	590,08	65,67	396,37	133,03	39	406,55	161,17	21,19	80,22	63,63
	8	71,88	54,62	79,68	82,13	66,51	542,49	59,47	368,2	121,45	36,61	370,4	146,55	18,71	75,5	57,83
	10	67,72	52,62	76,48	80,29	61,79	506,89	54,62	346,22	113,01	34,88	343,87	135,8	16,83	72,12	53,63
	12	64,35	51	74,06	78,64	57,98	478,36	50,42	328,93	106,69	33,54	323,11	127,32	15,35	69,49	50,4
	14	61,47	49,65	72,14	77,12	54,79	454,66	46,59	314,82	101,53	32,44	305,98	120,34	14,14	67,36	47,81
	16	58,93	48,46	70,57	75,71	52,08	433,86	43,2	302,93	97,14	31,51	291,4	114,42	13,13	65,56	45,66
	18	56,68	47,4	69,25	74,4	49,73	415,63	40,24	292,56	93,28	30,7	278,75	109,31	12,27	64,05	43,82
	20	54,62	46,44	68,11	73,2	47,66	399,25	37,68	283,43	89,85	29,99	267,61	104,84	11,52	62,75	42,23
	22	52,7	45,54	67,09	72,08	45,82	384,77	35,44	275,34	86,81	29,36	257,64	100,91	10,87	61,61	40,82
	24	50,89	44,7	66,17	71,05	44,15	371,33	33,47	268,05	84,05	28,79	248,69	97,43	10,29	60,6	39,57
	26	49,15	43,91	65,33	70,09	42,65	358,76	31,73	261,36	81,44	28,27	240,61	94,33	9,78	59,67	38,43
	28	47,49	43,14	64,56	69,19	41,28	347,24	30,19	255,13	79,13	27,8	233,25	91,54	9,32	58,81	37,4
	30	45,9	42,4	63,84	68,35	40,03	336,78	28,81	249,27	77,02	27,35	226,53	89	8,91	58	36,46
	32	44,37	41,69	63,18	67,55	38,88	326,98	27,56	243,71	75,06	26,94	220,34	86,65	8,54	57,23	35,58
	34	42,93	41	62,55	66,78	37,82	317,93	26,42	238,4	73,23	26,56	214,59	84,44	8,2	56,48	34,78
	36	41,55	40,34	61,96	66,05	36,83	309,51	25,39	233,29	71,48	26,19	209,22	82,34	7,89	55,78	34,02
	38	40,24	39,68	61,39	65,35	35,91	301,76	24,44	228,39	69,83	25,85	204,15	80,35	7,61	55,09	33,32
	40	39,01	39,05	60,83	64,67	35,04	294,44	23,57	223,64	68,28	25,51	199,36	78,44	7,35	54,43	32,66
	42	37,83	38,42	60,29	64,01	34,23	287,58	22,76	219,03	66,76	25,19	194,81	76,62	7,11	53,79	32,03
	44	36,72	37,82	59,77	63,37	33,46	281,08	22,01	214,55	65,35	24,88	190,48	74,88	6,89	53,17	31,44
	46	35,68	37,22	59,26	62,75	32,73	274,99	21,31	210,2	64,01	24,58	186,34	73,2	6,69	52,58	30,88
	48	34,69	36,64	58,76	62,14	32,04	269,16	20,66	205,99	62,73	24,29	182,37	71,59	6,49	52	30,34
	50	33,75	36,08	58,28	61,55	31,38	263,62	20,05	201,92	61,5	24	178,55	70,03	6,32	51,43	29,83
	52	32,87	35,53	57,81	60,96	30,75	258,37	19,47	198	60,33	23,71	174,89	68,53	6,15	50,88	29,34
	54	32,04	34,99	57,34	60,38	30,15	253,4	18,93	194,25	59,21	23,43	171,36	67,08	5,99	50,34	28,87
	56	31,25	34,46	56,88	59,81	29,58	248,74	18,42	190,64	58,13	23,15	167,95	65,69	5,84	49,82	28,41
	58	30,5	33,95	56,42	59,24	29,03	244,23	17,93	187,16	57,1	22,87	164,66	64,33	5,7	49,3	27,97
	60	29,79	33,45	55,97	58,67	28,5	239,9	17,46	183,79	56,07	22,58	161,48	63,02	5,57	48,8	27,54
	62	29,11	32,96	55,53	58,11	28	235,7	17,02	180,49	55,1	22,3	158,39	61,74	5,45	48,3	27,12
	64	28,47	32,48	55,1	57,56	27,52	231,67	16,59	177,22	54,16	22,02	155,41	60,5	5,33	47,79	26,71
	66	27,86	32,02	54,67	57,01	27,05	227,73	16,19	173,97	53,25	21,74	152,51	59,29	5,22	47,29	26,31
	68	27,28	31,56	54,25	56,46	26,6	223,92	15,79	170,74	52,36	21,45	149,69	58,11	5,11	46,8	25,92
	70	26,72	31,11	53,83	55,92	26,17	220,22	15,42	167,55	51,48	21,17	146,94	56,97	5,01	46,3	25,53
	72	26,19	30,66	53,42	55,38	25,75	216,65	15,06	164,43	50,62	20,89	144,25	55,86	4,91	45,81	25,15
	74	25,68	30,23	53,01	54,85	25,34	213,13	14,72	161,37	49,77	20,61	141,62	54,79	4,82	45,32	24,77
	76	25,18	29,8	52,61	54,32	24,95	209,7	14,39	158,39	48,9	20,33	139,05	53,73	4,73	44,83	24,4
	78	24,71	29,38	52,21	53,78	24,56	206,32	14,07	155,48	48,08	20,06	136,54	52,71	4,65	44,35	24,04
	80	24,26	28,97	51,81	53,25	24,19	203,05	13,77	152,66	47,27	19,79	134,08	51,7	4,56	43,87	23,67
	82	23,82	28,56	51,42	52,72	23,82	199,77	13,47	149,94	46,47	19,53	131,68	50,72	4,48	43,39	23,32
	84	23,39	28,16	51,03	52,18	23,46	196,49	13,2	147,3	45,68	19,27	129,33	49,76	4,41	42,92	22,97
	86	22,98	27,76	50,63	51,64	23,11	193,21	12,93	144,75	44,91	19,02	127,05	48,83	4,34	42,45	22,62
	88	22,59	27,37	50,23	51,09	22,77	189,98	12,67	142,27	44,14	18,76	124,83	47,91	4,26	41,98	22,28
	90	22,2	26,98	49,82	50,54	22,42	186,7	12,42	139,85	43,39	18,52	122,67	47,01	4,19	41,52	21,95
	92	21,82	26,59	49,39	49,99	22,08	183,44	12,18	137,48	42,63	18,27	120,55	46,12	4,13	41,06	21,62
	94	21,46	26,21	48,93	49,43	21,74	180,18	11,95	135,15	41,91	18,02	118,48	45,26	4,06	40,6	21,3
	96	21,1	25,83	48,43	48,86	21,4	177	11,73	132,82	41,21	17,78	116,44	44,4	4	40,13	20,98
	98	20,74	25,45	47,88	48,27	21,06	173,83	11,51	130,44	40,5	17,53	114,41	43,56	3,93	39,66	20,66
Average	100	20,37	25,07	47,26	47,57	20,7	170,63	11,29	128,01	39,79	17,24	112,39	42,73	3,87	39,15	20,33

ANEXO V: DENSIDAD DE POTENCIA DEL VIENTO A 10 M DE ALTURA (CONTINUACIÓN)

Guinea	Guinea Ecuatorial	Guinea-Bisáu	Kenia	Lesoto	Liberia	Madagascar	Malawi	Mali	Mauricio	Mauritania	Mozambique	Namibia	Niger	Nigeria	República Centroafricana	República del Congo
62,71	23,54	67,07	532,69	1169,5	26,29	447,83	177,69	195,19	319,21	307,46	150,32	302,38	364,67	115,61	56,63	34,43
51	18,61	59,83	395,95	903,26	23,05	344,06	145,97	187,74	289,96	275,71	117,13	251,4	304,32	98,7	48,07	29,16
45,33	16,05	54,52	324,32	764,53	21,57	290,22	130,6	183,96	276,12	260,5	101,22	225,68	271,56	90,49	42,13	26,07
41,74	14,37	50,24	277,53	677,71	20,62	255,09	120,12	181,33	262,07	250,62	91,27	209,22	250,73	85,02	37,21	23,89
39,12	13,14	46,69	243,56	616,52	19,91	229,75	112,22	179,25	248,88	243,19	84,16	197,32	235,84	80,89	33,59	22,21
37,05	12,18	43,76	217,89	570,33	19,35	210,29	105,87	177,59	237,91	237,17	78,69	188,03	224,56	77,58	30,85	20,84
35,36	11,4	41,35	198	533,68	18,88	194,74	100,6	176,23	227,79	232,03	74,28	180,36	215,73	74,83	28,69	19,7
33,91	10,73	39,35	182,19	503,46	18,46	181,95	96,09	175,03	218,98	227,54	70,62	173,79	208,58	72,48	26,93	18,73
32,65	10,16	37,68	169,36	477,92	18,08	171,2	92,15	173,94	211,12	223,62	67,5	167,96	202,67	70,46	25,48	17,89
31,53	9,65	36,24	158,74	455,89	17,74	162	88,66	172,9	203,58	220,19	64,77	162,6	197,64	68,66	24,24	17,14
30,54	9,19	34,99	149,76	436,58	17,41	154,01	85,55	171,9	196,84	217,17	62,37	157,55	193,28	67,05	23,17	16,48
29,63	8,78	33,88	142,06	419,46	17,1	147	82,75	170,93	190,69	214,48	60,21	152,77	189,42	65,58	22,24	15,87
28,8	8,42	32,89	135,36	404,12	16,79	140,78	80,22	169,97	184,99	212,09	58,26	148,24	185,93	64,23	21,42	15,32
28,04	8,08	32	129,47	390,26	16,5	135,21	77,91	169,03	179,87	209,92	56,47	143,95	182,74	62,98	20,68	14,8
27,34	7,77	31,19	124,25	377,62	16,21	130,18	75,8	168,07	175,09	207,93	54,82	139,89	179,79	61,8	20,02	14,32
26,68	7,49	30,44	119,59	366,01	15,94	125,59	73,85	167,1	170,55	206,11	53,29	136,07	177,04	60,68	19,42	13,86
26,07	7,22	29,75	115,39	355,27	15,67	121,38	72,06	166,1	166,38	204,43	51,86	132,49	174,47	59,63	18,87	13,42
25,5	6,98	29,11	111,57	345,27	15,4	117,5	70,39	165,07	162,4	202,86	50,51	129,15	172,05	58,62	18,37	12,99
24,97	6,76	28,52	108,09	335,91	15,14	113,9	68,85	164	158,55	201,39	49,24	126,04	169,75	57,66	17,9	12,58
24,46	6,55	27,95	104,89	327,12	14,89	110,55	67,4	162,88	154,95	200	48,04	123,15	167,57	56,73	17,47	12,19
23,98	6,36	27,42	101,94	318,83	14,65	107,41	66,04	161,73	151,45	198,69	46,89	120,46	165,5	55,83	17,07	11,8
23,53	6,18	26,92	99,19	310,99	14,41	104,46	64,76	160,53	148,21	197,46	45,8	117,94	163,52	54,95	16,7	11,44
23,09	6,01	26,45	96,63	303,54	14,18	101,68	63,55	159,28	145,14	196,28	44,75	115,57	161,61	54,08	16,34	11,1
22,68	5,85	26	94,23	296,44	13,95	99,06	62,41	157,99	142,15	195,16	43,74	113,34	159,77	53,23	16,01	10,78
22,28	5,7	25,57	91,98	289,66	13,74	96,57	61,33	156,65	139,39	194,09	42,78	111,24	157,98	52,38	15,7	10,48
21,9	5,56	25,16	89,87	283,17	13,53	94,21	60,29	155,24	136,77	193,05	41,85	109,25	156,24	51,55	15,41	10,2
21,53	5,43	24,78	87,88	276,95	13,32	91,97	59,3	153,74	134,2	192,04	40,95	107,35	154,52	50,72	15,13	9,94
21,18	5,3	24,41	85,99	270,97	13,11	89,83	58,35	152,12	131,82	191,07	40,09	105,55	152,84	49,9	14,86	9,69
20,84	5,18	24,05	84,2	265,2	12,9	87,8	57,44	150,37	129,55	190,11	39,26	103,84	151,18	49,09	14,61	9,46
20,52	5,07	23,72	82,5	259,63	12,7	85,86	56,56	148,52	127,32	189,17	38,46	102,2	149,56	48,28	14,36	9,23
20,2	4,96	23,4	80,88	254,23	12,49	84	55,72	146,6	125,24	188,23	37,69	100,62	147,98	47,48	14,13	9,02
19,89	4,86	23,09	79,33	249,02	12,27	82,23	54,89	144,66	123,2	187,3	36,94	99,11	146,41	46,69	13,9	8,81
19,6	4,76	22,79	77,84	243,96	12,06	80,53	54,1	142,7	121,26	186,38	36,22	97,66	144,87	45,9	13,69	8,61
19,31	4,67	22,51	76,42	239,06	11,84	78,89	53,32	140,74	119,37	185,45	35,53	96,27	143,34	45,13	13,48	8,42
19,03	4,58	22,23	75,04	234,31	11,63	77,32	52,56	138,78	117,49	184,51	34,86	94,91	141,83	44,36	13,28	8,24
18,76	4,5	21,97	73,71	229,71	11,42	75,81	51,82	136,81	115,72	183,56	34,22	93,61	140,34	43,61	13,08	8,06
18,5	4,41	21,72	72,42	225,25	11,21	74,35	51,1	134,85	114	182,57	33,59	92,34	138,88	42,88	12,89	7,89
18,25	4,33	21,47	71,17	220,93	11,01	72,94	50,38	132,91	112,28	181,53	32,99	91,11	137,44	42,15	12,71	7,73
18	4,26	21,24	69,94	216,74	10,81	71,57	49,67	130,98	110,65	180,42	32,41	89,91	136,02	41,44	12,52	7,57
17,76	4,19	21	68,73	212,67	10,62	70,25	48,97	129,07	109,06	179,23	31,85	88,75	134,62	40,74	12,35	7,42
17,52	4,12	20,78	67,56	208,72	10,43	68,97	48,27	127,17	107,48	177,92	31,3	87,61	133,23	40,05	12,17	7,27
17,29	4,05	20,56	66,4	204,87	10,24	67,73	47,58	125,29	105,97	176,49	30,78	86,49	131,86	39,37	12	7,13
17,06	3,98	20,35	65,26	201,12	10,06	66,53	46,89	123,44	104,51	174,96	30,26	85,4	130,5	38,7	11,83	7
16,84	3,92	20,14	64,14	197,46	9,88	65,36	46,19	121,59	103,05	173,35	29,77	84,32	129,13	38,04	11,65	6,87
16,62	3,86	19,93	63,04	193,89	9,71	64,21	45,48	119,76	101,67	171,69	29,28	83,25	127,74	37,4	11,48	6,74
16,4	3,8	19,72	61,96	190,42	9,55	63,09	44,77	117,92	100,28	169,96	28,81	82,18	126,31	36,76	11,3	6,62
16,18	3,74	19,52	60,9	187,03	9,38	61,99	44,06	116,08	98,95	168,18	28,35	81,12	124,85	36,12	11,12	6,5
15,96	3,69	19,32	59,85	183,7	9,23	60,91	43,35	114,23	97,63	166,35	27,9	80,01	123,35	35,49	10,94	6,39
15,74	3,63	19,11	58,8	180,45	9,07	59,84	42,63	112,37	96,28	164,43	27,45	78,84	121,8	34,85	10,75	6,27
15,51	3,57	18,9	57,74	177,23	8,92	58,76	41,89	110,42	94,93	162,27	26,99	77,58	120,15	34,2	10,55	6,16

ANEXO V: DENSIDAD DE POTENCIA DEL VIENTO A 10 M DE ALTURA (CONTINUACIÓN)

Zimbabwe	Zambia	Yibuti	Uganda	Togo	Tanzania	Sudán del Sur	Sudán	Sudáfrica	Suazilandia	Somalia	Sierra Leona	Seychelles	Senegal	Santo Tomé y Príncipe	Ruanda	República Dem. del Congo
122,95	92,26	506,06	87,2	71,97	184,23	105,61	365,35	554,09	209,7	570,97	54,83	271,49	87,09	54,22	66,63	72,39
99,31	76,15	453,78	68,52	61,12	141,7	84,76	309,03	410,45	182,91	448,81	43,63	267,5	80,61	48,33	54,26	53,05
88,52	67,58	419,07	60,53	54,88	121,26	75,3	281,88	342,2	166,16	384,01	38,16	265,45	76,93	44,85	47,92	43,69
81,89	61,9	394,58	55,9	50,71	108	69,25	264,59	299,71	154,02	342,43	34,64	264,14	74,47	42,44	43,86	37,91
77,18	57,77	375,62	52,69	47,67	98,45	64,72	251,94	269,84	144,54	312,52	32,12	262,61	72,7	40,34	40,86	33,8
73,56	54,59	360,08	50,25	45,31	91,17	61,18	241,96	247,34	136,87	289,55	30,19	260,65	71,33	38,43	38,49	30,68
70,63	52,04	346,75	48,27	43,41	85,42	58,35	233,71	229,6	130,54	271,23	28,66	254,15	70,21	36,77	36,6	28,2
68,17	49,92	335	46,56	41,83	80,75	56,02	226,65	215,21	125,15	256,08	27,39	242,55	69,28	35,29	35,02	26,17
66,06	48,11	324,48	45,07	40,48	76,81	54,05	220,49	203,26	120,47	243,28	26,33	232,64	68,46	33,99	33,67	24,48
64,19	46,5	314,89	43,74	39,31	73,38	52,36	215,04	193,17	116,32	232,21	25,42	223,53	67,73	32,81	32,48	23,04
62,53	45,06	306,1	42,49	38,29	70,33	50,88	210,14	184,5	112,62	222,47	24,63	214,93	67,06	31,72	31,42	21,81
61,03	43,74	297,93	41,29	37,37	67,57	49,59	205,69	176,97	109,32	213,79	23,94	207,67	66,45	30,69	30,47	20,72
59,65	42,52	290,36	40,11	36,53	65,07	48,43	201,62	170,34	106,34	206,02	23,33	201,09	65,88	29,68	29,61	19,77
58,37	41,39	283,33	38,97	35,77	62,78	47,39	197,88	164,44	103,61	198,97	22,78	195	65,34	28,8	28,82	18,92
57,17	40,33	276,77	37,87	35,07	60,68	46,45	194,4	159,16	101,08	192,54	22,28	189,13	64,83	27,98	28,08	18,15
56,05	39,33	270,6	36,83	34,42	58,74	45,61	191,15	154,39	98,75	186,63	21,84	184,14	64,33	27,22	27,39	17,46
55	38,38	264,74	35,84	33,81	56,96	44,82	188,1	150,05	96,57	181,17	21,43	179,64	63,84	26,51	26,76	16,83
54	37,48	259,17	34,91	33,24	55,3	44,08	185,22	146,07	94,53	176,09	21,05	175,45	63,35	25,84	26,16	16,25
53,05	36,62	253,86	34,03	32,7	53,75	43,37	182,51	142,42	92,62	171,37	20,7	171,22	62,88	25,2	25,6	15,71
52,14	35,8	248,78	33,21	32,19	52,31	42,7	179,91	139,03	90,83	166,96	20,37	167,43	62,42	24,59	25,07	15,21
51,28	35,02	243,92	32,43	31,7	50,95	42,04	177,42	135,88	89,12	162,82	20,06	163,9	61,96	24,01	24,56	14,75
50,45	34,28	239,26	31,71	31,23	49,68	41,41	174,99	132,94	87,51	158,96	19,77	160,62	61,5	23,45	24,09	14,32
49,66	33,57	234,81	31,02	30,78	48,47	40,79	172,63	130,19	85,98	155,34	19,5	157,34	61,05	22,92	23,64	13,91
48,89	32,89	230,56	30,37	30,34	47,33	40,19	170,32	127,59	84,52	151,93	19,24	154,44	60,61	22,41	23,21	13,52
48,16	32,24	226,47	29,76	29,91	46,25	39,59	168,04	125,14	83,13	148,73	18,98	151,7	60,17	21,93	22,79	13,16
47,45	31,62	222,56	29,18	29,5	45,22	39	165,77	122,83	81,79	145,7	18,74	149,11	59,74	21,47	22,4	12,81
46,76	31,02	218,8	28,63	29,08	44,23	38,41	163,49	120,63	80,5	142,83	18,51	146,64	59,32	21,02	22,03	12,48
46,09	30,44	215,19	28,1	28,67	43,29	37,81	161,2	118,54	79,25	140,1	18,28	144,15	58,89	20,6	21,67	12,17
45,45	29,89	211,7	27,61	28,26	42,38	37,2	158,89	116,56	78,06	137,5	18,06	141,93	58,47	20,19	21,32	11,86
44,82	29,36	208,34	27,13	27,85	41,51	36,59	156,56	114,67	76,89	135,02	17,85	139,79	58,05	19,79	20,99	11,57
44,21	28,85	205,09	26,67	27,44	40,66	35,97	154,23	112,86	75,76	132,66	17,65	137,72	57,63	19,41	20,67	11,29
43,61	28,35	201,96	26,24	27,03	39,84	35,34	151,9	111,12	74,66	130,4	17,45	135,59	57,21	19,05	20,37	11,03
43,03	27,88	198,93	25,82	26,62	39,05	34,7	149,58	109,46	73,58	128,23	17,25	133,65	56,78	18,7	20,07	10,77
42,46	27,42	196	25,41	26,21	38,28	34,06	147,3	107,86	72,53	126,15	17,06	131,8	56,35	18,36	19,78	10,52
41,9	26,97	193,18	25,02	25,81	37,53	33,42	145,03	106,31	71,52	124,15	16,88	130	55,9	18,02	19,51	10,28
41,35	26,53	190,43	24,64	25,41	36,8	32,79	142,79	104,81	70,52	122,2	16,69	128,14	55,45	17,7	19,24	10,05
40,81	26,11	187,77	24,28	25,02	36,09	32,18	140,59	103,35	69,56	120,31	16,51	126,44	54,97	17,39	18,98	9,82
40,28	25,7	185,17	23,92	24,64	35,4	31,58	138,44	101,94	68,61	118,47	16,34	124,77	54,45	17,07	18,72	9,61
39,75	25,3	182,66	23,57	24,26	34,72	31,01	136,34	100,55	67,68	116,68	16,16	123,14	53,89	16,77	18,48	9,4
39,23	24,9	180,2	23,23	23,89	34,06	30,45	134,28	99,2	66,76	114,94	15,99	121,43	53,29	16,48	18,23	9,2
38,72	24,52	177,82	22,89	23,53	33,42	29,91	132,27	97,87	65,86	113,25	15,82	119,86	52,66	16,2	18	9,01
38,21	24,14	175,5	22,55	23,17	32,8	29,38	130,3	96,57	64,98	111,62	15,66	118,33	52	15,92	17,76	8,83
37,7	23,78	173,23	22,22	22,82	32,2	28,87	128,36	95,28	64,09	110,04	15,49	116,83	51,33	15,65	17,54	8,65
37,2	23,42	171,01	21,89	22,47	31,62	28,38	126,45	94,01	63,23	108,5	15,32	115,27	50,64	15,37	17,31	8,48
36,7	23,07	168,83	21,56	22,13	31,05	27,9	124,56	92,75	62,37	106,99	15,15	113,82	49,95	15,1	17,09	8,32
36,21	22,72	166,69	21,23	21,8	30,5	27,44	122,68	91,48	61,51	105,51	14,98	112,38	49,25	14,83	16,86	8,16
35,71	22,38	164,58	20,9	21,47	29,96	26,98	120,79	90,2	60,67	104,05	14,81	110,93	48,56	14,56	16,64	8
35,22	22,03	162,49	20,58	21,14	29,43	26,54	118,88	88,89	59,82	102,61	14,63	109,38	47,86	14,3	16,42	7,86
34,71	21,69	160,4	20,25	20,82	28,91	26,11	116,93	87,55	58,96	101,18	14,45	107,9	47,17	14,03	16,19	7,71
34,17	21,34	158,17	19,91	20,49	28,39	25,67	114,87	86,12	58,08	99,63	14,23	106,34	46,46	13,77	15,94	7,57

