



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TURBINA HIDRÁULICA ARTESANAL PARA  
SU FABRICACIÓN EN CAMERÚN

Autor del Proyecto: Pablo Sánchez Villamor

Director del Proyecto: Francisco Tovar Rodríguez

Coordinador del Proyecto: Fernando de Cuadra García

Firma del Alumno:

Firma del Director:



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título **Diseño y construcción de una turbina hidráulica artesanal para su fabricación en Camerún** en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2018 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.: Pablo Sánchez Villamor      Fecha: 12/09 /2018



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Francisco Tovar Rodríguez      Fecha: 03/ 10/ 2018



## **AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO**

### ***1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.***

El autor D. **Pablo Sánchez Villamor**

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: **Diseño y construcción de una turbina hidráulica artesanal para su fabricación en Camerún**, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

### ***2º. Objeto y fines de la cesión.***

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

### ***3º. Condiciones de la cesión y acceso***

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

### ***4º. Derechos del autor.***

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

### ***5º. Deberes del autor.***

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

**6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.**

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 12 de septiembre de 2018

**ACEPTA**

Fdo.:



Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:





# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TURBINA HIDRÁULICA ARTESANAL PARA SU FABRICACIÓN EN CAMERÚN

**Autor: Pablo Sánchez Villamor**

Director: Francisco Tovar Rodríguez

Entidad Colaborativa: ICAI- Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

### INTRODUCCIÓN

Hoy en día cerca de mil millones de personas siguen sin tener acceso a la electricidad, lo que representa un 13% de la población mundial, según datos de un informe realizado conjuntamente por la Agencia Internacional de la Energía (AIE), el Banco Mundial y la Organización Mundial de la Salud (OMS), entre otros. Este número ha ido reduciéndose año tras año; pero, aun así, sigue siendo una cifra preocupante, sobre todo si pensamos que está concentrada en los países del continente africano

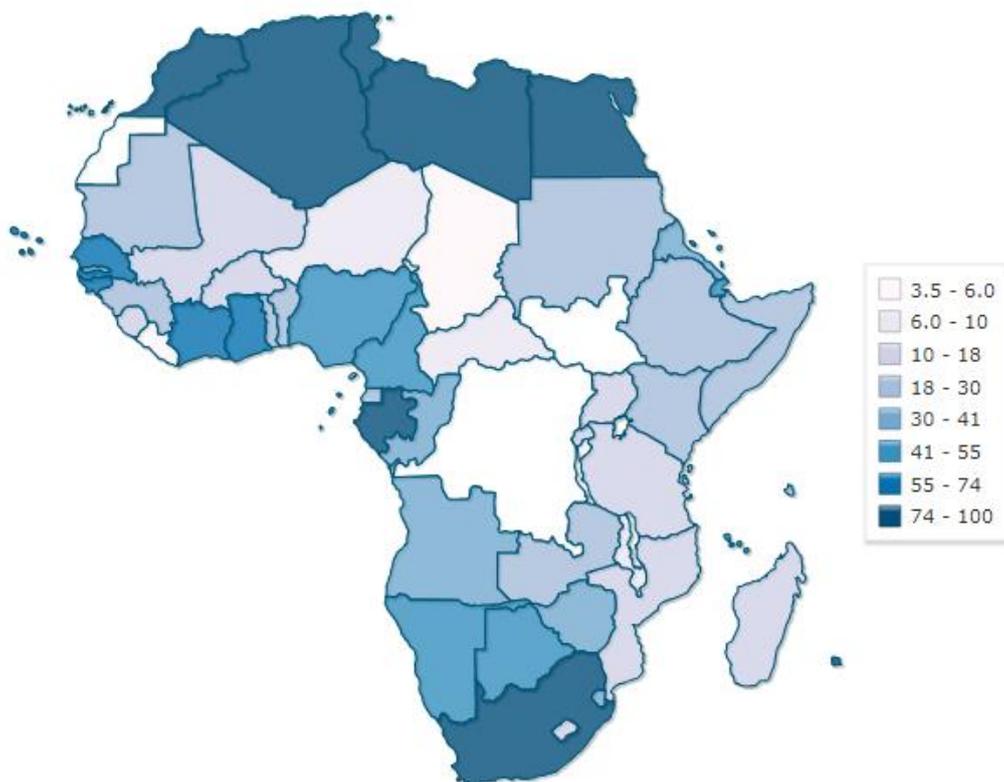


Figura 1. Mapa de porcentaje de acceso a la electricidad en África

La reducción de este gran porcentaje se debe realizar de una forma responsable, sin comprometer al planeta, siendo la preocupación por el cuidado del mismo cada vez mayor. Este papel fundamental lo realizan las energías renovables, que se plantean, según el mismo informe, como la principal alternativa a la accesibilidad plena a la electricidad en el mundo.

Para conseguir el acceso pleno, se debe llevar a cabo una política de abastecimiento de las zonas rurales, donde un 86,6% de las personas no tienen acceso a la electricidad. El proceso de electrificación de las zonas alejadas de los centros urbanos es largo y costoso. Las instalaciones aisladas de energía obtenida a través de fuentes de energía renovables, que además en zonas rurales son más abundantes que en las urbanas, plantean una solución rápida para este problema.

El primer objetivo de este proyecto es el de hacer frente al mencionado problema, aportando una forma de electrificación a través de energía renovable, para implantarla en un país con un nivel de acceso a la electricidad menor del 50% como es Camerún.

El clima de los países de África central con precipitaciones abundantes a lo largo del año provoca un alto caudal en los ríos, a partir del cual se podría obtener energía suficiente como para alimentar a todo el continente.

Siendo “k” una constante y siendo “g” la aceleración de la gravedad expresada en  $m/s^2$ , un salto de río de altura “H” expresada en metros con un caudal de agua “Q” expresado en  $m^3/s$  es capaz de proporcionar una potencia en kW, “P”, que cumple la siguiente relación:

$$P = Q * H * g * k$$

Esta posibilidad de transformar la energía potencial de un salto de río en países con recursos hidrológicos más que suficientes, hace de la energía micro hidráulica la renovable más adecuada para el cumplir el objetivo de este proyecto.

Realizar este desarrollo de la turbina hidráulica dentro del proyecto de la granja escuela *Shumas Biofarm* en Kumbo, Camerún, permite que se hable de un proyecto real que se materializará en una próxima visita al país. La colaboración entre la Fundación de Ingenieros de ICAI para el Desarrollo, Energía sin Fronteras y la ONG local Shumas posibilita que se trate de un proyecto de desarrollo y enseñanza. Tras el diseño de la

turbina, se instruirá a los habitantes de la zona en las técnicas de obtención de energía a través de esta fuente de energía renovable.

El diseño de la turbina se realizará, por tanto, atendiendo a los materiales y recursos disponibles en el país africano. Un primer modelo que se realizará en Madrid, España, servirá como base para elaborar un diseño en Kumbo utilizando proveedores del país. Obtener la máxima similitud entre el proyecto base y el modelo final será fundamental para el éxito del proyecto. Se realizará gracias a la ayuda de voluntarios en Kumbo, de forma que sea replicable en Camerún atendiendo tanto a los materiales como a los procesos de fabricación que deban llevarse a cabo.

## METODOLOGÍA

El proyecto se desarrollará de manera que funcione como una justificación teórica y numérica de todas las decisiones tomadas. De esta forma se dividirá en 4 secciones:

- Una primera sección, en la que se encuentran la “Introducción” y el “Estado de la cuestión”, sirve como análisis del escenario en el que se trabajará. Entender el papel que juega la Fundación de Ingenieros de ICAI para el Desarrollo en el desarrollo e instrucción de renovables en el país africano es fundamental para tener una visión completa de lo que se trata de conseguir en este proyecto. Se profundizará en los éxitos que ha cosechado el proyecto Shumas Biofarm, que geográficamente no se limita únicamente a Kumbo, sino que sigue aumentando su radio de influencia. Además, se estudiará el estado en que se encuentra el desarrollo de la energía hidráulica en los países del continente africano y, más concretamente, la energía micro hidráulica que se corresponde con la que se trabaja en el proyecto según la capacidad de producción
- La segunda sección de este proyecto es fundamental para entender la totalidad del documento, pues trata de analizar los datos y requisitos iniciales a tener en cuenta en el desarrollo del modelo de la turbina. Se parte de un proyecto anterior realizado por Gema Cañeque Simón, alumna de la Universidad Pontificia Comillas. En él se analizó el tipo de turbina a emplear, se diseñaron unos álabes realizados a partir de la fabricación de un prensa-chapas y se exponían métodos para la medida del caudal de un río. El proyecto actual se centra, además de en el

desarrollo de la turbina, en la justificación teórica de una de esas decisiones tomadas en el trabajo anterior: la elección del tipo de alternador a emplear.

Se considera que estas justificaciones son de gran importancia debido a que se pretende instruir a los estudiantes de la granja escuela; y, por tanto, la claridad en el presente proyecto facilitará la posterior enseñanza.

- En la tercera parte se encuadra el diseño y justificación de las decisiones tomadas en el desarrollo del conjunto de la turbina. Este apartado comienza introduciéndonos en el funcionamiento de las máquinas eléctricas de corriente alterna, más concretamente en la máquina síncrona. Se pretende así entender el proceso que ocurre dentro del alternador con el que contamos y que transformará la energía cinética del agua en energía eléctrica. Se diferenciarán las dos partes principales de una máquina síncrona: el rotor y el estator.

A partir de una clasificación de los diferentes tipos de rotor, se estudiarán las diferentes formas de acoplamiento de la máquina síncrona con el eje de la turbina, y, a partir de este análisis teórico en el que se expondrán las ventajas y desventajas de cada uno, se tomará una decisión para el diseño del conjunto. Este método de análisis de ventajas e inconvenientes se utilizará también en siguientes apartados. Siguiendo con el rotor de la máquina, se hablará sobre los diferentes sistemas de excitación que existen y se analizará cómo pueden beneficiar cada una de las características de estos a nuestro proyecto. Entender el sistema de excitación con el que cuenta nuestra máquina síncrona requiere de una explicación previa de los diferentes sistemas disponibles. Así, dentro de la excitación mediante excitatriz analizaremos el sistema de corriente continua y en este, la autoexcitación *shunt*, que tiene una gran relación con nuestro alternador. Además, se estudiará acerca de la excitación mediante excitatriz de corriente alterna y sin escobillas. Por último, dentro del análisis del rotor se tratará la excitación sin escobillas con autoexcitación, para, finalmente explicar el funcionamiento del sistema de excitación de nuestro alternador.

En cuanto al estator, se hablará de los reguladores necesarios en una máquina síncrona para su correcto funcionamiento. Se establecerán las responsabilidades del regulador de tensión que, en el alternador con el que se cuenta, está presente en el propio sistema de excitación. También se estudiarán las responsabilidades del regulador de velocidad, sobre el que se profundizará en mayor medida. Se

justificará numéricamente la necesidad de contar con este último y se explicará cómo debe funcionar de forma que se llegue a una conclusión sobre qué tipo de regulador necesitaremos entre las dos posibilidades (regulador de carga o regulador de inyección).

En cuanto al diseño propio de los elementos de la turbina, se comenzará hablando del rodete, presentando vistas de alzado y perfil junto con una justificación de las dimensiones. De igual manera se procederá con el eje del modelo. Se dimensionarán las poleas según los requerimientos de velocidad y se buscará un proveedor que pueda proporcionarnos dichas medidas. Se presentarán también los planos tanto de la carcasa como de la base de apoyo del conjunto. Se elegirán los anillos Seeger y rodamientos necesarios para el buen funcionamiento de la máquina. Por último, se presentarán una serie de imágenes del montaje en 3D que facilitarán la visión del conjunto diseñado. En un intento de relacionar el proyecto con lo que realmente se realizará en Kumbo, se presentarán las facilidades que tienen en el país para realizar los diseños expuestos.

- En un último apartado se analizará el proyecto en términos económicos, realizando un presupuesto de realización del proyecto y estudiando su viabilidad en este aspecto. Se realizará un listado de los materiales a utilizar con un presupuesto para cada uno de ellos. Analizando el precio de la electricidad se comprobará la viabilidad económica.

## CONCLUSIONES Y RESULTADOS

En este proyecto se presenta un diseño de una turbina hidráulica para su implantación en la región de Kumbo, Camerún. Tras un estudio económico, se ha podido comprobar que el diseño de la turbina en cuestión es viable, y, por tanto, se puede llevar a cabo su instalación.

Gracias a ello, este proyecto tiene la finalidad de servir de guía de aprendizaje a la hora de entender cómo funcionará la turbina y cómo está diseñado cada uno de sus elementos, de forma que se utilice como una guía genérica en la instalación de turbinas eléctricas en zonas de saltos de río donde sea posible su implantación.



# DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN ARTISAN HYDRAULIC TURBINE FOR ITS MANUFACTURE IN CAMEROON

**Author: Sánchez Villamor, Pablo**

Director: Tovar Rodríguez, Francisco

Collaborative Entity: ICAI- Universidad Pontificia Comillas

## SUMMARY

### INTRODUCTION

Today, nearly one billion people still have no access to electricity, which represents 13% of the world's population, according to a report jointly produced by the International Energy Agency (IEA), the World Bank and the World Health Organization (WHO), among others. This number has been decreasing year after year; but it still remains a worrying figure, especially taking into consideration that it is concentrated in the African country.

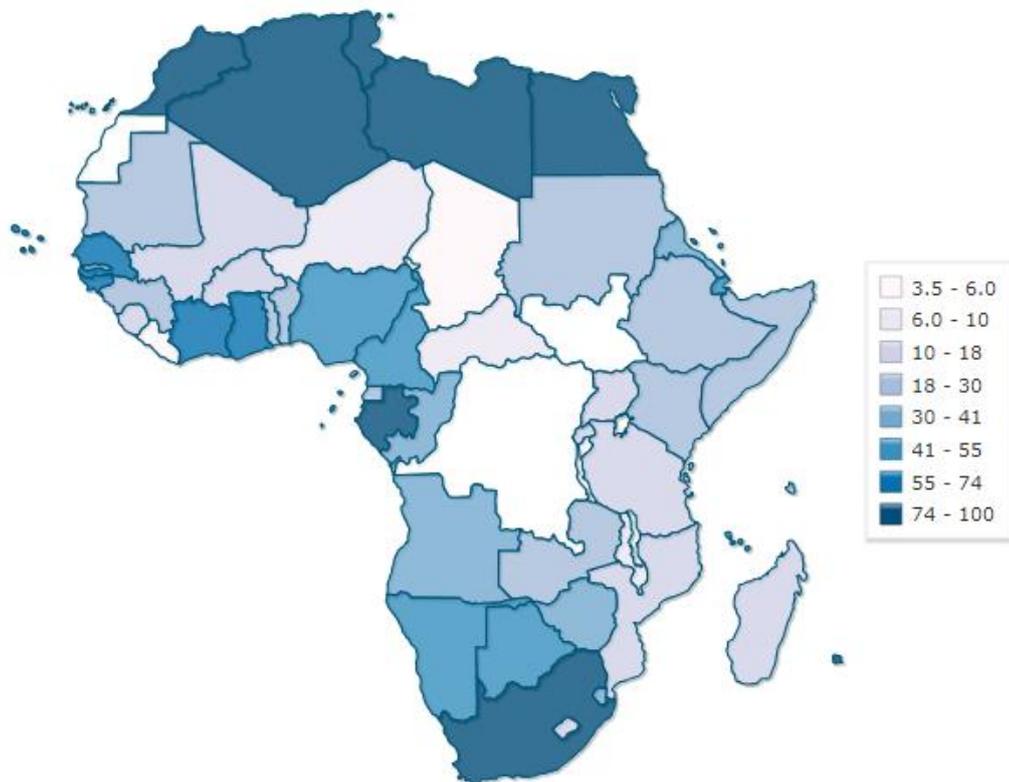


Figura 2. Map of percentage of access to electricity in Africa

In order to reduce this large percentage of people without access to electricity, we must preserve the planet and not to compromise the quality of life of the generations to come. Renewable energies, according to the report above-mentioned, are the main alternatives to get the full access of people to electricity.

To achieve this full access to electricity, a policy for supplying electricity to rural areas must be carried out, as in there the 86.6% of the people do not have access to it. The process of electrification of areas far from urban canters is long and expensive. The isolated energy networks obtained through renewable energy sources, which are also more abundant in rural areas than in urban areas, offer a quick solution to the problem.

The first objective of this project is to address the above-mentioned problem, providing a form of electrification through renewable energy, to implement it in a country with a level of access to electricity lower than 50%, as it is Cameroon.

The climate of Central African countries with abundant rainfall throughout the year causes high-water, from which it could be obtained enough energy to feed the entire continent.

Being “k” a constant and being “g” the acceleration of gravity expressed in m<sup>2</sup>/s, a high-altitude river jump “H” expressed in meters with a flow of water “Q” expressed in m<sup>3</sup>/s is able to provide a power in kW, “P”, which meets the following relationship:

$$P = Q * H * g * k$$

This possibility of transforming the potential energy of a river jump in countries with more than sufficient hydrological resources, makes micro hydro energy the most suitable renewable energy to achieve the objective of this project.

Carrying out this development of the hydraulic turbine within the project of the school farm *Shumas Biofarm* in Kumbo, Cameroon, allows us to talk about a “real project” that will be materialised in an upcoming visit to the country. The collaboration between the Foundation of Engineers of ICAI for Development, Energy without Borders and the local NGO Shumas makes it an educational project. After the design of the turbine, the

inhabitants of the area will be trained in the techniques of obtaining energy through this renewable energy source.

The design of the turbine will be made, therefore, taking into account the materials and resources available in the African country. A first model to be made in Madrid, Spain, will serve as the basis to develop the final design in Kumbo using the suppliers of the destination country. Obtaining the maximum similarity between the base project and the final one will be a critical factor for the success of the project. The project will be carried out thanks to the help of some volunteers in Kumbo, so that it can be replicated in Cameroon, taking into account both the materials and the manufacturing processes that must be developed.

## METHODOLOGY

The project will be developed in such a way that it could work as a theoretical and numerical justification of all the decisions made. In this way, it will be divided into 4 sections:

- The first section, covering the "Introduction" and the "State of the question", would include the analysis of the scenario. Understanding the role played by the ICAI Foundation for Development Engineers in the development and instruction of renewables in the African country is essential to have a complete vision of what is being achieved in this project. The successes of the Shumas Biofarm project, which is not geographically limited to Kumbo, but will continue to increase its influence radius, will be addressed in a comprehensive way. In addition, the status of the hydraulic energy in the countries of the African continent and, more specifically, the micro-hydraulic energy, will be studied.
- The second section of this project is fundamental to understand the entire document as a whole, as it tries to analyse the data and initial requirements to be taken into account in the development of the turbine model. It is based on a previous project carried out by Gema Cañeque Simón, student at the Universidad Pontificia Comillas. In it, the type of turbine to be used was analysed and methods for measuring the flow of a river were exposed. The current project focuses, in addition to the development of the turbine, on the theoretical justification of one

of those decisions taken in the previous work: the choice of the type of alternator to be used.

It is considered that these justifications are of great importance because they are intended to instruct the students of the school farm; and, therefore, the clarity in the present project will facilitate the subsequent teaching.

- The third section includes the design and justification of the decisions taken in the development of the whole turbine. This section begins by introducing us into the operation of AC electric machines, more specifically in the synchronous machine. It is intended to understand the process that occurs within the alternator that we have and that will transform the kinetic energy of water into electrical energy. The two main parts of a synchronous machine will be differentiated: the rotor and the stator.

From a classification of the different types of rotor, the different forms of coupling of the synchronous machine with the axis of the turbine will be studied, and, from this theoretical analysis in which the advantages and disadvantages of each one will be exposed, a decision will be made for the design of the whole turbine. This method of analysing advantages and disadvantages will also be used in the following sections.

Following with the rotor of the machine, we will talk about the different excitation systems existing and we will analyse how each of its characteristics can benefit our project. Understanding the excitation system of our synchronous machine requires a prior explanation of the different systems available. Thus, within excitation by exciter, we will analyse the DC system and in this, self-excitation *shunt*, which has a great relationship with our alternator. Finally, within the analysis of the rotor, the brushless excitation will be treated with self-excitation, to finally explain the functioning of the excitation system of our alternator.

Regarding the stator, the necessary regulators in a synchronous machine for proper operation will be analysed. The functions of the voltage regulator will be established, present in the excitation system itself in the alternator. Also, the functions of the speed regulator will be studied. The need to have the speed regulator will be numerically justified and it will be explained how should it work in order to reach a conclusion about the type of regulator needed between the two possibilities (charge regulator or injection regulator).

Regarding the design of the elements of the turbine, we will start exposing the impeller, presenting elevation and profile views together with a justification of the dimensions. In the same way, we will proceed with the axis of the model. The pulleys will be dimensioned according to the speed requirements, and a supplier who can provide these measurements will be looked for. The plans of both the housing and the support base of the assembly will also be presented. The Seeger rings and bearings necessary for the proper functioning of the machine will be chosen. Finally, a series of 3D images will be presented to facilitate the vision of the designed set. In an attempt to relate the project with what will actually be done in Kumbo, the facilities that they have in the country to carry out the exposed designs will be presented.

- In a final section, the project will be analysed in economic terms, making a budget for the realization of the project and studying its financial sustainability without jeopardising adequacy. A list of the materials to be used will be made with a budget for each of them. Analysing the price of electricity, we will verify the economic viability.

## CONCLUSIONS AND FINDINGS

This project presents a design of a hydraulic turbine for its implementation in the city of Kumbo, Cameroon. After an economic study, it has been possible to verify that the design of the turbine under consideration is feasible, and, therefore, its installation can be carried out.

Thanks to that, this project has the purpose of serving as a learning guide when understanding how the turbine should work and how each of its elements is designed, so that it could be used as a generic guide in the installation of electric turbines in areas with river breaks where it can be implemented.



# ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	27
2.	ESTADO DE LA CUESTIÓN .....	31
2.1	Infraestructura eléctrica en Camerún .....	32
3.	OBJETIVOS .....	35
3.1	Objetivo general .....	35
3.2	Objetivos específicos .....	35
4.	DATOS DE PARTIDA .....	37
4.1	Alternador .....	37
4.2	Álabes .....	38
4.3	Tabla de dimensiones .....	39
5.	JUSTIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE LA TURBINA .....	41
5.1	Alternador .....	41
5.1.1.	Máquinas síncronas.....	42
5.1.2.	Funcionamiento de la máquina síncrona como generador .....	42
5.1.3.	Rotor .....	44
5.1.3.1.	Acoplamiento.....	44
5.1.3.1.1.	Acoplamiento directo .....	44
5.1.3.1.2.	Acoplamiento mediante poleas .....	45
5.1.3.2.	Diferentes modelos de rotor.....	46
5.1.3.3.	Sistemas de excitación.....	47
5.1.3.3.1.	Excitación mediante excitatrices.....	47
5.1.3.3.1.1.	Corriente continua.....	47
5.1.3.3.1.2.	Corriente alterna .....	51
5.1.3.3.1.3.	Excitación sin escobillas .....	53
5.1.3.3.2.	Excitación sin escobillas con autoexcitación .....	54
5.1.4.	Estator .....	56

5.1.5.	Reguladores de una máquina síncrona .....	59
5.1.5.1.	Regulador de tensión .....	59
5.1.5.2.	Regulador de velocidad .....	59
5.2	Rodete .....	65
5.2.1.	Diseño .....	65
5.3	Poleas .....	67
5.4	Eje.....	71
5.5	Carcasa.....	72
5.6	Base .....	73
5.7	Elementos adicionales de la turbina .....	75
5.7.1	Rodamientos .....	75
5.7.2	Anillos Seeger.....	75
5.8	Montaje.....	77
6.	PRESUPUESTO DEL PROYECTO Y VIABILIDAD ECONÓMICA .....	81
7.	BIBLIOGRAFÍA .....	86
8.	ANEXOS .....	89

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de porcentaje de acceso a la electricidad en África.....	9
Figura 2. Map of percentage of access to electricity in Africa .....	15
Figura 3. Mapa a escala de la granja escuela .....	28
Figura 4. Construcción de la presa de Lom-Pagar.....	33
Figura 5. Vista de alzado del pistón .....	38
Figura 6. Diseño 3D de la matriz .....	38
Figura 7. Alzado, planta y vista 3D de un álabe .....	38
Figura 8. Diseño 3D de la plantilla base .....	38
Figura 9. Principio de funcionamiento de la máquina síncrona .....	43
Figura 10. Rotor de polos salientes (Izquierda) Rotor de polos lisos (Derecha).....	46
Figura 11. Excitación mediante excitatriz de corriente continua .....	48
Figura 12. Representación esquemática de un motor Shunt .....	48
Figura 13. Colector de delgas en una máquina eléctrica rotativa .....	50
Figura 14. Tensión alterna generada por una máquina eléctrica rotativa.....	50
Figura 15 Tensión alterna rectificada generada por una máquina eléctrica rotativa.....	50
Figura 16. Excitación mediante excitatriz de corriente continua .....	52
Figura 17. Excitación sin escobillas mediante corriente alterna .....	53
Figura 18. Autoexcitación mediante bobinado auxiliar y condensador.....	55
Figura 19. Chapas ferromagnéticas en el laboratorio de ICAI .....	57
Figura 20. Bobinado monofásico de dos polos en una chapa de 24 ranuras.....	58
Figura 21. Bobinado trifásico de cuatro polos en una chapa de 36 ranuras .....	58
Figura 22. Sistema de control de potencia- frecuencia de un alternador.....	61
Figura 23. Respuesta de un regulador isócrono ante un escalón en la demanda.....	62
Figura 24. Funcionamiento de un regulador de carga .....	63
Figura 25. Vista de perfil del rodete.....	65
Figura 26. Vista de alzado del rodete.....	65
Figura 27. Relación de velocidades en un engranaje o polea .....	67
Figura 28. Vista de alzado de la polea.....	70
Figura 29. Vista alzado y planta de la carcasa .....	72
Figura 30. Vista de planta de la base del conjunto .....	74
Figura 31. Rodamiento escogido para el conjunto .....	76
Figura 32. Anillo Seeger de retención .....	76

Figura 33. Vista 3D eje de la turbina .....	77
Figura 34. Vista 3D del acoplamiento eje, rodete, chaveta y alabes .....	78
Figura 35. Vista 3D del acoplamiento eje, rodete y chaveta.....	78
Figura 36. Vista del acoplamiento de eje, rodete, chaveta, alabes, anillos y rodamientos .....	79
Figura 37. Vista del conjunto en el interior de la carcasa .....	79
Figura 38. Torno mecánico en la escuela de formación profesional de los padres escolapios en Bandjun .....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características principales del alternador funcionando a 50Hz .....	37
Tabla 2. Tabla de dimensiones recomendables.....	39
Tabla 3. Dimensiones de poleas del distribuidor Transmisiones Jocar S.L.....	69
Tabla 4. Costes de potencia en Camerún .....	82
Tabla 5. Costes fijos del proyecto .....	83
Tabla 6. Costes variables del proyecto.....	84





# 1. INTRODUCCIÓN

El proyecto de la granja escuela *Shumas Biofarm* en Kumbo, Camerún, nace en el año 2007 gracias a la financiación de Manos Unidas y se desarrolla con la ayuda de la ONG local SHUMAS.