ANEXO VI: DENSIDAD DE POTENCIA DEL VIENTO A 50 M DE ALTURA

		Angola	Benin	Botswana	Burkina Faso	Burundi	Cabo Verde	Camerun	Chad	Comoras	Costa de Marfil	Eritrea	Etiopia	Gabon	Gambia	Ghana
Max	2	189,41	164,15	224,87	200,68	152,73	961,05	196,68	936,79	215,16	107,65	778,95	419,79	68,23	161,25	196,66
	4	164,33	148,98	208,57	193,15	130,77	850,18	173,24	831,36	192,87	97,75	675,18	353,32	59,68	157,59	163,37
	6	152,72	141,34	198,37	188,14	119,15	786,77	157,13	767,34	179,28	92,32	618,26	318,72	53,85	154,33	145,23
	8	144,99	136,12	190,99	184,31	110,91	740,44	143,95	717,84	168,7	88,58	578,51	295,22	49,33	151,54	133,75
	10	139,14	132,08	185,45	181,17	104,41	704,22	133,25	679,07	160,65	85,71	546,39	277,44	45,74	149,13	125,62
	12	134,33	128,76	181,06	178,47	99,06	674,28	123,27	648,35	154,58	83,37	518,9	263,2	42,85	147,04	119,41
	14	130,21	125,92	177,46	176,1	94,46	648,44	114,25	623,17	149,59	81,38	495,11	251,37	40,47	145,25	114,42
	16	126,52	123,4	174,45	173,97	90,49	624,53	106,51	601,75	145,36	79,65	474,26	241,29	38,48	143,69	110,24
	18	123,1	121,13	171,86	172,05	86,98	603,01	99,9	582,88	141,67	78,11	455,84	232,64	36,77	142,31	106,65
	20	119,85	119,04	169,61	170,29	83,87	583,62	94,21	566,24	138,39	76,72	439,52	225,12	35,29	141,06	103,51
	22	116,72	117,09	167,56	168,66	81,07	565,77	89,27	551,41	135,4	75,46	424,92	218,46	33,99	139,89	100,73
	24	113,68	115,24	165,66	167,13	78,53	549,07	84,92	537,9	132,68	74,31	411,75	212,4	32,84	138,77	98,22
	26	110,69	113,48	163,89	165,67	76,22	533,51	81,08	525,3	130,07	73,25	399,67	206,78	31,82	137,66	95,94
	28	107,77	111,78	162,24	164,28	74,1	519,18	77,64	513,43	127,67	72,26	388,51	201,47	30,89	136,55	93,86
	30	104,94	110,15	160,69	162,94	72,15	506,04	74,56	502,18	125,45	71,34	378,16	196,42	30,05	135,45	91,93
	32	102,22	108,59	159,24	161,64	70,33	493,76	71,77	491,41	123,38	70,47	368,53	191,6	29,29	134,36	90,14
	34	99,63	107,08	157,84	160,37	68,64	482,37	69,22	481,04	121,41	69,65	359,51	186,98	28,59	133,28	88,47
	36	97,17	105,63	156,49	159,13	67,05	471,83	66,9	471,02	119,55	68,88	351,05	182,53	27,94	132,22	86,89
	38	94,85	104,22	155,17	157,91	65,55	462,12	64,75	461,39	117,74	68,14	343,08	178,26	27,34	131,16	85,41
	40	92,64	102,84	153,88	156,71	64,14	452,89	62,78	452,11	116,03	67,43	335,55	174,15	26,79	130,1	84
	42	90,56	101,51	152,61	155,53	62,8	444,26	60,94	443,18	114,35	66,76	328,4	170,19	26,28	129,05	82,67
	44	88,59	100,21	151,37	154,36	61,53	436,12	59,24	434,57	112,8	66,1	321,59	166,39	25,8	128,02	81,39
	46	86,72	98,94	150,15	153,2	60,32	428,5	57,64	426,28	111,3	65,47	315,11	162,72	25,35	127,02	80,18
	48	84,95	97,7	148,96	152,04	59,18	421,17	56,15	418,34	109,87	64,85	308,92	159,18	24,93	126,04	79,02
	50	83,26	96,48	147,81	150,88	58,08	414,19	54,76	410,73	108,48	64,25	302,98	155,76	24,53	125,07	77,9
	52	81,65	95,29	146,68	149,71	57,03	407,52	53,44	403,42	107,13	63,66	297,28	152,45	24,15	124,12	76,83
	54	80,12	94,12	145,57	148,55	56,03	401,16	52,2	396,37	105,81	63,09	291,79	149,25	23,8	123,19	75,8
	56	78,66	92,98	144,49	147,37	55,06	395,16	51,03	389,49	104,52	62,52	286,48	146,15	23,46	122,27	74,8
	58	77,26	91,86	143,41	146,2	54,14	389,29	49,92	382,72	103,26	61,97	281,35	143,15	23,14	121,36	73,83
	60	75,92	90,77	142,35	145,02	53,25	383,62	48,87	376,01	101,99	61,42	276,37	140,23	22,83	120,46	72,9
	62	74,62	89,7	141,31	143,85	52,39	378,09	47,87	369,38	100,8	60,89	271,55	137,39	22,53	119,59	71,99
	64	73,38	88,66	140,27	142,68	51,57	372,75	46,92	362,83	99,63	60,35	266,88	134,64	22,25	118,71	71,1
	66	72,18	87,64	139,25	141,5	50,77	367,47	46,02	356,42	98,49	59,82	262,35	131,97	21,98	117,86	70,24
	68	71,02	86,64	138,24	140,33	50	362,33	45,15	350,16	97,38	59,3	257,95	129,38	21,71	117	69,4
	70	69,9	85,65	137,25	139,16	49,25	357,31	44,33	344,08	96,28	58,78	253,65	126,87	21,46	116,14	68,57
	72	68,82	84,69	136,27	137,99	48,52	352,42	43,54	338,16	95,2	58,26	249,43	124,42	21,21	115,29	67,77
	74	67,76	83,75	135,29	136,83	47,81	347,54	42,78	332,38	94,13	57,74	245,28	122,04	20,96	114,44	66,97
	76	66,74	82,82	134,33	135,67	47,11	342,68	42,05	326,7	93,05	57,23	241,22	119,72	20,73	113,59	66,19
	78	65,74	81,9	133,37	134,51	46,43	337,84	41,35	321,16	92,02	56,72	237,24	117,46	20,49	112,74	65,42
	80	64,77	81	132,43	133,34	45,77	333,01	40,68	315,77	91	56,2	233,35	115,26	20,26	111,88	64,67
	82	63,82	80,11	131,49	132,18	45,11	328,06	40,03	310,56	90	55,69	229,55	113,12	20,03	111,04	63,92
	84	62,89	79,23	130,57	131	44,47	323,09	39,4	305,52	88,99	55,17	225,84	111,02	19,81	110,2	63,18
	86	61,97	78,35	129,65	129,82	43,84	318,07	38,79	300,62	88	54,65	222,21	108,98	19,58	109,36	62,46
	88	61,07	77,48	128,72	128,62	43,22	313	38,19	295,85	87	54,13	218,65	106,98	19,36	108,53	61,74
	90	60,19	76,6	127,79	127,41	42,61	307,79	37,61	291,21	86,02	53,61	215,14	105,02	19,14	107,7	61,02
	92	59,31	75,72	126,85	126,18	42	302,55	37,04	286,64	85	53,08	211,68	103,11	18,92	106,88	60,31
	94	58,44	74,84	125,88	124,92	41,4	297,3	36,48	282,13	84	52,54	208,26	101,22	18,7	106,05	59,61
	96	57,57	73,95	124,87	123,62	40,79	292,19	35,91	277,59	82,97	51,99	204,86	99,37	18,47	105,21	58,9
	98	56,69	73,06	123,79	122,26	40,17	287,08	35,35	272,95	81,89	51,41	201,47	97,54	18,23	104,34	58,17
Average	100	55,75	72,14	122,53	120,7	39,52	281,87	34,74	268,18	80,67	50,78	198,03	95,71	17,97	103,39	57,37

ANEXO VI: DENSIDAD DE POTENCIA DEL VIENTO A 50 M DE ALTURA (CONTINUACIÓN)

Guinea	Guinea Ecuatorial	Guinea-Bisáu	Kenia	Lesoto	Liberia	Madagascar	Malawi	Mali	Mauricio	Mauritania	Mozambique	Namibia	Niger	Nigeria	República Centroafricana	República del Congo
123,26	49,75	117,91	998,21	1392,2	57,25	776,18	333,5	372,65	503,45	584,03	257,72	493,66	671,72	256,41	141,66	82,91
108,41	42,64	109,88	766,39	1126,4	53,83	626,7	295,58	361,62	464,61	541,69	221,97	422,12	569,14	230,05	122,32	71,2
100,65	38,77	104,64	638,64	981,79	51,97	544,19	273,21	355,72	445,95	518,94	202,76	384,91	513,37	215,69	110,13	64,54
95,39	36,18	100,61	552,94	888,62	50,6	488,74	256,73	351,39	434,58	503,05	189,71	360,46	477,95	205,71	100,35	59,98
91,31	34,21	97,22	490,26	820,71	49,52	447,97	243,73	347,85	423,25	490,42	179,75	342,4	452,6	197,93	92,86	56,53
87,93	32,62	94,32	443,25	767,65	48,61	416,22	233,13	344,89	412,19	479,56	171,6	328,05	433,42	191,54	87,07	53,78
85,06	31,27	91,85	406,99	724,59	47,81	390,46	224,02	342,39	401,79	469,98	164,75	316,11	418,31	186,12	82,44	51,5
82,54	30,1	89,72	378,26	688,42	47,07	368,99	215,98	340,2	392,27	461,36	158,87	305,9	405,9	181,46	78,63	49,55
80,3	29,07	87,84	354,84	657,47	46,38	350,68	208,8	338,22	383,38	453,59	153,75	296,83	395,45	177,36	75,43	47,83
78,29	28,14	86,17	335,28	630,41	45,73	334,8	202,34	336,36	374,97	446,7	149,2	288,57	386,41	173,66	72,68	46,27
76,46	27,31	84,67	318,69	606,36	45,1	320,86	196,47	334,56	367,08	440,57	145,09	280,88	378,43	170,28	70,29	44,84
74,8	26,55	83,31	304,36	584,7	44,49	308,49	191,12	332,77	359,61	435,06	141,34	273,66	371,28	167,17	68,17	43,51
73,26	25,85	82,06	291,84	565,03	43,88	297,37	186,21	330,98	352,34	430,05	137,89	266,86	364,74	164,25	66,27	42,26
71,84	25,21	80,91	280,83	547,04	43,28	287,29	181,68	329,19	345,66	425,46	134,72	260,44	358,69	161,51	64,56	41,09
70,52	24,62	79,84	271,05	530,44	42,68	278,08	177,49	327,38	339,42	421,25	131,76	254,41	353,05	158,91	62,99	40
69,28	24,08	78,85	262,26	515,04	42,09	269,6	173,62	325,54	333,28	417,37	129	248,75	347,76	156,42	61,56	38,97
68,11	23,58	77,91	254,33	500,69	41,51	261,75	170,02	323,65	327,58	413,76	126,4	243,47	342,76	154,01	60,23	38
67,01	23,11	77,03	247,1	487,23	40,95	254,47	166,66	321,7	322,2	410,38	123,94	238,55	337,99	151,66	59,01	37,08
65,96	22,67	76,2	240,47	474,61	40,4	247,66	163,5	319,67	316,96	407,21	121,61	233,96	333,45	149,37	57,86	36,21
64,97	22,26	75,42	234,32	462,68	39,86	241,27	160,53	317,56	312,03	404,2	119,39	229,66	329,11	147,11	56,78	35,39
64,03	21,87	74,68	228,58	451,41	39,33	235,25	157,73	315,37	307,17	401,34	117,27	225,65	324,96	144,9	55,77	34,61
63,13	21,5	73,98	223,2	440,73	38,82	229,56	155,07	313,11	302,64	398,63	115,23	221,88	320,99	142,71	54,82	33,87
62,27	21,16	73,31	218,16	430,57	38,31	224,16	152,55	310,78	298,35	396,03	113,28	218,32	317,19	140,55	53,92	33,17
61,45	20,84	72,68	213,41	420,92	37,82	219,03	150,15	308,38	294,16	393,54	111,39	214,97	313,54	138,41	53,06	32,51
60,66	20,53	72,07	208,95	411,7	37,35	214,13	147,87	305,91	290,26	391,14	109,57	211,79	310,03	136,3	52,24	31,88
59,9	20,23	71,49	204,72	402,84	36,89	209,46	145,67	303,36	286,46	388,83	107,8	208,77	306,64	134,21	51,46	31,28
59,17	19,95	70,93	200,7	394,35	36,45	204,99	143,56	300,71	282,7	386,6	106,09	205,89	303,37	132,14	50,71	30,71
58,47	19,69	70,39	196,88	386,2	36,01	200,72	141,52	297,96	279,17	384,43	104,43	203,14	300,21	130,1	49,99	30,17
57,79	19,43	69,87	193,22	378,35	35,58	196,63	139,54	295,1	275,75	382,32	102,83	200,5	297,14	128,08	49,3	29,66
57,13	19,19	69,36	189,73	370,79	35,17	192,72	137,63	292,13	272,34	380,27	101,27	197,97	294,16	126,09	48,63	29,17
56,49	18,95	68,88	186,38	363,51	34,77	188,96	135,77	289,08	269,1	378,25	99,77	195,52	291,26	124,12	47,99	28,71
55,87	18,73	68,4	183,15	356,5	34,37	185,36	133,97	285,96	265,85	376,27	98,31	193,16	288,44	122,18	47,37	28,27
55,26	18,51	67,94	180,03	349,73	33,98	181,89	132,21	282,83	262,76	374,3	96,89	190,89	285,69	120,26	46,76	27,85
54,66	18,3	67,49	177	343,2	33,6	178,55	130,49	279,68	259,71	372,33	95,52	188,69	283,01	118,37	46,17	27,45
54,08	18,09	67,04	174,05	336,9	33,23	175,33	128,8	276,51	256,63	370,35	94,18	186,56	280,41	116,51	45,6	27,06
53,5	17,9	66,61	171,17	330,8	32,86	172,22	127,14	273,33	253,66	368,36	92,89	184,49	277,86	114,68	45,04	26,68
52,94	17,7	66,18	168,34	324,9	32,49	169,22	125,51	270,14	250,74	366,36	91,63	182,47	275,37	112,89	44,49	26,32
52,38	17,51	65,76	165,57	319,17	32,13	166,31	123,91	266,95	247,82	364,3	90,4	180,51	272,92	111,13	43,95	25,98
51,82	17,33	65,34	162,85	313,59	31,78	163,5	122,32	263,77	245	362,16	89,2	178,58	270,51	109,4	43,42	25,64
51,28	17,15	64,93	160,18	308,18	31,43	160,76	120,76	260,59	242,22	359,92	88,03	176,69	268,12	107,7	42,91	25,32
50,73	16,97	64,52	157,57	302,9	31,08	158,1	119,21	257,41	239,44	357,58	86,87	174,84	265,77	106,02	42,39	25
50,19	16,79	64,11	155	297,77	30,74	155,52	117,67	254,21	236,8	355,14	85,75	173,01	263,43	104,37	41,89	24,69
49,65	16,61	63,7	152,48	292,79	30,41	153	116,13	251,01	234,2	352,59	84,64	171,21	261,09	102,75	41,38	24,39
49,11	16,43	63,29	149,99	287,92	30,08	150,54	114,59	247,79	231,57	349,91	83,56	169,42	258,76	101,14	40,89	24,09
48,56	16,25	62,88	147,54	283,14	29,75	148,13	113,06	244,55	229,04	347,07	82,49	167,65	256,42	99,56	40,39	23,8
48,01	16,07	62,47	145,12	278,45	29,43	145,76	111,5	241,26	226,48	344,08	81,43	165,88	254,04	98	39,88	23,51
47,45	15,88	62,06	142,72	273,83	29,11	143,42	109,91	237,92	223,99	340,97	80,38	164,1	251,62	96,44	39,38	23,22
46,88	15,68	61,64	140,34	269,31	28,79	141,09	108,26	234,52	221,46	337,73	79,33	162,27	249,11	94,89	38,86	22,93
46,29	15,48	61,22	137,95	264,85	28,47	138,77	106,52	231,05	218,84	334,32	78,26	160,34	246,5	93,32	38,31	22,63
45,66	15,25	60,75	135,49	260,34	28,13	136,36	104,7	227,32	216,19	330,47	77,12	158,19	243,59	91,68	37,71	22,31

ANEXO VI: DENSIDAD DE POTENCIA DEL VIENTO A 50 M DE ALTURA (CONTINUACIÓN)

República Dem. del Congo	Ruanda	Santo Tomé y Príncipe	Senegal	Seychelles	Sierra Leona	Somalia	Suazilandia	Sudáfrica	Sudán	Sudán del Sur	Tanzania	Togo	Uganda	Yibuti	Zambia	Zimbabwe
154,94	124,13	91,19	196,28	436,34	94,98	904,19	315,55	739,46	664	227,02	388,27	155,04	168,98	869,48	227,16	247,73
119,96	100,29	84,04	187,01	430,82	81,76	754,03	288,41	591,64	586,5	192,12	314,72	138,72	139,87	789,56	190,93	215,73
102,11	87,66	78,62	181,96	426,62	74,64	674,04	269,74	517,92	547	174,62	274,94	127,9	124,62	738,48	172,01	199,7
90,74	79,64	74,12	178,49	423,45	69,94	620,68	256,23	470,34	520,46	163,36	248,31	120,41	113,68	701,01	159,87	188,79
82,63	73,91	70,7	175,85	421,02	66,5	580,97	245,8	435,92	500,23	154,72	228,67	114,8	105,43	671,84	150,97	180,52
76,42	69,52	67,85	173,72	418,45	63,82	549,48	237,5	409,43	483,68	147,83	213,31	110,39	99,14	648,02	143,97	173,89
71,44	65,98	65,37	171,91	411,15	61,66	523,75	230,58	388,18	469,58	142,2	200,75	106,78	94,17	627,34	138,23	168,39
67,32	63,04	63,01	170,32	393,43	59,83	502,07	224,58	370,61	457,26	137,44	190,12	103,76	90,06	608,92	133,45	163,65
63,83	60,51	60,75	168,88	378,43	58,28	483,21	219,3	355,75	446,27	133,32	180,92	101,16	86,57	592,25	129,35	159,49
60,81	58,33	58,72	167,58	365,67	56,92	466,43	214,54	342,94	436,36	129,67	172,84	98,89	83,55	576,96	125,76	155,78
58,16	56,42	56,83	166,36	354,01	55,71	451,4	210,21	331,75	427,3	126,4	165,69	96,87	80,92	562,9	122,56	152,4
55,8	54,73	55,11	165,22	344,23	54,64	437,85	206,2	321,85	418,95	123,44	159,32	95,05	78,59	549,8	119,66	149,3
53,69	53,21	53,45	164,14	335,36	53,67	425,5	202,49	313,01	411,22	120,72	153,61	93,39	76,48	537,35	117,02	146,44
51,78	51,84	51,99	163,11	327,2	52,8	414,12	199,05	305,03	404,02	118,2	148,45	91,87	74,57	525,45	114,58	143,77
50,05	50,59	50,66	162,11	319,29	51,99	403,59	195,84	297,79	397,3	115,88	143,76	90,45	72,83	513,98	112,32	141,27
48,46	49,44	49,42	161,14	312,42	51,25	393,83	192,87	291,15	390,97	113,72	139,49	89,13	71,21	502,88	110,21	138,9
46,99	48,38	48,26	160,2	306	50,57	384,73	190,06	285,04	384,98	111,73	135,59	87,88	69,71	492,16	108,23	136,66
45,64	47,39	47,16	159,28	299,99	49,93	376,21	187,37	279,37	379,31	109,9	131,97	86,7	68,29	481,87	106,36	134,52
44,38	46,46	46,14	158,38	293,92	49,33	368,23	184,83	274,09	373,91	108,21	128,61	85,57	66,95	472,01	104,59	132,47
43,21	45,6	45,17	157,51	288,45	48,77	360,73	182,42	269,13	368,77	106,6	125,47	84,49	65,68	462,59	102,92	130,51
42,11	44,78	44,25	156,65	283,28	48,23	353,69	180,09	264,48	363,85	105,05	122,51	83,45	64,48	453,61	101,33	128,62
41,08	44,02	43,36	155,8	278,45	47,72	347,05	177,88	260,08	359,1	103,57	119,73	82,44	63,34	445,1	99,81	126,8
40,11	43,29	42,49	154,97	273,6	47,24	340,77	175,76	255,92	354,49	102,14	117,08	81,46	62,26	436,98	98,36	125,05
39,18	42,6	41,65	154,14	269,34	46,77	334,81	173,7	251,97	349,98	100,75	114,57	80,52	61,24	429,21	96,97	123,36
38,3	41,94	40,85	153,33	265,25	46,32	329,12	171,71	248,21	345,55	99,39	112,18	79,6	60,27	421,75	95,63	121,73
37,46	41,31	40,07	152,52	261,21	45,88	323,68	169,78	244,63	341,18	98,06	109,89	78,69	59,34	414,59	94,34	120,15
36,66	40,71	39,32	151,72	257,29	45,46	318,47	167,88	241,2	336,87	96,75	107,71	77,79	58,45	407,68	93,1	118,62
35,9	40,13	38,58	150,93	253,24	45,05	313,49	166,03	237,9	332,59	95,45	105,61	76,91	57,6	401,03	91,89	117,14
35,17	39,57	37,87	150,14	249,58	44,65	308,73	164,2	234,74	328,33	94,14	103,59	76,03	56,78	394,63	90,71	115,7
34,46	39,03	37,18	149,35	246,1	44,25	304,16	162,41	231,7	324,1	92,81	101,65	75,14	56	388,46	89,56	114,31
33,79	38,52	36,51	148,56	242,79	43,87	299,76	160,65	228,76	319,92	91,48	99,77	74,26	55,24	382,51	88,44	112,95
33,14	38,02	35,86	147,76	239,43	43,5	295,52	158,93	225,91	315,79	90,15	97,95	73,38	54,52	376,77	87,34	111,63
32,52	37,53	35,24	146,94	236,4	43,13	291,42	157,23	223,14	311,72	88,85	96,19	72,49	53,82	371,24	86,26	110,34
31,92	37,07	34,63	146,1	233,5	42,78	287,43	155,57	220,45	307,7	87,56	94,49	71,6	53,14	365,89	85,2	109,07
31,35	36,61	34,03	145,22	230,7	42,43	283,55	153,93	217,81	303,74	86,29	92,83	70,72	52,49	360,7	84,15	107,84
30,8	36,16	33,46	144,31	227,82	42,08	279,74	152,32	215,23	299,86	85,06	91,23	69,83	51,86	355,66	83,12	106,63
30,27	35,73	32,9	143,32	225,18	41,75	276	150,72	212,7	296,03	83,84	89,68	68,95	51,25	350,78	82,1	105,44
29,75	35,31	32,32	142,23	222,62	41,41	272,34	149,16	210,21	292,26	82,66	88,18	68,08	50,65	346,04	81,09	104,26
29,26	34,89	31,78	141,03	220,11	41,08	268,76	147,61	207,76	288,55	81,49	86,72	67,22	50,07	341,43	80,1	103,11
28,79	34,48	31,26	139,77	217,52	40,76	265,28	146,08	205,35	284,91	80,35	85,3	66,37	49,5	336,95	79,11	101,97
28,33	34,08	30,75	138,44	215,14	40,43	261,88	144,57	202,96	281,32	79,22	83,92	65,52	48,94	332,57	78,14	100,83
27,88	33,69	30,25	137,07	212,81	40,11	258,59	143,09	200,6	277,76	78,12	82,57	64,68	48,38	328,29	77,17	99,71
27,45	33,31	29,77	135,67	210,52	39,8	255,38	141,61	198,25	274,23	77,04	81,26	63,85	47,84	324,09	76,21	98,58
27,04	32,92	29,29	134,25	208,13	39,48	252,24	140,15	195,91	270,72	75,98	79,97	63,03	47,29	319,98	75,25	97,46
26,63	32,55	28,82	132,82	205,88	39,16	249,15	138,69	193,56	267,21	74,93	78,7	62,22	46,75	315,94	74,28	96,33
26,24	32,17	28,36	131,39	203,63	38,84	246,1	137,22	191,19	263,7	73,91	77,45	61,41	46,19	311,97	73,32	95,19
25,85	31,79	27,91	129,96	201,37	38,51	243,08	135,73	188,76	260,12	72,89	76,22	60,61	45,63	308,06	72,35	94,03
25,47	31,4	27,45	128,52	198,95	38,18	240,05	134,21	186,26	256,44	71,88	75,01	59,8	45,06	304,16	71,36	92,84
25,1	31	26,99	127,05	196,61	37,82	237,01	132,64	183,64	252,61	70,87	73,79	58,98	44,47	300,23	70,34	91,6
24,71	30,58	26,53	125,41	194,12	37,4	233,7	130,93	180,79	248,47	69,82	72,54	58,12	43,8	296,07	69,24	90,23