El objetivo inicial del proyecto consiste en la formación de alumnos de la región en técnicas agrícolas y ganaderas sostenibles. Se trabajaría en un régimen de internado y se prepararía a los alumnos mediante unos módulos formativos para que fuesen capaces de extender los conocimientos a sus pueblos de origen, convirtiendo así la granja en un polo del conocimiento agropecuario. Además, la granja cuenta con un centro de salud y una clínica veterinaria que ofrecen sus servicios a la región.

En esta situación existe el inconveniente de que no se dispone de energía, excepto por un pequeño aerogenerador eólico de muy baja potencia, un digestor de biogás y un grupo electrógeno de gasoil que al ser de 60Hz no funciona para la gran mayoría de aparatos.

Es en este punto donde la Fundación de Ingenieros de ICAI para el Desarrollo (en adelante, “**FIICAID**”) y Energía sin Fronteras (en adelante, “**EsF**”) deciden colaborar para llevar energía a la granja escuela. De este modo, comienza un proyecto de electrificación de la granja y también la transformación de la misma en un centro de enseñanza sobre energías renovables, ya que el proceso de instalación de la maquinaria para el abastecimiento de la energía se llevaría a cabo permitiendo que sea el personal local el que realice su operación y mantenimiento. Se impartirían también los conocimientos teóricos para capacitar a los alumnos a medir los recursos disponibles (hídrico, eólico y solar), evaluar las necesidades de un edificio o comunidad y calcular las instalaciones necesarias para disponer de electricidad.

Así se llega a obtener electricidad gracias al aporte de tres formas diferentes de energía renovable:

- (i) Eólica, mediante un aerogenerador eólico de 800W ubicado en la loma más elevada de la granja.

- (ii) Hidráulica, con la instalación de una turbina hidroeléctrica de 7kW en un salto de agua que dista 2,5km de la granja.
- (iii) Solar-fotovoltaica gracias a 2 paneles fotovoltaicos de 185W cada uno instalados en la clínica veterinaria y el dispensario médico.

Además, se obtiene biogás, gracias al ya mencionado digestor. Con todas ellas se satisfacen las necesidades energéticas de 150 alumnos de la granja y de otros 5.000 beneficiarios indirectos generando un impacto mínimo sobre el medio ambiente.



Figura 3. Mapa a escala de la granja escuela

Este gran ejemplo de mix de energías renovables hace de la granja un lugar inmejorable para su conversión en un epicentro que posibilite la expansión de las energías por toda la región de Kumbo. Muestra de ello es cómo se ha dotado ya al pueblo de Bamdzeng de electricidad generada tanto por energía hidráulica como por fotovoltaica, que es utilizada en la escuela islámica y la mezquita, en la iglesia católica, en la escuela y en la guardería baptista y el centro de salud.

Es este contexto donde cobra sentido el objetivo del proyecto, que tratará de desarrollar una turbina sencilla y fácilmente reproducible en la región de Kumbo convirtiéndola en un prototipo conocido por los alumnos de la granja escuela tras la conveniente explicación técnica y teórica. Se priorizará entonces un diseño lo más económico posible y que sea posible fabricar con materiales disponibles en Kumbo.

Una vez transferidos a los alumnos los conocimientos teóricos y técnicos de los diferentes tipos de obtención de energía que conforman el mix de renovables, en el proyecto Shumas Biofarm, se asegura el buen mantenimiento de las instalaciones mediante una serie de procedimientos:

- (i) Se entregan los manuales de mantenimiento preventivo y correctivo adecuadamente elaborados para su fácil interpretación.
- (ii) Se entregan también repuestos de los componentes con mayor probabilidad de fallo para que mediante las instrucciones previamente dadas sea posible sustituir dichos componentes.
- (iii) Finalmente, se establece un responsable en la ONG local SHUMAS que se encargará de enviar un informe mensual con las medidas eléctricas de cada instalación y de las posibles incidencias que tengan lugar.

Este proyecto parte de uno realizado anteriormente por otra alumna de la Universidad Pontificia Comillas ICAI, Gema Cañeque Simón. En este primero se definió qué tipo de turbina era la más adecuada explicando su funcionamiento; se dimensionaron los álabes diseñando un prensa-chapas que posibilitase su fabricación, y; se realizó la compra de un alternador para el conjunto. Además, también se realizó una introducción a cada uno de los elementos que componen el conjunto de la turbina y que en este proyecto se estudiaran más profundamente realizando el dimensionamiento correspondiente.



## 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Las energías renovables han ido adquiriendo con el paso del tiempo mayor relevancia en el mix de generación eléctrica en la mayoría de los países. Entre ellas, algunas como la hidráulica son cuestionadas por el elevado impacto que suponen sobre el entorno debido a la gran dimensión de las infraestructuras necesarias para su obtención.

La energía micro hidráulica o *Small Hydropower* (en adelante, “**SHP**”) es aquella que aprovecha los pequeños saltos de río para generar electricidad, pero a menor escala, considerándose “centrales micro hidráulicas” aquellas con menor capacidad de generación de 100 kW. Esto permite aprovechar directamente la energía sin necesidad de la construcción de grandes infraestructuras, reduciendo así el impacto sobre el entorno con unos costes de instalación y mantenimiento muy reducidos en comparación con los de otras energías renovables.

Hoy en día el papel de la energía hidráulica es fundamental a escala global, contando con una capacidad instalada de 1,2 TW en todo el mundo. Por su parte, la energía micro hidráulica contaba en el año 2016 con una capacidad instalada estimada de 78 GW, lo que suponía un aumento de aproximadamente un 4% sobre la cifra de 2013 según el informe de “The World Small Hydropower Development Report 2016”.

Como se ha comentado, nuestro proyecto se encuadra geográficamente en Kumbo, Camerún, país de África central. Según datos del informe mencionado en el párrafo anterior, entre el total de los países de África central se dispone de energía hidráulica suficiente como para cubrir las necesidades de energía de todo el continente, sin embargo, solo un 6% de este potencial es aprovechado. Camerún se sitúa en segundo lugar entre los países de África central en cuanto a la capacidad de producción de energía micro hidráulica, contando con una capacidad potencial de 615 MW, de la que únicamente se aprovecha una cifra aproximada de 1 MW. Es por tanto uno de los países con mayor capacidad potencial generadora de todo el continente y también uno de los que menor porcentaje de esta utiliza.

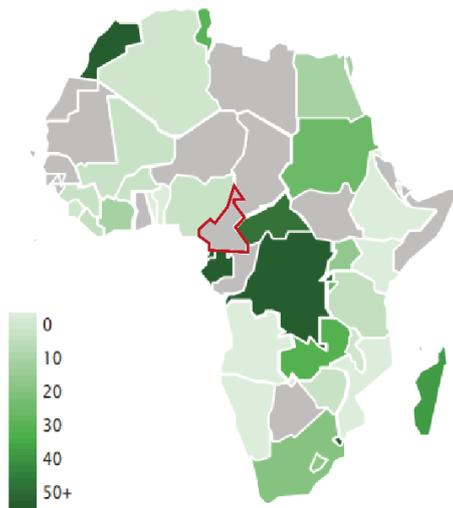


Figura 4. Desarrollo de energía SHP por país en África (%)

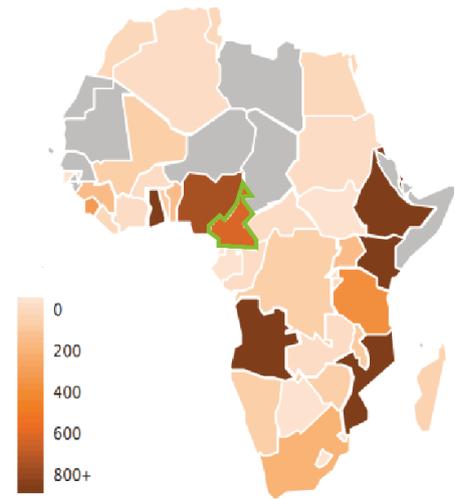


Figura 5. Capacidad potencial de energía SHP por país en África (MW)

## 2.1 Infraestructura eléctrica en Camerún

Camerún ocupa según datos de 2014 de la Agencia para la Energía de Estados Unidos (EIA) el puesto 84 en producción de energía eléctrica y el 123 en consumo. Junto con la subida considerable de producción energética, el consumo ha aumentado de forma considerable, lo que ha provocado un déficit energético importante en el país. Debido a esto, se han derivado problemas de apagones y cortes del suministro eléctrico especialmente en la región sudoeste del país. para el abastecimiento local.

Camerún tiene una potencia total instalada a lo largo del país de más de 1.150 MW y distribuidos principalmente en 12 centrales principales de generación y 26 centrales que cuentan con menos de 1 MW. Entre las 12 mencionadas, como según lo mostrado anteriormente cabría esperar, las hidroeléctricas juegan un papel importante contando con 3 centrales que producen más de un 74% de la energía eléctrica. Las centrales de producción hidroeléctrica de Edéa, Ladgo y Songluoulou aportan un total de 720MW de la potencia instalada a pesar de que, recalcando lo mencionado anteriormente, según cálculos de la EIA únicamente explota un 5% de su producción de energía potencial.

Debido a esto, han surgido proyectos para aumentar este porcentaje como el de Lom-Pagar que pretende construir una presa con una capacidad de generación hidroeléctrica total de 30 MW y en el que colaboran el banco mundial, el banco africano de desarrollo y el banco europeo. Se ubica en el este del país, en las inmediaciones de confluencia de los ríos Lom y Pagar y sus obras comenzaron en 2013 y pretenden terminar a finales de 2018. Cuenta con una capacidad de depósito de agua de 6 mil millones de metros cúbicos es la más grande jamás construida en Camerún.

En el año 2013, según el propio gobierno del país, Camerún contaba con 32.234 Km de recorrido de líneas de transporte, de los que 1.944km son de líneas de alta tensión, 15.081 Km de líneas de media tensión y 15.209 de baja tensión. La distribución cuenta con 22.608 km de líneas.



*Figura 4. Construcción de la presa de Lom-Pagar*



# 3. OBJETIVOS

## 3.1 Objetivo general

Partiendo de los datos del proyecto anterior de mi compañera de escuela Gema, el objetivo de este proyecto es el de proponer un diseño final de una instalación de una turbina lo más sencilla y artesanal posible, planteando un dimensionamiento específico para cada uno de sus componentes, de manera que sirva como prototipo para obtener energía aprovechando diferentes saltos de agua de los ríos. Variando las dimensiones de elementos de la turbina como la de las poleas, se pretende obtener una turbina hidráulica adaptable a las diferentes alturas de los saltos de agua.

## 3.2 Objetivos específicos

Los objetivos concretos del proyecto que nos ocupa podrían plantearse como sigue:

- Determinación del potencial energético aprovechable en un salto de río en función de parámetros desconocidos como caudal y altura.
- Diseño y dimensionamiento detallado de las diferentes partes de una turbina hidráulica.
- Elección de los materiales de fabricación de los elementos de la turbina atendiendo a la disponibilidad de los mismos en la región de Kumbo.
- Selección de diferentes proveedores según la viabilidad económica y geográfica de estos.
- Justificación teórica y numérica, tanto eléctrica como mecánica, de las decisiones tomadas en el dimensionamiento. Análisis de los límites mecánicos de los diferentes materiales con los que se fabricarán las piezas del conjunto y de los límites eléctricos del alternador con el que se cuenta.
- Elección de los diferentes elementos necesarios para el correcto funcionamiento de la turbina como anillos Seeger que eviten el desplazamiento axial, correas que funcionen de unión transmisora entre las poleas o rodamientos que permitan el movimiento rotacional del eje tras su unión con las partes móviles del conjunto.

- Evaluación económica del proyecto para estudiar su viabilidad de reproducción en un país con escasos recursos económicos.
- Realización de una introducción a los controladores necesarios, tanto de voltaje como de velocidad, para conseguir una turbina operativa antes de la próxima visita a Kumbo prevista para principios de 2019.

## 4. DATOS DE PARTIDA

Dado que se parte de un proyecto realizado con anterioridad, se tendrán en cuenta una serie de datos y requisitos iniciales sobre los que se irán trabajando y que vienen dados por los elementos de la turbina de los que ya se dispone (alternador y álabes).

### 4.1 Alternador

A partir de las características necesarias que debía reunir el alternador, se optó por la compra del más adecuado tras la consecuente comparación de los diferentes estudiados. El alternador elegido resultó ser el generador S15W-45/A 1,2Kva. Está distribuido y fabricado por Meccalte, una empresa eléctrica italiana. Sus características y manuales se adjuntan al final del documento en los anexos.

Es un generador síncrono de un par de polos, por lo que su velocidad nominal funcionando a 50Hz es de 3.000 r.p.m., y se caracteriza por proporcionar un voltaje de salida monofásico. Se tendrá que estudiar entonces la relación del diámetro de las poleas necesarias para conectar el eje de la turbina y el del alternador y así conseguir alcanzar la velocidad nominal del último.

El proyecto tiene como objetivo la distribución energética a 50Hz, por lo que serán importantes las características del alternador funcionando a esta frecuencia:

#### 50 Hz

Type	115/230V 50Hz 3000 RPM									
	kVA CL-H	$\eta$ 2/4 1 p.f.	$\eta$ 3/4 1 p.f.	$\eta$ 4/4 1 p.f.	T.H.D.	Air volume	Noise		Weight	J
		%	%	%	%	m <sup>3</sup> /min	7m dBA	1m dBA	Kg	Kgm <sup>2</sup>
S15W-45	1,2	65,9	68,8	68,7	< 5	2,1	55	71	8,1	0,0031
S15W-60	1,8	67,5	70,4	70,2	< 5	2,1	55	71	10,4	0,0040
S15W-75	2,1	68,8	71,6	71,4	< 5	2,1	55	71	12,4	0,0049
S15W-85	2,4	69	71,9	71,8	< 7,5	2,1	55	71	13,4	0,0055
S15W-102	2,8	89,2	72,2	72	< 5	2,1	55	71	14,8	0,0066

Tabla 1. Características principales del alternador funcionando a 50Hz

## 4.2 Álabes

Se parte también de un diseño de álabes que se tomará como base para el diseño del resto de componentes de la turbina.

En el proyecto previo, se diseñaron unos álabes a partir de la fabricación previa de un pistón, una matriz y una plantilla base para facilitar el proceso de embutición. Se eligió como material más adecuado el acero inoxidable, atendiendo a las condiciones a las que se vería expuesto el álabe. El material de fabricación de pistón, matriz y plantilla base es el F-5220, un acero de uso universal enfocado para trabajar en frío.

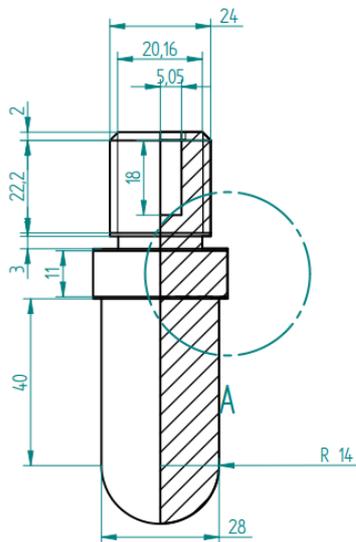


Figura 5. Vista de alzado del pistón

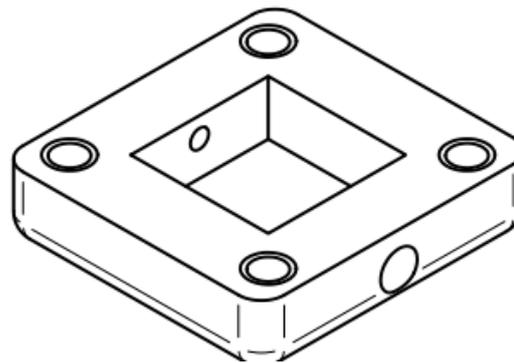


Figura 6. Diseño 3D de la matriz

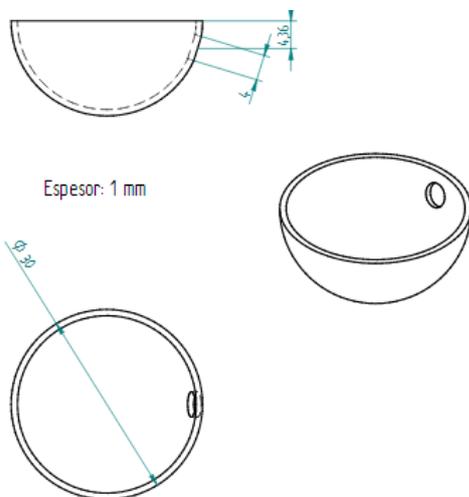


Figura 7. Alzado, planta y vista 3D de un álabe

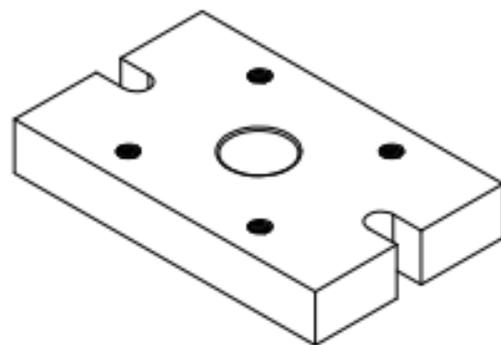


Figura 8. Diseño 3D de la plantilla base

## 4.3 Tabla de dimensiones

En el proyecto previo ya se tomó como dato de partida la tabla del libro de Sebastián Urkia “Energía renovable práctica” que establece las dimensiones recomendables de tres rodetes, con las revoluciones que dan según desniveles y máxima potencia, con un chorro de agua del diámetro máximo (máximo caudal por chorro). La potencia está calculada con un rendimiento de una turbina del 75%.

La tabla es la que se muestra a continuación:

Ø Rodete	Ø Cazoleta	Ø Chorro	Altura útil del salto (metros)				Magnitud
			15	20	30	40	
<b>80</b>	30	20	5,4	6,3	7,7	8,9	l/s
			2065	2385	2925	3380	Rpm
			0,6	0,95	1,7	2,7	kW
<b>120</b>	45	30	12,15	14,1	17,3	20	l/s
			1380	1590	1950	2270	Rpm
			1,35	2,1	3,9	6	kW
<b>180</b>	60	40	21,6	25,2	30,8	35,6	l/s
			920	1060	1300	1500	Rpm
			2,45	3,8	6,9	10,7	kW

Tabla 2. Tabla de dimensiones recomendables

En el proyecto anterior se definió un diámetro para el rodete de 80 milímetros. Entonces, a partir de los datos de esta tabla resultantes de este diámetro de definirán los diferentes diámetros para acoplar las poleas. Se ajustará también el caudal del chorro adecuándolo a cada altura.



# **5. JUSTIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE LA TURBINA**

En este apartado se pretende realizar una justificación de todas las decisiones tomadas en el diseño del modelo de la turbina. Se dimensionarán los elementos necesarios, comprobando que no se superan sus límites mecánicos y eléctricos, y se justificarán elecciones del proyecto anterior que sirven como datos de partida de éste.

## **5.1 Alternador**

En la elección del alternador se tuvieron en cuenta diferentes características que hacían de este el generador propicio para el proyecto. Puesto que no se evaluaron en el proyecto anterior, se considera interesante hacerlo en éste. Además, a partir de sus características se estudiarán también los elementos adicionales necesarios para el correcto funcionamiento del alternador.

Es fundamental entonces entender cómo es y cómo funciona la máquina eléctrica rotativa de corriente alterna con la que contamos.

Las máquinas eléctricas rotativas de corriente alterna se clasifican en máquinas síncronas y máquinas asíncronas, diferenciándose principalmente por el rotor y la forma de producir el campo en este.

En este proyecto se cuenta con un alternador síncrono, por lo que nos centraremos en el estudio del primer tipo de máquina eléctrica rotativa de corriente alterna mencionado.

### 5.1.1. Máquinas síncronas

Las máquinas síncronas son máquinas de corriente alterna en las que tanto el campo magnético producido por el rotor como el propio rotor y el campo magnético generado en el estator giran a la misma velocidad, conocida como “velocidad de sincronismo”. Por tanto, la máquina síncrona consta de una igualdad entre la frecuencia eléctrica y la frecuencia angular. Normalmente, el devanado inducido se sitúa en el estator y el devanado inductor en el rotor. El primero funciona con corriente continua y el segundo es un devanado de corriente alterna mono o polifásico.

Pueden funcionar de acuerdo con el principio de reciprocidad electromagnética como motor, transformando la energía eléctrica en energía mecánica, o como generador en el caso contrario.

El empleo de la máquina síncrona es el recurso más común de obtención de energía eléctrica a pequeña escala y fundamental en el suministro de energía en instalaciones remotas o aisladas, alejadas de las redes de distribución. Esto la convierte en la opción más adecuada para nuestro proyecto.

En nuestro caso, el empleo de una máquina síncrona en la obtención de energía en un salto de río supone el funcionamiento de esta como generador, transformando la energía cinética del agua en energía eléctrica.

### 5.1.2. Funcionamiento de la máquina síncrona como generador

Al acoplar el alternador a una máquina motriz, como en nuestro caso es la turbina hidráulica, gira el rotor de esta y junto a él gira también el campo magnético inductor. Este campo magnético inductor es generado por una corriente continua que alimenta al devanado del rotor.

Las bobinas del estator se encuentran sometidas entonces a un flujo magnético variable en el tiempo y se induce en ellas por tanto una tensión o f.e.m. con un valor:

$$f.e.m. = -\delta\phi/\delta t$$

El valor del flujo del campo magnético de valor B. a través de una espira de área S será:

$$\phi = B * S * \cos(\omega * t)$$

Al girar el campo magnético a velocidad constante  $\omega$ , la tensión que se induce en el conductor será entonces:

$$f.e.m. = \omega * B * S * \text{sen}(\omega * t)$$

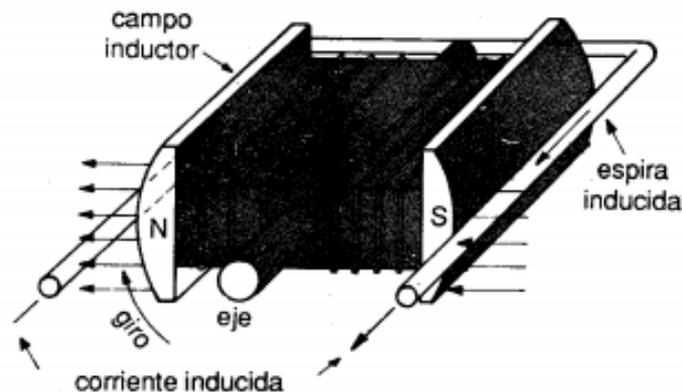


Figura 9. Principio de funcionamiento de la máquina síncrona

En la práctica, no se coloca una sola espira, sino un bobinado completo y, la mayoría de las veces, trifásico, para redes de este tipo.

Si tenemos 3 devanados cuyos ejes estén rotados en el espacio 120 grados (eléctricos) unos de otros, se inducirá en ellos 3 tensiones senoidales trifásicas equilibradas, separadas 120 en el tiempo.

El razonamiento inverso nos lleva a entender el funcionamiento de la máquina eléctrica como motor, alimentando el rotor con 3 tensiones senoidales trifásicas equilibradas.

### 5.1.3. Rotor

#### 5.1.3.1. Acoplamiento

La velocidad de giro de la máquina síncrona es constante y viene determinada por el número de polos del motor y por la frecuencia de la tensión de la red, cumpliéndose siempre la relación:

$$f = P * n/120$$

Siendo:

- "P" el número de polos, que es un dato característico de la máquina y que en el caso de nuestro alternador es igual a 2.
- "f" la frecuencia, que, como se ha mencionado anteriormente, será de 50Hz, pues es a la que funcionan la gran mayoría de aparatos en el lugar geográfico que ocupa a este proyecto.

Por tanto, para cumplirse la relación anterior, nuestro rotor tendrá que girar a 3.000 revoluciones por minuto para mantener en la red una frecuencia de 50Hz. A la hora de conseguir esta velocidad en el rotor podemos acoplar directamente la máquina motriz a la máquina síncrona o podemos acoplar los ejes de las dos máquinas mediante poleas.

##### 5.1.3.1.1. Acoplamiento directo

El acoplamiento directo supone la ventaja de la reducción del porcentaje de pérdidas y de una necesidad de mantenimiento menor, pero obliga a la turbina a girar a las 3.000 r.p.m. que tiene que mantener el rotor. La velocidad de giro de una turbina hidráulica viene definida por diferentes parámetros del salto de un río como el caudal o la altura. Como no se tienen datos hidrológicos concretos del lugar donde se colocará la turbina puesto

que es un diseño genérico que trata de ser válido para diferentes emplazamientos, se usaran los datos obtenidos de la tabla presentada en el apartado datos de partida.

Para controlar la velocidad es posible incorporar un control del caudal que se le inyecta a la turbina para colisionar e impulsar los álabes de esta. Por tanto, podremos tener un cierto margen de regulación de la velocidad que ajustará esta para obtener las 3.000 rpm necesarias en el lado del alternador. Esto nos posibilita tomar los datos en la tabla anterior como válidos, ya que la variación de velocidad respecto a los valores mostrados será lo suficientemente pequeña como para que se pueda llevar hasta las 3.000 rpm. gracias al regulador.

Sin embargo, el margen de regulación no se considerará lo suficientemente grande como para llevar a 3.000 rpm por ejemplo las 2.065 revoluciones obtenidas en el salto de 15 metros. De esta forma, será necesario realizar un acople que aproxime la velocidad del rodete a 3.000 rpm para facilitar el ajuste de esta.

#### 5.1.3.1.2. Acoplamiento mediante poleas

La unión mediante poleas supone la desventaja de la caída del rendimiento del conjunto, al tener las propias poleas un rendimiento inferior al 100%. Sin embargo, el propósito de diseñar una turbina hidráulica lo más estándar posible para que se adecue a cualquier altura de salto del río nos hace contemplar esta como la mejor opción, ya que nos ofrece la posibilidad de diseñar diferentes juegos de poleas que se adecuen a las diferentes situaciones. Empleando una polea estándar y una auxiliar de diferentes medidas podremos hacer el modelo extensible a cualquier altura. Facilitamos así el trabajo del regulador de velocidad, lo que supondrá también un ahorro económico, ya que se podrá optar por la opción más sencilla posible.

El acople mediante poleas cuenta además con numerosas ventajas que favorecen la elección de este sistema de transmisión para el proyecto. Entre las virtudes de esta opción podemos destacarlas siguientes: (i) no necesita lubricación: como las correas y poleas deben friccionar para transmitir la potencia, este sistema no necesita ningún tipo de lubricación y, por tanto, el mantenimiento no es necesario en este aspecto.; (ii) es un

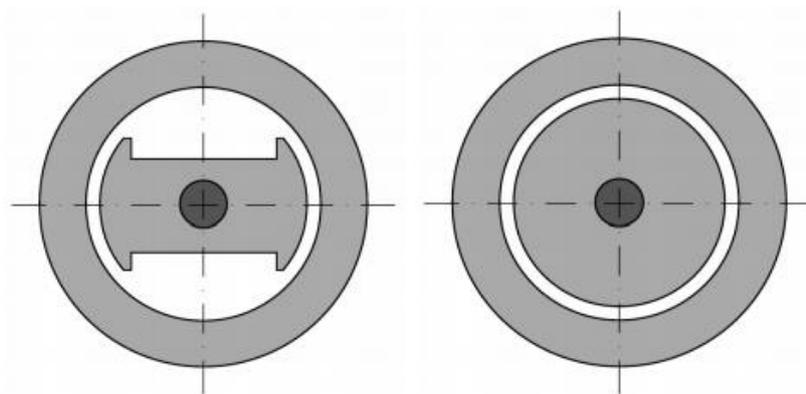
sistema muy fiable siempre que se someta a esfuerzos inferiores a valores máximos especificados; (iii) es más económico frente a otros sistemas de transmisión.

### 5.1.3.2. Diferentes modelos de rotor

El rotor de una máquina síncrona puede estar formado por imanes permanentes o por devanados de excitación.

El rotor de imanes permanentes no requiere de alimentación externa para el funcionamiento de la máquina, pero su precio suele ser más elevado que el de las máquinas con devanados de excitación.

En los rotores formados por devanados de excitación encontramos dos tipos: (i) el rotor cilíndrico o liso, y (ii) el rotor de polos salientes. La principal diferencia existente entre ambos se da desde un punto de vista de modelamiento, debido a las diferencias de construcción de los dos.



*Figura 10. Rotor de polos salientes (Izquierda) Rotor de polos lisos (Derecha)*

En un proyecto en el que el aspecto económico prima sobre cualquier otro, trabajaremos con el segundo tipo de rotor, uno con devanados de excitación.

### 5.1.3.3. Sistemas de excitación

En las máquinas síncronas con el rotor formado por un devanado de excitación es necesario para el funcionamiento de la máquina inyectar en este una corriente continua para generar el campo magnético del rotor. El responsable de suministrar esta corriente continua se conoce como “sistema de excitación”.

Además, un generador síncrono debe producir energía eléctrica con un voltaje constante, incluso cuando la carga varíe. Para conseguir esto se puede variar el campo magnético generado en el rotor, que depende de la corriente de excitación que se le inyecta a este.

Por tanto, el sistema de excitación será también el encargado de regular la corriente inyectada al devanado de campo del rotor para ajustar así la tensión al valor deseado a pesar de que varíen las cargas.

El sistema de excitación será algo fundamental a la hora de elegir nuestro alternador.

Existen una gran cantidad de sistemas de excitación. Para nuestro proyecto y la justificación de la elección del alternador, estudiaremos los más importantes, analizando las ventajas e inconvenientes que tendría su aplicación en nuestro proyecto.

#### 5.1.3.3.1. Excitación mediante excitatrices

##### 5.1.3.3.1.1. Corriente continua

La excitatriz que genera la corriente de excitación que alimentará al devanado del rotor es en este caso una máquina de corriente continua acoplada al mismo eje que la máquina síncrona y el motor de accionamiento.

El inductor de esta excitatriz necesita también de corriente continua para llevar a cabo el proceso de generación. Para ello, se utiliza una segunda excitatriz más pequeña llamada “excitatriz auxiliar”. La excitatriz auxiliar, que también recibe el nombre de “piloto”, puede ser una fuente exterior de corriente continua, por lo general una máquina Shunt en la que el circuito de campo se conecta en paralelo con el de armadura (el inductor en

paralelo con el inducido), o una máquina de corriente continua con imanes permanentes. Esta se puede llegar a utilizar en algunos casos directamente como excitatriz principal, cuando la máquina síncrona sea suficientemente pequeña.

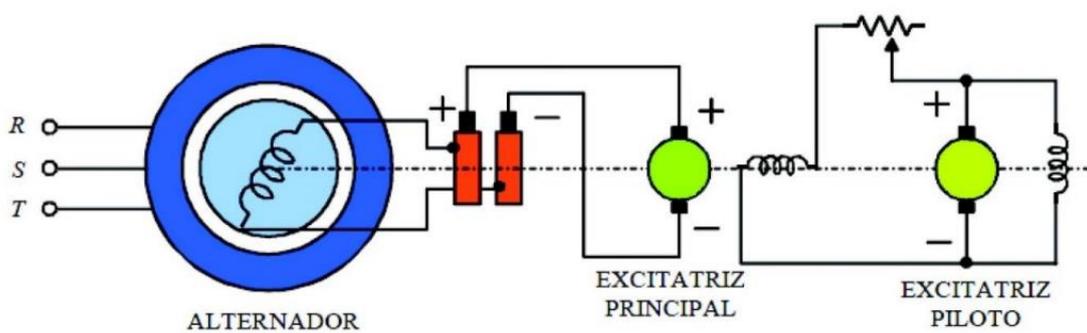


Figura 11. Excitación mediante excitatriz de corriente continua

El funcionamiento de esta máquina de corriente continua sirve como base para entender la excitación de nuestro alternador:

En un motor de autoexcitación Shunt nos encontramos con el devanado inducido conectado en paralelo con el devanado de inductor.

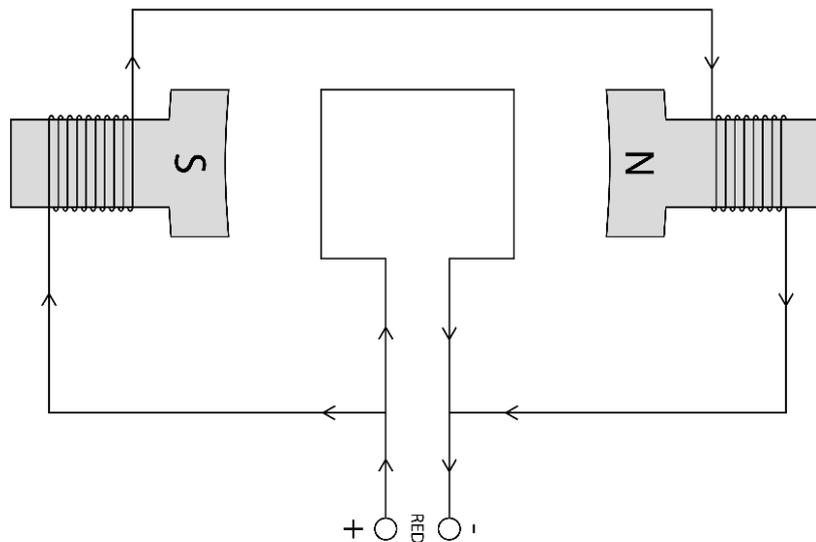


Figura 12. Representación esquemática de un motor Shunt

Con este esquema, si la máquina ha generado tensión al menos una vez, tendremos un flujo remanente que permitirá la aparición de una tensión inducida en bornes del rotor. En el momento de conexión de una carga se generará una corriente de excitación por el devanado del rotor, la cual provocará una elevación de tensión que hará que la corriente de campo aumente.

Es por tanto un proceso cíclico pero limitado gracias a la característica de saturación del material ferromagnético que permite frenar ese aumento de tensión y corriente.

Además, existen otras formas de autoexcitación de máquinas de corriente continua como son la autoexcitación serie y la compound, menos relacionadas con nuestro alternador y que, por tanto, no serán objeto de estudio de este proyecto.

Para mantener un voltaje constante en la alimentación de las cargas se puede utilizar por ejemplo una resistencia variable que controle la corriente de excitación de la excitatriz principal. Gracias a esto se controlará la corriente de excitación de la máquina síncrona permitiendo mantener ese nivel constante de voltaje.

#### **Inconvenientes del sistema para nuestro proyecto:**

El primer y mayor problema que supone este tipo de excitación es la necesidad del uso de colectores. Se llegan a requerir tres colectores diferentes: un colector de anillos en la máquina síncrona y dos colectores de delgas en las excitatrices de corriente continua.

El colector de delgas es el encargado de convertir la corriente alterna en continua en los generadores de corriente continua, es decir, de rectificarla. Conectando los extremos de la espira sobre la que se induce la tensión a dos delgas o láminas de colector, que son semicircunferencias de cobre montadas sobre el mismo eje del rotor, se consigue este fenómeno. La conexión entre estas delgas y la parte fija que llega a las cargas se realiza mediante el uso de las escobillas. La forma de semicircunferencia permite que se mantenga siempre la polaridad en las escobillas, de forma que una escobilla siempre estará en contacto con el conductor situado sobre un polo determinado.

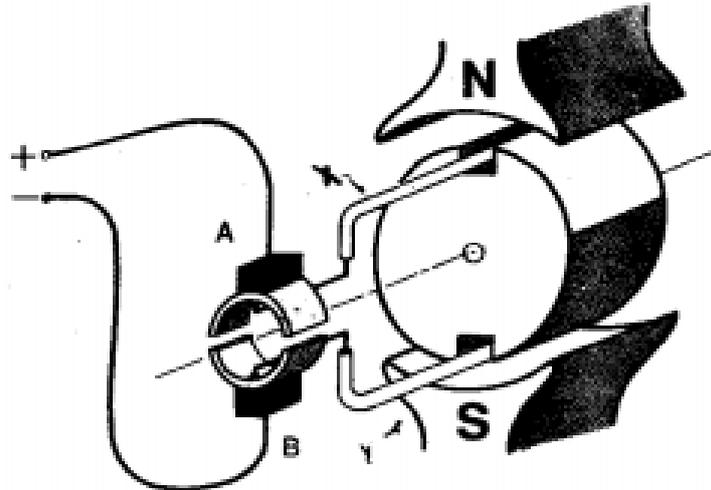


Figura 13. Colector de delgas en una máquina eléctrica rotativa

En la figura se puede ver como la escobilla A siempre está conectada con la delga unida al conductor bajo el polo N. De esta forma se consigue una tensión unidireccional, es decir, rectificada.

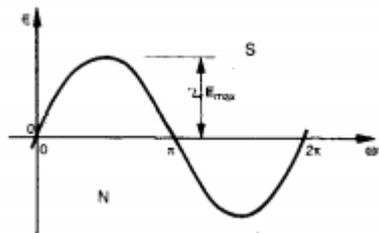


Figura 14. Tensión alterna generada por una máquina eléctrica rotativa

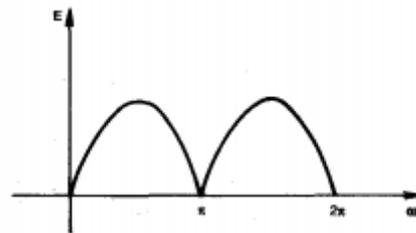


Figura 15 Tensión alterna rectificada generada por una máquina eléctrica rotativa

El problema de este proceso está en el mantenimiento constante que requieren los colectores debido a la delicadeza de los mismos. Las escobillas están formadas por un compuesto similar al grafito, capaz de conducir electricidad, que debido a la fricción con los anillos se va desgastando progresivamente. Este desgaste provoca la necesidad de

revisar su estado físico periódicamente, además de una caída de tensión que aumenta las pérdidas de potencia de campo del rotor. En este proyecto se desea realizar un modelo que requiera del menor mantenimiento posible ya que no siempre se contará con personal plenamente capacitado para ello. Es por esta razón por la que se ha decidido no utilizar las escobillas en nuestro modelo. Sin embargo, habrá que plantear alguna alternativa que económicamente resulte viable, ya que en máquinas eléctricas pequeñas el sistema descrito es muy utilizado por su eficiencia a la hora de suministrar potencia de campo al sistema.

#### **Ventajas del sistema para nuestro proyecto:**

El motor Shunt y los imanes permanentes nos ofrecen uno de los requisitos fundamentales para este proyecto: el funcionamiento del alternador en una red aislada. Como se prevé que el alternador funcione como único elemento generador que alimenta a una red de cargas, no cabría la posibilidad de excitarlo mediante el uso de la propia red (a no ser que el propio alternador fuese auto excitado, como se expondrá más adelante).

Esta forma de excitación mediante corriente continua se utilizaba antes del desarrollo de los sistemas de excitación por corriente alterna. Las grandes velocidades alcanzadas por las dinamos resultan una dificultad añadida a la hora de invertir la corriente en las bobinas del inducido del motor para transformar así la corriente alterna en corriente continua (conmutación). El empleo de máquinas de corriente alterna como excitatriz plantea una solución a este problema y evita además la presencia del colector de delgas, necesario en las máquinas de corriente continua.

#### 5.1.3.3.1.2. Corriente alterna

La corriente de entrada al rotor debe ser continua, y para ello se transforma la tensión alterna generada por la excitatriz de corriente alterna mediante el empleo de rectificadores. Este, si es controlado, se puede encargar además del control del valor de tensión ajustándolo para producir la corriente continua adecuada que alimenta al rotor. Los rectificadores controlados se fabrican con tiristores, mientras que los no controlados están formados por diodos. También se necesita en este sistema de una excitatriz piloto que inicie el proceso de excitación y que, al igual que en el caso de corriente continua,

pueda ser directamente utilizada como excitatriz principal. Esta función la realiza una máquina síncrona de imanes permanentes. Podemos ver en el esquema como, gracias a un rectificador controlado, se regula la tensión continua con la que la excitatriz piloto alimenta a la principal. Mediante este se obtiene un control electrónico sobre la excitación de la máquina síncrona con mejor rendimiento respecto al anterior método y que ofrece la posibilidad de emplear un sistema electrónico de control. También aparece un rectificador no controlado que transforma a continua la tensión alterna a la entrada de la máquina principal.

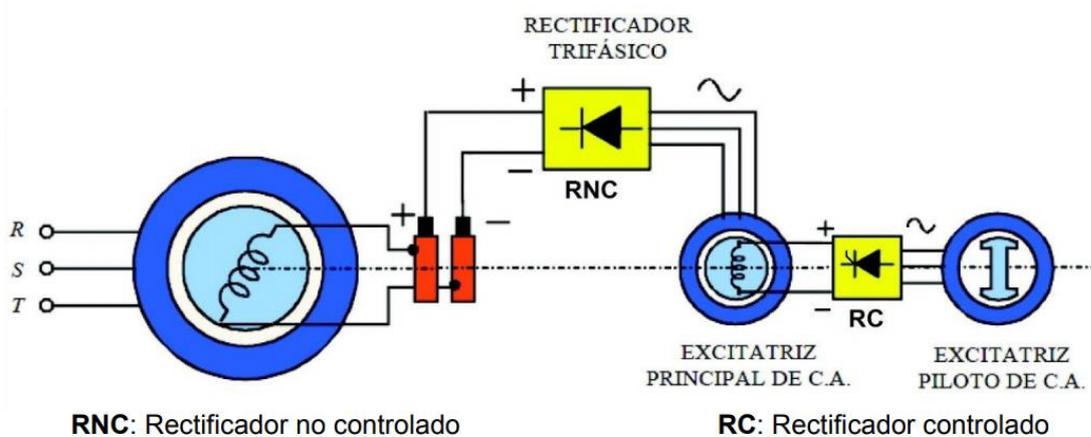


Figura 16. Excitación mediante excitatriz de corriente continua

**Inconvenientes del sistema para nuestro proyecto:**

A pesar de no contar con el colector de delgas, siguen existiendo los colectores de anillos de la máquina síncrona y de la excitatriz principal. Este sistema es por tanto algo más fiable que el anterior, pero sigue sin ser una solución a nuestro problema. Plantea además el inconveniente de la elevada inversión necesaria respecto a otros sistemas. Los imanes permanentes son entre otros los responsables del alto coste de la máquina.

**Ventajas del sistema para nuestro proyecto:**

Es un sistema más fiable puesto que no plantea la dificultad del proceso de conmutación y además ahorra el empleo del colector de delgas. Por tanto, se plantea como un primer acercamiento a la eliminación total de colectores en el sistema, que se tendrán como el principal inconveniente debido a la atención constante que merece el estado del alternador que cuente con estos.

5.1.3.3.1.3. Excitación sin escobillas

En el sistema anterior podemos cambiar la configuración de la excitatriz principal, haciendo que el estator sea el inductor y el rotor el inducido. Tenemos entonces una excitatriz piloto con el inducido en el estator conectada eléctricamente al inductor de la excitatriz principal, colocado también en el estator. De esta forma, se evitará el uso de colectores entre ambas excitatrices puesto que no es necesario ninguna unión entre una parte fija y otra móvil. el rectificador controlado se sitúa en la unión entre los dos estatores de estas. Si además la excitatriz piloto es de imanes permanentes, carecerá también de colectores. Tampoco existirán colectores en la unión de la excitatriz principal con la máquina síncrona puesto que el inducido de la excitatriz principal y el rectificador no controlado se encuentran en el rotor, girando junto con la máquina síncrona por lo que no existe movimiento relativo entre ambas partes.

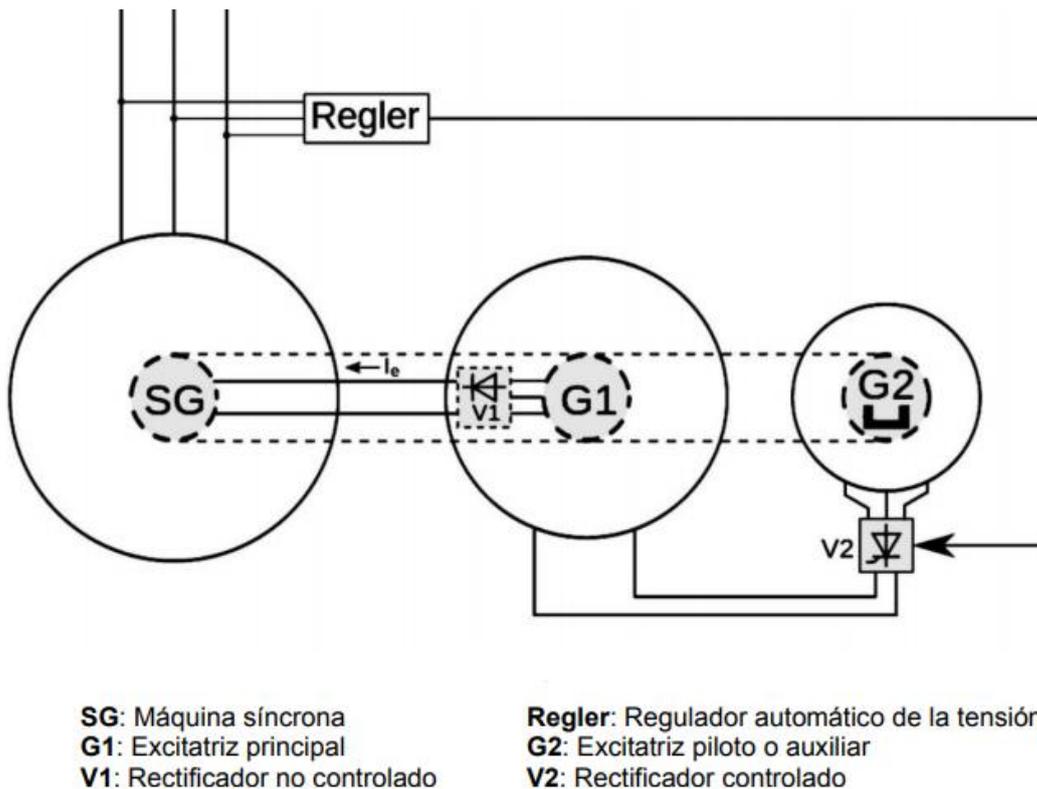


Figura 17. Excitación sin escobillas mediante corriente alterna

### **Ventajas e inconvenientes del sistema para nuestro proyecto:**

Con este sistema se ha llegado a obtener una ausencia completa de escobillas facilitando en gran medida el mantenimiento de la máquina. Aun así, siguen existiendo los inconvenientes del precio de los imanes permanentes y de la necesidad de conexión de la excitatriz principal a la red. Esto último se puede resolver con la siguiente configuración.

#### 5.1.3.3.2. Excitación sin escobillas con autoexcitación

Este sistema debe su nombre a que es la propia máquina síncrona la que produce tensión alterna inicial que se transformará adecuadamente para alimentar al rotor. A la salida de la máquina se coloca un transformador que rebaja a niveles adecuados la tensión y la intensidad generadas por el generador síncrono. Esta tensión alterna rebajada se convierte a continua mediante un rectificador controlado que se encarga a su vez de controlar la corriente de excitación del rotor de la máquina.

Es entonces necesario seguir disponiendo de una excitatriz principal si se quiere evitar el uso de colectores.

En el arranque de este sistema será entonces necesario disponer de una batería u otro sistema que permita alimentar la máquina en un primer instante para que se produzca ese proceso de excitación.

En nuestro proyecto, al tener la turbina hidráulica como forma de generación aislada, no sería posible alimentar al generador para su funcionamiento puesto que no tendríamos de ninguna red para conectar la máquina. Esto nos hace optar por un sistema de autoexcitación que alimente la máquina o bien por una batería. El empleo de la batería parecería una buena opción, pero seguiría existiendo entonces la necesidad de utilizar escobillas que sirviesen de unión entre la parte fija y la parte móvil. La autoexcitación mediante imanes permanentes no se adapta tampoco a las características de este proyecto puesto que presenta el inconveniente de su elevado precio. De las formas de autoexcitación mencionadas la más adecuada es por tanto la Shunt, pero para ello se necesitaría de una excitatriz piloto que también elevaría el precio de la máquina síncrona como ya se ha comentado anteriormente.