ANEXO VII: VELOCIDAD DEL VIENTO A 10 M DE ALTURA

		Angola	Benin	Botsana	Burkina Faso	Burundi	Cabo Verde	Camerun	Chad	Comoras	Costa de Marfil	Eritrea	Etiopia	Gabón	Gambia	Ghana
Percentile																
Max	2	3,77	3,63	4,46	4,06	3,74	7,95	3,96	7,6	3,69	3,32	6,85	5,29	2,87	4,34	3,98
	4	3,66	3,48	4,23	3,99	3,52	7,63	3,74	7,27	3,58	3,17	6,51	4,96	2,64	4,19	3,69
	6	3,59	3,41	4,11	3,95	3,38	7,41	3,57	7,05	3,5	3,1	6,28	4,77	2,45	4,01	3,52
	8	3,53	3,36	4,03	3,91	3,27	7,22	3,43	6,86	3,43	3,04	6,09	4,63	2,3	3,88	3,41
	10	3,48	3,31	3,97	3,89	3,19	7,06	3,3	6,71	3,36	3	5,92	4,52	2,18	3,78	3,32
	12	3,43	3,28	3,93	3,86	3,12	6,91	3,17	6,59	3,31	2,97	5,77	4,43	2,08	3,72	3,25
	14	3,39	3,25	3,9	3,84	3,06	6,78	3,04	6,49	3,26	2,94	5,64	4,35	2	3,67	3,2
	16	3,35	3,23	3,87	3,81	3	6,66	2,93	6,4	3,22	2,92	5,53	4,29	1,93	3,62	3,15
	18	3,31	3,2	3,84	3,79	2,95	6,56	2,83	6,32	3,18	2,9	5,43	4,23	1,88	3,59	3,11
	20	3,27	3,18	3,82	3,78	2,91	6,47	2,74	6,25	3,14	2,88	5,33	4,18	1,82	3,56	3,08
	22	3,23	3,16	3,8	3,76	2,87	6,38	2,66	6,18	3,11	2,86	5,25	4,13	1,78	3,53	3,04
	24	3,19	3,14	3,78	3,74	2,84	6,3	2,6	6,12	3,07	2,84	5,16	4,08	1,73	3,51	3,01
	26	3,14	3,12	3,76	3,73	2,8	6,23	2,53	6,07	3,04	2,82	5,09	4,03	1,7	3,48	2,99
	28	3,1	3,11	3,74	3,71	2,77	6,16	2,48	6,01	3,01	2,81	5,02	3,99	1,66	3,46	2,96
	30	3,06	3,09	3,73	3,7	2,74	6,09	2,42	5,96	2,98	2,79	4,95	3,94	1,63	3,45	2,94
	32	3,02	3,07	3,72	3,68	2,71	6,03	2,38	5,91	2,96	2,78	4,89	3,9	1,6	3,43	2,91
	34	2,98	3,06	3,7	3,67	2,68	5,97	2,33	5,85	2,93	2,77	4,83	3,86	1,58	3,41	2,89
	36	2,94	3,04	3,69	3,65	2,66	5,92	2,29	5,8	2,91	2,75	4,78	3,81	1,55	3,4	2,87
	38	2,9	3,03	3,68	3,64	2,63	5,87	2,25	5,75	2,88	2,74	4,72	3,77	1,53	3,38	2,85
	40	2,86	3,01	3,66	3,62	2,61	5,82	2,22	5,7	2,86	2,73	4,67	3,73	1,51	3,37	2,83
	42	2,82	3	3,65	3,61	2,59	5,77	2,18	5,64	2,83	2,72	4,62	3,69	1,49	3,35	2,81
	44	2,79	2,98	3,64	3,59	2,57	5,72	2,15	5,59	2,81	2,7	4,57	3,65	1,47	3,34	2,79
	46	2,76	2,96	3,63	3,58	2,54	5,68	2,12	5,54	2,79	2,69	4,53	3,61	1,45	3,33	2,78
	48	2,73	2,95	3,61	3,57	2,52	5,63	2,09	5,49	2,76	2,68	4,48	3,58	1,44	3,32	2,76
	50	2,7	2,93	3,6	3,55	2,5	5,59	2,06	5,44	2,74	2,67	4,44	3,54	1,42	3,31	2,74
	52	2,67	2,92	3,59	3,54	2,48	5,55	2,03	5,39	2,72	2,66	4,4	3,5	1,41	3,29	2,72
	54	2,64	2,9	3,58	3,52	2,47	5,51	2,01	5,35	2,7	2,64	4,36	3,46	1,39	3,28	2,71
	56	2,62	2,89	3,57	3,51	2,45	5,47	1,98	5,3	2,68	2,63	4,32	3,43	1,38	3,27	2,69
	58	2,59	2,87	3,56	3,49	2,43	5,43	1,96	5,25	2,66	2,62	4,28	3,39	1,37	3,26	2,67
	60	2,57	2,85	3,55	3,48	2,41	5,39	1,93	5,21	2,64	2,6	4,24	3,35	1,36	3,25	2,66
	62	2,54	2,84	3,53	3,47	2,4	5,36	1,91	5,16	2,62	2,59	4,2	3,32	1,34	3,24	2,64
	64	2,52	2,82	3,52	3,45	2,38	5,32	1,89	5,11	2,6	2,57	4,17	3,28	1,33	3,23	2,63
	66	2,5	2,8	3,51	3,44	2,36	5,28	1,87	5,06	2,58	2,56	4,13	3,25	1,32	3,22	2,61
	68	2,48	2,79	3,5	3,42	2,34	5,24	1,84	5,01	2,56	2,55	4,09	3,21	1,31	3,21	2,59
	70	2,45	2,77	3,49	3,41	2,33	5,21	1,82	4,97	2,54	2,53	4,06	3,18	1,3	3,19	2,58
	72	2,43	2,75	3,48	3,4	2,31	5,17	1,8	4,92	2,52	2,52	4,02	3,15	1,29	3,18	2,56
	74	2,41	2,74	3,47	3,38	2,3	5,13	1,78	4,87	2,5	2,5	3,99	3,11	1,28	3,17	2,55
	76	2,39	2,72	3,46	3,37	2,28	5,09	1,77	4,82	2,48	2,49	3,95	3,08	1,27	3,16	2,53
	78	2,37	2,71	3,45	3,35	2,26	5,05	1,75	4,78	2,46	2,47	3,92	3,05	1,26	3,15	2,51
	80	2,35	2,69	3,43	3,34	2,25	5	1,73	4,73	2,43	2,46	3,88	3,01	1,25	3,14	2,5
	82	2,33	2,67	3,42	3,33	2,23	4,96	1,71	4,69	2,41	2,44	3,85	2,98	1,25	3,13	2,48
	84	2,32	2,66	3,41	3,31	2,21	4,91	1,69	4,64	2,39	2,43	3,82	2,95	1,24	3,12	2,46
	86	2,3	2,64	3,4	3,3	2,2	4,86	1,68	4,6	2,37	2,41	3,78	2,91	1,23	3,11	2,45
	88	2,28	2,62	3,39	3,28	2,18	4,81	1,66	4,56	2,36	2,4	3,75	2,88	1,22	3,1	2,43
	90	2,26	2,61	3,38	3,27	2,16	4,76	1,65	4,51	2,34	2,38	3,72	2,85	1,21	3,09	2,42
	92	2,24	2,59	3,36	3,25	2,14	4,71	1,63	4,47	2,32	2,36	3,68	2,81	1,2	3,07	2,4
	94	2,22	2,57	3,35	3,23	2,12	4,65	1,61	4,43	2,3	2,35	3,65	2,78	1,19	3,06	2,38
	96	2,2	2,55	3,33	3,22	2,1	4,6	1,6	4,39	2,28	2,33	3,61	2,74	1,19	3,05	2,37
	98	2,18	2,54	3,31	3,2	2,08	4,54	1,58	4,34	2,25	2,31	3,57	2,71	1,18	3,04	2,35
Average	100	2,15	2,52	3,29	3,18	2,06	4,48	1,56	4,29	2,23	2,29	3,53	2,67	1,16	3,02	2,33

ANEXO VII: VELOCIDAD DEL VIENTO A 10 M DE ALTURA
(CONTINUACIÓN)

Guinea	Guinea Ecuatorial	Guinea-Bisáu	Kenia	Lesoto	Liberia	Madagascar	Malawi	Mali	Mauricio	Mauritania	Mozambique	Namibia	Niger	Nigeria	República Centroafricana	República del Congo
2,99	2,41	3,86	8,11	8,04	2,62	6,16	4,88	5,15	6,47	6,35	4,45	5,6	6,42	4,29	3,14	2,8
2,86	2,2	3,69	7,17	7,4	2,52	5,65	4,65	5,11	6,39	6,2	4,15	5,21	6,01	4,14	3	2,63
2,78	2,08	3,55	6,58	7,03	2,47	5,34	4,51	5,08	6,23	6,1	3,98	4,98	5,79	4,05	2,88	2,52
2,73	2	3,44	6,15	6,76	2,44	5,11	4,41	5,06	6,06	6,02	3,86	4,84	5,66	3,98	2,75	2,44
2,68	1,93	3,34	5,81	6,55	2,41	4,94	4,32	5,04	5,91	5,96	3,76	4,72	5,56	3,92	2,65	2,37
2,64	1,87	3,26	5,54	6,38	2,39	4,8	4,25	5,03	5,79	5,9	3,69	4,63	5,48	3,88	2,57	2,31
2,6	1,83	3,19	5,33	6,23	2,36	4,68	4,18	5,02	5,68	5,85	3,62	4,55	5,42	3,83	2,5	2,27
2,57	1,78	3,13	5,16	6,1	2,35	4,57	4,12	5	5,58	5,8	3,56	4,48	5,36	3,8	2,45	2,22
2,54	1,74	3,08	5,02	5,98	2,33	4,48	4,06	4,99	5,5	5,76	3,51	4,42	5,31	3,76	2,4	2,19
2,51	1,71	3,03	4,89	5,88	2,31	4,4	4,01	4,98	5,42	5,72	3,46	4,36	5,27	3,73	2,36	2,15
2,49	1,67	2,99	4,79	5,78	2,3	4,32	3,96	4,97	5,36	5,68	3,41	4,31	5,23	3,7	2,32	2,12
2,46	1,64	2,96	4,7	5,69	2,28	4,25	3,92	4,96	5,3	5,65	3,37	4,27	5,19	3,68	2,29	2,08
2,44	1,61	2,92	4,62	5,61	2,27	4,19	3,87	4,95	5,23	5,62	3,33	4,23	5,15	3,65	2,26	2,05
2,42	1,59	2,89	4,54	5,53	2,25	4,13	3,83	4,94	5,18	5,6	3,3	4,19	5,11	3,62	2,23	2,02
2,4	1,56	2,87	4,48	5,45	2,24	4,07	3,8	4,93	5,12	5,58	3,26	4,16	5,07	3,6	2,21	1,99
2,38	1,54	2,84	4,42	5,38	2,23	4,02	3,76	4,92	5,07	5,55	3,23	4,13	5,04	3,58	2,18	1,96
2,36	1,52	2,82	4,36	5,31	2,21	3,96	3,73	4,91	5,02	5,53	3,2	4,1	5,01	3,55	2,16	1,94
2,35	1,5	2,79	4,31	5,24	2,2	3,92	3,69	4,9	4,97	5,51	3,17	4,07	4,98	3,53	2,14	1,91
2,33	1,48	2,77	4,26	5,17	2,19	3,87	3,66	4,88	4,93	5,49	3,14	4,04	4,95	3,5	2,12	1,88
2,31	1,46	2,75	4,22	5,11	2,18	3,82	3,63	4,87	4,89	5,47	3,11	4,02	4,92	3,48	2,11	1,85
2,3	1,45	2,73	4,18	5,05	2,16	3,78	3,6	4,86	4,84	5,46	3,08	4	4,89	3,46	2,09	1,83
2,28	1,43	2,71	4,14	4,99	2,15	3,74	3,57	4,85	4,8	5,44	3,05	3,97	4,86	3,43	2,07	1,8
2,27	1,42	2,69	4,1	4,93	2,14	3,7	3,55	4,83	4,76	5,43	3,02	3,95	4,84	3,41	2,06	1,78
2,26	1,4	2,68	4,07	4,88	2,13	3,66	3,52	4,82	4,73	5,41	3	3,93	4,81	3,39	2,04	1,76
2,24	1,39	2,66	4,03	4,83	2,11	3,62	3,49	4,8	4,69	5,4	2,97	3,91	4,79	3,36	2,03	1,74
2,23	1,38	2,64	4	4,77	2,1	3,58	3,47	4,79	4,65	5,38	2,94	3,89	4,77	3,34	2,01	1,72
2,22	1,37	2,63	3,97	4,72	2,09	3,55	3,44	4,77	4,62	5,37	2,92	3,87	4,75	3,31	2	1,7
2,2	1,35	2,61	3,94	4,67	2,08	3,51	3,42	4,75	4,58	5,35	2,89	3,86	4,72	3,29	1,99	1,68
2,19	1,34	2,6	3,91	4,62	2,06	3,48	3,4	4,73	4,55	5,34	2,87	3,84	4,7	3,26	1,98	1,66
2,18	1,33	2,58	3,88	4,58	2,05	3,45	3,37	4,71	4,52	5,33	2,85	3,82	4,68	3,24	1,96	1,64
2,17	1,32	2,57	3,85	4,53	2,03	3,42	3,35	4,69	4,48	5,32	2,82	3,81	4,66	3,22	1,95	1,63
2,15	1,31	2,55	3,82	4,49	2,02	3,38	3,33	4,66	4,45	5,3	2,8	3,79	4,64	3,19	1,94	1,61
2,14	1,3	2,54	3,79	4,44	2	3,35	3,31	4,64	4,42	5,29	2,78	3,77	4,62	3,17	1,93	1,6
2,13	1,29	2,53	3,77	4,4	1,98	3,32	3,28	4,61	4,39	5,28	2,76	3,76	4,6	3,14	1,92	1,58
2,12	1,28	2,52	3,74	4,36	1,97	3,29	3,26	4,59	4,36	5,27	2,74	3,74	4,58	3,12	1,91	1,56
2,11	1,28	2,5	3,71	4,32	1,95	3,26	3,24	4,56	4,33	5,25	2,72	3,73	4,57	3,09	1,9	1,55
2,1	1,27	2,49	3,68	4,27	1,93	3,24	3,22	4,54	4,31	5,24	2,7	3,71	4,55	3,07	1,89	1,53
2,09	1,26	2,48	3,65	4,23	1,92	3,21	3,19	4,51	4,28	5,23	2,68	3,69	4,53	3,04	1,87	1,52
2,08	1,25	2,47	3,62	4,19	1,9	3,18	3,17	4,48	4,25	5,22	2,66	3,68	4,51	3,02	1,86	1,51
2,07	1,24	2,46	3,59	4,16	1,89	3,15	3,15	4,45	4,23	5,2	2,64	3,66	4,49	3	1,85	1,49
2,05	1,23	2,45	3,56	4,12	1,87	3,13	3,13	4,42	4,2	5,19	2,62	3,65	4,47	2,97	1,84	1,48
2,04	1,23	2,44	3,53	4,08	1,86	3,1	3,1	4,39	4,17	5,17	2,6	3,63	4,45	2,95	1,83	1,47
2,03	1,22	2,43	3,5	4,04	1,84	3,07	3,08	4,37	4,15	5,15	2,58	3,62	4,43	2,92	1,82	1,45
2,02	1,21	2,42	3,47	4	1,82	3,04	3,06	4,34	4,12	5,13	2,57	3,6	4,42	2,89	1,81	1,44
2,01	1,2	2,41	3,44	3,97	1,81	3,02	3,03	4,31	4,1	5,11	2,55	3,58	4,4	2,87	1,8	1,43
2	1,2	2,4	3,41	3,93	1,79	2,99	3,01	4,27	4,07	5,09	2,53	3,57	4,38	2,84	1,79	1,41
1,98	1,19	2,39	3,37	3,89	1,78	2,96	2,98	4,24	4,05	5,06	2,51	3,55	4,36	2,82	1,77	1,4
1,97	1,18	2,38	3,34	3,85	1,76	2,93	2,95	4,2	4,02	5,04	2,49	3,53	4,34	2,79	1,76	1,39
1,96	1,17	2,37	3,3	3,81	1,75	2,9	2,92	4,17	4	5,01	2,47	3,51	4,31	2,76	1,74	1,38
1,94	1,16	2,36	3,26	3,77	1,73	2,87	2,89	4,12	3,96	4,98	2,45	3,48	4,29	2,72	1,72	1,37

ANEXO VII: VELOCIDAD DEL VIENTO A 10 M DE ALTURA (CONTINUACIÓN)

Zimbabwe	Zambia	Yibuti	Uganda	Togo	Tanzania	Sudán del Sur	Sudán	Sudáfrica	Suazilandia	Somalia	Sierra Leona	Seychelles	Senegal	Santo Tomé y Príncipe	Ruanda	República Dem. del Congo
4,14	3,98	3,86	3,75	3,66	3,57	3,43	3,34	3,21	3,17	3,13	3,06	3,02	2,97	2,93	2,89	2,86
3,98	3,89	3,81	3,75	3,66	3,57	3,44	3,38	3,34	3,28	3,24	3,18	3,14	3,08	3,04	2,98	2,94
3,89	3,81	3,75	3,66	3,57	3,44	3,38	3,34	3,28	3,24	3,18	3,14	3,08	3,04	2,98	2,94	2,90
3,81	3,75	3,66	3,57	3,44	3,38	3,34	3,28	3,24	3,18	3,14	3,08	3,04	2,98	2,94	2,90	2,86
3,75	3,66	3,57	3,44	3,38	3,34	3,28	3,24	3,18	3,14	3,08	3,04	2,98	2,94	2,90	2,86	2,82
3,66	3,57	3,44	3,38	3,34	3,28	3,24	3,18	3,14	3,08	3,04	2,98	2,94	2,90	2,86	2,82	2,78
3,57	3,44	3,38	3,34	3,28	3,24	3,18	3,14	3,08	3,04	2,98	2,94	2,90	2,86	2,82	2,78	2,74
3,43	3,34	3,21	3,17	3,13	3,06	3,02	2,97	2,93	2,89	2,86	2,82	2,78	2,74	2,70	2,66	2,62
3,34	3,21	3,17	3,13	3,06	3,02	2,97	2,93	2,89	2,86	2,82	2,78	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58
3,21	3,17	3,13	3,06	3,02	2,97	2,93	2,89	2,86	2,82	2,78	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
3,17	3,13	3,06	3,02	2,97	2,93	2,89	2,86	2,82	2,78	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	2,50
3,13	3,06	3,02	2,97	2,93	2,89	2,86	2,82	2,78	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	2,50	2,46
3,06	3,02	2,97	2,93	2,89	2,86	2,82	2,78	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	2,50	2,46	2,42
3,02	2,97	2,93	2,89	2,86	2,82	2,78	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	2,50	2,46	2,42	2,38
2,97	2,93	2,89	2,86	2,82	2,78	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	2,50	2,46	2,42	2,38	2,34
2,93	2,89	2,86	2,82	2,78	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	2,50	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30
2,89	2,86	2,82	2,78	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	2,50	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,26
2,86	2,82	2,78	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	2,50	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,26	2,22
2,82	2,78	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	2,50	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,26	2,22	2,18
2,78	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	2,50	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,26	2,22	2,18	2,14
2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	2,50	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,26	2,22	2,18	2,14	2,10
2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	2,50	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,26	2,22	2,18	2,14	2,10	2,06
2,66	2,62	2,58	2,54	2,50	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,26	2,22	2,18	2,14	2,10	2,06	2,02
2,62	2,58	2,54	2,50	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,26	2,22	2,18	2,14	2,10	2,06	2,02	1,98
2,58	2,54	2,50	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,26	2,22	2,18	2,14	2,10	2,06	2,02	1,98	1,94
2,54	2,50	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,26	2,22	2,18	2,14	2,10	2,06	2,02	1,98	1,94	1,90
2,50	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,26	2,22	2,18	2,14	2,10	2,06	2,02	1,98	1,94	1,90	1,86
2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,26	2,22	2,18	2,14	2,10	2,06	2,02	1,98	1,94	1,90	1,86	1,82
2,42	2,38	2,34	2,30	2,26	2,22	2,18	2,14	2,10	2,06	2,02	1,98	1,94	1,90	1,86	1,82	1,78
2,38	2,34	2,30	2,26	2,22	2,18	2,14	2,10	2,06	2,02	1,98	1,94	1,90	1,86	1,82	1,78	1,74
2,34	2,30	2,26	2,22	2,18	2,14	2,10	2,06	2,02	1,98	1,94	1,90	1,86	1,82	1,78	1,74	1,70
2,30	2,26	2,22	2,18	2,14	2,10	2,06	2,02	1,98	1,94	1,90	1,86	1,82	1,78	1,74	1,70	1,66
2,26	2,22	2,18	2,14	2,10	2,06	2,02	1,98	1,94	1,90	1,86	1,82	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62
2,22	2,18	2,14	2,10	2,06	2,02	1,98	1,94	1,90	1,86	1,82	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,58
2,18	2,14	2,10	2,06	2,02	1,98	1,94	1,90	1,86	1,82	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,58	1,54
2,14	2,10	2,06	2,02	1,98	1,94	1,90	1,86	1,82	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,58	1,54	1,50
2,10	2,06	2,02	1,98	1,94	1,90	1,86	1,82	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,58	1,54	1,50	1,46
2,06	2,02	1,98	1,94	1,90	1,86	1,82	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,58	1,54	1,50	1,46	1,42
2,02	1,98	1,94	1,90	1,86	1,82	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,58	1,54	1,50	1,46	1,42	1,38
1,98	1,94	1,90	1,86	1,82	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,58	1,54	1,50	1,46	1,42	1,38	1,34
1,94	1,90	1,86	1,82	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,58	1,54	1,50	1,46	1,42	1,38	1,34	1,30
1,90	1,86	1,82	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,58	1,54	1,50	1,46	1,42	1,38	1,34	1,30	1,26
1,86	1,82	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,58	1,54	1,50	1,46	1,42	1,38	1,34	1,30	1,26	1,22
1,82	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,58	1,54	1,50	1,46	1,42	1,38	1,34	1,30	1,26	1,22	1,18
1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,58	1,54	1,50	1,46	1,42	1,38	1,34	1,30	1,26	1,22	1,18	1,14
1,74	1,70	1,66	1,62	1,58	1,54	1,50	1,46	1,42	1,38	1,34	1,30	1,26	1,22	1,18	1,14	1,10
1,70	1,66	1,62	1,58	1,54	1,50	1,46	1,42	1,38	1,34	1,30	1,26	1,22	1,18	1,14	1,10	1,06
1,66	1,62	1,58	1,54	1,50	1,46	1,42	1,38	1,34	1,30	1,26	1,22	1,18	1,14	1,10	1,06	1,02
1,62	1,58	1,54	1,50	1,46	1,42	1,38	1,34	1,30	1,26	1,22	1,18	1,14	1,10	1,06	1,02	98
1,58	1,54	1,50	1,46	1,42	1,38	1,34	1,30	1,26	1,22	1,18	1,14	1,10	1,06	1,02	98	94
1,54	1,50	1,46	1,42	1,38	1,34	1,30	1,26	1,22	1,18	1,14	1,10	1,06	1,02	98	94	90
1,50	1,46	1,42	1,38	1,34	1,30	1,26	1,22	1,18	1,14	1,10	1,06	1,02	98	94	90	86
1,46	1,42	1,38	1,34	1,30	1,26	1,22	1,18	1,14	1,10	1,06	1,02	98	94	90	86	82
1,42	1,38	1,34	1,30	1,26	1,22	1,18	1,14	1,10	1,06	1,02	98	94	90	86	82	78
1,38	1,34	1,30	1,26	1,22	1,18	1,14	1,10	1,06	1,02	98	94	90	86	82	78	74
1,34	1,30	1,26	1,22	1,18	1,14	1,10	1,06	1,02	98	94	90	86	82	78	74	70
1,30	1,26	1,22	1,18	1,14	1,10	1,06	1,02	98	94	90	86	82	78	74	70	66
1,26	1,22	1,18	1,14	1,10	1,06	1,02	98	94	90	86	82	78	74	70	66	62
1,22	1,18	1,14	1,10	1,06	1,02	98	94	90	86	82	78	74	70	66	62	58
1,18	1,14	1,10	1,06	1,02	98	94	90	86	82	78	74	70	66	62	58	54
1,14	1,10	1,06	1,02	98	94	90	86	82	78	74	70	66	62	58	54	50
1,10	1,06	1,02	98	94	90	86	82	78	74	70	66	62	58	54	50	46
1,06	1,02	98	94	90	86	82	78	74	70	66	62	58	54	50	46	42
1,02	98	94	90	86	82	78	74	70	66	62	58	54	50	46	42	38
98	94	90	86	82	78	74	70	66	62	58	54	50	46	42	38	34
94	90	86	82	78	74	70	66	62	58	54	50	46	42	38	34	30
90	86	82	78	74	70	66	62	58	54	50	46	42	38	34	30	26
86	82	78	74	70	66	62	58	54	50	46	42	38	34	30	26	22
82	78	74	70	66	62	58	54	50	46	42	38	34	30	26	22	18
78	74	70	66	62	58	54	50	46	42	38	34	30	26	22	18	14
74	70	66	62	58	54	50	46	42	38	34	30	26	22	18	14	10
70	66	62	58	54	50	46	42	38	34	30	26	22	18	14	10	6
66	62	58	54	50	46	42	38	34	30	26	22	18	14	10	6	2
62	58	54	50	46	42	38	34	30	26	22	18	14	10	6	2	

ANEXO VIII: VELOCIDAD DEL VIENTO A 50 M DE ALTURA

		Angola	Benin	Botswana	Burkina Faso	Burundi	Cabo Verde	Camerun	Chad	Comoras	Costa de Marfil	Eritrea	Etiopia	Gabón	Gambia	Ghana
Percentile																
Max	2	5,23	5,16	6,15	5,67	4,94	9,74	5,68	9,8	4,8	4,65	8,79	7,29	4,03	5,3	5,59
	4	5,11	5,03	5,97	5,6	4,67	9,39	5,42	9,45	4,68	4,53	8,46	6,93	3,82	5,21	5,23
	6	5,03	4,94	5,85	5,55	4,53	9,16	5,21	9,2	4,6	4,46	8,21	6,7	3,64	5,15	5,02
	8	4,97	4,89	5,77	5,51	4,42	8,97	5,02	9	4,53	4,41	7,99	6,54	3,51	5,1	4,87
	10	4,92	4,84	5,71	5,48	4,33	8,8	4,86	8,83	4,48	4,36	7,79	6,4	3,39	5,07	4,77
	12	4,87	4,8	5,66	5,46	4,26	8,65	4,69	8,7	4,43	4,33	7,61	6,29	3,3	5,04	4,69
	14	4,82	4,76	5,62	5,43	4,2	8,51	4,53	8,58	4,39	4,29	7,46	6,2	3,23	5,02	4,62
	16	4,78	4,73	5,59	5,41	4,14	8,37	4,39	8,48	4,35	4,26	7,32	6,11	3,16	4,99	4,56
	18	4,74	4,7	5,56	5,39	4,09	8,25	4,26	8,4	4,31	4,24	7,2	6,04	3,11	4,98	4,51
	20	4,7	4,67	5,53	5,38	4,04	8,13	4,15	8,32	4,28	4,21	7,08	5,97	3,06	4,96	4,47
	22	4,65	4,65	5,5	5,36	4	8,03	4,06	8,24	4,25	4,19	6,97	5,9	3,02	4,94	4,43
	24	4,61	4,62	5,48	5,34	3,95	7,94	3,97	8,17	4,23	4,17	6,87	5,83	2,98	4,93	4,39
	26	4,56	4,6	5,46	5,33	3,91	7,86	3,89	8,11	4,2	4,15	6,77	5,77	2,95	4,91	4,36
	28	4,51	4,58	5,44	5,31	3,88	7,78	3,82	8,04	4,17	4,13	6,68	5,7	2,92	4,9	4,33
	30	4,47	4,56	5,42	5,3	3,84	7,71	3,75	7,98	4,15	4,11	6,6	5,64	2,89	4,88	4,3
	32	4,43	4,53	5,4	5,28	3,81	7,65	3,69	7,92	4,12	4,1	6,52	5,58	2,86	4,87	4,27
	34	4,38	4,51	5,38	5,26	3,77	7,59	3,64	7,85	4,1	4,08	6,45	5,52	2,84	4,86	4,24
	36	4,34	4,49	5,37	5,25	3,74	7,53	3,59	7,79	4,07	4,06	6,38	5,46	2,81	4,84	4,22
	38	4,3	4,47	5,35	5,23	3,71	7,48	3,54	7,73	4,05	4,05	6,32	5,4	2,79	4,83	4,19
	40	4,26	4,46	5,33	5,22	3,68	7,43	3,49	7,66	4,02	4,03	6,26	5,35	2,77	4,82	4,17
	42	4,23	4,44	5,32	5,2	3,66	7,38	3,45	7,6	4	4,02	6,2	5,29	2,75	4,81	4,14
	44	4,19	4,42	5,3	5,18	3,63	7,33	3,41	7,54	3,98	4	6,14	5,24	2,73	4,8	4,12
	46	4,16	4,4	5,28	5,17	3,6	7,29	3,37	7,48	3,96	3,99	6,08	5,18	2,72	4,78	4,1
	48	4,13	4,38	5,27	5,15	3,57	7,24	3,34	7,42	3,93	3,97	6,03	5,13	2,7	4,77	4,08
	50	4,1	4,36	5,25	5,13	3,55	7,2	3,31	7,36	3,91	3,96	5,97	5,08	2,68	4,76	4,06
	52	4,07	4,34	5,24	5,11	3,52	7,16	3,27	7,3	3,89	3,95	5,92	5,02	2,67	4,75	4,04
	54	4,04	4,32	5,22	5,1	3,5	7,11	3,24	7,25	3,87	3,93	5,87	4,97	2,65	4,74	4,02
	56	4,01	4,31	5,2	5,08	3,47	7,07	3,22	7,19	3,85	3,92	5,83	4,92	2,64	4,73	4
	58	3,98	4,29	5,19	5,06	3,45	7,03	3,19	7,13	3,82	3,9	5,78	4,87	2,62	4,72	3,98
	60	3,95	4,27	5,17	5,04	3,43	6,99	3,16	7,07	3,8	3,89	5,73	4,82	2,61	4,71	3,96
	62	3,93	4,25	5,16	5,02	3,4	6,94	3,14	7,01	3,78	3,88	5,69	4,77	2,6	4,7	3,95
	64	3,9	4,23	5,14	5,01	3,38	6,9	3,11	6,95	3,76	3,86	5,64	4,72	2,58	4,68	3,93
	66	3,87	4,21	5,13	4,99	3,36	6,86	3,09	6,89	3,74	3,85	5,6	4,68	2,57	4,67	3,91
	68	3,85	4,19	5,11	4,97	3,33	6,81	3,06	6,84	3,72	3,83	5,55	4,63	2,56	4,66	3,89
	70	3,82	4,18	5,1	4,95	3,31	6,77	3,04	6,78	3,7	3,82	5,51	4,58	2,55	4,65	3,87
	72	3,8	4,16	5,08	4,94	3,29	6,72	3,02	6,72	3,68	3,81	5,46	4,54	2,53	4,64	3,86
	74	3,77	4,14	5,07	4,92	3,26	6,67	3	6,66	3,66	3,79	5,42	4,49	2,52	4,64	3,84
	76	3,75	4,12	5,06	4,9	3,24	6,63	2,98	6,6	3,63	3,78	5,38	4,45	2,51	4,63	3,82
	78	3,72	4,1	5,04	4,88	3,22	6,57	2,96	6,54	3,61	3,76	5,34	4,4	2,5	4,62	3,8
	80	3,7	4,08	5,03	4,87	3,2	6,52	2,94	6,49	3,59	3,75	5,29	4,36	2,48	4,61	3,79
	82	3,67	4,07	5,01	4,85	3,17	6,46	2,92	6,43	3,57	3,73	5,25	4,31	2,47	4,6	3,77
	84	3,65	4,05	5	4,83	3,15	6,4	2,9	6,38	3,55	3,71	5,21	4,27	2,46	4,59	3,75
	86	3,62	4,03	4,98	4,81	3,13	6,34	2,88	6,32	3,53	3,7	5,17	4,22	2,45	4,58	3,73
	88	3,6	4,01	4,97	4,79	3,1	6,28	2,86	6,27	3,51	3,68	5,12	4,18	2,43	4,57	3,72
	90	3,57	3,99	4,95	4,77	3,08	6,22	2,84	6,22	3,49	3,66	5,08	4,13	2,42	4,56	3,7
	92	3,55	3,97	4,94	4,75	3,05	6,15	2,82	6,17	3,46	3,65	5,04	4,09	2,41	4,55	3,68
	94	3,52	3,95	4,92	4,73	3,03	6,08	2,8	6,12	3,44	3,63	4,99	4,04	2,39	4,54	3,66
	96	3,49	3,93	4,9	4,71	3	6,02	2,78	6,07	3,42	3,61	4,95	3,99	2,37	4,53	3,64
	98	3,46	3,9	4,88	4,69	2,97	5,94	2,76	6,01	3,39	3,59	4,9	3,94	2,36	4,52	3,62
Average	100	3,43	3,88	4,86	4,66	2,94	5,86	2,73	5,94	3,36	3,57	4,84	3,89	2,34	4,51	3,6

ANEXO VIII: VELOCIDAD DEL VIENTO A 50 M DE ALTURA (CONTINUACIÓN)

Guinea	Guinea Ecuatorial	Guinea-Bisáu	Kenia	Lesoto	Liberia	Madagascar	Malawi	Mali	Mauricio	Mauritania	Mozambique	Namibia	Niger	Nigeria	República Centroafricana	República del Congo
4,44	3,48	4,91	10,51	9,69	3,74	8,45	6,97	6,99	7,82	8,48	6,02	7,29	8,37	6,11	4,61	4,1
4,28	3,29	4,78	9,46	9,11	3,66	7,87	6,7	6,94	7,71	8,32	5,76	6,83	7,93	5,94	4,42	3,89
4,19	3,19	4,69	8,77	8,76	3,62	7,5	6,53	6,9	7,66	8,2	5,6	6,59	7,7	5,83	4,29	3,77
4,13	3,11	4,62	8,25	8,5	3,59	7,23	6,39	6,88	7,6	8,11	5,48	6,43	7,55	5,75	4,17	3,67
4,07	3,05	4,56	7,85	8,29	3,56	7,01	6,28	6,86	7,53	8,03	5,38	6,3	7,44	5,68	4,06	3,59
4,02	3,01	4,51	7,55	8,12	3,54	6,83	6,18	6,84	7,46	7,96	5,3	6,2	7,35	5,62	3,98	3,53
3,98	2,96	4,47	7,3	7,96	3,51	6,68	6,08	6,82	7,4	7,89	5,23	6,11	7,28	5,57	3,9	3,47
3,95	2,92	4,43	7,1	7,82	3,49	6,55	6	6,81	7,34	7,83	5,16	6,03	7,22	5,52	3,84	3,42
3,91	2,89	4,39	6,93	7,7	3,47	6,44	5,92	6,79	7,27	7,78	5,1	5,96	7,16	5,48	3,79	3,38
3,88	2,86	4,36	6,79	7,58	3,45	6,33	5,85	6,78	7,21	7,74	5,04	5,9	7,1	5,44	3,74	3,33
3,85	2,83	4,33	6,66	7,48	3,43	6,23	5,78	6,76	7,15	7,69	4,99	5,85	7,05	5,4	3,7	3,29
3,82	2,8	4,3	6,55	7,38	3,41	6,15	5,72	6,75	7,1	7,66	4,94	5,8	7	5,37	3,66	3,25
3,8	2,78	4,27	6,46	7,28	3,4	6,06	5,66	6,73	7,04	7,62	4,9	5,76	6,95	5,34	3,63	3,22
3,77	2,75	4,25	6,37	7,19	3,38	5,99	5,6	6,72	6,99	7,59	4,86	5,72	6,91	5,3	3,59	3,18
3,75	2,73	4,23	6,29	7,1	3,36	5,91	5,55	6,71	6,94	7,56	4,82	5,68	6,87	5,27	3,56	3,15
3,73	2,71	4,2	6,22	7,02	3,34	5,84	5,5	6,69	6,9	7,53	4,78	5,65	6,82	5,24	3,53	3,11
3,71	2,69	4,18	6,15	6,94	3,33	5,78	5,45	6,68	6,86	7,5	4,75	5,62	6,79	5,2	3,51	3,08
3,69	2,67	4,16	6,09	6,86	3,31	5,72	5,41	6,66	6,81	7,48	4,71	5,59	6,75	5,17	3,48	3,05
3,67	2,66	4,15	6,03	6,78	3,3	5,66	5,37	6,65	6,77	7,46	4,68	5,56	6,71	5,14	3,46	3,02
3,65	2,64	4,13	5,98	6,71	3,28	5,6	5,32	6,63	6,74	7,43	4,65	5,53	6,68	5,11	3,44	2,99
3,63	2,62	4,11	5,93	6,64	3,27	5,54	5,28	6,62	6,7	7,41	4,62	5,51	6,65	5,07	3,41	2,97
3,62	2,61	4,1	5,88	6,57	3,25	5,49	5,25	6,6	6,66	7,39	4,59	5,48	6,61	5,04	3,39	2,94
3,6	2,6	4,08	5,83	6,5	3,24	5,44	5,21	6,58	6,63	7,37	4,56	5,46	6,58	5,01	3,37	2,91
3,58	2,58	4,06	5,79	6,44	3,22	5,39	5,17	6,56	6,59	7,35	4,53	5,43	6,56	4,97	3,35	2,89
3,57	2,57	4,05	5,75	6,37	3,21	5,34	5,14	6,54	6,56	7,33	4,5	5,41	6,53	4,94	3,33	2,87
3,55	2,56	4,04	5,71	6,31	3,19	5,29	5,1	6,52	6,52	7,31	4,48	5,39	6,5	4,91	3,32	2,84
3,53	2,54	4,02	5,67	6,25	3,18	5,24	5,07	6,5	6,49	7,3	4,45	5,37	6,47	4,87	3,3	2,82
3,52	2,53	4,01	5,63	6,19	3,17	5,2	5,04	6,48	6,46	7,28	4,42	5,35	6,45	4,84	3,28	2,8
3,5	2,52	4	5,59	6,14	3,15	5,15	5,01	6,46	6,42	7,26	4,4	5,33	6,42	4,81	3,26	2,78
3,49	2,51	3,99	5,55	6,08	3,14	5,11	4,98	6,43	6,39	7,25	4,37	5,31	6,4	4,78	3,25	2,76
3,47	2,5	3,98	5,51	6,03	3,13	5,07	4,95	6,41	6,36	7,23	4,35	5,29	6,37	4,74	3,23	2,75
3,46	2,49	3,96	5,48	5,97	3,11	5,03	4,92	6,38	6,33	7,21	4,32	5,27	6,35	4,71	3,22	2,73
3,44	2,48	3,95	5,44	5,92	3,1	4,99	4,89	6,35	6,3	7,2	4,3	5,25	6,33	4,68	3,2	2,71
3,43	2,47	3,94	5,4	5,87	3,09	4,95	4,86	6,32	6,26	7,18	4,28	5,24	6,3	4,65	3,19	2,69
3,41	2,46	3,93	5,36	5,82	3,07	4,91	4,83	6,29	6,23	7,17	4,25	5,22	6,28	4,62	3,17	2,68
3,4	2,45	3,92	5,33	5,77	3,06	4,87	4,8	6,26	6,2	7,15	4,23	5,2	6,25	4,58	3,16	2,66
3,38	2,44	3,91	5,29	5,72	3,05	4,84	4,77	6,23	6,17	7,13	4,21	5,18	6,23	4,55	3,14	2,65
3,37	2,43	3,9	5,25	5,67	3,04	4,8	4,74	6,2	6,14	7,12	4,19	5,16	6,21	4,52	3,13	2,63
3,35	2,41	3,89	5,21	5,63	3,02	4,76	4,71	6,17	6,11	7,1	4,16	5,15	6,18	4,49	3,11	2,62
3,33	2,4	3,88	5,17	5,58	3,01	4,73	4,68	6,14	6,08	7,08	4,14	5,13	6,16	4,46	3,1	2,6
3,32	2,39	3,87	5,13	5,53	3	4,69	4,65	6,11	6,05	7,06	4,12	5,11	6,14	4,42	3,09	2,59
3,3	2,38	3,86	5,09	5,49	2,98	4,65	4,62	6,07	6,02	7,04	4,1	5,09	6,11	4,39	3,07	2,58
3,29	2,37	3,85	5,05	5,44	2,97	4,62	4,59	6,04	5,99	7,02	4,08	5,07	6,09	4,36	3,06	2,56
3,27	2,36	3,84	5,01	5,39	2,96	4,58	4,56	6,01	5,96	7	4,05	5,05	6,07	4,33	3,04	2,55
3,25	2,34	3,83	4,96	5,35	2,95	4,55	4,53	5,97	5,93	6,97	4,03	5,03	6,04	4,29	3,03	2,54
3,23	2,33	3,82	4,92	5,3	2,93	4,51	4,49	5,93	5,9	6,95	4,01	5,01	6,02	4,26	3,01	2,52
3,21	2,32	3,82	4,88	5,26	2,92	4,47	4,46	5,89	5,87	6,92	3,99	4,99	6	4,23	3	2,51
3,19	2,3	3,81	4,83	5,21	2,91	4,43	4,42	5,85	5,83	6,89	3,96	4,97	5,97	4,19	2,98	2,5
3,17	2,28	3,79	4,78	5,16	2,89	4,39	4,38	5,8	5,8	6,86	3,93	4,94	5,94	4,15	2,96	2,48
3,14	2,26	3,78	4,73	5,11	2,87	4,34	4,33	5,75	5,76	6,82	3,9	4,9	5,91	4,1	2,93	2,46

ANEXO VIII: VELOCIDAD DEL VIENTO A 50 M DE ALTURA (CONTINUACIÓN)

Zimbabwe	Zambia	Yibuti	Uganda	Togo	Tanzania	Sudán del Sur	Sudán	Sudáfrica	Suazilandia	Somalia	Sierra Leona	Seychelles	Senegal	Santo Tomé y Príncipe	Ruanda	República Dem. del Congo
5,92	5,71	9,57	5,14	5,09	7,41	5,7	8,88	7,76	6,06	8,39	4,12	7,59	5,8	4,46	4,68	4,82
5,75	5,71	9,26	4,82	4,92	6,87	5,44	8,55	7,26	5,88	8,12	3,95	7,56	5,7	4,31	4,36	4,45
5,64	5,54	9,06	4,6	4,81	6,54	5,28	8,37	6,97	5,76	7,94	3,85	7,52	5,63	4,19	4,17	4,23
5,55	5,42	8,91	4,44	4,74	6,3	5,16	8,24	6,78	5,67	7,81	3,78	7,49	5,57	4,1	4,04	4,06
5,47	5,33	8,79	4,32	4,68	6,11	5,07	8,14	6,63	5,59	7,7	3,72	7,46	5,53	4,02	3,94	3,93
5,41	5,25	8,69	4,23	4,64	5,95	5	8,05	6,51	5,53	7,61	3,67	7,43	5,5	3,95	3,86	3,82
5,35	5,18	8,6	4,15	4,6	5,82	4,93	7,97	6,42	5,48	7,53	3,63	7,37	5,47	3,88	3,79	3,73
5,3	5,12	8,52	4,08	4,56	5,7	4,87	7,9	6,34	5,43	7,46	3,6	7,23	5,44	3,82	3,73	3,65
5,25	5,07	8,45	4,02	4,53	5,59	4,82	7,83	6,27	5,38	7,39	3,57	7,12	5,42	3,77	3,67	3,58
5,2	5,02	8,37	3,98	4,5	5,49	4,77	7,77	6,2	5,34	7,33	3,54	7,03	5,4	3,72	3,62	3,51
5,16	4,98	8,29	3,93	4,47	5,39	4,72	7,71	6,14	5,31	7,27	3,51	6,94	5,38	3,67	3,58	3,45
5,12	4,94	8,2	3,89	4,44	5,31	4,67	7,66	6,09	5,27	7,21	3,49	6,87	5,36	3,63	3,54	3,39
5,08	4,9	8,12	3,86	4,42	5,23	4,63	7,6	6,04	5,24	7,16	3,47	6,8	5,34	3,59	3,51	3,34
5,05	4,87	8,05	3,82	4,39	5,16	4,59	7,56	6	5,21	7,11	3,45	6,74	5,33	3,55	3,47	3,29
5,01	4,84	7,97	3,79	4,37	5,1	4,54	7,51	5,95	5,18	7,07	3,43	6,68	5,31	3,51	3,44	3,25
4,98	4,81	7,89	3,76	4,35	5,03	4,5	7,46	5,91	5,15	7,02	3,41	6,62	5,3	3,48	3,41	3,21
4,94	4,78	7,82	3,73	4,33	4,97	4,47	7,42	5,88	5,12	6,98	3,4	6,57	5,29	3,44	3,38	3,17
4,91	4,75	7,75	3,7	4,3	4,92	4,43	7,38	5,84	5,1	6,94	3,38	6,52	5,27	3,41	3,36	3,13
4,88	4,72	7,68	3,67	4,28	4,87	4,39	7,34	5,81	5,07	6,9	3,37	6,47	5,26	3,37	3,33	3,1
4,85	4,7	7,61	3,64	4,26	4,82	4,36	7,3	5,78	5,04	6,86	3,35	6,43	5,25	3,34	3,31	3,06
4,82	4,67	7,54	3,62	4,24	4,77	4,33	7,26	5,75	5,02	6,83	3,34	6,39	5,24	3,31	3,28	3,03
4,79	4,65	7,48	3,59	4,22	4,72	4,3	7,22	5,72	5	6,79	3,32	6,35	5,23	3,28	3,26	3
4,77	4,63	7,42	3,57	4,2	4,68	4,27	7,19	5,69	4,97	6,76	3,31	6,31	5,21	3,24	3,24	2,97
4,74	4,6	7,36	3,54	4,18	4,64	4,24	7,15	5,66	4,95	6,72	3,3	6,27	5,2	3,21	3,22	2,94
4,71	4,58	7,3	3,52	4,15	4,59	4,22	7,12	5,63	4,93	6,69	3,28	6,23	5,19	3,18	3,2	2,91
4,69	4,56	7,24	3,5	4,13	4,55	4,19	7,08	5,61	4,91	6,66	3,27	6,2	5,18	3,15	3,18	2,88
4,66	4,54	7,19	3,48	4,11	4,52	4,16	7,04	5,58	4,88	6,63	3,26	6,16	5,17	3,12	3,16	2,85
4,64	4,52	7,13	3,46	4,09	4,48	4,14	7,01	5,55	4,86	6,59	3,25	6,12	5,16	3,09	3,14	2,83
4,61	4,49	7,08	3,44	4,07	4,44	4,12	6,97	5,53	4,84	6,56	3,24	6,09	5,15	3,06	3,12	2,8
4,59	4,47	7,03	3,42	4,04	4,4	4,09	6,93	5,5	4,82	6,53	3,23	6,06	5,14	3,04	3,1	2,78
4,56	4,45	6,97	3,4	4,02	4,37	4,07	6,9	5,48	4,8	6,51	3,22	6,02	5,13	3,01	3,09	2,75
4,54	4,43	6,92	3,38	4	4,33	4,04	6,86	5,45	4,77	6,48	3,2	5,99	5,13	2,98	3,07	2,73
4,52	4,41	6,87	3,37	3,97	4,3	4,02	6,82	5,43	4,75	6,45	3,19	5,96	5,11	2,96	3,05	2,71
4,5	4,39	6,82	3,35	3,95	4,26	4	6,78	5,4	4,73	6,42	3,18	5,93	5,1	2,93	3,03	2,68
4,47	4,37	6,77	3,33	3,93	4,23	3,97	6,75	5,38	4,71	6,39	3,17	5,91	5,09	2,9	3,02	2,66
4,45	4,35	6,72	3,31	3,9	4,19	3,95	6,71	5,35	4,69	6,36	3,16	5,88	5,08	2,87	3	2,64
4,43	4,33	6,67	3,3	3,88	4,16	3,93	6,67	5,33	4,67	6,33	3,15	5,85	5,07	2,85	2,98	2,62
4,4	4,3	6,62	3,28	3,85	4,13	3,91	6,64	5,3	4,65	6,3	3,14	5,82	5,05	2,82	2,97	2,6
4,38	4,28	6,58	3,27	3,83	4,1	3,88	6,6	5,28	4,62	6,28	3,13	5,8	5,03	2,79	2,95	2,58
4,36	4,26	6,53	3,25	3,81	4,07	3,86	6,56	5,25	4,6	6,25	3,12	5,77	5,01	2,77	2,93	2,57
4,33	4,24	6,48	3,23	3,78	4,03	3,84	6,52	5,22	4,58	6,22	3,11	5,75	4,99	2,74	2,92	2,55
4,31	4,21	6,43	3,22	3,76	4	3,82	6,49	5,2	4,56	6,2	3,1	5,72	4,97	2,71	2,9	2,53
4,28	4,19	6,39	3,2	3,73	3,97	3,79	6,45	5,17	4,54	6,17	3,09	5,7	4,95	2,69	2,88	2,51
4,26	4,16	6,34	3,18	3,71	3,94	3,77	6,41	5,14	4,51	6,14	3,08	5,67	4,93	2,66	2,87	2,49
4,23	4,14	6,29	3,17	3,68	3,91	3,75	6,37	5,11	4,49	6,11	3,07	5,65	4,91	2,63	2,85	2,48
4,21	4,11	6,25	3,15	3,66	3,88	3,73	6,33	5,08	4,47	6,09	3,06	5,62	4,89	2,61	2,83	2,46
4,18	4,08	6,2	3,13	3,63	3,85	3,7	6,29	5,05	4,44	6,06	3,05	5,6	4,86	2,58	2,82	2,44
4,15	4,05	6,15	3,11	3,61	3,81	3,68	6,25	5,01	4,42	6,02	3,04	5,57	4,84	2,56	2,8	2,43
4,12	4,01	6,09	3,09	3,58	3,78	3,66	6,2	4,97	4,39	5,99	3,02	5,54	4,81	2,53	2,78	2,41
4,08	3,97	6,04	3,06	3,55	3,74	3,63	6,14	4,93	4,35	5,94	3,01	5,51	4,78	2,5	2,75	2,39