Es aquí donde surge la alternativa al proceso de autoexcitación. Mediante un bobinado auxiliar cargado con un condensador se puede conseguir este proceso. El esquema del proceso se muestra en la siguiente figura:

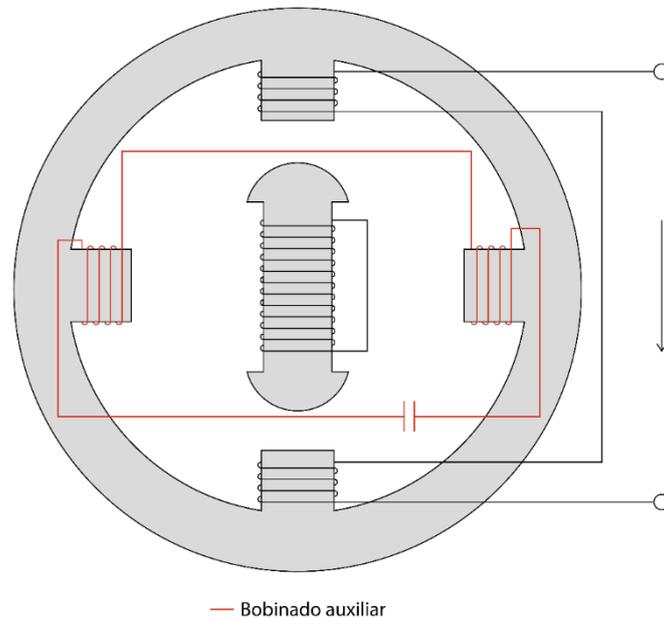


Figura 18. Autoexcitación mediante bobinado auxiliar y condensador

Mediante este sistema, la máquina es capaz de auto excitarse gracias a un bobinado auxiliar (con un condensador) desfasado del devanado de potencia del estator, colocado sobre el mismo estator. El magnetismo remanente del bobinado auxiliar permite que aparezca sobre el rotor una corriente continua una vez que este se encuentre girando. Es el propio rotor el que ahora inducirá una tensión en el bobinado auxiliar de forma que la corriente del devanado del rotor aumenta nuevamente, teniendo así un proceso cíclico. Este proceso se auto limita gracias a la característica de saturación del material ferromagnético. Es por tanto un proceso llevado a cabo completamente mediante inducción, por lo que no es necesario el uso de escobillas.

El condensador consta de dos electrodos, que son dos placas de material conductor separadas por una capa fina de algún material aislante. Cuando pasa una corriente a través del condensador, se forma en los electrodos un campo eléctrico capaz de almacenar energía que puede liberarse más adelante. Son más baratos que las baterías convencionales y no contienen elementos tóxicos, además de no requerir de

mantenimiento. Sin embargo, su capacidad de almacenamiento es escasa, por lo que seguramente este sistema requiera en su arranque de una carga del condensador. Esto último no nos supone un problema muy grave ya que se prevé un uso continuo de la máquina y se evita así la descarga del condensador.

#### 5.1.4. Estator

La mayoría de máquinas síncronas son trifásicas y se utilizan como generadores debido a las grandes ventajas que presenta la corriente alterna trifásica frente a la monofásica.

Entre todas ellas, destaca la capacidad de transmitir mayor potencia de la que permite un sistema monofásico. En corriente alterna monofásica contamos con 2 hilos, un hilo de fase y un hilo de neutro. La potencia sería la que sigue:

$$P_{monofásica} = V * I * \cos \varphi$$

Sin embargo, en corriente alterna trifásica, añadiendo únicamente un hilo, tendríamos 3 hilos, cada uno de ellos correspondiente a una fase. La potencia sería la siguiente:

$$P_{trifásica} = \sqrt{3} * V * I * \cos \varphi$$

Esto supondría un aumento de la potencia total en un 73%, a cambio de añadir un único hilo conductor; es decir, un aumento de un 50% del precio inicial.

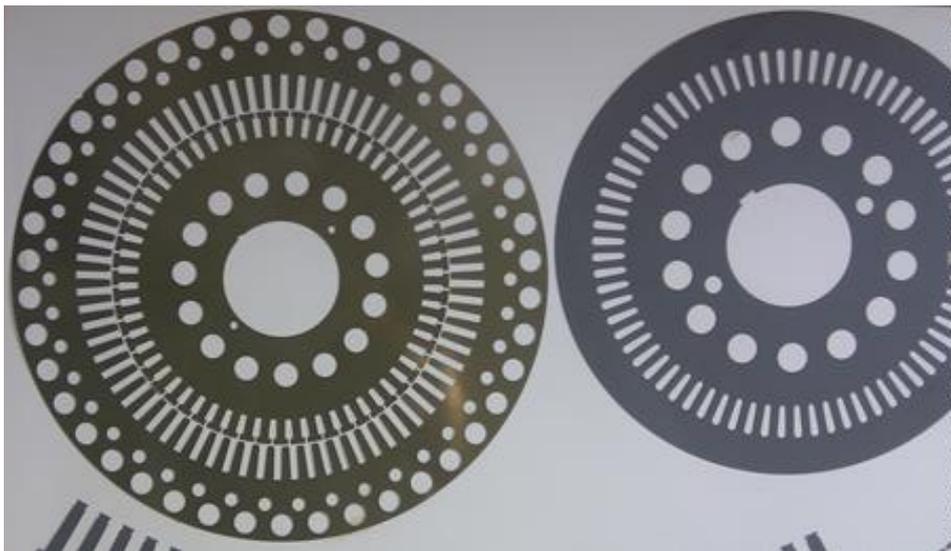
Sin embargo, no solo es más costoso un sistema trifásico por el número de hilos conductores con los que cuenta. Generalmente, los componentes de un sistema trifásico suelen ser mayores que los de los sistemas monofásicos: protecciones, contadores, mayor diámetro de los tubos de la instalación por tener mayor número de cable, etc.

Según el Reglamento Electrotécnico para baja tensión, IT-BT-10, en España “Las empresas distribuidoras estarán obligadas, siempre que lo solicite el cliente, a efectuar el suministro de forma que permita el funcionamiento de cualquier receptor monofásico de

potencia menor o igual a 5 750 W a 230 V, hasta un suministro de potencia máxima de 14 490 W a 230V”. Además, el Ministerio de Industria en el año 2006 fijó en 3.464kW la potencia mínima contratada para instalaciones trifásicas.

Viendo estos valores, podemos afirmar que en algunas ocasiones la mejor alternativa es contar con un suministro de potencia monofásico, en concreto para potencias pequeñas, como es nuestro caso. Es por ello que es habitual encontrarse con instalaciones monofásicas en ciertos entornos como el doméstico.

El estator de un alternador está formado por una serie de chapas aisladas entre sí de material ferromagnético apiladas con unas ranuras. Los conductores sobre los que se inducirá la tensión irán colocados a lo largo de las propias ranuras, y será el número de conductores empleados el que determinará si la máquina genera corriente monofásica o trifásica.



*Figura 19. Chapas ferromagnéticas en el laboratorio de ICAI*

De esta forma podemos comprobar si la salida de un alternador es monofásica o trifásica estudiando la configuración del bobinado del estator. Así, un generador monofásico cuenta con un bobinado de dos devanados con una separación eléctrica y mecánica de 180 grados. Un bobinado formado por tres devanados separados 120 grados entre sí, sería propio de una máquina eléctrica trifásica. En cada uno de estos devanados se produciría un voltaje alterno independiente de los otros dos y desfasado 120 grados respecto a ellos,

con lo que resultaría un sistema trifásico equilibrado. Un ejemplo de lo que podría ser un bobinado monofásico y uno trifásico se presenta en la figura siguiente.

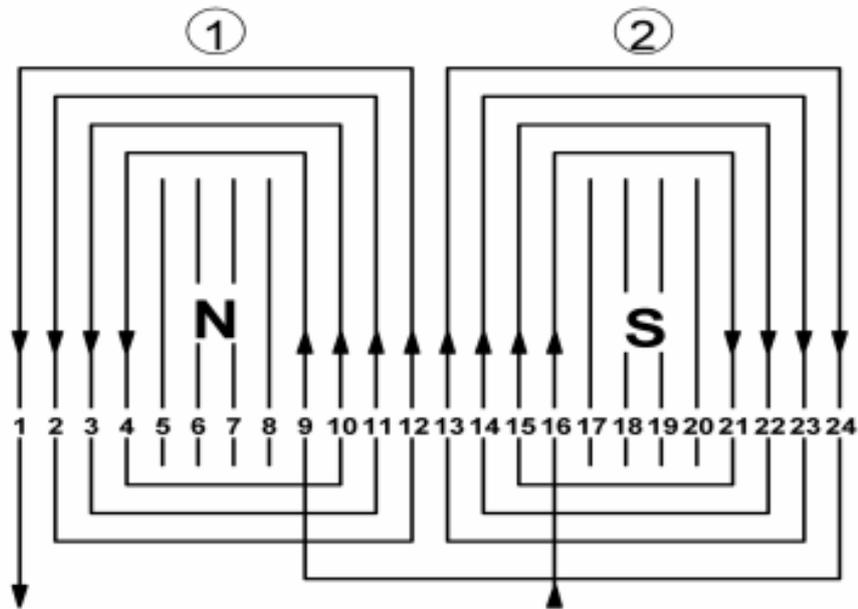


Figura 20. Bobinado monofásico de dos polos en una chapa de 24 ranuras

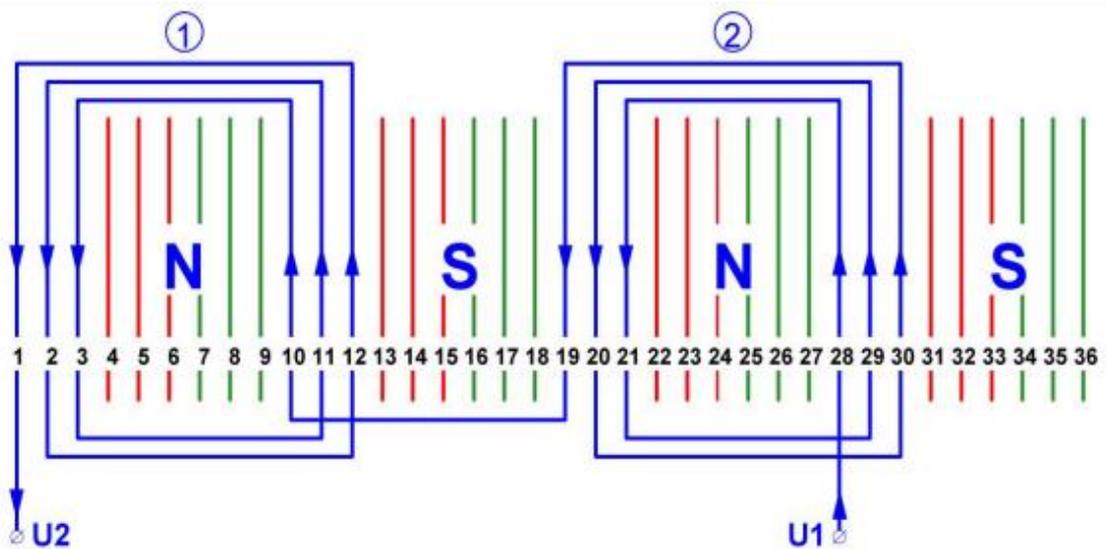


Figura 21. Bobinado trifásico de cuatro polos en una chapa de 36 ranuras

## 5.1.5. Reguladores de una máquina síncrona

### 5.1.5.1. Regulador de tensión

Un alternador síncrono necesita, como ya se ha comentado con anterioridad, de un regulador que se encargue de ajustar la corriente de excitación con la que se alimentará al devanado del rotor. Este regulador se encarga de mantener la tensión en bornes de la máquina constante, cambiando el valor de la fuerza electromotriz inducida gracias al control del valor de la corriente de excitación del devanado del rotor. Es el propio sistema de excitación el que se encarga de realizar este ajuste.

### 5.1.5.2. Regulador de velocidad

Además, se necesita de un regulador de velocidad y potencia que mantenga constantes las 3.000 r.p.m. necesarias en el eje del alternador en todo momento. De esta manera se mantendrá constante la frecuencia de la red, en nuestro caso los 50Hz.

Si el generador funciona en régimen permanente, entonces la potencia generada por la turbina es igual a la potencia eléctrica demandada por la red, sin tener en cuenta las pérdidas. Si en un momento dado se produce un aumento de la demanda eléctrica, entonces la potencia generada por la turbina no será suficiente y la energía cinética de la máquina será la encargada de igualar generación y demanda.

Esta energía cinética se refiere en este caso a la energía cinética rotacional que depende tanto de la inercia de la máquina eléctrica como de la velocidad angular de esta de la siguiente forma:

$$Ec = \frac{1}{2} * J * \omega^2$$

Si derivamos esta expresión respecto del tiempo tenemos:

$$\frac{\delta E_c}{\delta t} = J * \omega * \frac{\delta \omega}{\delta t} = 2 * E_{c0} * \frac{\left(\frac{\delta \omega}{\delta t}\right)}{\omega_0}$$

Donde “J” es en nuestro caso la inercia del conjunto; alternador junto con turbina.

Y donde “ $\omega$ ” es la velocidad en radianes por segundo de la máquina.

En caso de producirse una disminución en la demanda de, por ejemplo, 100W, podemos comprobar cómo cambiaría la frecuencia en nuestro sistema. La energía cinética almacenada por el conjunto, si se tuviese una velocidad angular de 3.000 r.p.m., sería igual a:

$$E_c = 49347,93 * J$$

$$\frac{\delta E_c}{\delta t} = 2 * 49347,93 * J * \frac{\left(\frac{\delta \omega}{\delta t}\right)}{\omega_0}$$

Igualando a la variación de energía demandada tenemos:

$$100 = 2 * 49347,93 * J * \frac{\left(\frac{\delta \omega}{\delta t}\right)}{\omega_0}$$

Por lo que, la variación de la frecuencia obtenida sería:

$$\frac{\left(\frac{\delta \omega}{\delta t}\right)}{\omega_0} = \frac{100}{2 * 49347,93 * J} = 0,001s^{-1}$$

En una red de 50 hercios, la caída de la frecuencia sería de:

$$0,001s^{-1} * 50Hz = 0,05 Hz/s$$

Al cabo de un minuto tendríamos una caída de 3Hz.

Podemos ver con este ejemplo cómo al subir la demanda, la energía cinética acumulada por el generador se reduce, y con ella la velocidad de giro de esta. Una caída de la velocidad de giro de la máquina se traduce en una caída de la frecuencia eléctrica.

Vemos entonces la necesidad de contar con un regulador que se oponga a esta caída de frecuencia progresiva y la mantenga siempre en un valor constante.

La regulación frecuencia/potencia suele ser un problema global del que se ocupa todo el sistema generador.

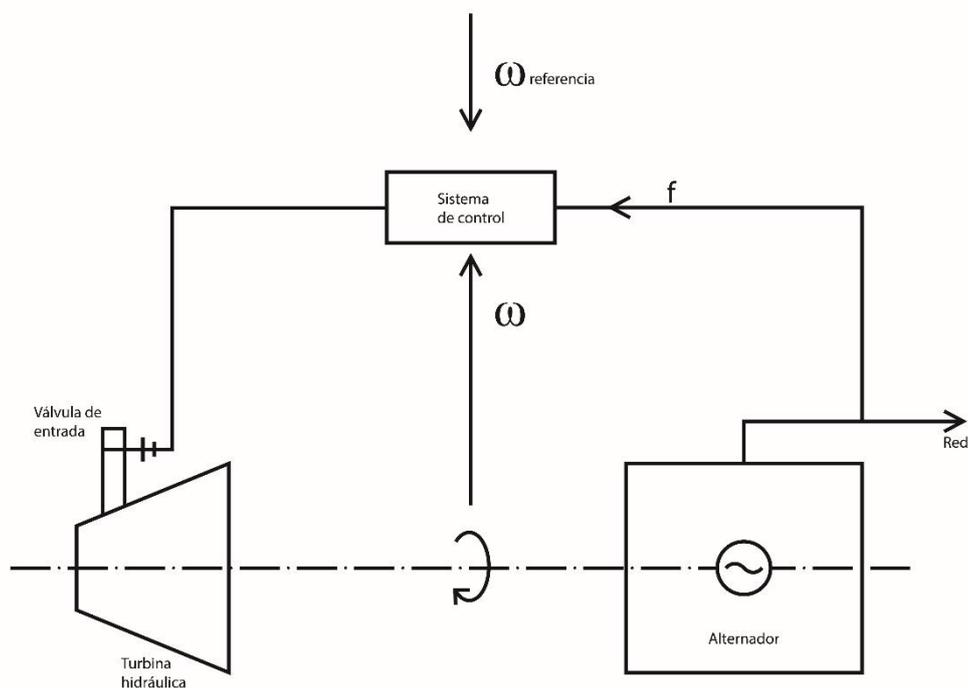


Figura 22. Sistema de control de potencia-frecuencia de un alternador

En los sistemas con más de un generador, si se produce un aumento de demanda, los generadores reaccionarán modificando la potencia inyectada en la red en mayor o menor medida según su estatismo para poder reestablecer la frecuencia inicial. Sin embargo, en redes aisladas como la nuestra, en la que toda la potencia se genera mediante un único alternador, la potencia generada debe ser siempre la que requiera el sistema y la modificación de la potencia inyectada en la red debe ser exactamente igual que la variación de la demanda. El regulador isócrono es el encargado de realizar esta función y su respuesta ante un escalón en la demanda sería parecido al de la figura:

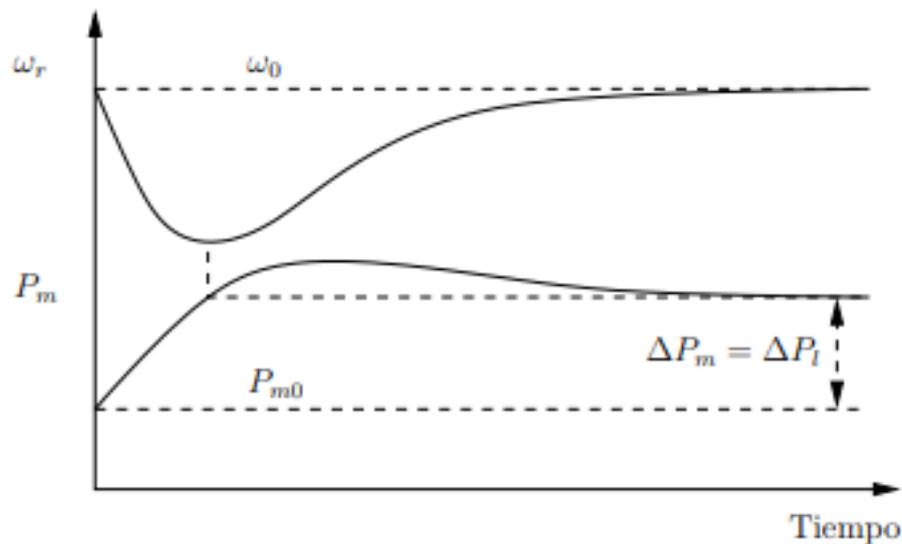


Figura 23. Respuesta de un regulador isócrono ante un escalón en la demanda

A la hora de representar cómo funciona un regulador de velocidad, se suele representar en una gráfica la frecuencia, que es proporcional a la velocidad del alternador, y la potencia activa que se inyecta en la red. Esta es la que se conoce como “curva de estatismo” y en ella podemos ver entonces cómo varía la frecuencia, colocada en el eje Y respecto a la potencia activa inyectada, que se representa en el eje X. Generalmente se trata de una recta con cierta inclinación dependiendo del estatismo del conjunto.

Sin embargo, en este proyecto se tendrá por lo general un único alternador como única fuente de alimentación de una red aislada, por lo que la frecuencia debería ser constante en todo momento y por tanto también la velocidad. La curva de estatismo será entonces una recta horizontal, es decir, la velocidad del alternador será siempre la misma a pesar de la potencia necesaria al otro lado de la red.

Necesitaremos por tanto de un sistema de control que mantenga la velocidad siempre constante regulando la carga de la red.

El regulador de velocidad del sistema será el encargado de mantener esta velocidad constante mediante una de las siguientes formas:

- (i) Modificando la potencia suministrada por el caudal de agua, adaptándola en todo momento a la demanda de electricidad que depende de la carga eléctrica que haya conectada en la instalación. La válvula reguladora de caudal permite que en horas de baja demanda se ahorre agua, permitiendo su almacenamiento

cuando este es posible, lo que supone una gran ventaja sobre todo cuando se instala este sistema en ríos con poco caudal de agua. Sin embargo, la respuesta del sistema será algo más lenta que la del que sigue.

- (ii) Modificando la propia demanda de forma que el generador trabaje en un régimen de estado de carga constante. El generador está conectado al consumo y a unas resistencias de control, conocidas como carga balasto o carga lastre. Mediante el control del valor de la frecuencia, el sistema de regulación de carga derivará más o menos energía a las resistencias. Si, por ejemplo, la frecuencia generada tiene un valor superior al de la frecuencia de referencia, el sistema tendrá que derivar más energía a las resistencias. Esto ocurriría por ejemplo en las horas en las que haya luz solar y por tanto no sea necesaria la luz eléctrica. Estas resistencias de control trabajan en función de la frecuencia eléctrica, que es directamente proporcional a la velocidad del rodete, evitando así que la turbina se embale cuando no hay consumo. La ventaja que se obtiene empleando este método es la mayor rapidez en la respuesta dinámica del sistema ante la variación de demanda. Además, gracias a esto, se hace innecesario el empleo de un volante de inercia, que sí que debería estar presente en la configuración anterior. El inconveniente que presenta es la cantidad de agua desperdiciada y que podría haber sido almacenada. Este desperdicio de energía puede evitarse, utilizando la energía sobrante para otros fines. Las resistencias reguladoras disipan la energía y en el proceso alcanzan temperaturas que pueden aprovecharse para por ejemplo, como ya se ha hecho anteriormente en el proyecto Shumas Biofarm, calentar granjas de pollitos para que estuvieran calientes por la noche, hora en la que la demanda suele caer.

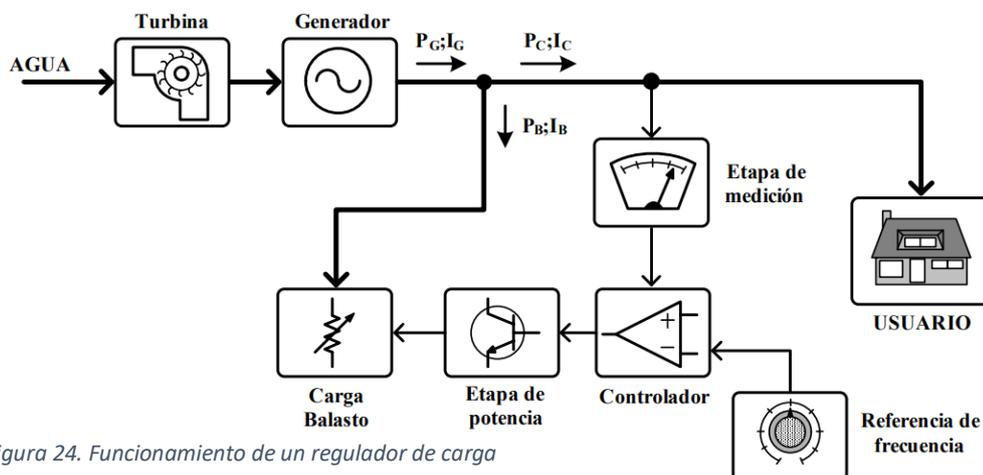


Figura 24. Funcionamiento de un regulador de carga

Puesto que la segunda configuración hace más sencillo el proceso de regulación de velocidad, será este el método empleado en nuestro caso ya que, además, no se plantea como una necesidad el almacenamiento de agua del río.

Los sistemas de control de carga se han ido desarrollando y actualmente suelen ser de tipo digital. La electrónica digital se encarga de realizar el proceso de control mediante el empleo de microprocesadores que además permiten llevar a cabo también una función de protección.

Actualmente existen ciertos controladores comercializados como el DIGIPID 100, un microprocesador responsable del control de velocidad, y también del arranque y parado de la máquina, que funciona mediante un control PID. Se plantea por tanto la posibilidad de comprar un controlador que permita realizar esta función de regulación de velocidad de la máquina, aunque también cabe la posibilidad de diseñar el controlador debido a la ventaja económica que presenta esta alternativa.

## 5.2 Rodete

### 5.2.1. Diseño

A la hora de diseñar el rodete se partió de la premisa de que el diámetro de este debía medir 80 milímetros para cumplir los requisitos del proyecto anterior.