ANEXO IX: GUÍA PARA PROYECTOS DE BOMBEO EÓLICO EN PEQUEÑAS COMUNIDADES

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades

Claudia Ríos Marcos

INTRODUCCIÓN.....	2
1. VELOCIDAD DEL VIENTO Y WPD	3
2. ALTURA Y POTENCIA DE LA BOMBA	8
3. CURVAS CARACTERÍSTICAS	14
4.A. AEROGENERADOR.....	19
4.B. AEROGENERADOR CASERO.....	22
4.C. AEROBOMBA.....	25
5. ALMACENAMIENTO DEL AGUA.....	28
ANEXOS.....	30

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

En esta guía se detallan los pasos a seguir para el análisis de viabilidad y dimensionamiento de equipos de una instalación de bombeo eólico para pequeñas comunidades mediante el aprovechamiento de los recursos disponibles y uso del libro Excel “Cálculos del bombeo eólico” y de la aplicación web Global Wind Atlas (<https://globalwindatlas.info>).

Introducción

La guía

Las funciones que se pueden llevar a cabo con esta guía son:

- **Analizar la situación actual relativa al suministro de agua**
 - Definir el número de personas abastecidas y el consumo de agua.
 - Analizar los recursos disponibles.
- **Analizar el emplazamiento**
 - Estudiar el entorno para localizar el emplazamiento de los elementos de la instalación.
- **Analizar las condiciones meteorológicas**
 - Obtener información del viento del país de África subsahariana en el que se va a realizar el proyecto para hacer una previsión de la viabilidad del uso de energía eólica.
 - Obtener información del viento en la posición geográfica y a la altura de la turbina eólica.
- **Crear un perfil de la instalación**
 - Introducir datos sobre la población abastecida y los recursos disponibles para establecer las características de la instalación.
- **Probar y comparar el uso de diferentes equipos para realizar el suministro**
 - Sistema eléctrico
 - Obtener resultados de la producción y el consumo de diferentes modelos de bomba eléctrica.
 - Probar la posibilidad de alimentar una bomba con diferentes modelos de aerogenerador, incluyendo aerogeneradores comerciales o caseros. Estos últimos siguiendo el modelo propuesto por Hugh Piggott en su libro “Wind Power Workshop”.
 - Sistema mecánico
 - Obtener resultados de la producción de diferentes modelos de aerobomba, que es el sistema puramente mecánico de bombeo eólico.
- **Dimensionar el sistema de almacenamiento de agua**
 - Comprobar la necesidad de almacenamiento de agua.

Contenido del libro “Cálculos del bombeo eólico”

El libro de Excel se compone de las siguientes hojas de cálculo:

- | | |
|---|--------------------------|
| • 1. Velocidad del viento y WPD | • Power density_50m |
| • 2. Altura y potencia de la bomba | • Wind speed_10m |
| • 3 Curvas características | • Wind speed_50m |
| • 4.a. Aerogenerador | • Hellmann |
| • 4.b. Aerogenerador casero | • Air density_10m |
| • 4.c. Aerobomba | • Air density_50m |
| • 5. Almacenamiento de agua | • Frecuencias del viento |
| • Power density_10m | • Listado de países |

El usuario sólo debe familiarizarse con las hojas destacadas. Las demás son para los cálculos en segundo plano.

El itinerario de la guía se basa en estas hojas de cálculo.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

1. Velocidad del viento y WPD

Esta hoja de cálculo permite obtener datos sobre la velocidad y la potencia del viento en el emplazamiento del proyecto.

Paso 1. Comprobación preliminar de las condiciones de viento

Paso 1.1. Seleccionar el PAÍS en el que se va a realizar el proyecto en la tabla DATOS DE ENTRADA

Datos de entrada		
Completar las celdas destacadas en amarillo		
Primera estimación		
Completar para obtener los datos del país entero		
País	-	
Altura del aerogenerador	m	
Cálculo exacto		
Completar para obtener los datos		
A 10 m de altura		
Densidad de potencia	W/m ²	
Velocidad del viento	m/s	
A 50 m de altura		
Densidad de potencia	W/m ²	
Velocidad del viento	m/s	

Paso 1.2. Completar la ALTURA DEL AEROGENERADOR en la tabla DATOS DE ENTRADA

Esta altura se mide desde el suelo hasta la turbina. Ésta debe situarse en la zona en la que más viento haya, que suele ser una zona alta y sin obstáculos alrededor. Para situarla lo más alto posible se puede aprovechar relieves del terreno y edificios, o construir una torre para elevarla. Se deben evitar obstáculos en los alrededores como árboles, edificaciones y otros.

Datos de entrada		
Completar las celdas destacadas en amarillo		
Primera estimación		
Completar para obtener los datos del país entero		
País	-	
Altura del aerogenerador	m	
Cálculo exacto		
Completar para obtener los datos de la localización seleccionada		
A 10 m de altura		
Densidad de potencia	W/m ²	
Velocidad del viento	m/s	
A 50 m de altura		
Densidad de potencia	W/m ²	
Velocidad del viento	m/s	

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

Paso 1.3. Comprobar la VELOCIDAD DEL VIENTO MÁXIMA y la VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIA del país en la tabla de RESULTADOS de la PRIMERA ESTIMACIÓN

Esta comprobación permite tener una idea inicial sobre la viabilidad del uso de energía eólica. Normalmente, se considerarán bajos los valores menores de 4, aceptables valores entre 4 y 6, y altos valores mayores de 6.

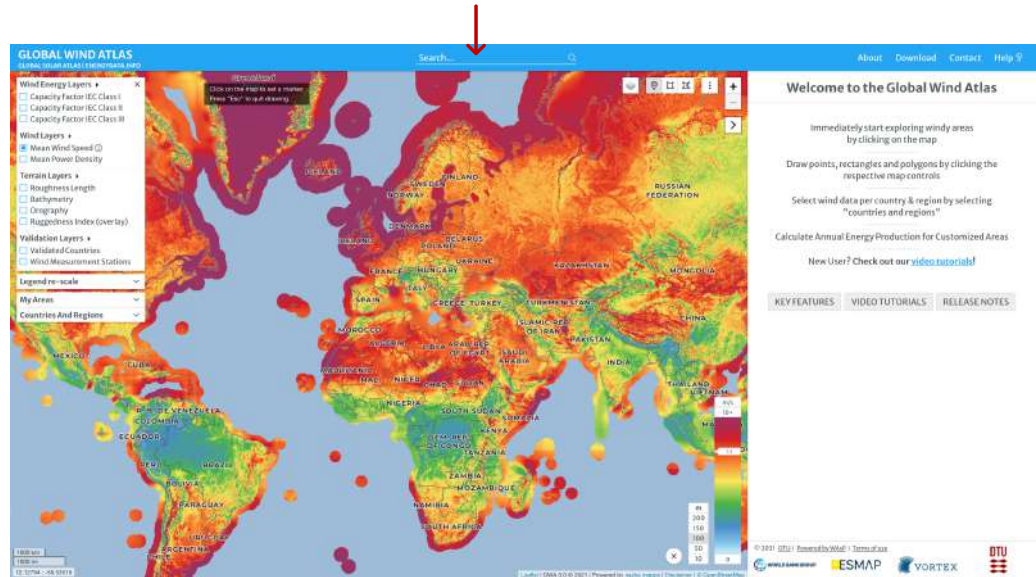
PRIMERA ESTIMACIÓN		
Parámetros de cálculo		
A 10 m de altura		
Densidad de potencia máxima	W/m2	209,7
Densidad de potencia media	W/m2	58,08
Velocidad del viento máxima	m/s	4,52
Velocidad del viento media	m/s	2,89
Densidad del aire a velocidad máxima	kg/m3	4,542
Densidad del aire a velocidad media	kg/m3	4,812
A 50 m de altura		
Densidad de potencia máxima	W/m2	315,55
Densidad de potencia media	W/m2	130,93
Velocidad del viento máxima	m/s	6,06
Velocidad del viento media	m/s	4,35
Densidad del aire a velocidad máxima	kg/m3	2,836
Densidad del aire a velocidad media	kg/m3	3,181
Resultados		
Exponente de Hellmann		
A velocidad máxima	-	0,1822
A velocidad media	-	0,2541
Densidad del aire		
A velocidad máxima	kg/m3	4,158
A velocidad media	kg/m3	4,462
Densidad de potencia máxima	W/m2	239,60
Densidad de potencia media	W/m2	73,35
Velocidad del viento máxima	m/s	4,867
Velocidad del viento media	m/s	3,204

Paso 2. Obtención de condiciones de viento en el emplazamiento del proyecto

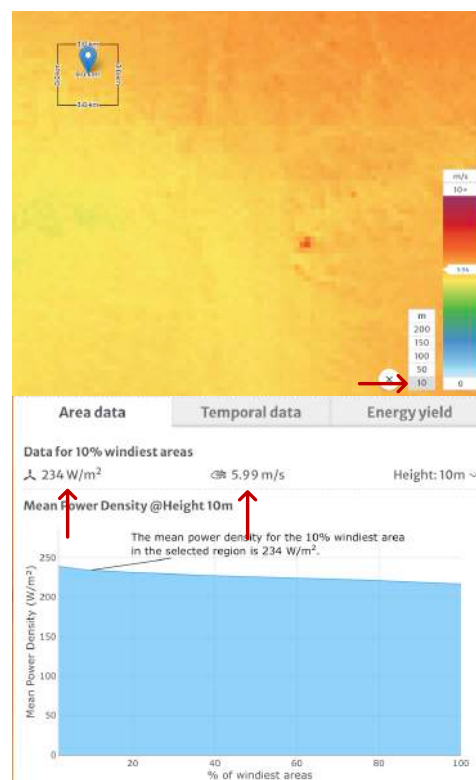
Paso 2.1. Acceder a <https://globalwindatlas.info> para obtener los datos de viento del emplazamiento del proyecto a 10 m y a 50 m de altura

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

Paso 2.2. Pinchar en el mapa o introducir las coordenadas del emplazamiento del proyecto en el buscador con el formato .º, .º



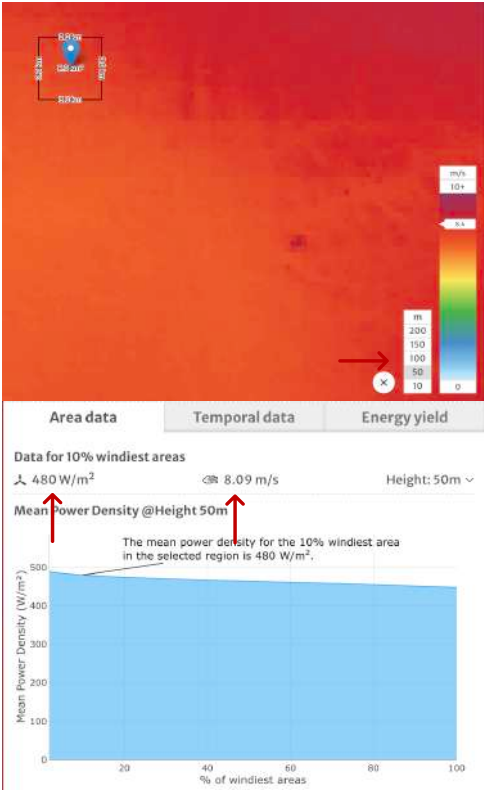
Paso 2.3. Obtener la DENSIDAD DE POTENCIA y la VELOCIDAD DEL VIENTO a 10 m pinchando en 10 m



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades

Claudia Ríos Marcos

Paso 2.4. Obtener la DENSIDAD DE POTENCIA y la VELOCIDAD DEL VIENTO a 50 m pinchando en 50 m



Paso 2.5. Introducir DENSIDAD DE POTENCIA y VELOCIDAD DEL VIENTO a 10 y 50 m en la tabla de DATOS DE ENTRADA

Datos de entrada		
Completar las celdas destacadas en amarillo		
Primera estimación		
Completar para obtener los datos del país entero		
País	-	Suazilandia
Altura del aerogenerador	m	15
Cálculo exacto		
Completar para obtener los datos de la localización seleccionada		
A 10 m de altura		
Densidad de potencia	W/m2	234
Velocidad del viento	m/s	5,99
A 50 m de altura		
Densidad de potencia	W/m2	480
Velocidad del viento	m/s	8,09

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

Paso 2.6. Comprobar la validez de los resultados de DENSIDAD DE POTENCIA y VELOCIDAD DEL VIENTO en la tabla de RESULTADOS del CÁLCULO EXACTO

En el caso de que aparezca #¡VALOR! en alguna celda, hay algún valor introducido erróneo.

CÁLCULO EXACTO		
Parámetros de cálculo		
A 10 m de altura		
Densidad de potencia	W/m2	234
Velocidad del viento	m/s	5,99
Densidad del aire a velocidad máxima	kg/m3	2,178
A 50 m de altura		
Densidad de potencia	W/m2	480
Velocidad del viento	m/s	8,09
Densidad del aire a velocidad máxima	kg/m3	1,813
Resultados		
Exponente de Hellmann	-	0,1867
Densidad del aire	kg/m3	2,096
Densidad de potencia	W/m2	282,65
Velocidad del viento	m/s	6,461

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

2. Altura y potencia de la bomba

Paso 1. Introducir datos de la instalación en PARÁMETROS DE DISEÑO

Parámetros de diseño		
Completar sólo las celdas destacadas en amarillo		
Profundidad de la superficie freática	m	150
Altura de la salida de agua al exterior o al tanque	m	0
Altura geométrica	m	150
Presión en el grifo	bar	1
Altura por diferencia de presión	m	10,19367992
Longitud total de tubería	m	200
Diámetro interior de la tubería	mm	40
Material de la tubería	-	Plástico (PE, PVC)
Rugosidad absoluta de la tubería	mm	0,0015
Número de personas abastecidas	personas	60
Densidad del fluido	kg/m ³	1000
Viscosidad dinámica	Pa·s	0,001519
Agua abastecida	L/(pers·día)	50
Tiempo de abastecimiento (*)	h/día	1
Aceleración de la gravedad	m/s ²	9,81

Paso 1.1. Introducir la PROFUNDIDAD DE LA SUPERFICIE FREÁTICA

En el Anexo I se puede encontrar un MAPA DE ÁFRICA DE LOS NIVELES FREÁTICOS que se puede usar para tener una idea aproximada.

En el Anexo II se puede encontrar un LISTADO DE LOS HUMEDALES DE ÁFRICA. En los humedales y sus proximidades el nivel freático se encuentra más próximo a la superficie, por que es conveniente situar el pozo lo más cerca posible.

Indicadores del nivel freático. El nivel freático se puede estimar a partir de diferentes indicadores que no requieren material especializado ni grandes gastos económicos y que pueden ser identificados por personas sin formación relativa, como la vegetación, el suelo o la proximidad a agua.

- **Vegetación.** En áreas donde el nivel freático está próximo a la superficie, la vegetación suele ser más exuberante y suele abundar la vegetación freatofita. Dicha vegetación se podrá localizar gracias al catálogo de plantas adjunto en el Anexo III.

- **Suelo.** El relieve del terreno define el recorrido que hace el agua sobre la superficie. Mediante la observación de las curvas de nivel del terreno es posible determinar los flujos de escorrentía y las zonas más susceptibles a acumular agua. También la experiencia durante las temporadas de lluvia puede ayudar a localizar las acumulaciones. Además, las zonas en las que los materiales del suelo sean más porosos tienen mayor facilidad para acumular agua, mientras que en las zonas



en las que el suelo sea de materiales impermeables el agua tiende a escurrir hacia otra zona. Una forma de comprobar y comparar la porosidad de varias zonas del suelo es verter la misma cantidad de agua en diferentes puntos y medir el tiempo que tarda en ser absorbida, si bien es cierto que en algunos territorios esto puede ser un malgasto de un bien escaso.

- **Proximidad a agua.** Las zonas cercanas a ríos o lagos tienen la capa freática más cercana a la superficie. Sobre todo en el caso de que la pendiente de la costa sea baja. La proximidad a agua salada puede suponer un nivel freático próximo a la superficie. Sin embargo, es probable que el agua esté contaminada por el agua salada y, por lo tanto, no sea potable.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

Medición del nivel freático. El nivel freático se puede medir con una sonda piezométrica siguiendo los siguientes pasos:

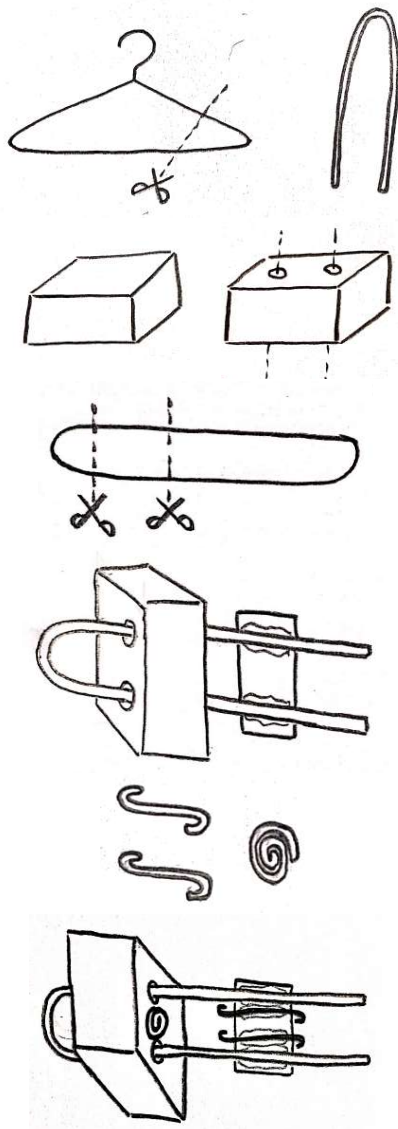
- **Instalación de tubería piezométrica**
Se realiza una perforación en el suelo para que entre una tubería de unos 5 cm de diámetro. La profundidad de la perforación depende de la estimación del nivel freático que se haya hecho en función de la zona con el mapa de niveles freáticos y los indicadores expuestos en el apartado anterior. Para perforaciones de hasta 10 m, es posible utilizar una barrena manual similar a la de la imagen.
A continuación, se introduce una tubería de diámetro inferior a la perforación en la que se han realizado segmentos ranurados cada aproximadamente 10 cm en las alturas en las que se espera el ingreso de agua freática. Dichos segmentos ranurados se pueden realizar con una sierra.
La tubería debe sobresalir unos 20 cm sobre el nivel de la tierra.
- **Agotamiento del nivel de agua**
Se desaloja el agua del interior de la tubería con una sonda o con un piezo que funcione como un pistón, como puede ser una barra de acero maciza de diámetro inferior al diámetro interior de la tubería. Dicha pieza se ata a una cuerda o cadena por un extremo y se deja caer en el interior de la tubería hasta el fondo. A continuación, se extrae empujando el agua hacia el exterior.
Se debe tapar el extremo superior de la tubería para evitar el ingreso de agua de lluvia o de otras fuentes distintas a la capa freática.
- **Aporte de tierra**
Para evitar filtraciones de agua desde la superficie por la holgura de la perforación en la tierra con respecto a la tubería, se realiza un aporte de tierra alrededor de la tubería con una pala.
- **Reposo de 48 horas**
Se deja reposar la instalación durante 48 horas para estabilizar el agua del interior de la tubería con la del exterior antes de realizar la primera medida.
- **Tomar medida**
Se utiliza una sonda piezométrica para tomar la medida de la profundidad a la que se encuentra el agua. Dicho instrumento consiste en una bobina de cable en cuyo extremo se encuentra un sensor de agua. El sensor se deja caer por el interior del tubo, y la profundidad del agua se indica a través de un visor o a través de una bombilla que se enciende al detectar el agua y la medida se indica en una regla pintada en el cable.
En caso de no tener acceso a una sonda piezométrica convencional, en el apartado siguiente se muestra cómo fabricarla.

Fabricación de una sonda piezométrica

- **Sonda piezométrica con cuerda y recipiente**
Se ata una cuerda a un recipiente de modo que quede la boca hacia arriba. El tamaño del recipiente deberá ser inferior al diámetro interior de la tubería piezométrica.
El recipiente se dejará caer por el interior de la tubería a profundidades cada vez mayores en intervalos de unos 20 cm. Cada vez que se deje caer se comprobará si el recipiente se ha llenado. En tal caso, se habrá alcanzado la superficie freática y la profundidad a la que se encuentra corresponderá con la longitud de cuerda introducida en la tubería.
- **Sonda piezométrica con circuito eléctrico**
 - **Materiales**
 - Percha metálica
 - Poliespán u otro material flotante fácil de manipular
 - Alambre de cobre
 - Cable
 - Portapilas (no es estrictamente necesario)
 - Zumbador o LED
 - Palo de helado o similar
 - Pegamento

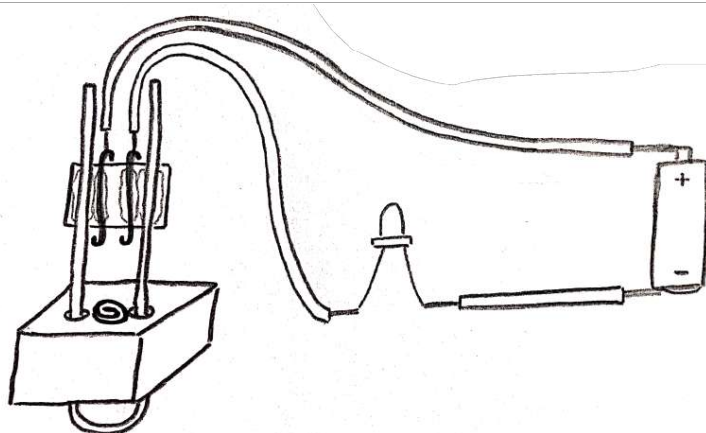
Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

- Montaje



1. Cortar una parte de la percha preferiblemente de una longitud mayor que 30 cm.
2. Doblar el alambre de la percha por la mitad de tal manera que ambas mitades queden a una distancia de unos 2 o 3 cm.
3. Cortar una pieza de poliespán de aproximadamente 4x1x2cm.
4. Crear dos agujeros en la pieza a la misma distancia que los extremos del alambre de la percha y de mayor diámetro, de tal manera que se pueda insertar y pasar por ellos libremente.
5. Cortar una pieza del palo de helado de mayor longitud que la distancia entre los extremos del alambre de la percha.
6. Insertar la pieza de poliespán en el alambre de la percha y a continuación pegar la pieza del palo de helado a los extremos del alambre transversalmente.
7. Cortar tres segmentos de alambre de cobre: dos de unos 2 o 3 cm y uno de unos 4 cm.
8. Doblar los tres segmentos como se muestra en la figura.
9. Pegar los dos segmentos cortos en la pieza del palo de helado, como se muestra en la figura.
10. Pegar el segmento largo en la pieza de poliespán, como se muestra en la figura. Los segmentos cortos tienen que poder hacer contacto con el segmento largo desplazando la pieza de poliespán.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos



11. Conectar un cable a cada segmento de cobre, teniendo en cuenta que no se deben tocar entre ellos y que su longitud debe ser suficientemente larga como para recorrer la tubería piezométrica hasta el agua. En caso de tener un soldador de estaño es recomendable soldar los cables a los segmentos.
12. Conectar un LED o un zumbador al extremo de uno de los cables.
13. Conectar una pila o el portapilas (en caso de tenerlo) entre el LED o zumbador y el cable libre.

- **Instrucciones de uso**

Para conocer la profundidad a la que se encuentra el agua, se dejará caer lentamente la sonda por la tubería piezométrica, dejando en la superficie la pila y el LED o zumbador. Cuando la sonda llegue al agua, la pieza de poliespán flotará y el segmento de cobre pegado a la misma entrará en contacto con los otros dos segmentos, cerrando el circuito. Al cerrarse el circuito se encenderá el LED o pitará el zumbador, en su caso. Cuando esto ocurra se marcará el cable para después medir la sección del mismo que se ha introducido en la tubería. Dicha medida es la profundidad de la capa freática.

Para más detalles sobre la construcción o el uso de la sonda piezométrica consultar:
<https://www.youtube.com/watch?v=ehEzTA5aDj0>.

Paso 1.2. Introducir la ALTURA DE LA SALIDA DE AGUA AL EXTERIOR O AL TANQUE

Esta es la altura del grifo o de la salida de agua al tanque con respecto del suelo.

Paso 1.3. Introducir la LONGITUD TOTAL DE TUBERÍA

Esta tubería comienza sumergida en el agua de pozo y termina en la salida del agua al grifo o al tanque. Su longitud depende del recorrido que haga, está muy determinada por la distancia entre el pozo y la fuente.

Paso 1.4. Introducir el DIÁMETRO INTERIOR DE LA TUBERÍA

El diámetro de la tubería puede estar limitado por las características de la bomba o por los recursos disponibles. En todo caso es necesario hacer una previsión a priori, aunque ésta puede cambiarse más adelante en caso de que la previsión no fuera acertada.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

Paso 1. 5. Introducir el MATERIAL DE LA TUBERÍA

El material de la tubería puede estar limitado por los recursos disponible o por la instalación existente. Habitualmente es PVC. En la hoja de cálculo ALTURA Y POTENCIA DE LA BOMBA, el material se selecciona en una lista desplegable. En caso de que los materiales que aparecen en esa lista no sean suficientes, es posible añadir más completando la tabla MATERIALES DE LA TUBERÍA, que se muestra a continuación.

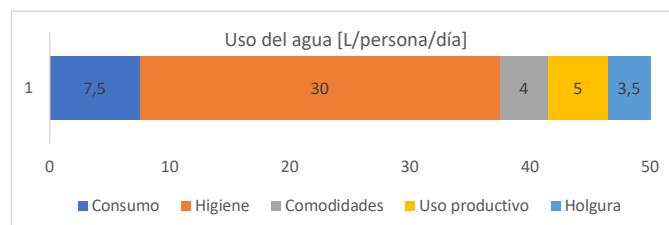
Materiales de la tubería	
Incluir en la lista nuevos materiales si fuera necesario	
Material	Rugosidad [mm]
Plástico (PE, PVC)	0,0015
Tubos de latón o cobre	0,0015
Poliétileno reticulado (PEX)	0,007
Acero comercial y soldado	0,09
Hierro galvanizado	0,24

Paso 1.6. Introducir el NÚMERO DE PERSONAS ABASTECIDAS

Es el número de personas a las que se desea abastecer de agua.

Paso 1.7. Introducir el AGUA ABASTECIDA

Son los litros por persona al día que se desean abastecer. En el caso de que el uso sea únicamente doméstico, se recomienda un caudal de 50 L/(persona·día), que se repartirá aproximadamente de la siguiente manera:



Paso 1.8. Introducir el TIEMPO DE ABASTECIMIENTO

El tiempo de abastecimiento es el tiempo diario máximo durante el cual se va a extraer el agua necesaria para todo el día. Por ejemplo, si el tiempo de abastecimiento son 4 horas y se empieza a bombear a las 7:00 ininterrumpidamente, a las 11:00 se habrá extraído el total del agua necesaria para ese día.

Este valor define la velocidad a la que la bomba extrae el agua y está muy limitado por el tiempo diario en que se alcanza viento suficiente como para activarla. Por esto, se recomienda introducir un valor bajo, como 1 h/día, e ir ampliándolo más adelante si resulta ser posible una vez realizados los cálculos pertinentes.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

Paso 2. Comprobar la validez de los resultados de ALTURA EFECTIVA DE LA BOMBA y POTENCIA EFECTIVA DE LA BOMBA en la tabla de RESULTADOS

En el caso de que aparezca #¡VALOR! en alguna celda, hay algún valor introducido erróneo.

Resultados		
Caudal	m3/h	3,0000
Velocidad del fluido	m/s	0,6631
Número de Reynolds	-	17.462,69
Coeficiente de fricción	-	0,02680
Pérdidas de carga primarias	m	3,00399
Pérdidas de carga secundarias	m	1,95259
Pérdidas de carga totales	m	4,95658
Altura efectiva de la bomba	m	165,150
Potencia efectiva de la bomba	W	1350,103

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

3. Curvas características

No es necesario completar esta hoja de cálculo si se desea utilizar una aerobomba. En tal caso, saltar directamente a la hoja de cálculo 4.C.AEROBOMBA.

Paso 1. Comprobar la validez de los datos de la CURVA H-Q CARACTERÍSTICA DE LA INSTALACIÓN

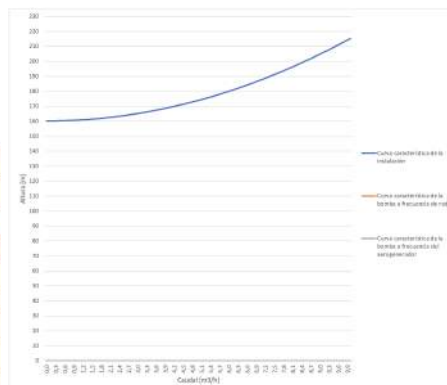
Todos los datos deben haberse completado automáticamente y en la gráfica debe aparecer una curva creciente. En el caso de que aparezca #¡VALOR! en alguna celda, hay algún valor introducido erróneo.

Curva H-Q característica de la Instalación			
Las celdas de esta tabla se rellenan automáticamente			
		Punto 1	Punto 2
Altura	m	165,150256	160,194
Caudal	m3/h	3	0,0000

C		D	
H =	160,194	+	0,55073062 *Q^2

Q	H
m3/h	m
0	160,19368
0,1	160,199187
0,2	160,215709
0,3	160,243246
0,4	160,281797

Q	H
m3/h	m
5,1	174,518183
5,2	175,085436
5,3	175,663703
5,4	176,252985
5,5	176,853281



Paso 2. Selección preliminar de la bomba

El tipo de bomba más apropiado para esta instalación es la **bomba sumergible**. Un posible proveedor de este tipo de bombas es Grundfos.

En la tabla de VALORES DE REFERENCIA DE LA BOMBA aparecen los requerimientos mínimos que debe cumplir el modelo de bomba en esta selección preliminar. Para que la tabla se complete, es necesario introducir una estimación del RENDIMIENTO de la bomba. Esto es posible observando el rendimiento de algunas bombas del fabricante seleccionado que cumplan valores similares a los de los RESULTADOS de la hoja de cálculo ALTURA Y POTENCIA DE LA BOMBA.

Valores de referencia de la bomba		
Completar únicamente la celda destacada en amarillo		
Rendimiento	%	50
Seleccionar una bomba que cumpla los siguientes valores		
Caudal mínimo	m3/h	4
Altura mínima	m	170
Potencia mínima	W	2030

Paso 3. Completar datos de la CURVA H-Q CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA OFRECIDA POR EL FABRICANTE

Curva H-Q característica de la bomba ofrecida por el fabricante			
Completar las celdas destacadas en amarillo con datos de la curva de la hoja de características de la bomba			
Frecuencia de la red	Hz	50	
El punto 3 es el origen y el 4 es un punto arbitrario de la curva			
		Punto 3	Punto 4
Altura	m	320	250,000
Caudal	m3/h	0	6,4210

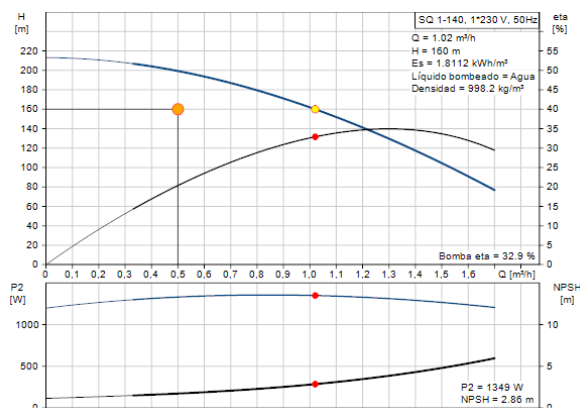
Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

Paso 3.1. Completar FRECUENCIA DE LA RED

Esta frecuencia es para la que la bomba fue diseñada, aparece en los datos eléctricos de la bomba y suele ser de 50 o 60 Hz.

Paso 3.2. Completar ALTURA y CAUDAL de los PUNTOS 3 y 4

- El PUNTO 3 será cualquier otro punto de la curva H-Q de la bomba de la hoja de características ofrecida por el fabricante. En el caso de las bombas Grundfos suele aparecer el punto nominal destacado y sus valores exactos en la leyenda de la gráfica, como se muestra en la figura a continuación. Dicho punto puede ser utilizado como punto 3.



- El PUNTO 4 será el de $Q = 0$, es decir, el valor del extremo izquierdo de la curva H-Q.

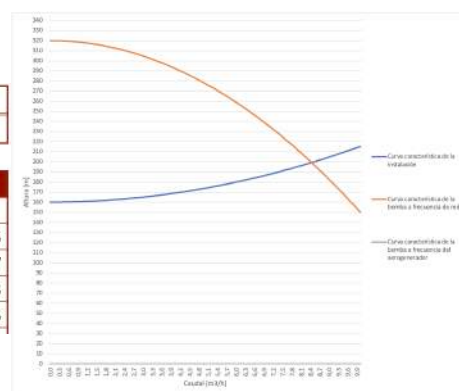
Paso 4. Comprobar la validez de los datos de la CURVA H-Q CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA OFRECIDA POR EL FABRICANTE

Todos los datos deben haberse completado automáticamente y en la gráfica debe aparecer una curva decreciente.

A	B
H =	320,000 - 1,697824124 * Q^2

Q	H
m³/h	m
0	320
0,1	319,9830218
0,2	319,932087
0,3	319,8471958

Q	H
m³/h	m
5,1	275,8395945
5,2	274,0908357
5,3	272,3081203
5,4	270,4914485



Paso 5. Completar datos de la CURVA H-Q CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA A LA FRECUENCIA DEL AEROGENERADOR

Curva H-Q característica de la bomba a la frecuencia del aerogenerador		
Completar la celda destacada en amarillo con datos proporcionados por el fabricante del aerogenerador		
Frecuencia del aerogenerador	Hz	40

En esta tabla únicamente hay que completar la FRECUENCIA DEL AEROGENERADOR, que es la frecuencia de la corriente generada por éste. Para ello, se deben seguir los siguientes pasos.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

5.1. Selección preliminar del aerogenerador

Partiendo de esta primera selección de la bomba, se debe elegir el aerogenerador correspondiente para comenzar las iteraciones. El primer paso es elegir un fabricante de aerogeneradores de minieólica (<100kW), como puede ser Bornay o Enair. A continuación hay que elegir la potencia del aerogenerador. Según CIEMAT lo más recomendable es elegir **un aerogenerador que cuadruple la potencia de la bomba**.

5.2. Definir la configuración de la conexión aerogenerador - bomba

En este punto se puede optar por varias opciones:

A. Utilizar un inversor

Estos dispositivos permiten controlar la frecuencia de la alimentación de la bomba de tal manera que se mantenga en 50 Hz aunque la frecuencia de la corriente de salida del aerogenerador sea variable. Se suelen utilizar para conectar aerogeneradores a la red. Estos aparatos suelen ser convertidores AC-DC-AC, que transforman la corriente de entrada en corriente continua y a continuación generan la señal deseada. Este control se realiza normalmente mediante la relación voltaje-frecuencia, de tal manera que se conserva la proporcionalidad V/f a la entrada y a la salida del convertidor. Esto quiere decir que para subir la frecuencia a la alimentación de la bomba, es necesario subir la tensión, por lo que es posible que sea necesario en este caso instalar algún dispositivo que proteja a la bomba de sobretensiones. Este dispositivo de protección puede estar incluido en la caja del inversor.

Habitualmente, los fabricantes de aerogeneradores también proveen de los inversores y en función de las necesidades del usuario se pueden definir las características de los mismos.

Las **ventajas** de usar un inversor son que la bomba se alimenta a una frecuencia constante, por lo que el suministro de agua es más constante y la se preserva mejor la salud de la bomba, y que se alimenta a una frecuencia mayor, por lo que se saca mayor partido de la bomba, obteniendo valores más altos de caudal y altura. Además, sería posible conectarse a una línea eléctrica en el caso de haberla y conectar otros dispositivos.

Las **desventajas** son el aumento de precio del sistema y el aumento de la complejidad de instalación. Además, este tipo de dispositivos puede limitar la potencia del aerogenerador y de la bomba.

En el caso de los aerogeneradores Bornay, la conexión sería la siguiente:

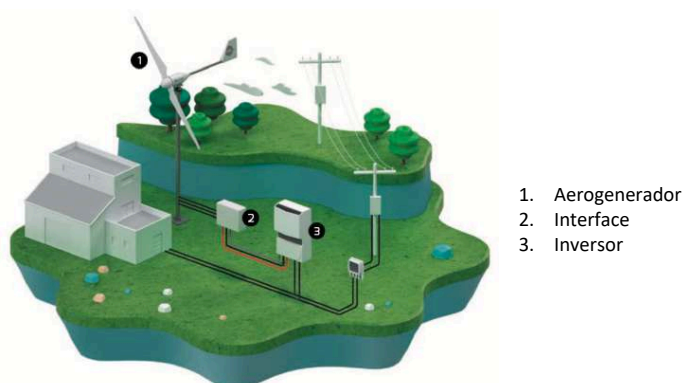


Figura 0.1 Conexión de aerogenerador con inversor.
Fuente: Catálogo de Bornay

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

B. Utilizar la interfaz Wind+

Este dispositivo lo ofrece Bornay y sirve específicamente para conectar el aerogenerador directamente a una bomba, y gestiona y controla el funcionamiento del aerogenerador, así como la energía entregada a la bomba. Además, se recomienda en el catálogo de Bornay utilizar la bomba tipo Grundfos SQFlex, lo cual simplifica la selección de equipos. También permite que la salida sea en corriente continua para alimentar una bomba de CC.

Las **ventajas** de este sistema son que es de fácil instalación y que con un único dispositivo se saca el mayor partido posible a la bomba, protegiendo su salud.

Las **desventajas** son el aumento de precio y que limita las posibilidades a un único fabricante. Esto implica que si alguna parte del sistema se corrompe, sólo es sustituible por el mismo modelo. Lo cual crea una codependencia.

La conexión es la siguiente:

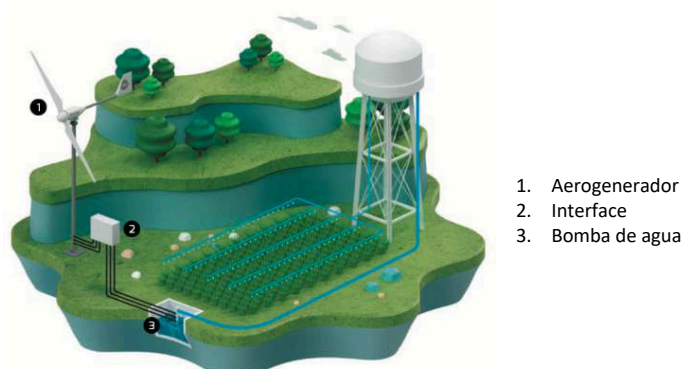


Figura 0.2 Conexión de aerogenerador con interfaz Wind+.
 Fuente: Catálogo de Bornay

C. Conectar directamente la bomba al aerogenerador

En este caso, es importante elegir bien la bomba y el aerogenerador para aprovechar al máximo ambos. Por esta razón, el proceso de selección es más complejo y se describirá más adelante.

Las **ventajas** de este sistema son el ahorro de costes en dispositivos electrónicos y la simplicidad del sistema. En el caso de que alguna parte del sistema se corrompa, es más fácil repararla o sustituirla, ya que no hay electrónica de por medio y todos los elementos son relativamente sencillos.

Una de las **desventajas** es que la bomba se alimenta a frecuencias más bajas, por lo que se pierde gran parte de su potencial. Esto puede suponer que el ahorro que implica no incluir dispositivos electrónicos se compense por el precio de una bomba de mayor potencia. Además, al estar la bomba expuesta a mayores variaciones de frecuencia se compromete su salud y probablemente sea necesario incluir un dispositivo de protección.

Las variaciones de frecuencia de este sistema se pueden limitar utilizando **aerogeneradores de paso variable**. Estos aerogeneradores regulan la posición de las palas para mantener unas revoluciones constantes. Sin embargo, tienen la desventaja de que las variaciones de la velocidad del viento se traducen en fluctuaciones del par mecánico y que producen menor potencia que los aerogeneradores de paso fijo.

En caso de optar por la opción A o por la opción B, la FRECUENCIA DEL AEROGENERADOR de la tabla CURVA H-Q CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA A LA FRECUENCIA DEL AEROGENERADOR, será de 50 Hz, ya que la electrónica se encarga de mantener dicha frecuencia.

En caso de optar por la opción C, se deben seguir los siguientes pasos.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

Paso 5.3. Preguntar al fabricante del aerogenerador qué frecuencia de salida se obtiene

Habitualmente existe una correlación entre la velocidad de rotación de las palas y la frecuencia de la corriente generada. Esta relación depende de la multiplicadora, que es un sistema de engranajes que multiplica la velocidad del eje por un factor para aumentar la frecuencia de la corriente de salida. Este factor puede ser muy diverso en función de los tipos y la combinación de multiplicadoras. En el caso de un sistema de ejes planetarios puede estar entre 10 y 15, y en el caso de un sistema de ejes paralelos puede estar entre 2 y 3.

En las hojas de características de los aerogeneradores suelen aparecer las RPMs del rotor en condiciones nominales, pero sin conocer la relación de la multiplicadora no es posible saber la frecuencia que alimenta la bomba, dato que es imprescindible para elegir la bomba adecuada.

- Lo más recomendable es tomar como referencia la **frecuencia de salida del aerogenerador a la velocidad del viento media de la zona**. De esta manera se simplifican los cálculos posteriores evitando la complejidad de las fluctuaciones en la velocidad del rotor. Además, los aerogeneradores de minieólica suelen ser de paso variable por lo que la velocidad de rotación se mantiene relativamente constante, lo que hace que esta aproximación sea razonable.
- En caso de que el fabricante no proporcione esta información o que se vaya a utilizar un aerogenerador casero, se puede optar por solicitar la relación de la multiplicadora y el número de polos del generador, de tal manera que sea posible calcular la **frecuencia de salida del aerogenerador en condiciones nominales** de la siguiente forma:

$$f_n = \frac{p \cdot n \cdot r}{2 \cdot 60}$$

donde f_n es la frecuencia en condiciones nominales, n son las revoluciones por minuto del rotor, p el número de polos y r la relación de la multiplicadora.

- Si el fabricante no proporciona ninguna información acerca de la frecuencia de salida del aerogenerador, lo mejor es **optar por utilizar un inversor o una interfaz Wind+**, porque el riesgo de elegir la bomba sin conocer esta información es muy alto.

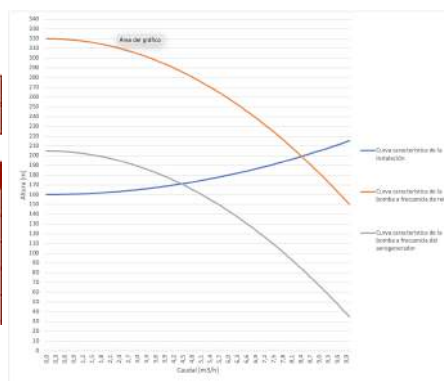
Paso 6. Comprobar la validez de los datos de la CURVA H-Q CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA A LA FRECUENCIA DEL AEROGENERADOR

Todos los datos deben haberse completado automáticamente y en la gráfica debe aparecer una curva decreciente. En el caso de que aparezca #¡VALOR! en alguna celda, hay algún valor introducido erróneo.

	A'		B
H =	204,800	-	1,697824124 *Q^2

Q	H
m3/h	m
0	204,8
0,1	204,7830218
0,2	204,732087
0,3	204,6471958

Q	H
m3/h	m
5,1	160,6395945
5,2	158,8908357
5,3	157,1081203
5,4	155,2914485



Paso 7. Comprobar la validez de los datos del PUNTO DE TRABAJO DE LA CURVA

Este punto debe corresponder con la intersección entre las curvas características de la bomba a la frecuencia del aerogenerador y de la instalación. En caso de que dicha intersección no exista aparecerá un mensaje de ERROR.

En el caso de que aparezca #¡VALOR! en alguna celda, hay algún valor introducido erróneo.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

Paso 8. Seguir las ADVERTENCIAS y RECOMENDACIONES

En el cuadro ADVERTENCIA aparecerán mensajes relacionados con el estado actual de la instalación.

Se deben seguir las instrucciones que aparecen en el cuadro de RECOMENDACIÓN para elegir la bomba adecuada para la instalación. Para ello, volverá al **Paso 3** tantas veces como sea necesario.

Una vez aparezcan los siguientes mensajes en los cuadros de ADVERTENCIA y RECOMENDACIÓN, se pasará a 4.a.AEROGENERADOR o a 4.b.AEROGENERADOR CASERO, en su caso.

ADVERTENCIA	RECOMENDACIÓN
Ninguna.	Puede concluir las iteraciones. La bomba y el aerogenerador seleccionados cumplen las características mínimas.