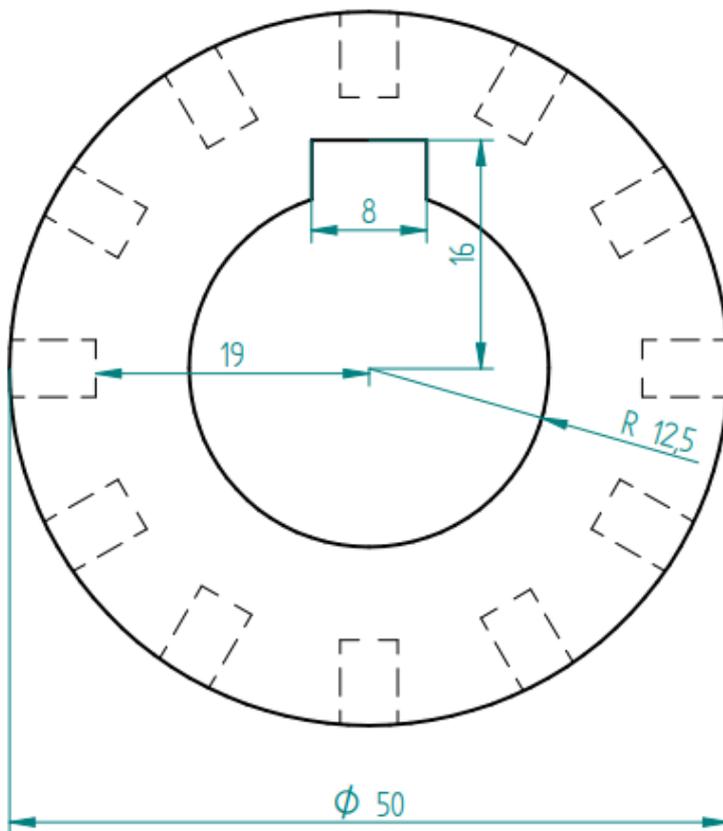


Figura 26. Vista de alzado del rodete

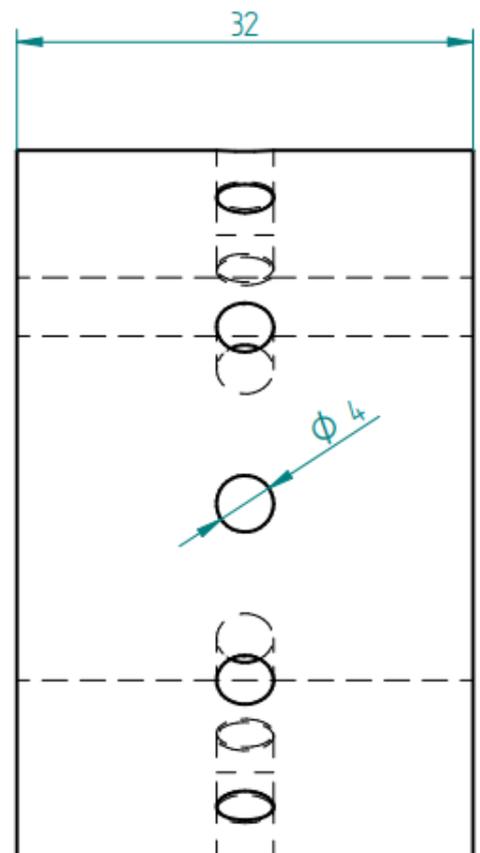


Figura 25. Vista de perfil del rodete

En el centro del rodete se ha elaborado un agujero pasante a través de la cual irá acoplado el eje conectado con la polea de transmisión. Para acoplar el eje y evitar el movimiento relativo de este con el rodete, asegurando la correcta transmisión, se ha realizado un orificio circular de 25 milímetros sobre el cual aparece uno rectangular de 8 milímetros de ancho y 4 de alto. En este último se emplazará una chaveta. Las dimensiones se han tomado de forma que la chaveta insertada tenga unas medidas lo más estandarizadas posibles y por tanto sea obtenida de forma sencilla. En el rodete se han realizado 12 orificios alrededor del diámetro exterior, separados de forma equidistante. En estos irán

alejados los tornillos que unirán los álabes con el rodete soportando el esfuerzo cortante debido al chorro de inyección. Procediendo con la misma premisa que con la chaveta, se ha dimensionado estos orificios con un ancho de 4 milímetros y una longitud de 6 milímetros. El número de orificios se ha obtenido a partir del diseño del anterior proyecto.

El rodete irá fabricado en un material resistente a los esfuerzos a los que se verá sometido este como Delrin o Nylon.

## 5.3 Poleas

Como se ha explicado en apartados anteriores, se opta por acoplar el eje de la turbina y el del alternador mediante el uso de poleas. Para obtener el modelo más estándar posible en función de los saltos de río que aparecen en nuestra tabla de datos de partida, se estudiará una polea genérica, de forma que en cada salto de río solo sea necesario cambiar la otra cuya dimensión será la necesaria para cumplir la relación de velocidades obteniendo 3.000 rpm en la parte del alternador.

Se trabajará con modelos de polea trapeciales estándar que en un principio se obtendrán a partir del distribuidor Jocar transmisiones S.L. De los diferentes diámetros primitivos de las poleas, el que más se acerca al diámetro del agujero del rodete donde se inserta el eje es de 32 milímetros. De esta forma se podrá obtener un eje con diferentes diámetros, pero cuyas medidas no varían demasiado.

La correa que une las dos poleas se encarga de mantener una misma velocidad lineal y potencia en cada una de ellas.

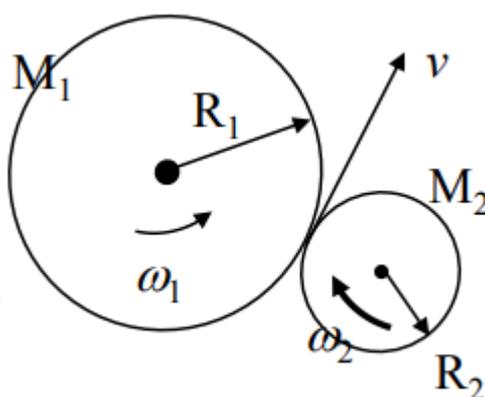


Figura 27. Relación de velocidades en un engranaje o polea

Esta igualdad de velocidad lineal se traduce en una relación de velocidad angular de la siguiente forma:

$$V1 = V2 ;$$

$$\omega2 = \omega1 * \frac{R1}{R2}$$

Podemos trabajar directamente con los diámetros cumpliéndose la misma relación.

Para los siguientes cálculos Consideraremos que el diámetro de la polea genérica es de 50 milímetros.

Entonces, para las diferentes alturas de los saltos obtendremos unas medidas de relación de poleas como las que se muestran:

✓ Salto de 15 metros:

La velocidad angular obtenida en el lado de la turbina es de 2065 revoluciones por minuto. Aplicando la relación y sabiendo que en el lado del alternador tenemos 3.000 revoluciones por minuto, nos queda:

$$R2 = \omega1 * \frac{R1}{\omega2} = 3.000 * \frac{50}{2065} = 72,64$$

✓ Salto de 20 metros:

La velocidad obtenida en el lado de la turbina es de 2385. Aplicando la relación y sabiendo que en el lado del alternador tenemos 3.000 revoluciones por minuto, nos queda:

$$R2 = \omega1 * \frac{R1}{\omega2} = 3.000 * \frac{50}{2385} = 62,9$$

✓ Salto de 30 metros:

La velocidad obtenida en el lado de la turbina es de 2925. Aplicando la relación y sabiendo que en el lado del alternador tenemos 3.000 revoluciones por minuto, nos queda:

$$R2 = \omega1 * \frac{R1}{\omega2} = 3.000 * \frac{50}{2925} = 51,28$$

✓ Salto de 40 metros:

La velocidad obtenida en el lado de la turbina es de 3380. Aplicando la relación y sabiendo que en el lado del alternador tenemos 3.000 revoluciones por minuto, nos queda:

$$R2 = \omega1 * \frac{R1}{\omega2} = 3.000 * \frac{50}{3380} = 44,37$$

Una de las principales razones que formaron parte de elección del distribuidor de poleas es que este ofrece en su catálogo diámetros muy parecidos a los que necesitaremos, excepto para el caso del salto de 40 metros. La variación entre el diámetro requerido y el disponible es asumible por el control de velocidad de la turbina debido a la pequeña diferencia.

Polea Trapecial Ciega SPA-A									
Ø primitivo dw (mm)	Nº canales	Figura	M (mm)	L (mm)	Ø primitivo dw (mm)	Nº canales	Figura	M (mm)	L (mm)
<b>50</b>	1	P	32	35	<b>118</b>	1	D	60	35
	2	P	40	45		2	D	60	45
	3	P	40	54		3	D	70	50
<b>56</b>	1	P	35	35		4	P	70	50
	2	P	40	45		5	P	80	50
	3	P	40	54	<b>125</b>	1	D	55	35
<b>63</b>	1	P	40	35		2	D	60	45
	2	P	40	45		3	D	68	50
	3	P	40	54		4	D	68	50
	4	P	40	68		5	D	80	50
	5	P	40	84	<b>132</b>	1	D	55	35
<b>71</b>	1	P	40	35		2	D	60	45
	2	P	50	45		3	D	68	50
	3	P	52	54		4	D	68	50
	4	P	52	68		5	D	80	50
	5	P	52	84	<b>140</b>	1	D	60	35
<b>71</b>	1	P	40	35		2	D	60	45
	2	P	50	45		3	D	68	50
	3	P	52	54		4	D	68	50
	4	P	52	68		5	D	80	50
	5	P	52	84					

Tabla 3. Dimensiones de poleas del distribuidor Transmisiones Jocar S.L

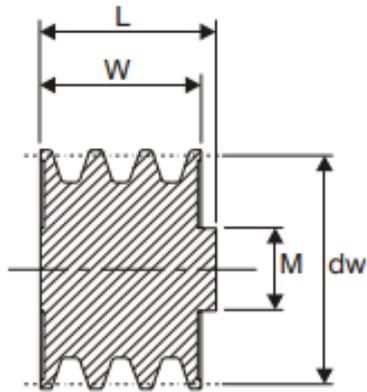


Figura 28. Vista de alzado de la polea

En la imagen podemos ver cómo los diámetros de 50, 63 y 71 milímetros se adaptan en gran medida a los requeridos.

De esta forma contamos con dos opciones: podemos utilizar las poleas fabricadas por Jocar y en un futuro se podrán fabricar por cuenta propia para mejorar la viabilidad económica del proyecto

La correa que une ambas poleas se conseguirá a través del mismo proveedor. Esta debe ser de un material que facilite la transmisión que se consigue gracias al rozamiento entre polea y correa. Debe estar suficientemente tensa y para ello se elaborará en la base del conjunto una serie de ranuras que lo posibiliten.

## 5.4 Eje

El diámetro principal del eje se ha diseñado de 25 milímetros para realizar el adecuado acople con el rodete de la turbina. En la zona intermedia se puede ver un orificio realizado para colocar la chaveta que evitará el movimiento relativo entre eje y rodete.

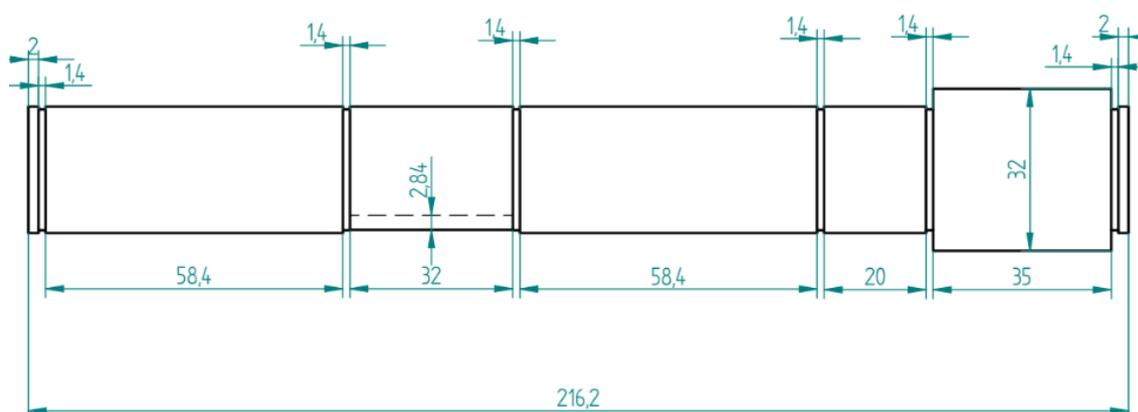


Figura 31. Vista de alzado del eje

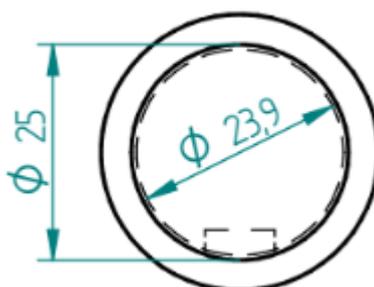


Figura 32. Vista de perfil del eje

Los orificios que se han realizado en el eje en repetidas ocasiones y que reducen el diámetro de este hasta 23,9 milímetros y tienen un ancho de 1,4 milímetros, tienen como objetivo servir de emplazamiento para los anillos Seeger o de retención. Estos giran con el eje y serán los encargados de evitar el desplazamiento axial de elementos de la turbina como eje, carcasa, chavetas y rodetes. Las medidas de estos orificios están diseñadas según las indicaciones de los propios fabricantes del anillo de retención como puede verse en los catálogos al final de este proyecto.

La longitud del eje se adapta a la de los dos rodamientos que se utilizarán en el conjunto.

En el extremo del eje podemos ver un ensanchamiento de este para realizar el acoplamiento de la polea que tiene un diámetro de 32 milímetros.

## 5.5 Carcasa

Con el propósito de abaratar costes, la carcasa se realizará a partir de un tubo hueco rectangular metálico. Entre los diferentes proveedores se ha escogido inicialmente a hierros Santander. Las medidas del tubo son 200x80 y tiene un espesor de 4 milímetros. La altura será de 200 milímetros. Al tubo se le realizaran una serie de taladros con diferentes propósitos.

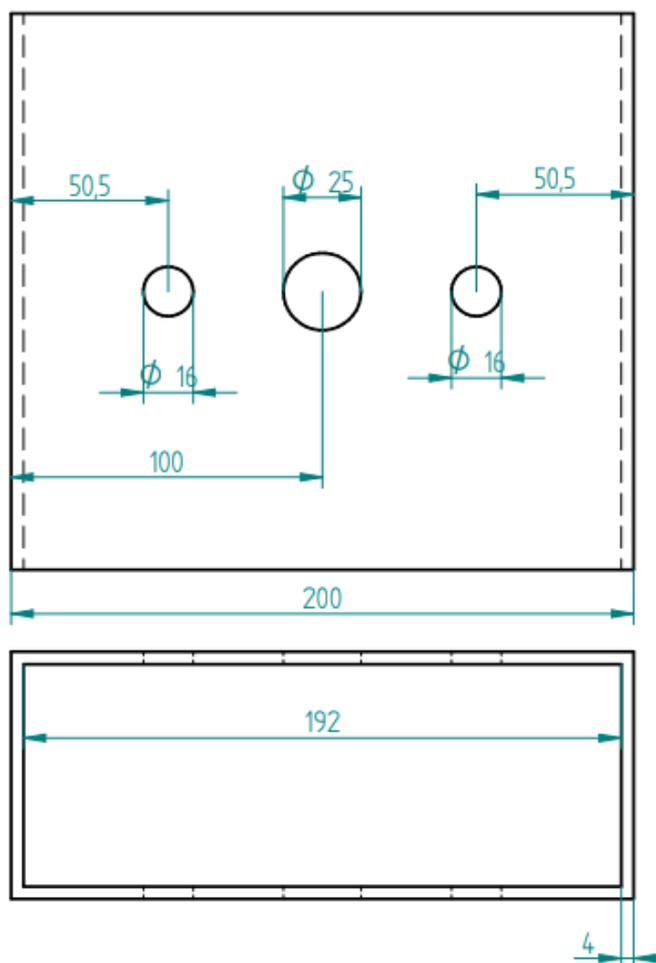


Figura 29. Vista alzado y planta de la carcasa

En el centro se realizará un agujero pasante de 30 milímetros de diámetro, será por tanto mayor que el eje para evitar la posible fricción entre eje y carcasa.

En la misma cara frontal se realizarán también dos agujeros de 16 milímetros de diámetro cada uno para acoplar a la carcasa el rodamiento que facilitará el movimiento rotacional del eje. Los 25 milímetros de diámetro del eje también se corresponden al diámetro del rodamiento.

## 5.6 Base

La base del conjunto tiene como misión servir de soporte para todos los elementos, incluido el alternador. En esta, se realizará un agujero que permita pasar con facilidad el agua que es inyectada en la turbina.

También se realizarán una serie de taladros para unirla tanto con la carcasa como con el alternador. Esta unión entre la carcasa y la base se realizará mediante la unión por soldadura de unas pequeñas piezas también de acero en la carcasa. En estas piezas se realizarán unos taladros de las mismas dimensiones que los anteriores por los que atravesarán unos tornillos que absorberán los esfuerzos cortantes que se produzcan evitando el deslizamiento relativo entre las piezas.

Para realizar el acoplamiento de las dos poleas mediante la correa de transmisión, se realizarán una serie de agujeros que permitan tensar y destensar las correas en las ocasiones que sea necesario como en el montaje o el mantenimiento del conjunto.

Para realizar el diseño y dimensionamiento de la base, es importante tener una medida de la correa trapecial que realizará la transmisión del conjunto. Utilizando una correa de 610 milímetros del mismo distribuidor que las poleas, Jocar transmisiones S.L, el diseño de la base para un modelo de poleas de 50 milímetros tendría una distancia entre ambos ejes de 225,86 ya que:

$$\frac{605 - 2 * ((2 * \pi * r)/2)}{2} = 225,86$$

La base también se realizará en chapa de 4 milímetros de ancho y tendrá unas medidas de 500mm de ancho y 500 milímetros de largo. En la siguiente figura también se presentan abocetadas las plantas tanto del alternador como de la carcasa de la turbina para facilitar el entendimiento de la distribución.

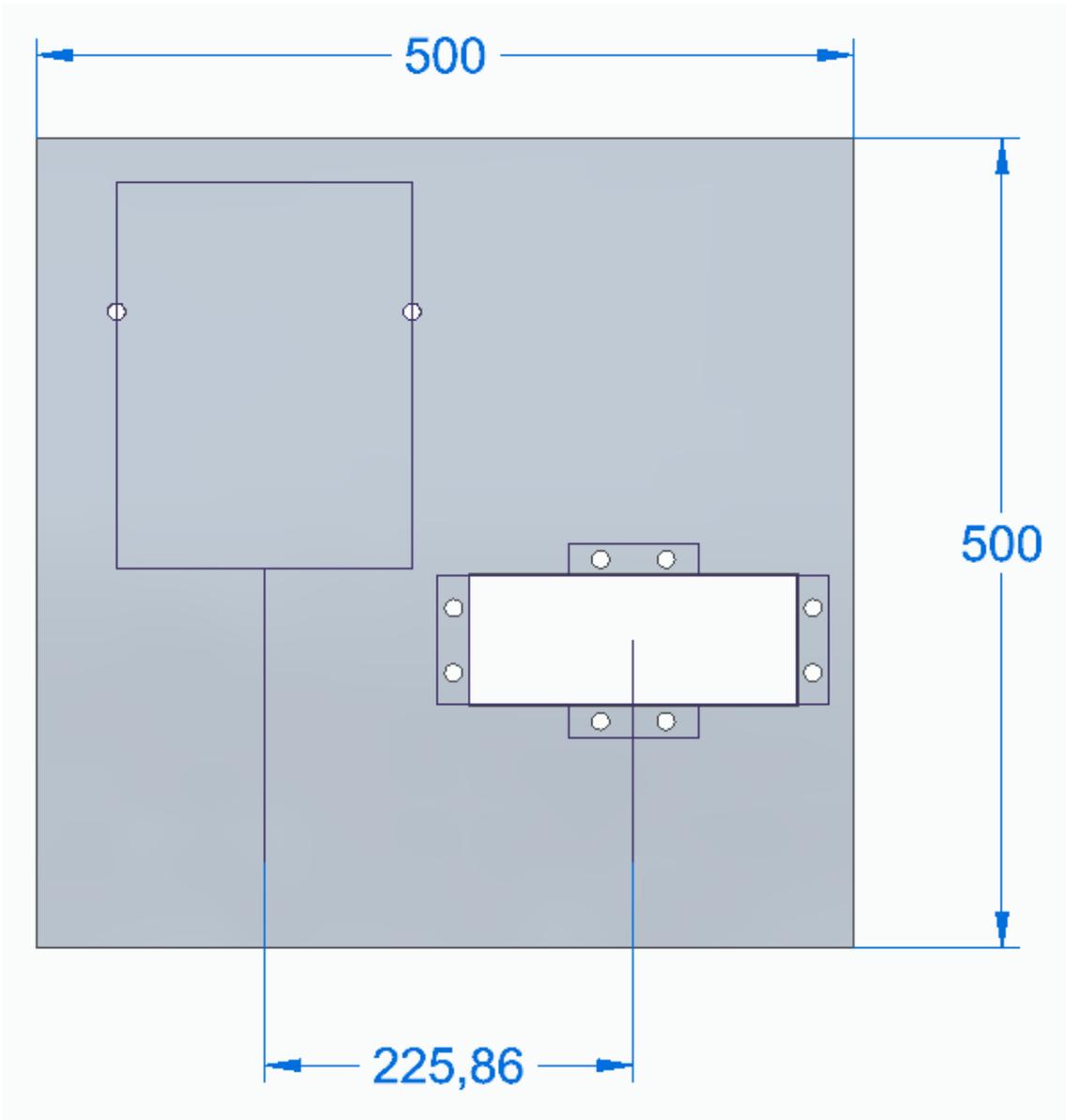


Figura 30. Vista de planta de la base del conjunto

## 5.7 Elementos adicionales de la turbina

Además de los elementos diseñados, en el conjunto de la turbina, existen una serie de elementos adicionales que han sido escogidos de los catálogos de diferentes fabricantes tras un estudio de cumplimiento de los requisitos necesarios y los límites del modelo.

### 5.7.1 Rodamientos

Será necesario el uso de un rodamiento en aquellas partes del modelo en las que se sitúen dos componentes con un eje de rotación común, de forma que uno de ellos gire respecto al otro. En nuestro proyecto, habrá que usar por tanto dos rodamientos que se situaran entre la carcasa y el eje de la turbina. Sirve además como apoyo del eje de la turbina. Las dimensiones de los rodamientos están estandarizadas y por tanto han servido como base para la toma de decisiones en el diseño de elementos como el eje de la turbina.

El rodamiento elegido es de bolas radiales, también conocido como Conrad, utilizado especialmente para aplicaciones de alta velocidad como es el caso de este proyecto.

La fatiga suele ser el fallo que aparece y que pone fin a la vida de los rodamientos tras un cierto tiempo o número de revoluciones. Esta vida del rodamiento es algo imposible de determinar de modo exacto y solo es parcialmente controlable de modo estadístico. Por tanto, es un elemento en el que se debe invertir un tiempo extra para las labores de mantenimiento como puede ser la lubricación del mismo.

### 5.7.2 Anillos Seeger

La misión principal de un anillo Seeger o anillo de retención es la de evitar el desplazamiento axial entre el eje, la carcasa y los rodamientos. Se dispondrán a lo largo del eje y girarán con el evitando este movimiento relativo gracias a la absorción de los esfuerzos normales que puedan presentarse.

Los anillos Seeger están normalizados, de forma que el hueco en el que ira dispuesto cada uno de ellos exige unas medidas exactas especificadas por el fabricante.