4.a. Aerogenerador

Paso 1. Comprobar la validez de los datos de la tabla de PARÁMETROS DE CÁLCULO

Todos los datos deben haberse completado automáticamente. En el caso de que aparezca #¡VALOR! en alguna celda, hay algún valor introducido erróneo.

Parámetros de cálculo		
Las celdas de esta tabla se rellenan automáticamente		
Velocidad del viento media	m/s	6,461139333
Velocidad de referencia	m/s	6
Tiempo de abastecimiento teórico	horas/día	1
Volumen bombeado objetivo	m3/día	3
Bomba		
Altura de trabajo	m	171,1189493
Caudal de trabajo	m3/h	4,453961568
Frecuencia de la red	Hz	50
Frecuencia del aerogenerador	Hz	40

Paso 2. Completar los DATOS DE LA INSTALACIÓN

Datos de la instalación		
Completar únicamente las celdas destacadas en amarillo		
Bomba		
Completar con datos de la hoja de características de la bomba		
Potencia nominal	W	7844
Caudal homólogo	m3/h	5,56745196
Potencia homóloga (*1)	W	7500
Potencia de trabajo	W	3840
Aerogenerador		
Potencia inicial recomendada (*2)	W	15700
Completar con datos de la curva de la hoja de características del aerogenerador		
Potencia nominal	W	9000
Velocidad del viento		
Para arranque	m/s	3
Para potencia nominal	m/s	12
Para frenado automático	m/s	14

Paso 2.1. Introducir la POTENCIA NOMINAL de la BOMBA

Este dato aparece en la hoja de características de la bomba seleccionada.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

Paso 2.2. Introducir la POTENCIA HOMÓLOGA de la BOMBA

La POTENCIA HOMÓLOGA se obtiene de la curva de la bomba de la hoja de características proporcionada por el fabricante y es la potencia absorbida correspondiente al CAUDAL HOMÓLOGO.

Paso 2.3. Introducir la POTENCIA NOMINAL del AEROGENERADOR

La POTENCIA NOMINAL aparece en la hoja de características del aerogenerador seleccionado..

La POTENCIA INICIAL RECOMENDADA es la potencia del aerogenerador que se recomienda para comenzar las iteraciones, y corresponde con el cuádruple de la potencia nominal de la bomba según recomendación profesional. Se puede usar como dato de referencia para elegir un aerogenerador en caso de ser necesario.

Paso 2.4. Introducir los datos de la VELOCIDAD DEL VIENTO PARA ARRANQUE, PARA POTENCIA NOMINAL y PARA FRENADO AUTOMÁTICO

Estos datos corresponden con la velocidad mínima del viento para que arranque el aerogenerador, la velocidad a la que genera la potencia nominal y la potencia máxima a la que se produce el frenado de seguridad, respectivamente, y aparecen en la hoja de características del aerogenerador.

Paso 3. Comprobar la validez de los datos de la tabla de PRODUCCIÓN DEL AEROGENERADOR Y DE LA BOMBA

Todos los datos deben haberse completado automáticamente. En el caso de que aparezca #¡VALOR! en alguna celda, hay algún valor introducido erróneo.

PRODUCCIÓN DEL AEROGENERADOR Y LA BOMBA					
Velocidad del viento	Frecuencia de aparición	Potencia del aerogenerador	Bomba activa	Tiempo de bombeo	Volumen bombeado
m/s	horas/día	W	-	horas/día	m3
1	0,795	0,00	No	0,000	0,000
2	1,661	0,00	No	0,000	0,000
3	2,522	0,00	No	0,000	0,000
4	3,130	333,33	No	0,000	0,000
5	3,380	651,04	No	0,000	0,000
6	3,260	1125,00	No	0,000	0,000
7	2,846	1786,46	No	0,000	0,000
8	2,264	2666,67	No	0,000	0,000
9	1,647	3796,88	No	0,000	0,000
10	1,098	5208,33	Sí	1,098	6,113
11	0,671	6932,29	Sí	0,671	3,737
12	0,377	9000,00	Sí	0,377	2,096
13	0,194	11442,71	Sí	0,194	1,078
14	0,091	0,00	No	0,000	0,000
15	0,039	0,00	No	0,000	0,000
16	0,016	0,00	No	0,000	0,000
17	0,006	0,00	No	0,000	0,000
18	0,002	0,00	No	0,000	0,000
19	0,001	0,00	No	0,000	0,000
20	0,000	0,00	No	0,000	0,000
> 20	0,000	0,00	No	0,000	0,000
Total				m3/día	13,025

El VOLUMEN BOMBEADO TOTAL es la previsión de la producción de la instalación y se puede comparar al VOLUMEN BOMBEADO OBJETIVO de la tabla PARÁMETROS DE CÁLCULO, que es la producción necesaria.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

Paso 4. Seguir las RECOMENDACIONES

Se deben seguir las instrucciones que aparecen en el cuadro de RECOMENDACIÓN para dimensionar adecuadamente la instalación. Para ello, se volverá al **Paso 2** tantas veces como sea necesario.

Una vez aparezca el siguiente mensaje en el cuadro de RECOMENDACIÓN, se pasará a 4.b.AEROGENERADOR CASERO o a 4.c.AEROBOMBA, en el caso de querer comparar varias opciones. Si no es así, se saltará directamente a 5.ALMACENAMIENTO DE AGUA.



Este mensaje aparecerá cuando el VOLUMEN BOMBEADO TOTAL sea entre 4 y 5 veces mayor que el VOLUMEN BOMBEADO OBJETIVO. De esta manera se reduce el riesgo de que se produzcan faltas de agua, pero se puede dar por buena la instalación con un sobredimensionamiento menor para ahorrar costes o por otros motivos.

Paso 5. Añadir a la instalación los sistemas de protección pertinentes

Una vez seleccionada la bomba, el aerogenerador y demás elementos, se deberá considerar la posibilidad de añadir otras protecciones al sistema, como interruptores diferenciales u otros, siguiendo las recomendaciones de los fabricantes.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

4.b. Aerogenerador casero

Esta hoja de cálculo está basada en el libro "Wind Power Workshop" de Hugh Piggott y para construir este tipo de instalación habría que seguir sus instrucciones.

Paso 1. Comprobar la validez de los datos de la tabla de PARÁMETROS DE CÁLCULO

Todos los datos deben haberse completado automáticamente. Se debe tener en cuenta que la FRECUENCIA DEL AEROGENERADOR introducida en la hoja de cálculo de CURVAS CARACTERÍSTICAS debe ser de 50 Hz, ya que se tratará de alcanzar ese valor con la multiplicadora, y la selección de la bomba se habrá realizado teniendo en cuenta esto. Se podrá modificar este valor más adelante si fuera necesario.

En el caso de que aparezca #¡VALOR! en alguna celda, hay algún valor introducido erróneo.

Parámetros de cálculo		
Las celdas de esta tabla se completan automáticamente		
Velocidad del viento media	m/s	6,461139
Velocidad de referencia	m/s	6
Tiempo de abastecimiento teórico	horas/día	1
Volumen bombeado objetivo	m3/día	3
Bomba		
Altura de trabajo	m	199,3345
Caudal de trabajo	m3/h	8,430343
Frecuencia de la red	Hz	50
Frecuencia del aerogenerador	Hz	50

Paso 2. Completar los DATOS DE LA INSTALACIÓN

Datos de la instalación		
Completar las celdas destacadas en amarillo		
Bomba		
Completar con datos de la hoja de características de la bomba		
Potencia nominal	W	7844
Caudal homólogo	m3/h	5,567452
Potencia homóloga (*)	W	7500
Potencia de trabajo	W	400
Aerogenerador		
Velocidad de referencia	m/s	6
Potencias medias disponibles		
W		
Diámetro de las palas 1 m	1	30
Diámetro de las palas 2 m	2	121
Diámetro de las palas 3 m	3	272
Diámetro de las palas 4 m	4	483
Diámetro de las palas mínimo	m	4
Potencia media mínima	W	483
Seleccionar un diámetro de palas tal que la potencia media sea suficiente para alimentar la bomba		
Diámetro de palas elegido	m	4
Potencia media	W	483
Potencias instantáneas disponibles		

W		
Velocidad del viento 2,2 m/s	2,2	12
Velocidad del viento 4,5 m/s	4,5	100
Velocidad del viento 10 m/s	10	1120
Velocidad del viento 20 m/s	20	9000
Multiplicadora		
Seleccionar TSR siguiendo las recomendaciones de la tabla "TSR - No. palas - Funciones"		
TSR	-	4
Velocidades angulares disponibles		
rpm		
Potencia 10 W	10	2032
Potencia 50 W	50	909
Potencia 100 W	100	642
Potencia 250 W	250	406
Potencia 500 W	500	287
Potencia de referencia	W	500
Velocidad angular	rpm	287
Polos del generador	-	2
Frecuencia sin multiplicadora	Hz	4,783333
Relación de multiplicación ideal	-	10,45296
Relación de multiplicación real	-	10
Frecuencia del aerogenerador real	Hz	47,83333

Paso 2.1. Introducir la POTENCIA NOMINAL de la BOMBA

Este dato aparece en la hoja de características de la bomba seleccionada.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

Paso 2.2. Introducir la POTENCIA HOMÓLOGA de la BOMBA

La POTENCIA HOMÓLOGA se obtiene de la curva de la bomba de la hoja de características proporcionada por el fabricante y es la potencia absorbida correspondiente al CAUDAL HOMÓLOGO.

Paso 2.3. Introducir el DIÁMETRO DE PALAS ELEGIDO

En función de los datos introducidos, aparecerá en los DATOS DE LA INSTALACIÓN, el DIÁMETRO DE PALAS MÍNIMO y la POTENCIA MEDIA MÍNIMA. Estos datos pueden servir de referencia para establecer el DIÁMETRO DE PALAS ELEGIDO.

Paso 2.4. Introducir el TSR o Tip Speed Ratio

El valor de este factor depende de la función que cumpla el aerogenerador. Para elegirlo se ha incluido en la hoja de cálculo la tabla de TSR - NO. PALAS - FUNCIONES, que también incluye una aproximación del NÚMERO DE PALAS que debe tener.

TSR - No. palas - Funciones		
TSR	Palas	Funciones
1	6 - 20	Bomba lenta
2	4 - 12	Bomba rápida
3	3 - 6	Dutch de 4 palas
4	2 - 4	Generador lento
5 - 8	2 - 3	Generador
8 - 15	1 - 2	Velocidad máxima

Paso 2.5. Introducir los POLOS DEL GENERADOR

Este valor depende de si el generador se va a construir de manera manual o de los generadores disponibles. En caso de que el número de polos sea mayor, la frecuencia de la corriente de salida del generador será mayor, lo cual implicará que la relación de multiplicación de la multiplicadora podrá ser menor. Esto puede ser útil si la FRECUENCIA SIN MULTIPLICADORA es pequeña y, por tanto, se obtiene una RELACIÓN DE MULTIPLICACIÓN IDEAL muy alta.

Paso 2.6. Introducir la RELACIÓN DE MULTIPLICACIÓN REAL

Este valor depende de las características de las multiplicadoras que estén disponibles, pero deberá ser lo más próximo posible a la RELACIÓN DE MULTIPLICACIÓN IDEAL para alcanzar una frecuencia cercana a 50 Hz en la corriente de alimentación de la bomba.

Paso 3. Reajustar la bomba a la nueva frecuencia del aerogenerador

Una vez introducida la RELACIÓN DE MULTIPLICACIÓN REAL, aparecerá en la tabla de DATOS DE LA INSTALACIÓN la FRECUENCIA DEL AEROGENERADOR REAL. Si ésta es distinta de 50 Hz, aparecerá el siguiente mensaje en el cuadro de ADVERTENCIA.

ADVERTENCIA
Se debe introducir la frecuencia real del aerogenerador obtenida en los datos de la multiplicadora en la hoja de CURVAS CARACTERÍSTICAS para seleccionar la bomba más adecuada.

En tal caso, se debe introducir su valor en la FRECUENCIA DEL AEROGENERADOR de la CURVA H-Q CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA A LA FRECUENCIA DEL AEROGENERADOR de la hoja de cálculo de CURVAS CARACTERÍSTICAS, y volver al **Paso 8 de 3. CURVAS CARACTERÍSTICAS** para ajustar las dimensiones de la bomba a la nueva frecuencia.

Curva H-Q característica de la bomba a la frecuencia del aerogenerador		
Completar la celda destacadas en amarillo con datos proporcionados por el fabricante del aerogenerador		
Frecuencia del aerogenerador	Hz	47,8

Paso 4. Reajustar el aerogenerador a la nueva bomba

Una vez elegida la nueva bomba, se volverá al **Paso 1** para ajustar el aerogenerador y la multiplicadora a la nueva bomba.

Se volverá al **Paso 3** tantas veces como sea necesario hasta que desaparezca el mensaje del cuadro de ADVERTENCIA.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

Paso 5. Comprobar la validez de los datos de la tabla de PRODUCCIÓN DEL AEROGENERADOR Y DE LA BOMBA

Todos los datos deben haberse completado automáticamente. En el caso de que aparezca #¡VALOR! en alguna celda, hay algún valor introducido erróneo.

PRODUCCIÓN DEL AEROGENERADOR Y LA BOMBA					
Velocidad del viento	Frecuencia de aparición	Potencia del aerogenerador	Bomba activa	Tiempo de bombeo	Volumen Bombeado
m/s	horas/día	W	-	horas/día	m3
1	0,795	0,00	No	0,000	0,000
2	1,661	0,00	No	0,000	0,000
3	2,522	12,00	No	0,000	0,000
4	3,130	12,00	No	0,000	0,000
5	3,380	100,00	No	0,000	0,000
6	3,260	100,00	No	0,000	0,000
7	2,846	100,00	No	0,000	0,000
8	2,264	100,00	No	0,000	0,000
9	1,647	100,00	No	0,000	0,000
10	1,098	1120,00	Sí	1,098	4,890
11	0,671	1120,00	Sí	0,671	2,990
12	0,377	1120,00	Sí	0,377	1,677
13	0,194	1120,00	Sí	0,194	0,863
14	0,091	1120,00	Sí	0,091	0,407
15	0,039	1120,00	Sí	0,039	0,176
16	0,016	1120,00	Sí	0,016	0,070
17	0,006	1120,00	Sí	0,006	0,025
18	0,002	1120,00	Sí	0,002	0,008
19	0,001	1120,00	Sí	0,001	0,003
20	0,000	9000,00	Sí	0,000	0,001
> 20	0,000	9000,00	Sí	0,000	0,000
Total				m3/día	11,109

El VOLUMEN BOMBEADO TOTAL es la previsión de la producción de la instalación y se puede comparar al VOLUMEN BOMBEADO OBJETIVO de la tabla PARÁMETROS DE CÁLCULO, que es la producción necesaria.

Paso 6. Seguir las RECOMENDACIONES

Se deben seguir las instrucciones que aparecen en el cuadro de RECOMENDACIÓN para dimensionar adecuadamente la instalación. Para ello, se volverá al **Paso 2** tantas veces como sea necesario.

Una vez aparezca el siguiente mensaje en el cuadro de RECOMENDACIÓN, se pasará a 4.c.AEROBOMBA, en el caso de querer comparar varias opciones. Si no es así, se saltará directamente a 5.ALMACENAMIENTO DE AGUA.

RECOMENDACIÓN
Puede concluir las iteraciones. La instalación ya se encuentra ajustada.

En caso de que aparezca de nuevo el mensaje de ADVERTENCIA, se volverá al **Paso 3** tantas veces como sea necesario.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

4.c. Aerobomba

Paso 1. Comprobar la validez de los datos de la tabla de PARÁMETROS DE CÁLCULO

Todos los datos deben haberse completado automáticamente. En el caso de que aparezca #¡VALOR! en alguna celda, hay algún valor introducido erróneo.

Parámetros de cálculo		
Las celdas de esta tabla se rellenan automáticamente		
Velocidad del viento media	m/s	6,461139333
Velocidad de referencia	m/s	6
Tiempo de abastecimiento teórico	horas/día	1
Volumen bombeado objetivo	m3/día	3

Paso 2. Completar las ESPECIFICACIONES DE LA BOMBA

En la siguiente tabla se pueden introducir los datos de una o varias aerobombas para comprobar el resultado que darían en la instalación. Estos datos se encuentran en las hojas de características del fabricante.

ESPECIFICACIONES DE LA AEROBOMBA						
Modelos de Bornay						
Modelo	Diámetro	Longitud del golpe		Frecuencia de golpes	Velocidad de viento	
		Largo	Corto		Mínima	Máxima
	m	m	m	golpes/min	m/s	m/s
X	6	0,1270	0,0953	32	6,705	8,046
A	8	0,1810	0,1397	32	6,705	8,046
B	10	0,2350	0,1842	26	6,705	8,046
D	12	0,2858	0,2096	21	8,046	8,941
E	14	0,3429	0,2477	18	8,046	8,941
F	16	0,3778	0,2889	16	8,046	8,941
Otros modelos						
Completar con información de la hoja de características de la aerobomba, sólo es necesario completar las celdas destacadas en amarillo						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Como se puede observar, ya se encuentran incluidos algunos modelos de Bornay. En caso de usar estos modelos ya incluidos, no es necesario completar el resto de la tabla.

- El DIÁMETRO se refiere al diámetro de las palas de la aerobomba.
- La LONGITUD DEL GOLPE es la distancia que recorre la pieza que se une al pistón de la bomba en cada vuelta del rotor. En el caso de algunas aerobombas es posible establecer dos configuraciones en la construcción de la misma, que son GOLPE LARGO y GOLPE CORTO.
- La FRECUENCIA DE GOLPES es el número de golpes por minuto. Normalmente se da el valor máximo, lo que se tendrá en cuenta en el sobredimensionamiento de la aerobomba.
- La VELOCIDAD DEL VIENTO MÍNIMA y MÁXIMA es el rango de trabajo de la aerobomba, fuera de estos valores no estará activa.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

Paso 3. Seleccionar el MODELO de aerobomba y la CONFIGURACIÓN DEL GOLPE

En la tabla de DATOS DE LA AEROBOMBA se seleccionará el MODELO de aerobomba y la CONFIGURACIÓN DEL GOLPE en las listas desplegables.

Datos de la aerobomba		
Completar únicamente las celdas destacadas en amarillo		
Modelo	-	X
Configuración del golpe	-	Largo
Longitud del golpe	m	0,127000254
Frecuencia de golpes	golpes/min	32
Velocidad del viento		
Mínima	m/s	6,70540903
Máxima	m/s	8,046490836

En la primera iteración se seleccionará aquella de menor diámetro o de menor precio para empezar la comparación.

Paso 4. Completar los DATOS DE LA BOMBA DE PISTÓN

Se debe introducir el DIÁMETRO INTERIOR DEL CILINDRO y la CARRERA DEL PISTÓN. Estos valores pueden estar limitados por las bombas disponibles, sobretodo en el caso de usar una bomba de pistón ya existente. Si no, lo más recomendable es comenzar por dimensiones pequeñas para reducir el precio.

Datos de la bomba de pistón		
Completar únicamente las celdas destacadas en amarillo		
Diámetro interior del cilindro	m	0,1
Carrera del pistón	m	0,3
Capacidad máxima de bombeo	m3	0,002356194
Capacidad real de bombeo	m3	0,000997458

Paso 5. Comprobar la validez de los datos de la tabla de PRODUCCIÓN DE LA AEROBOMBA

Todos los datos deben haberse completado automáticamente. En el caso de que aparezca #¡VALOR! en alguna celda, hay algún valor introducido erróneo.

PRODUCCIÓN DE LA AEROBOMBA				
Velocidad del viento	Frecuencia de aparición	Aerobomba activa	No. de golpes	Volumen bombeado
m/s	horas/día	-	golpes	m3
1	0,795	No	0	0,000
2	1,661	No	0	0,000
3	2,522	No	0	0,000
4	3,130	No	0	0,000
5	3,380	No	0	0,000
6	3,260	No	0	0,000
7	2,846	Sí	5465	5,451
8	2,264	Sí	4347	4,336
9	1,647	No	0	0,000
10	1,098	No	0	0,000
11	0,671	No	0	0,000
12	0,377	No	0	0,000
13	0,194	No	0	0,000
14	0,091	No	0	0,000
15	0,039	No	0	0,000
16	0,016	No	0	0,000
17	0,006	No	0	0,000
18	0,002	No	0	0,000
19	0,001	No	0	0,000
20	0,000	No	0	0,000
> 20	0,000	No	0	0,000
Total			m3/día	9,787

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

El VOLUMEN BOMBEADO TOTAL es la previsión de la producción de la instalación y se puede comparar al VOLUMEN BOMBEADO OBJETIVO de la tabla PARÁMETROS DE CÁLCULO, que es la producción necesaria.

Paso 6. Seguir las ADVERTENCIAS y RECOMENDACIONES

En el cuadro ADVERTENCIA aparecerán mensajes relacionados con el estado actual de la instalación.

Se deben seguir las instrucciones que aparecen en el cuadro de RECOMENDACIÓN para elegir la bomba adecuada para la instalación. Para ello, volverá al **Paso 3** o al **Paso 4** tantas veces como sea necesario.

Una vez aparezcan los siguientes mensajes en los cuadros de ADVERTENCIA y RECOMENDACIÓN, se pasará a 5. ALMACENAMIENTO DE AGUA.

ADVERTENCIAS
Se debe tener en cuenta que, para comparar la producción del aerogenerador con la de la aerobomba, los datos de viento de la hoja de cálculo VELOCIDAD DE VIENTO Y WPD deben corresponder a la localización de cada uno.
Ninguna.

RECOMENDACIONES
Las recomendaciones llevadas a cabo deben ser compatibles entre sí
-
Se alcanza el volumen bombeado objetivo.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

5. Almacenamiento del agua

Paso 1. Seleccionar el TIPO DE AEROGENERADOR en la tabla de CÁLCULO DE VOLUMEN DEL TANQUE

Se debe seleccionar en la lista desplegable COMERCIAL, CASERO o AEROBOMBA en función del tipo de instalación que se vaya a realizar.

Cálculo del volumen del tanque		
Completar celdas destacadas en amarillo		
Tipo de aerogenerador	-	Aerobomba
Máximo periodo sin bombeo	días	Desconocido
Periodo de almacenamiento en tanque (*)	días	3
Volumen del tanque	m3	9

Paso 2. Completar DATOS DEL VIENTO

Si se dispone de los datos meteorológicos correspondientes de al menos un año, se recomienda completar la tabla para obtener valores más fiables en el dimensionamiento del tanque.

Datos del viento						
Completar con datos meteorológicos disponibles lo más próximos posibles al proyecto						
Año	1			2		
Periodo	Velocidad media	Bomba activa	Contador	Velocidad media	Bomba activa	Contador
días	m/s	-	días	m/s	-	días
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						

Paso 3. Introducir el PERIODO DE ALMACENAMIENTO EN TANQUE en la tabla de CÁLCULO DE VOLUMEN DEL TANQUE

El PERIODO DE ALMACENAMIENTO EN TANQUE es el número de días máximo en los que se puede cubrir la demanda con el contenido del tanque lleno. Si se ha completado la tabla de DATOS DEL VIENTO, aparecerá el MÁXIMO PERIODO SIN BOMBEO, que puede servir como referencia. Si no, aparecerá el mensaje de "Desconocido".

Cálculo del volumen del tanque		
Completar celdas destacadas en amarillo		
Tipo de aerogenerador	-	Aerobomba
Máximo periodo sin bombeo	días	Desconocido
Periodo de almacenamiento en tanque (*)	días	3
Volumen del tanque	m3	9

Es importante tener en cuenta que este cálculo tiene varias limitaciones:

- Las condiciones de viento son muy variables en función de la zona, el terreno, los obstáculos del entorno, la altura, etc. En consecuencia, los datos meteorológicos que se obtengan de una estación meteorológica pueden ser muy distintos a los reales. Además, la estación meteorológica más cercana puede no serlo demasiado, debido a los escasos recursos de los países de África Subsahariana.
- Por otro lado, el agua extraída del pozo puede ser potable, pero la duración de esta potabilidad depende mucho de las condiciones en las que se encuentre. El agua tratada con cloro puede almacenarse hasta 6 meses en un tanque suficientemente estanco, pero el agua extraída de un pozo no debe almacenarse más de unos pocos días.