Figura 32. Anillo Seeger de retención



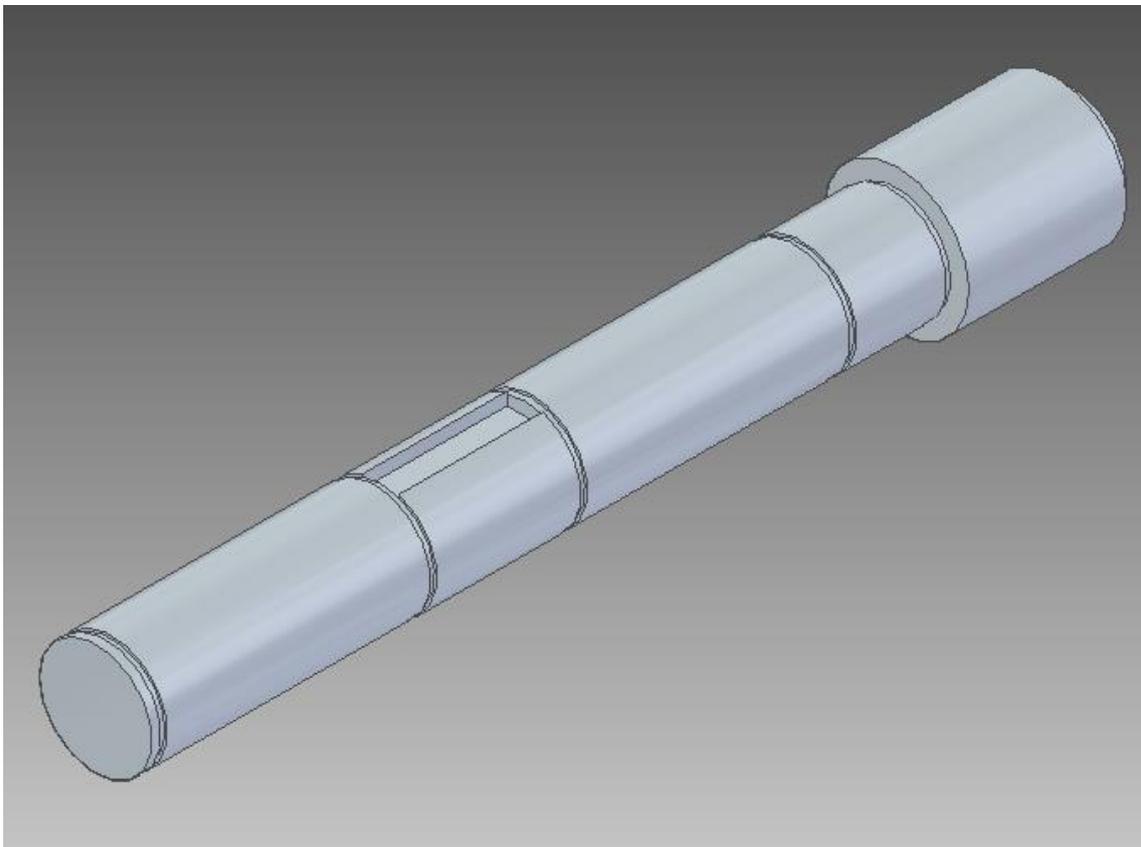
Figura 31. Rodamiento escogido para el conjunto

### 5.7.3 Chaveta

La chaveta es un elemento que evita deslizamientos entre 2 elementos que deben ser solidarios entre sí, como lo son en nuestro caso el eje y el rodete. Es una pieza de pequeñas dimensiones en relación con estos y se ubicará en un hueco mecanizado con las medidas adecuadas en el propio eje y rodete de forma que no exista holgura al insertarla. La chaveta al igual que los rodamientos y los anillos de retención, también están normalizadas.

## 5.8 Montaje

Como se ha comentado con anterioridad, el diseño del conjunto se ha realizado con la herramienta de diseño en tres dimensiones, SolidEdge, la cual permite además de realizar el diseño individual de cada una de las piezas, acoplar cada una de las piezas obteniendo un conjunto final con una serie de movimientos restringidos. A continuación, se muestra la sucesión del que sería el montaje de las piezas que conforman la parte de la turbina del conjunto:



*Figura 33. Vista 3D eje de la turbina*

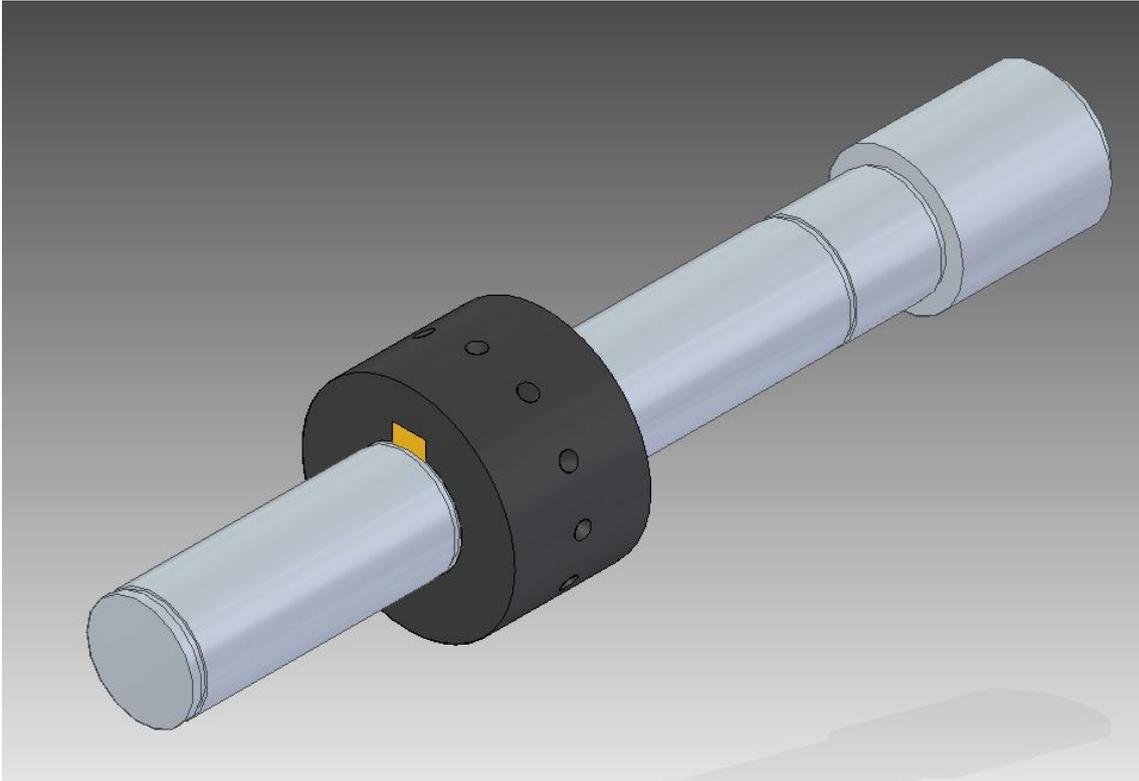


Figura 35. Vista 3D del acoplamiento eje, rodete y chaveta

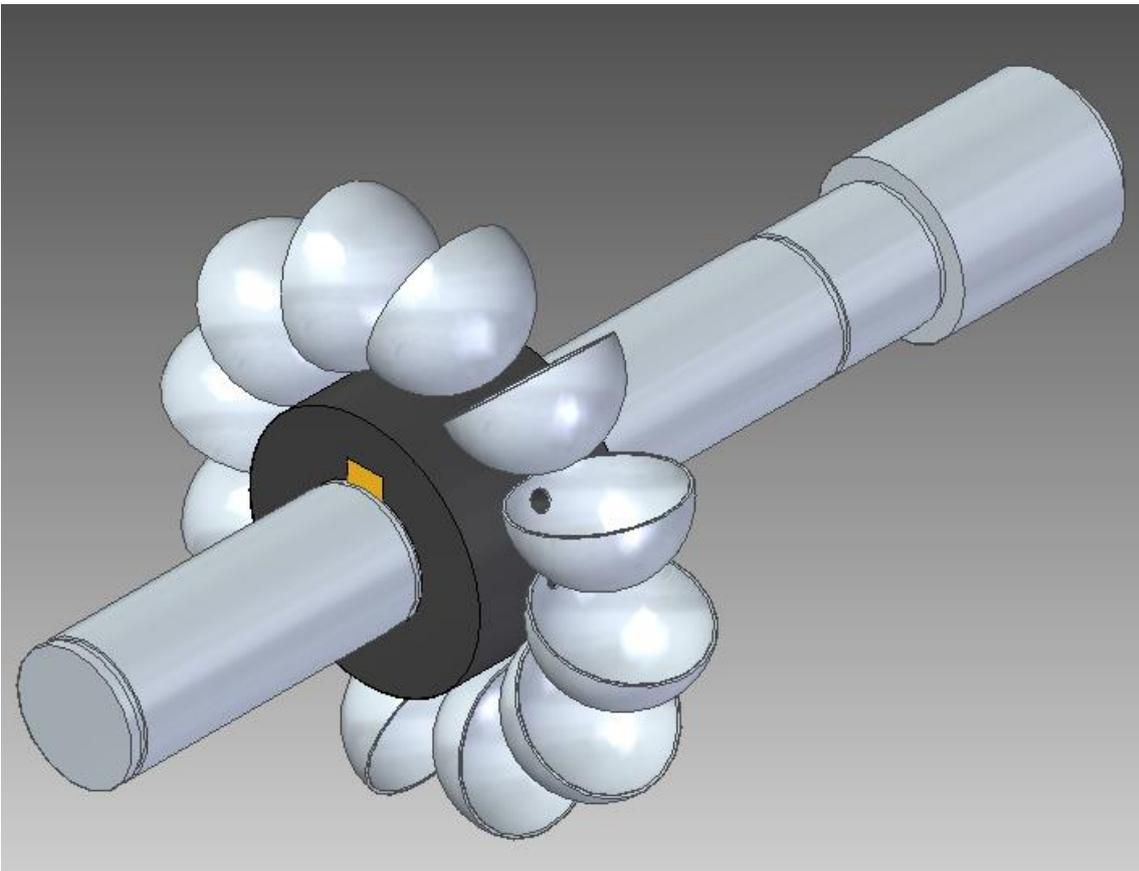


Figura 345. Vista 3D del acoplamiento eje, rodete, chaveta y alabes

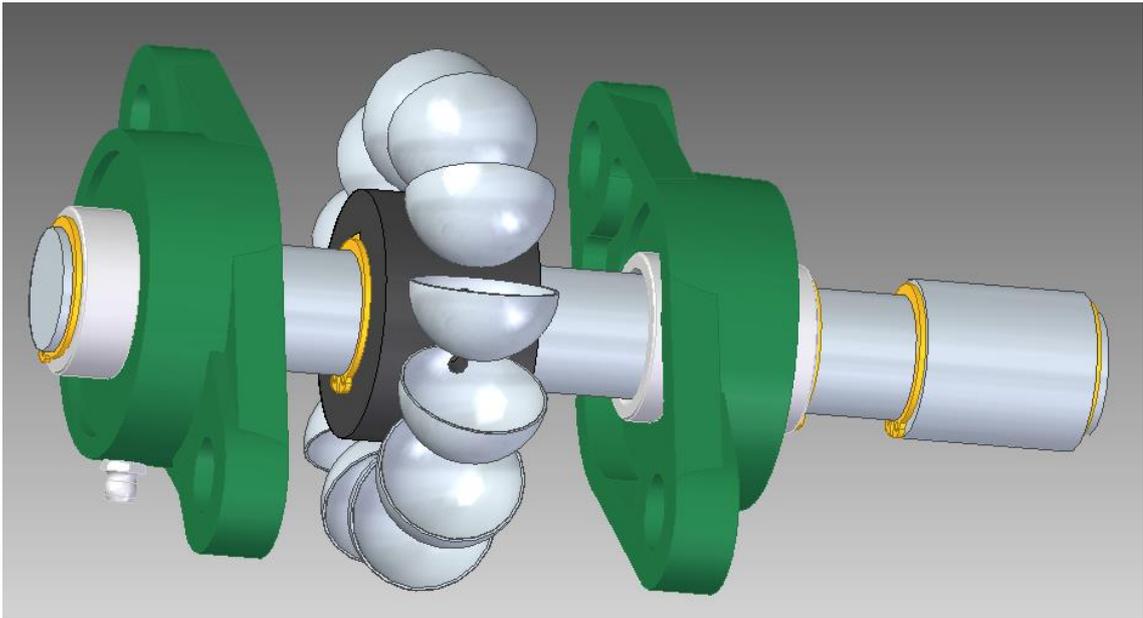


Figura 36. Vista del acoplamiento de eje, rodete, chaveta, alabes, anillos y rodamientos

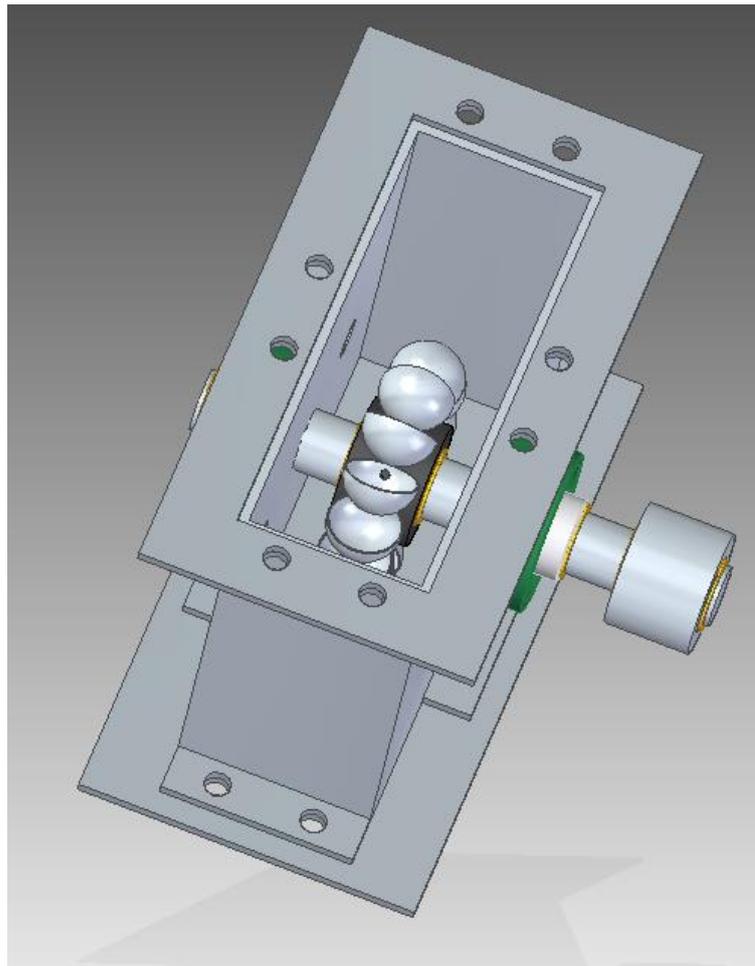


Figura 37. Vista del conjunto en el interior de la carcasa

En la fabricación del conjunto, juega un papel fundamental la escuela de formación profesional de los padres escolapios en Bandjun, una población de unos 120.000 habitantes ubicada en el departamento de Koung-Khi, al oeste de Camerún. En la escuela, se imparten cursos formativos sobre mecánica, electricidad y electrónica además de otros de materias domesticas como la economía familiar. La escuela, que cuenta con más de 400 alumnos en situaciones desfavorables cada año, está dotada de maquinaria que servirá para la fabricación de los elementos de la turbina. La soldadura necesaria para realizar la unión entre la carcasa y las pequeñas placas que se unirán con la base o el mecanizado del o el torneado del eje de la turbina podrían realizarse con la ayuda de la escuela.

Además, a lo largo del proyecto, han servido como contacto a través del cual se recibía información sobre la disponibilidad de los elementos necesarios en Camerún. Mediante el contacto con ellos, se ha hecho posible comprobar con que materiales se contaban en Camerún. El principal proveedor con el que se trabajará en el país será “Bernabé Camaeroun”, que distribuye generadores y material industrial como tubos huecos y barras de acero que nos servirán para elaborar nuestro modelo de turbina con la mayor semejanza al propuesto. Todas las proformas con las que se cuentan gracias a su ayuda, se muestran al final de este documento en el apartado de anexos.



*Figura 38. Torno mecánico en la escuela de formación profesional de los padres escolapios en Bandjun*

# 6.PRESUPUESTO DEL PROYECTO Y VIABILIDAD ECONÓMICA

Nos encontramos ante un proyecto de cooperación internacional en el que se trabaja para suplir la necesidad de acceso a la electricidad de zonas desabastecidas de Camerún. Se pretende que sirva como base para diversas instalaciones a lo largo de país y por tanto es fundamental que sea un proyecto viable en términos económicos, ya que de lo contrario no se alcanzaría el objetivo final de este y se podría buscar una mejor solución al problema del desabastecimiento.

Un proyecto será económicamente viable cuando los bienes o recursos que genera son mayores que las necesidades financieras del mismo.

Para contabilizar los bienes que genera este proyecto es necesario conocer el precio de la electricidad en Camerún para, a partir de una estimación de la energía producida, analizar el coste de la cantidad total de electricidad distribuida.

Algunos de los productos de Camerún como la electricidad o el agua están sujetos a una reglamentación de precios debido a que son suministrados por monopolios o porque están subvencionados por el estado. En el caso de la electricidad, se dan las dos situaciones a la vez. La sociedad nacional de electricidad (AES-SONEL) es una empresa en parte extranjera de la que un 44% pertenece al estado. Esta tiene el monopolio del suministro de la electricidad gracias a una concesión del estado por 20 años que se inició en 2001.

Si se quisiese valorar económicamente el impacto del proyecto, debería existir una referencia que justificase el valor de la energía producida. Para ello, se ha escogido el valor del kWh en Camerún como referencia. La tarifa de precios de electricidad en Camerún se divide en una serie de niveles, en los cuales, al aumentar de consumo, aumenta el precio que se debe pagar por kilovatio-hora como se muestra en la tabla:

<b>Baja tensión: potencia inferior a 66 kw</b>		
	<i>Uso doméstico</i>	<i>Otros usos</i>
Consumo ≤ 10 kWh/mes	50 FCFA Kwh Exonerado de TVA	75 FCFA Kwh Exonerado de TVA
111–400 kWh/mes*	70 FCFA Kwh	80 FCFA Kwh
401-800 kWh/mes*	80 FCFA Kwh	85 FCFA Kwh
> 800 kWh/mes*	85 FCFA Kwh	92 FCFA Kwh
* Para tramos de consumo > 100 Kwh, el TVA es 18,7 %. TVA + Céntimos adicionales comunales = 19,25		
<b>Media tensión: 66-500 KW</b>		
La tarifa se compone de dos elementos: 1) Tarifa proporcional al kwh consumido, en función de la potencia contratada De 48 FCFA kwh a 70 FCFA kwh (TVA + céntimos adicionales: 19,25 %) 2) Prima fija mensual en función de la potencia instalada à 3.500 FCFA		
<b>Alta tensión: 500 KW</b>		
Las tarifas se rigen por contratos firmados con ENEO, la empresa que ostenta el monopolio de la comercialización de la energía eléctrica en el país, y revisados por la agencia de regulación. Se paga también una prima mensual en función de la potencia instalada.		

Tabla 4. Costes de potencia en Camerún

Al tratar este proyecto de una instalación de muy pequeña producción, se situaría en el nivel más bajo, por el que se pagan aproximadamente 75FCFA/kWh en un mes.

El franco CFA es la moneda de Camerún por ser este país miembro de la Comunidad Económica y Monetaria del África Central (CEMAC) y del Banco de los Estados de África Central (BEAC). Actualmente, un euro equivale a 655,96 francos. Por tanto, se puede observar como a pesar de no tener una amplia red, Camerún posee una energía relativamente barata en comparación con otros países, esto se debe a la gran importancia de la energía hidráulica en el mix de generación del país.

El alternador con el que contamos, es de 1,2Kva. Con un factor de potencia de 0.8 se tendría un resultado de potencia de 0,96 kW.

Teniendo en cuenta que un mes de 30 días tiene 720 horas, el precio del kW según la tarifa anterior sería de 79,02 euros. Sin embargo, esto sería para un factor de utilización del 100%, que se aleja de la realidad ya que habría que tener en cuenta paradas por fallo o mantenimiento de la tubina. Para un factor del 80%, tendríamos un coste de 63,22 euros al mes.

$$\frac{1(\text{€})}{655,96(\text{FCFA})} * 75\left(\frac{\text{FCFA}}{\text{kWh}}\right) * 0,96(\text{kW}) * 720(\text{h}) * 0,8 = 63,22\text{€}$$

Las necesidades financieras por su parte, irán desglosadas en dos tablas conformando el presupuesto del proyecto. En el presupuesto también irá incluido el coste de las tareas llevadas a cabo en el proyecto anterior como la fabricación de la prensa-chapas manual o la impresión en 3D de las piezas prototipo. Se actualizarán los precios estimados ya que se cuenta con la información definitiva acerca del precio de venta de los elementos necesarios por parte de los proveedores.

Costes fijos: Son aquellos que se asumen al inicio del proyecto y que no varían al fabricar más turbinas. Estos costes son:

Cantidad	Descripción	Precio (€)	Importe (€)
1	Punzón en acero para para la realización de las cazoletas	310	310
1	Útil de embutición	271,9	271,9
1	Útil de taladro	175,45	175,45
1	Matriz para realizar la embutición	200	200
1	Prensa de mano para la fabricación de las cazoletas	121	121
2	Disco prototipo fabricado en impresión digital 3D	5,67	11,34
26	Cazoletas prototipo fabricadas en impresión digital 3D	0,5	13
TOTAL (€)			922,69

Tabla 5. Costes fijos del proyecto

Costes variables: Son aquellos costes que se dan cada vez que se elabore un modelo de turbina. En cada reproducción del modelo será necesario una inversión en materiales y elementos como por ejemplo el alternador. Estos costes aparecen en la siguiente tabla:

Cantidad	Descripción	Precio (€)	Importe (€)
1	Cuadro eléctrico para la protección a la salida del alternador	45,67	45,67
1	Contador	20,65	20,65
1	Alternador S15W 2 Polos 1 fase	161,25	161,25
2	Rodamientos	6,21	12,42
5	Anillos Seeger/ anillos de retención	1,05	5,25
1	Eje de acero	35,00	35,00
1	Chaveta	2,50	2,50
1	Alternador	161,25	161,25
2	Poleas	19,66	39,32
1	Tubo hueco de acero para la carcasa	30,45	30,45
4	Chapas de acero para la soldadura	2,80	11,20
1	Chapa para realización de la base	15,50	15,50
1	Chapa de acero para cubrir la carcasa	7,00	7,00
1	Correa	15,33	15,33
12	Chapas para la realización de los alabes	1,40	16,80
28	Tornillos	0,02	0,56
TOTAL (€)			580,15

Tabla 6. Costes variables del proyecto

De esta forma, el coste total de fabricación de la turbina sería de 1502,84 euros. Según el cálculo realizado anteriormente que indica que el ahorro en un mes sería de 63,22 euros, el proyecto tardaría en amortizarse un total de 23,77 meses. Por tanto, en aproximadamente 2 años, la turbina podría considerarse como rentable.

Cabe destacar que la forma de comprobar esta rentabilidad que se ha llevado a cabo es teórica ya que realmente no se podría llegar a disponer de electricidad en la zona de instalación de la turbina a través de la red eléctrica.

En las necesidades financieras se han incluido únicamente los costes de los materiales ya que la mano de obra no supondría ningún gasto para el proyecto al contar con voluntarios que pueden llevarlo a cabo.

# 7. BIBLIOGRAFÍA

- [LUS03] I. U. Lus, S. U. Lus. “Energía Renovable Práctica”. 2003.
- [SALD90] F. V. M. Saldarriaga. “Máquinas Eléctricas rotativas”. 1990.
- [MORA08] J. F. Mora. “Máquinas Eléctricas”. 2008. McGraw-Hill.
- [VAZQ91] J. R. Vázquez. “101 Esquemas De Bobinados De Corriente Alterna”. 1991.
- [POZU10] M. R. Pozueta. “Constitución De Las Máquinas Eléctricas”. Departamento de Ingeniería Eléctrica Y Energética. Universidad de Cantabria. 2010.
- [POZU15] M. R. Pozueta “Maquinas Eléctricas. Máquinas Sincrónicas”. Departamento de Ingeniería Eléctrica Y Energética. Universidad de Cantabria. 2015.
- [LEDE08] P. Ledesma “Regulación De Frecuencia Y Potencia”. Universidad Carlos III de Madrid. 2008.
- [MILL94] R. H. Miller. J. H. Malinowski. “Power System Operation”. Mc Graw Hill. 1994.
- [KUND94] P. Kundur. “Power System Stability And Control”. McGraw-Hill. 1994.
- [CAR] E. L. Carvajal E. N. Rivera. “Dinámica De Maquinas Excitación Sin Escobillas (Brushless)” Universidad Técnica de Cotopaxi.
- [HIDA15] J. L. G. Hidalgo. “Metodología Para El Diseño De Turbinas En Pequeñas Centrales Hidroeléctricas Con Capacidad Menos A 10 MW”. Facultad De Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Nacional. 2015.
- [VALD13] J. C. N. Valdez. “Control Digital De La Excitación De Un Generador Síncrono”. Facultad De Ingeniería Departamento De Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Universidad De Piura.