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

Esto implica que existen las siguientes opciones:

- **Almacenar el agua en un tanque cuyo volumen sea el correspondiente a la demanda de pocos días**, de tal manera que el agua del interior del tanque se renueve con suficiente frecuencia como para mantenerla potable y no sea necesario tratarla después para que sea apta para consumo.

Ventajas

- Se evita el tratamiento posterior del agua, lo que permite su uso inmediato y reduce costes.
- El coste del tanque será menor por su reducido tamaño.
- La estructura de elevación del tanque será también más barata y sencilla de construir.
- La renovación frecuente del agua también evita el calentamiento excesivo, lo cual reduce la severidad de floración de algas y las pérdidas por evaporación del agua.

Inconvenientes

- Pueden producirse faltas de agua si las condiciones de viento provocan que la bomba esté inactiva durante más días que para los que está pensado el almacenamiento.
- La disponibilidad de agua para los días en los que la demanda aumente será menor.
- Si se produce un descenso de la demanda y el agua queda estancada temporalmente, la velocidad de floración de las algas y las pérdidas por evaporación serán mayores que en tanques más grandes debido a la mayor velocidad de calentamiento.

- **Almacenar el agua en un tanque tal que se pueda cubrir la demanda durante el número de días seguidos máximo en los que no hay bombeo**. Este planteamiento en algunos casos supondrá un volumen del tanque mucho mayor.

Ventajas

- Se asegura la disponibilidad de agua durante todos los días del año.

Inconvenientes

- Es necesario mantener un control de calidad de agua mediante el mantenimiento del tanque.
- Se debe realizar el tratamiento del agua extraída del mismo para su potabilización en caso de que se vaya a utilizar para consumo humano.
- Para prolongar el buen estado del agua en el interior del tanque y el resto de la instalación es recomendable el uso de químicos como la adición de cloro al agua.
- El coste del tanque será mayor debido a su tamaño.
- El coste de la estructura de elevación también será mayor.
- Si el tamaño del tanque es muy excesivo no será posible elevarlo con una estructura.
- Es recomendable que el agua se renueve por completo y se proceda a la limpieza del interior del tanque cada 6 meses.
- El cálculo necesario para obtener el volumen del tanque es complejo y los datos necesarios para realizarlo pueden no estar disponibles o ser difíciles de conseguir.

Debido a los numerosos inconvenientes de la segunda opción, lo más recomendable es utilizar un **tanque de un tamaño reducido**.

En caso de que no existan otras fuentes de agua, es muy recomendable consultar los datos meteorológicos más cercanos a la zona de la instalación para hacer una previsión de si se pueden producir faltas de agua en la instalación.

Paso 4. Tener en cuenta las ADVERTENCIAS

Si se ha completado la tabla de DATOS DEL VIENTO, aparecerán mensajes en el cuadro de ADVERTENCIAS en función del valor introducido en PERIODO DE ALMACENAMIENTO EN TANQUE. Si el cuadro aparece vacío, como se muestra a continuación, no es necesario realizar ningún ajuste.

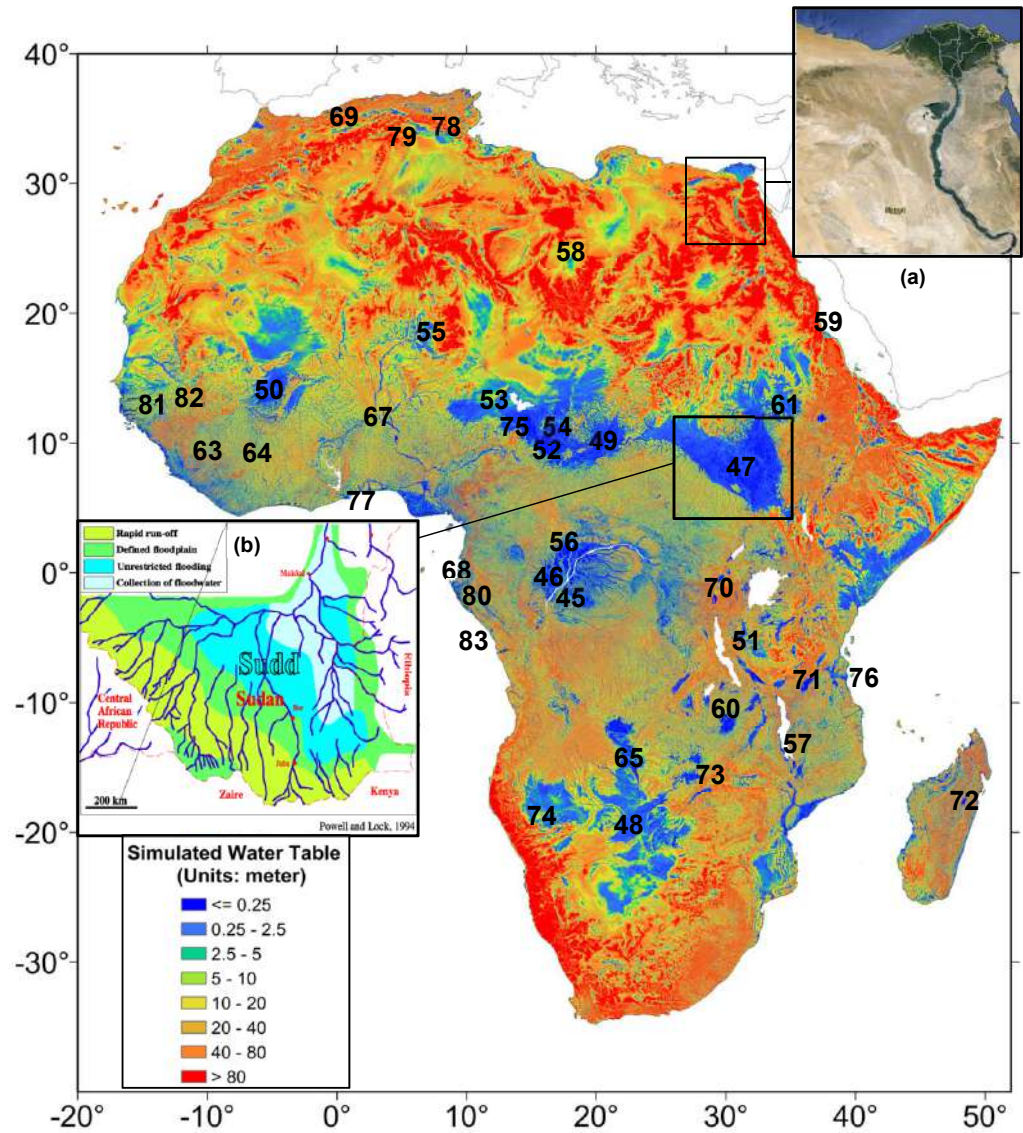
ADVERTENCIAS

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

Anexos

Anexo I: Mapa de zonas freáticas en África

La numeración indica la situación de los humedales del Anexo II.



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

Anexo II: Humedales Ramsar en África

	Humedal	País	Estado	Zona protegida	Lat.	Lon.
45	<i>Ngiri-Tumba-Maindombe</i>	Dem Rep Congo	Equateur, Bandundu	65,696	-1.50	17.50
46	<i>Grands affluents</i>	Congo	Plateaux, Sangha, Likouala, Cuvette	59,081	-0.25	16.70
47	<i>Sudd</i>	Sudan	Southern Sudan	57,000	7.57	30.65
48	<i>Okavango Delta System</i>	Botswana	Ngamiland	55,374	-19.28	22.90
49	<i>Plaines d'inondation des Bahr Aouk et Salamat</i>	Chad	Salamat, Bahr Koh	49,220	10.75	20.55
50	<i>Delta Intérieur du Niger</i>	Mali	Mopti, Ségou, Tombouctou	41,195	15.20	-4.10
51	<i>Malagarasi-Muyovozi Wetlands</i>	Tanzania	Kigoma, Shinyanga, & Tabora	32,500	-5.00	31.00
52	<i>Plaines d'inondation du Logone et les dépressions Toupouri</i>	Chad	Chari-Baguirmi, Mayo-Kebbi, Tandjilé	29,789	10.50	16.23
	<i>Partie tchadienne du lac Tchad</i>	Chad	Lac, Kenam	16,482	14.33	13.62
	<i>Lake Chad Wetlands in Nigeria</i>	Nigeria	Borno	6,074	13.07	13.80
	<i>Lac Tchad</i>	Niger	Diffa	3,404	14.25	13.33
	<i>Partie Camerounaise du Lac Tchad</i>	Cameroon	Far North Region	1,250	12.77	14.32
53				27,210		
54	<i>Plaine de Massenya</i>	Chad	Baguirmi	25,260	11.25	16.25
55	<i>Guelts et Oasis de l'Air</i>	Niger	Agadez	24,132	18.30	9.50
56	<i>Sangha-Nouabalé-Ndoki</i>	Congo	Sangha, Likouala	15,250	1.68	16.43
57	<i>Lake Niassa and its Coastal Zone (Lago Niassa e Zona Costeira)</i>	Mozambique	Niassa Province	13,637	-12.50	34.85
58	<i>Banc d'Arguin</i>	Mauritania		12,000	20.83	16.75
59	<i>Suakin-Gulf of Agig</i>	Sudan	Red Sea State	11,250	18.57	38.08
60	<i>Bangweulu Swamps</i>	Zambia	Northern Province	11,000	-11.42	29.98
61	<i>Dinder National Park (DNP)</i>	Sudan	Sennar State	10,846	12.32	34.78
62	<i>Niger-Niandan-Milo</i>	Guinea	Kankan	10,464	10.50	-9.50

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

63	<i>Niger-Mafou</i>	Guinea	Kankan, Faranah	10,155	9.88	-10.62
64	<i>Sankarani-Fié</i>	Guinea	Kankan	10,152	10.42	-8.50
65	<i>Zambezi Floodplains</i>	Zambia	Western Province	9,000	-15.25	23.25
66	<i>Tinkisso</i>	Guinea	Faranah, Kankan	8,960	11.22	-10.58
67	<i>Site Ramsar du Complexe W</i>	Benin	Alibori	8,955	11.83	2.50
68	<i>Site Ramsar Bas Ogooué</i>	Gabon	Moyen Ogooué, Ogooué maritime	8,627	-0.65	10.02
69	<i>Chott Ech Chergui</i>	Algeria	Saïda	8,555	34.45	0.83
70	<i>Parc national des Virunga</i>	Dem Rep Congo	Nord-Kivu	8,000	-1.25	29.50
71	<i>Kilombero Valley Floodplain</i>	Tanzania	Morogoro Region	7,967	-8.67	36.17
72	<i>Le Lac Alaotra: les zones humides et bassins versants</i>	Madagascar	Ambatondrazaka	7,225	-17.47	48.52
73	<i>Kafue Flats</i>	Zambia	Southern & Central Provinces	6,005	-15.68	27.27
74	<i>Etosha Pan, Lake Oponono & Cuvelai drainage</i>	Namibia		6,000	-19.25	15.50
75	<i>The Waza Lagone Floodplain</i>	Cameroon	Far North Region	6,000	11.63	14.62
76	<i>Rufiji-Mafia-Kilwa Marine Ramsar Site</i>	Tanzania	Coast, Lindi Regions	5,969	-8.13	39.63
77	<i>Zones Humides du Littoral du Togo</i>	Togo	Maritime	5,910	6.57	1.42
78	<i>Chott El Jerid</i>	Tunisia	Tozeur, Kebili	5,862	33.70	8.40
79	<i>Chott Melghir</i>	Algeria	El Oued, Biskra, Khenchela	5,515	34.25	6.32
80	<i>Site Ramsar des Monts Birougou</i>	Gabon	Ngounié, Ogooué- lolo	5,368	-0.65	10.02
81	<i>Gambie-Oundou-Liti</i>	Guinea	Labé	5,274	11.55	-12.30
82	<i>Bafing-Falémé</i>	Guinea	Labé	5,173	12.00	-11.50
83	<i>Conkouati-Douli</i>	Congo	Kouilou	5,050	-3.92	11.45

Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

Anexo III: Catálogo de plantas freatofita



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

CAROXYLON TETRANDRUM (FORSSK.) AKHANI & ROALSON



CAROXYLON VERMICULATUM (L.) AKHANI & ROALSON



CARPHALEA PUBESCENS (KLOTZSCH) VERDC.



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

CAROXYLON TETRANDRUM (FORSSK.) AKHANI & ROALSON



CAROXYLON VERMICULATUM (L.) AKHANI & ROALSON



CARPHALEA PUBESCENS (KLOTZSCH) VERDC.



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

CENTROSEMA PUBESCENS BENTH.



COGNIAUXIA TRILOBATA COGN.



COLA FLAVO



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

DISA STRICTA SOND.



ECHINOPS SPINOSISSIMUS SUBSP. SPINOSUS GREUTER



ECHINOPS SPINOSUS L.



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

ERICA EREMIOIDES SUBSP. PUBESCENS (E.G.H. OLIV.) E.G.H. OLIV.



ERIGERON TRILOBUS (DECNE.) BOISS.



EUPHORBIA HIRSUTA L.



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

EUPHORBIA SCHIMPERIANA VAR. VELUTINA N.E. BR.



FAGONIA GLUTINOSA DELILE



FERRARIA GLUTINOSA (BAKER) RENDLE



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

FRANKENIA LAEVIS SUBSP. VELUTINA (DC.) MAIRE



FUIRENA STRICTA STEUD.



HAEMANTHUS PUBESCENS SUBSP. LEIPOLDTII SNIJMAN



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

HELIOTROPIMUM CURASSAVICUM L.



HERMANNIA STRICTA (E. MEY. EX TURCZ.) HARV.



HOLARRHENA PUBESCENS (BUCH.)



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

KALLSTROEMIA PUBESCENS (G.DON) DANDY



KNIPHOFIA STRICTA CODD



LACTUCA VIMINEA (L.) J. PRESL & C. PRESL



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

LEPTACTINA BENGUELENSIS (BENTH. & HOOK. F.) R.D. GOOD



LEPTADENIA LANCEOLATA (POIR.) GOYDER



LINUM PUBESCENS BANKS & SOL.



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

MORAEA STRICTA BAKER



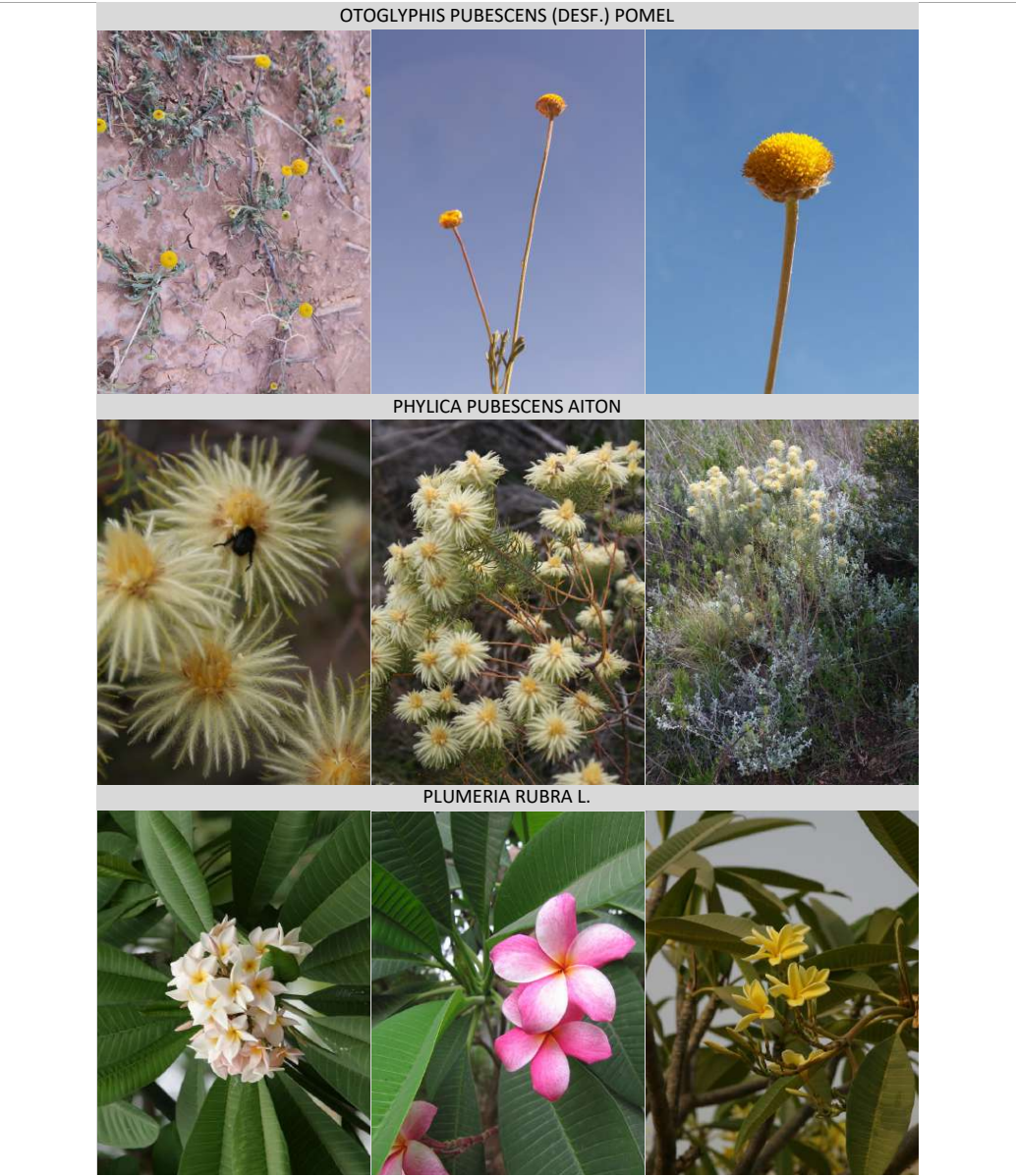
ONONIS PUBESCENS L.



OTOGLYPHIS MAROCCANA (BALL) DOBIGNARD



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

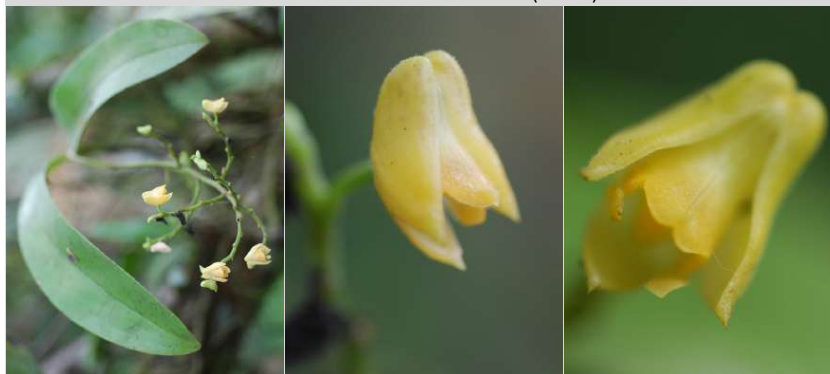


Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

POLYSTACHYA PUBESCENS (LINDL.) RCHB. F.



POLYSTACHYA STRICTA VAR. LAXIFLORA (LINDL.) PEREZ



PROSOPIS JULIFLORA (SW.) DC.



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

RAPHIONACME VELUTINA SCHLTR.



RHYNCHOSIA SUBLOBATA (SCHUMACH. & THONN.) MEIKLE



ROEPERA PUBESCENS (SCHINZ) BEIER & THULIN



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos

SALSOLA APHYLLA L. F.



SALSOLA KALI L.



SAMBUCUS CANADENSIS L.



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

SILENE GALLICA L.



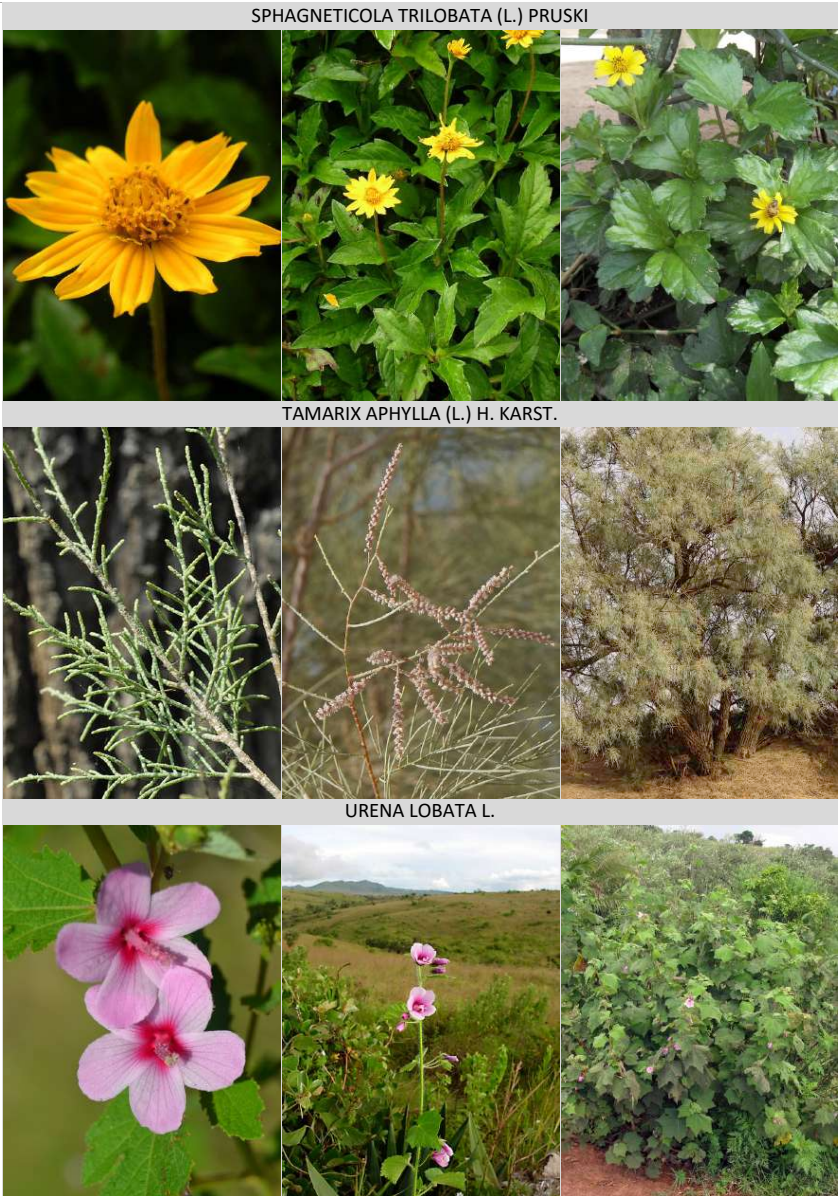
SMEATHMANNIA PUBESCENS SOL. EX R.BR.



SOLANUM WRIGHTII BENTH.

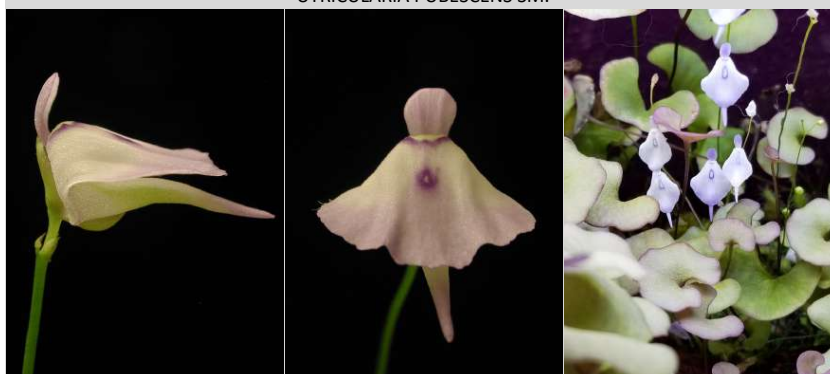


Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
Claudia Ríos Marcos



Guía para proyectos de bombeo eólico en pequeñas comunidades
 Claudia Ríos Marcos

UTRICULARIA PUBESCENS SM.



VASCONCELLEA PUBESCENS A. DC.



WURMBEA STRICTA (BURM. F.) J. C. MANNING & VINNIKOVÁ