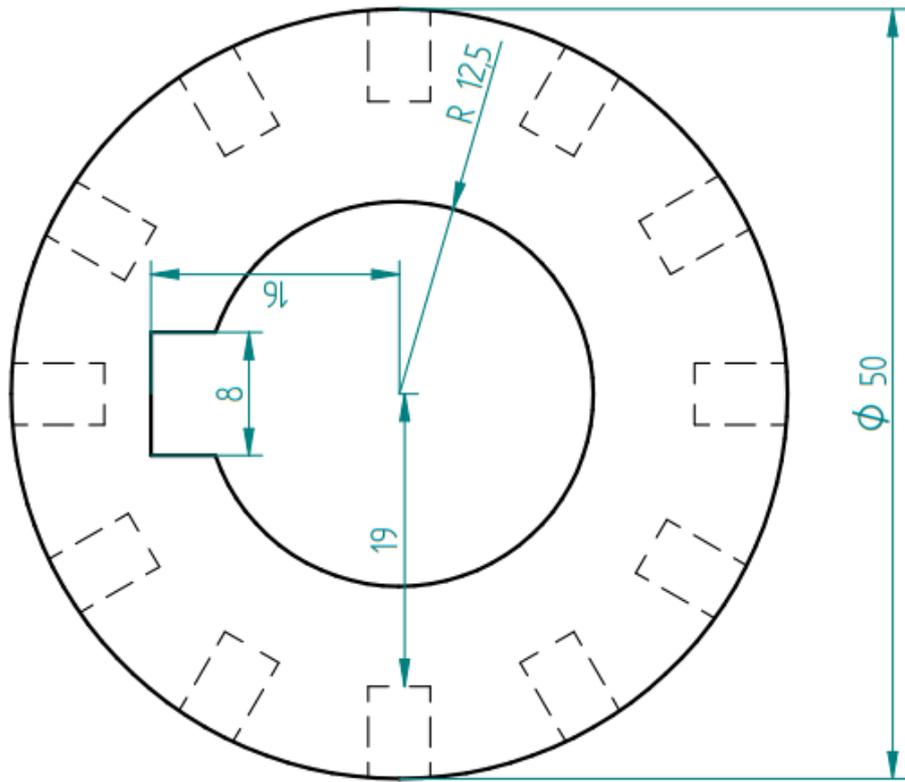
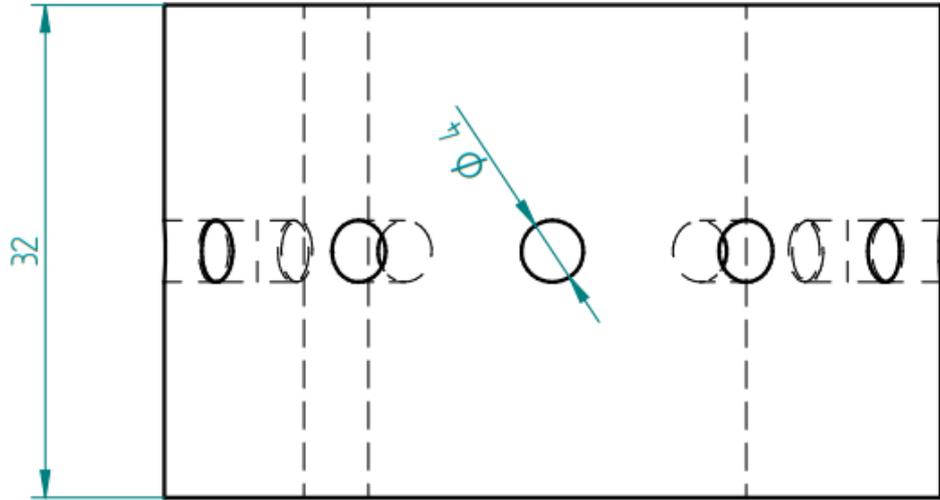
- [VARG05] L. VARGAS. "Sistemas De Excitación De Máquinas Síncronas"  
Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas. Departamento De  
Ingeniería Eléctrica. Universidad De Chile.
- [RODR] F. G. T. Rodríguez "Proyecto Kumbo (Camerún) Instalaciones  
Energéticas Necesarias". Revista Anales. Icai
- [RODR16] F. G. T. Rodríguez "El Espíritu De Icai Revive En Camerún".  
Revista Anales. Icai



## **8.ANEXOS**

Se incluyen los planos de los elementos diseñados a lo largo del proyecto y los catálogos de los materiales necesarios. Además, se incluyen las proformas de materiales disponibles de Camerún recibidas por el contacto en Kumbo.

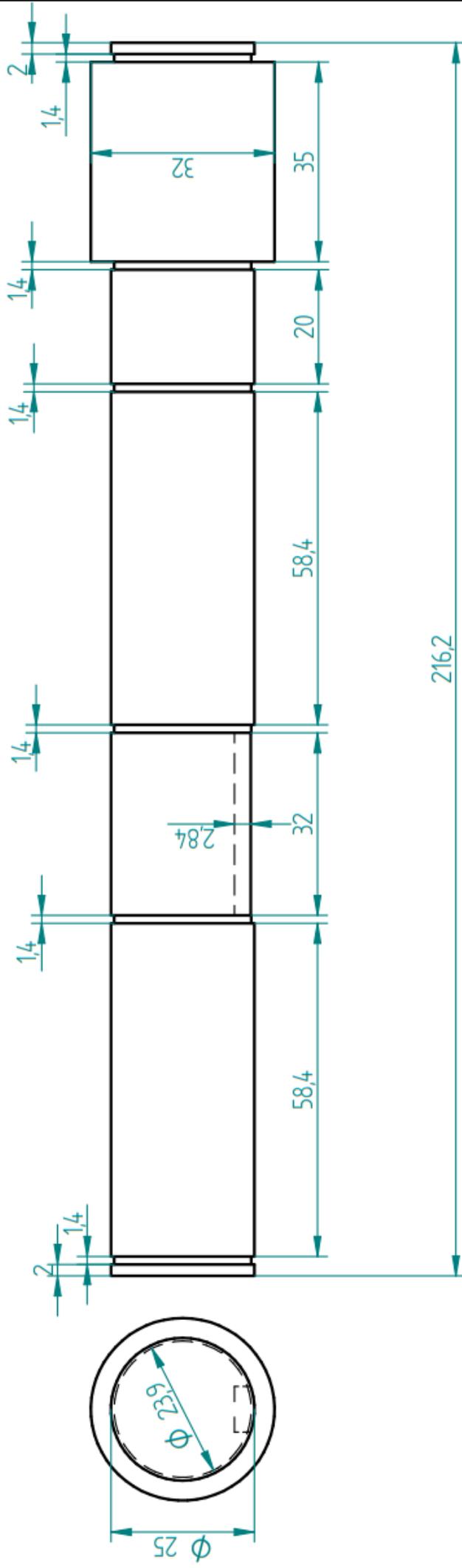




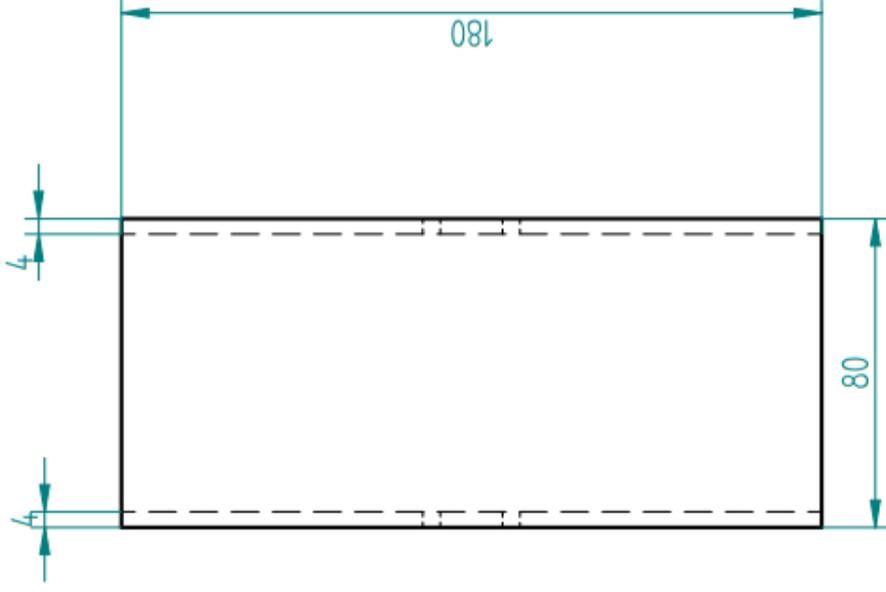
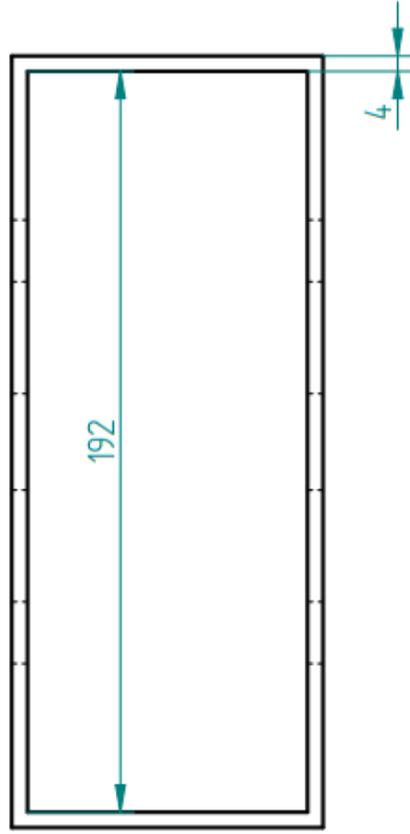
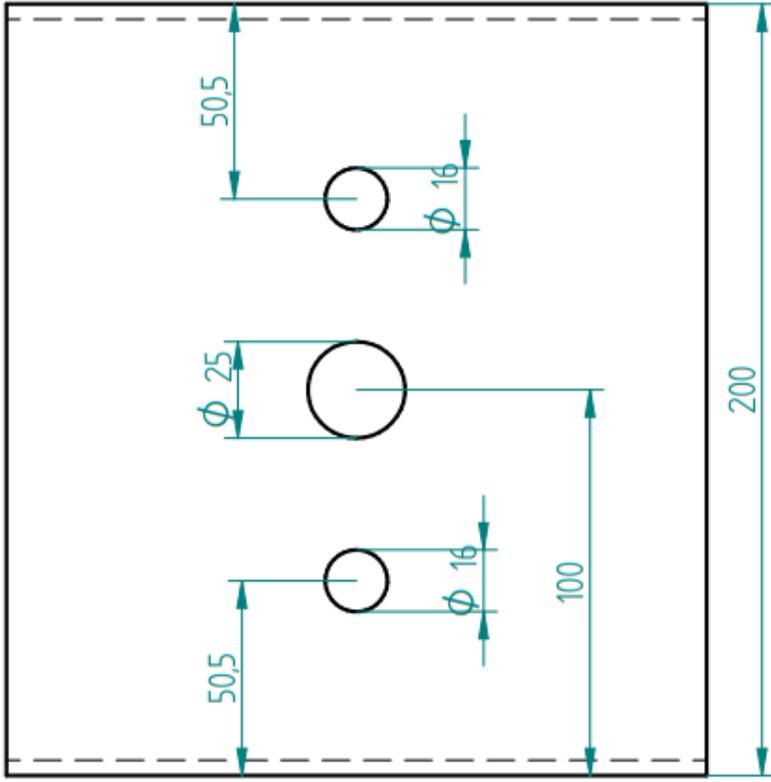
Dibujado	Nombre	Fecha
	P. SÁNCHEZ	12/09/2018
Comprobado		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		

<b>ICAI</b>	
<b>PROYECTO DE FIN DE GRADO</b>	
Título: TURBINA HIDRÁULICA ARTESANAL	
A4	Plano: RODETE
Plano número: I	
Escala 2:1	Peso
	Hoja 1 de 1

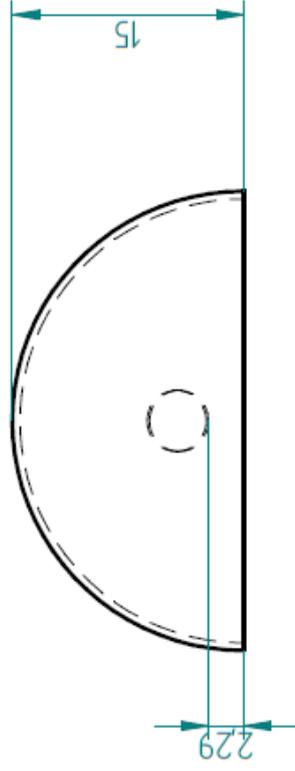
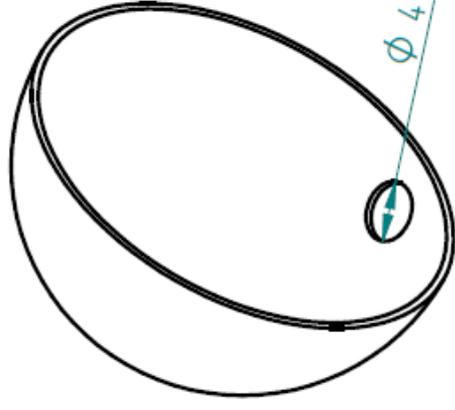
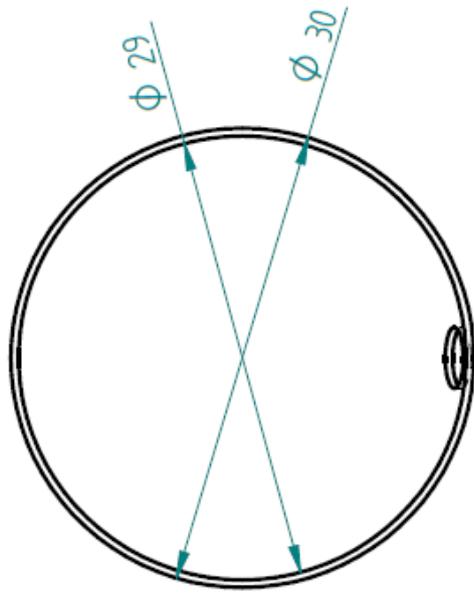
SOLID EDGE ACADEMIC COPY



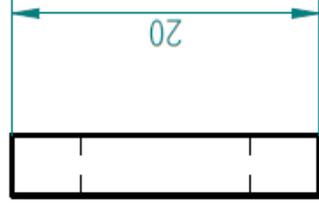
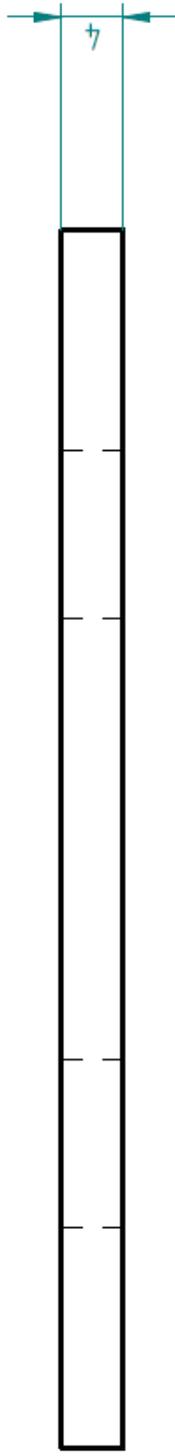
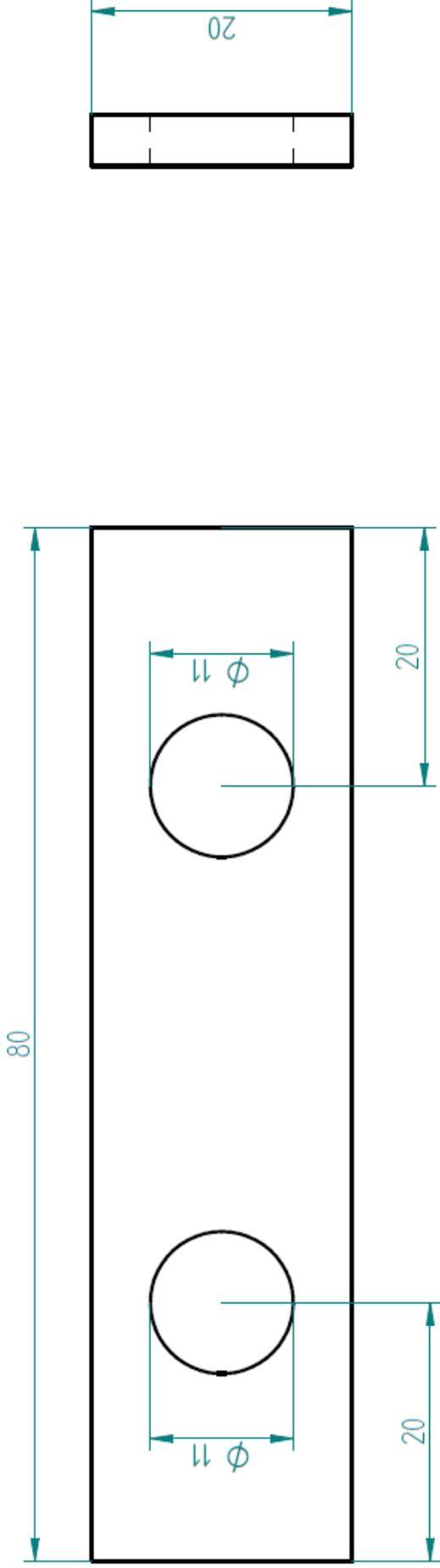
<b>ICAI</b> <b>PROYECTO DE FIN DE GRADO</b>		Nombre	Fecha
		Dibujado	12/09/2018
Título: TURBINA HIDRÁULICA ARTESANAL		Comprobado	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		A4	Plano: EJE
		Plano número: 2	
		Escala 1:1	Peso
		Hoja 1 de 1	



<p style="text-align: center;"><b>ICAI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE FIN DE GRADO</b></p>		Nombre	Fecha
		P. SÁNCHEZ	12/09/2018
Comprobado			
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		A4 Plano: CARCASA	
		Plano número: 3	
Escala 1:2	Peso	Hoja 1 de 1	

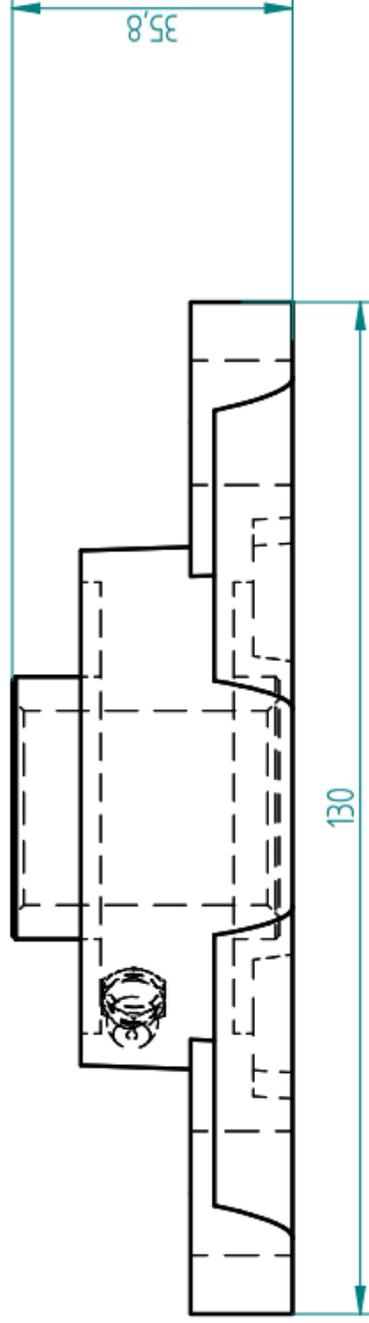
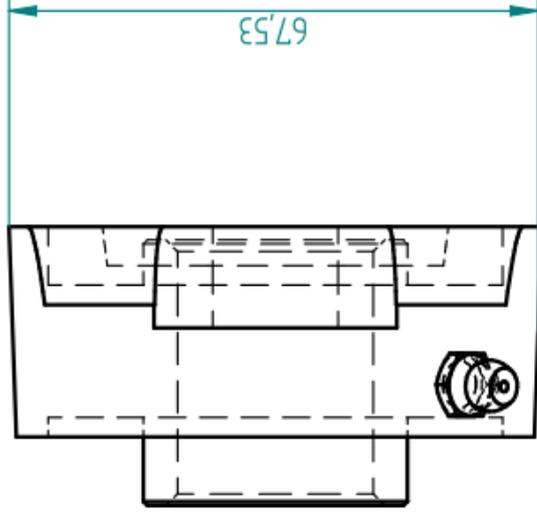
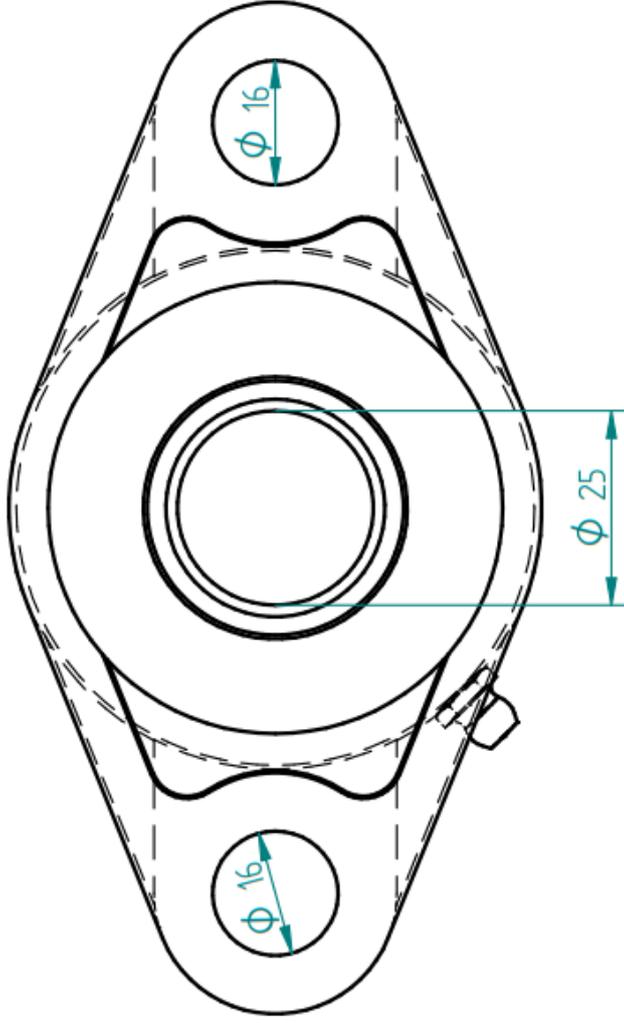


<p style="text-align: center;"><b>ICAI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE FIN DE GRADO</b></p>		Nombre	Fecha
		Dibujado	12/09/2018
Comprobado			
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		A4	Plano: ÁLABE
		Plano número: 4	
Escala 2:1	Peso	Hoja 1 de 1	
Título: TURBINA HIDRÁULICA ARTESANAL			

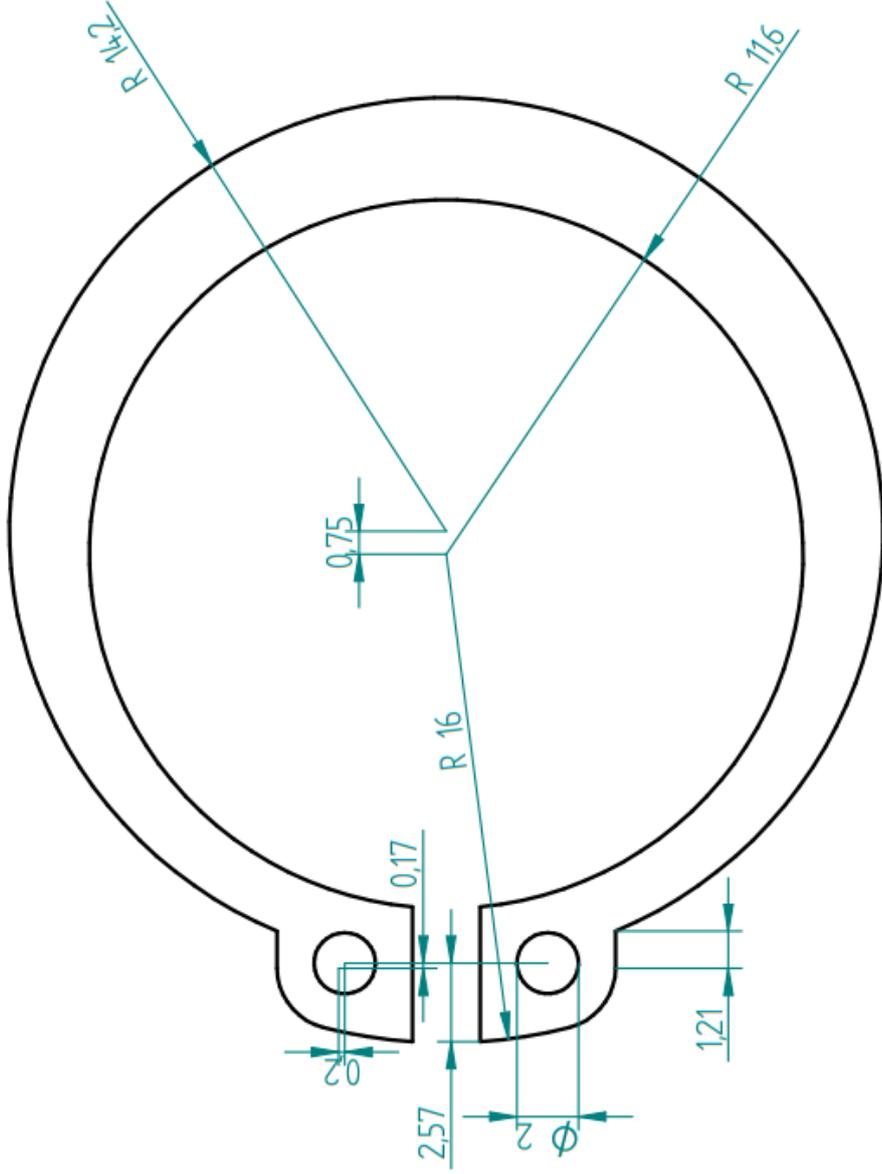
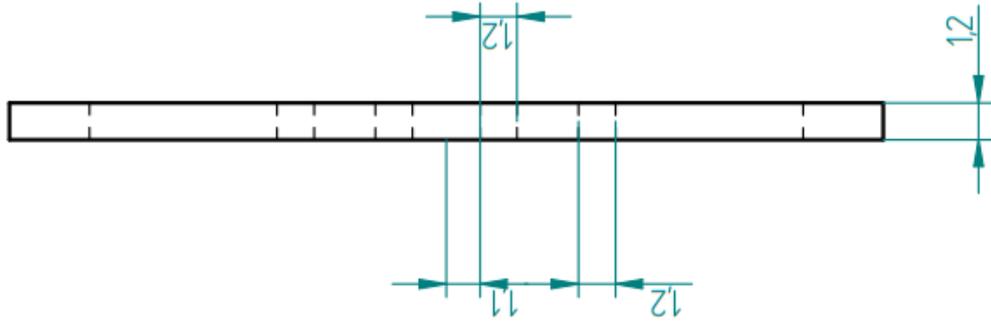


Dibujado	Nombre	Fecha
P. SANCHEZ		12/09/2018
Comprobado		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0.5$ y $\pm 1^\circ$		

<b>ICAI</b>	
<b>PROYECTO DE FIN DE GRADO</b>	
Título: TURBINA HIDRÁULICA ARTESANAL	
A4	Plano: SOLDADURA
Plano número: 5	
Escala 1:1	Peso
Hoja 1 de 1	



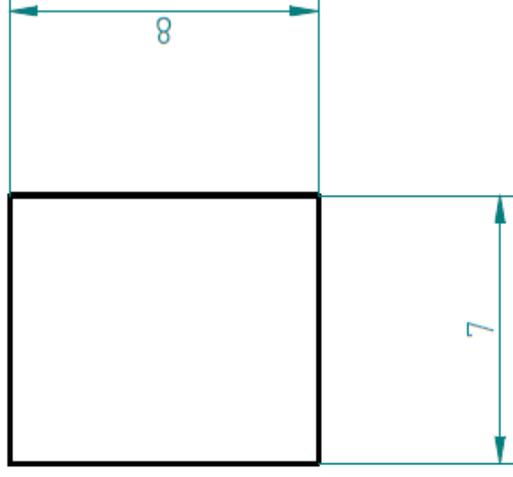
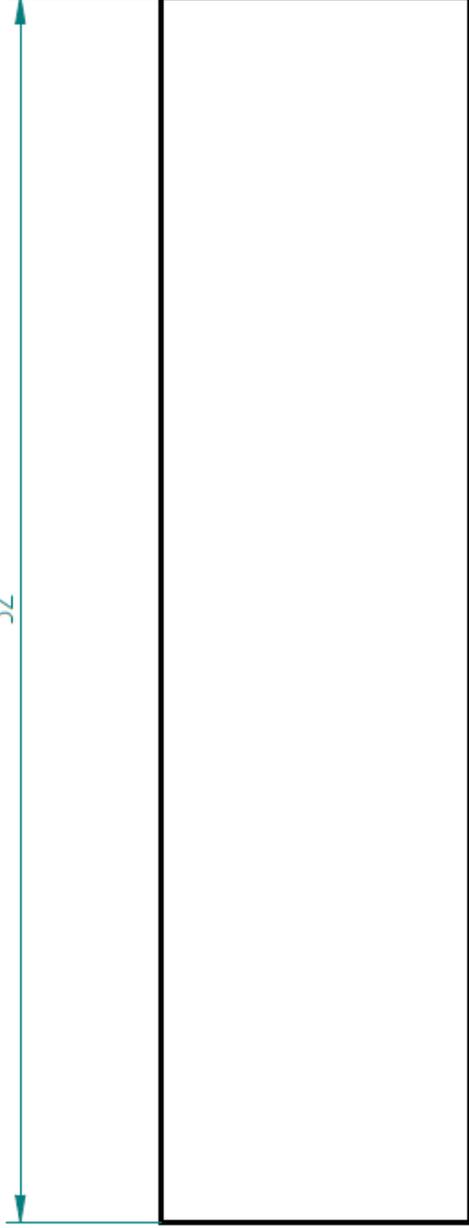
ICAI		Nombre	Fecha
PROYECTO DE FIN DE GRADO		P. SÁNCHEZ	12/09/2018
Título: TURBINA HIDRÁULICA ARTESANAL		Comprobado	
A4	Plano: RODAMIENTO	Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$	
Plano número: 6		Escala I:I	Peso
		Hoja 1 de 1	



ICAI		PROYECTO DE FIN DE GRADO	
Dibujado		Nombre	Fecha
Comprobado		P. SÁNCHEZ	12/09/2018
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Título: TURBINA HIDRÁULICA ARTESANAL	
A4		Plano: ANILLO DE RETENCIÓN	
Escala 4:1		Plano número: 7	
Peso		Hoja 1 de 1	

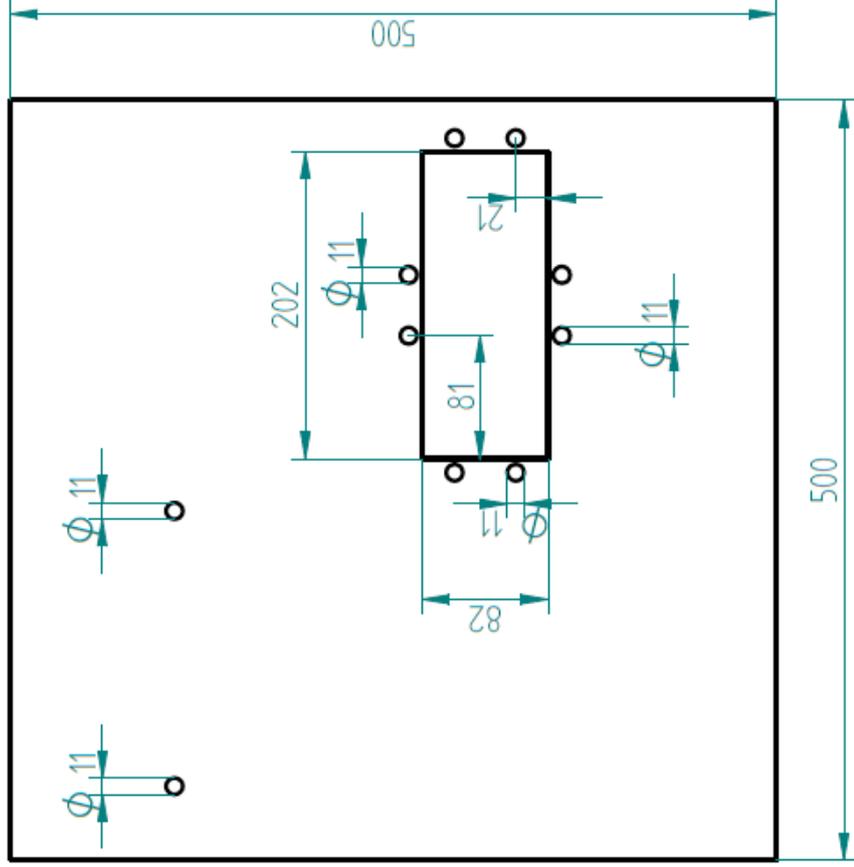
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

32



	Nombre	Fecha
Dibujado	P. SÁNCHEZ	12/09/2018
Comprobado		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0.5$ y $\pm 1^\circ$		

<b>ICAI</b>	
<b>PROYECTO DE FIN DE GRADO</b>	
Título: TURBINA HIDRÁULICA ARTESANAL	
A4	Plano: CHAVETA
Plano número: 8	
Escala 5:1	Peso
Hoja 1 de 1	



Nombre	Fecha
P. SANCHEZ	12/09/2018
Comprobado	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$	

<b>ICAI</b>	
PROYECTO DE FIN DE GRADO	
Título: TURBINA HIDRÁULICA ARTESANAL	
A4	Plano: BASE
Plano número: 9	
Escala 1:5	Peso
Hoja 1 de 1	



07/11



# S15W

MECCALTE spa - Via Roma, 20 - 36051 CREAZZO (VI) ITALIA  
 Tel. +39 0444/396111 - Fax +39 0444/396166 - e-mail: info@meccalte.it  
 web site: www.meccalte.com

**2 POLE**  
**1 PHASE**  
**IP21 or IP23**

## CHARACTERISTICS

### 50 Hz

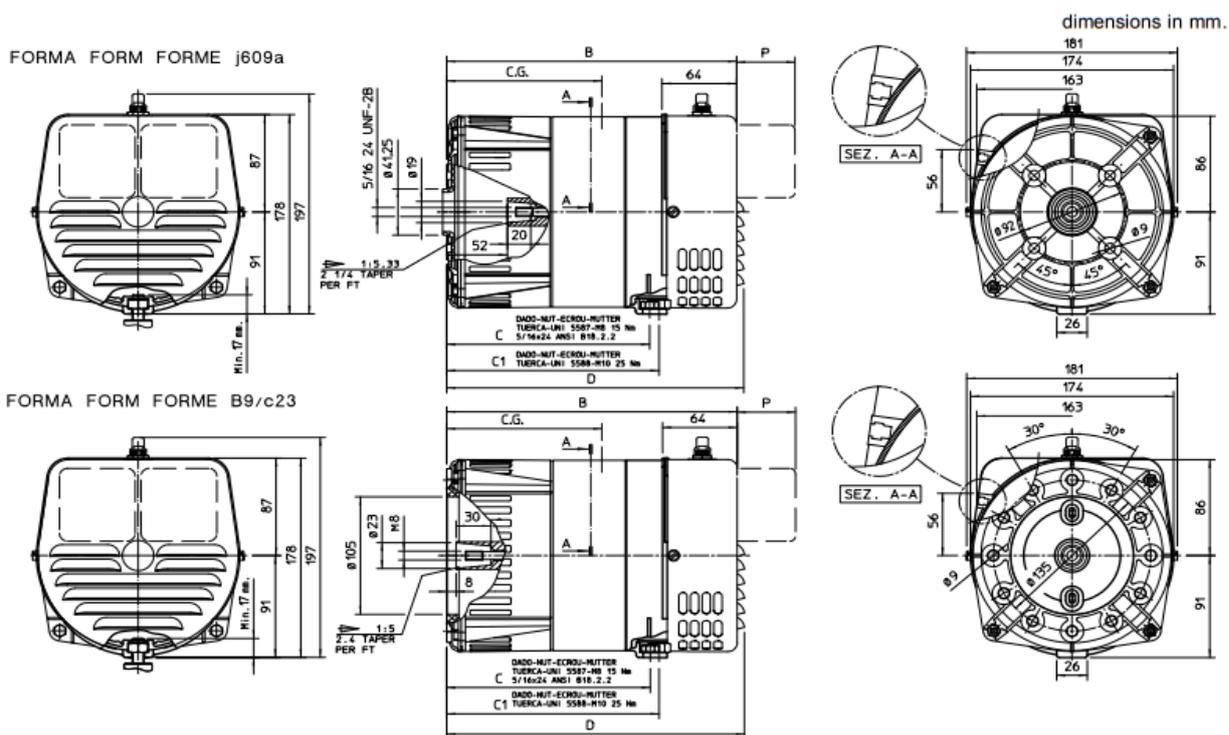
Type	115/230V 50Hz 3000 RPM									
	kVA CL. H	$\eta$ 2/4 1 p.f.	$\eta$ 3/4 1 p.f.	$\eta$ 4/4 1 p.f.	T.H.D. %	Air volume m <sup>3</sup> /min	Noise		Weight Kg	J Kgm <sup>2</sup>
		%	%	%			7m dBA	1m dBA		
S15W-45	1,2	65,9	68,8	68,7	< 5	2,1	55	71	8,1	0,0031
S15W-60	1,8	67,5	70,4	70,2	< 5	2,1	55	71	10,4	0,0040
S15W-75	2,1	68,8	71,6	71,4	< 5	2,1	55	71	12,4	0,0049
S15W-85	2,4	69	71,9	71,8	< 7,5	2,1	55	71	13,4	0,0055
S15W-102	2,8	89,2	72,2	72	< 5	2,1	55	71	14,8	0,0066

### 60 Hz

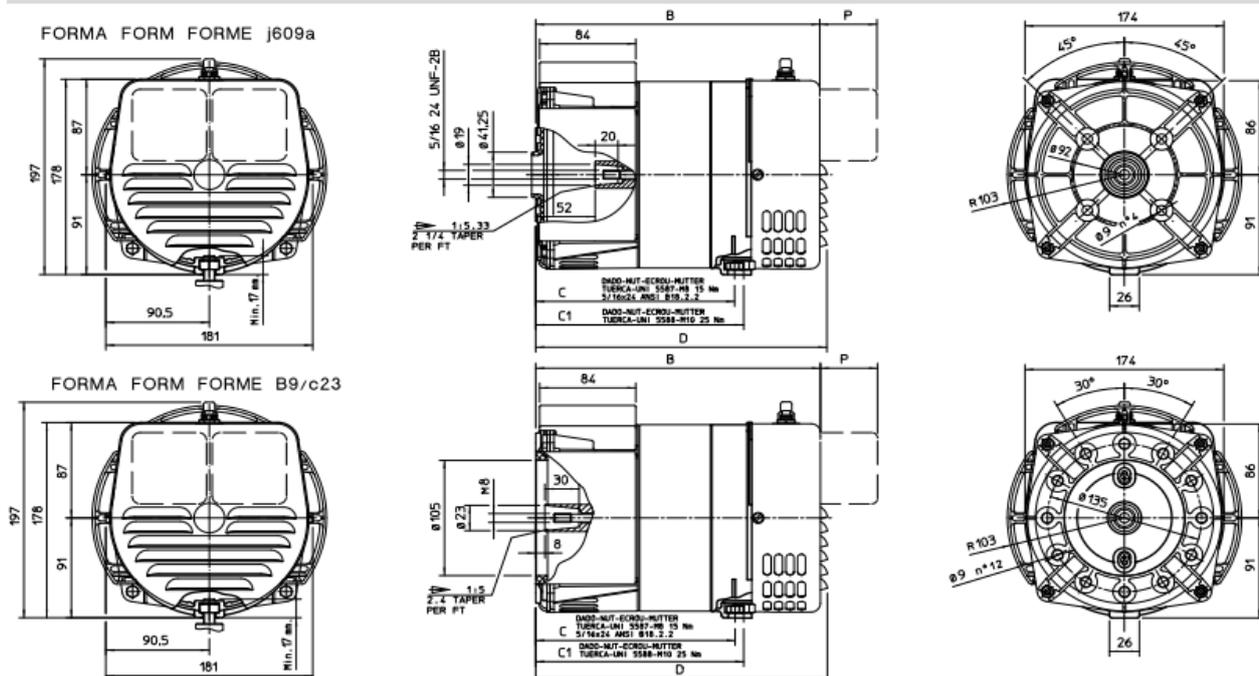
Type	120/240V 60Hz 3600 RPM									
	kVA CL. H	$\eta$ 2/4 1 p.f.	$\eta$ 3/4 1 p.f.	$\eta$ 4/4 1 p.f.	T.H.D. %	Air volume m <sup>3</sup> /min	Noise		Weight Kg	J Kgm <sup>2</sup>
		%	%	%			7m dBA	1m dBA		
S15W-45	1,45	67	69,8	69,7	< 5	2,9	58	76	8,1	0,0031
S15W-60	2,2	68,2	71,4	71,2	< 5	3	58	76	10,4	0,0040
S15W-75	2,5	68,6	71,9	71,8	< 5	3	58	76	12,4	0,0049
S15W-85	2,9	69,2	72,3	72,2	< 7,5	3	58	76	13,4	0,0055
S15W-102	3,4	69,5	72,6	72,3	< 5	3	58	76	14,8	0,0066



## OVERALL DIMENSIONS IP21



## OVERALL DIMENSIONS IP23



SOCKETS TYPE	P
AMERICAN	4
FRENCH	11,5
SCHUKO	14,5
CEE	52

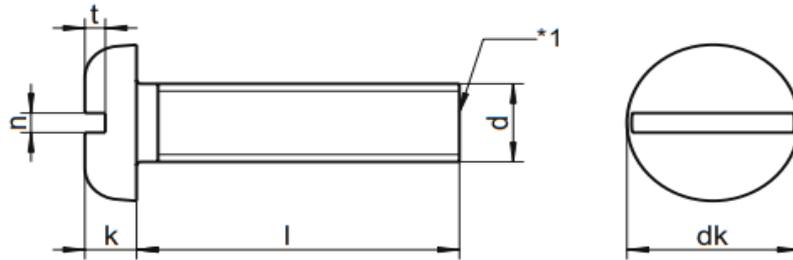
FORM	TYPE	B	C	C1	D	CG
J609a	S15W 45	233,5	159	167	239,5	115
	S15W 60	248,5	174	182	254,5	123
	S15W 75	263,5	189	197	269,5	133
	S15W 85	273,5	199	207	279,5	135
	S15W 102	290,5	216	224	296,5	143
B9	S15W 45	234	159	167	240	115
	S15W 60	249	174	182	255	123
	S15W 75	264	189	197	270	133
	S15W 85	274	199	207	280	135
	S15W 102	291	216	224	297	143

S15W-45 also available in form B9/c17

# DIN 85 - sim. ISO 1580

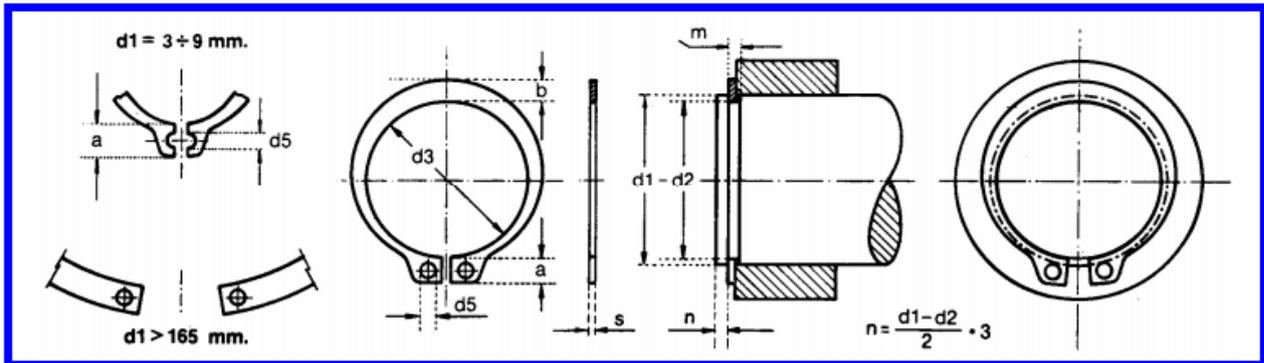
## Tornillo cabeza alomada

ranurado



dk	3,2	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0
k	1,0	1,3	1,5	1,8	2,1	2,4	3,0	3,6	4,8	6,0
n	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,2	1,6	2,0	2,5
t	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,9	2,4
Ø	0,4X2,0	0,5X3,0	0,6X3,5	0,8X4,0	1,0X5,5	1,2X7,0	1,2X7,0	1,6X9,0	2,0X12,0	2,5X14,0
Long. / Ø	M1,6	M2	M2,5	M3	M3,5	M4	M5	M6	M8	M10
3		▲●	▲●	▲●						
4		▲●	▲●	▲●						
5	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●				
6	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●		
8	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	
10	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	
12		▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	
14		▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	
16		▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
18		▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
20		▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
22			▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
25			▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
30				▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
35				▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
40				▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
45				▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
50				▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
55						▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
60						▲●	▲●	▲●	▲●	▲●
65							▲●	▲●	▲●	▲●
70							▲●	▲●	▲●	▲●
75							▲●	▲●	▲●	▲●
80							▲●	▲●	▲●	▲●
90							▲●	▲●	▲●	▲●
100							▲●	▲●	▲●	▲●
UV	1000	1000	1000	500	500	500	500 ≥ 25 200	200 ≥ 35 100	100	100 ≥ 55 50

■ A1 / ▲ A2 / ● A4 | UV: Unidad de venta | Todas las medidas en mm | Otras dimensiones bajo pedido  
 Ejemplo Art.-Nr.: 85-2-8X40 DIN 85 - A2 - M8 - l = 40mm - \*1: sin punta

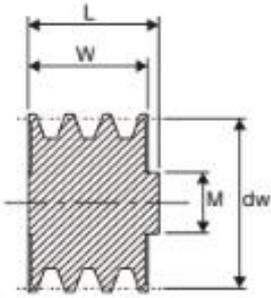
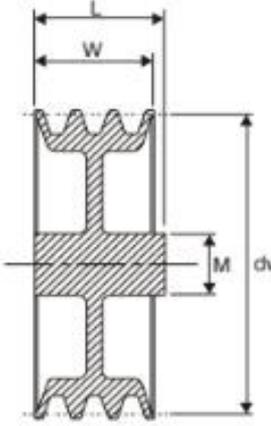
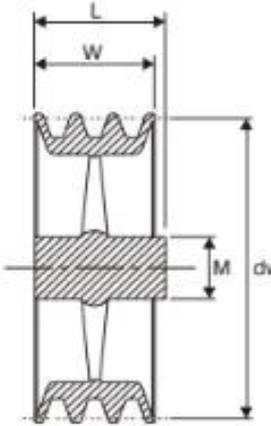


Med.Nom.	ANILLO						RANURA		
	d1	s h 11	d3	Tolerancia d3	a ≈	b ≈	d5 Min.	d2	Tolerancia d2
3	0,4	2,7	+0,04	1,9	0,8	1,0	2,8	-0,04	0,50
4				2,2	0,9		3,8		
5				2,5	1,1		4,8		
6	0,6	4,7	-0,15	2,7	1,3	1,2	5,7	-0,06	0,80
7	0,7	5,6		3,1	1,4		6,7		
8	0,8	7,4		3,2	1,5		7,6		
9	1,0	8,4	+0,06	3,3	1,8	1,5	8,6	-0,11	1,10
10		9,3					9,6		
11		10,2					10,5		
12		11,0					11,5		
13		11,9					12,4		
14		12,9					13,4		
15		13,8					14,3		
16		14,7					15,2		
17		15,7					16,2		
18		16,5					17,0		
19	17,5	18,0	+0,13	3,9	2,4	2,0	19,0	-0,15	1,30
20	18,5	19,0		4,0	2,6		20,0		
21	19,5	20,0		4,1	2,7		21,0		
22	1,2	20,5	-0,42	4,2	2,8	2,0	22,0	-0,21	1,60
23		21,5		4,3	2,9		22,9		
24		22,2		4,4	3,0		23,9		
25		23,2		4,5	3,1		24,9		
26		24,2		4,6	3,1		25,6		
27		24,9		4,7	3,2		26,6		
28		25,9		4,8	3,3		27,6		
29	26,9	5,0	3,4	28,6					
30	1,5	27,9	+0,21	5,0	3,5	2,5	29,3	-0,25	1,85
31		28,6		5,2	3,6		30,3		
32		29,6		5,2	3,7		31,3		
33		30,5		5,4	3,8		32,3		
34		31,5		5,4	3,9		33,0		
35		32,2		5,6	4,0		34,0		
36		33,2		5,7	4,1		35,0		
37		34,2		5,8	4,2		36,0		
38	1,75	35,2	-0,50	5,8	4,2	2,5	36,0	-0,25	1,85

# Polea Trapecial Ciega SPA-A

E-05

Ø primitivo dw (mm)	Nº canales	Figura	M (mm)	L (mm)	Ø primitivo dw (mm)	Nº canales	Figura	M (mm)	L (mm)	Ø primitivo dw (mm)	Nº canales	Figura	M (mm)	L (mm)
<b>50</b>	1	P	32	35	<b>118</b>	1	D	60	35	<b>250</b>	1	3R	75	50
	2	P	40	45		2	D	60	45		2	3R	75	50
	3	P	40	54		3	D	70	50		3	3R	75	50
				4		P	70	50	4		3R	88	60	
				5		P	80	50	5		3R	96	65	
<b>56</b>	1	P	35	35	<b>125</b>	1	D	55	35	<b>280</b>	1	3R	68	50
	2	P	40	45		2	D	60	45		2	3R	75	50
	3	P	40	54		3	D	68	50		3	3R	75	50
				4		D	68	50	4		3R	88	60	
				5		D	80	50	5		3R	96	65	
<b>63</b>	1	P	40	35	<b>132</b>	1	D	55	35	<b>300</b>	1	3R	75	50
	2	P	40	45		2	D	60	45		2	3R	75	50
	3	P	40	54		3	D	68	50		3	3R	88	60
	4	P	40	68		4	D	68	50		4	3R	88	60
	5	P	40	84		5	D	80	50		5	3R	96	70
<b>71</b>	1	P	40	35	<b>140</b>	1	D	60	35	<b>315</b>	2	3R	75	50
	2	P	50	45		2	D	60	45		3	3R	88	60
	3	P	52	54		3	D	68	50		4	3R	88	60
	4	P	52	68		4	D	68	50		5	3R	96	70
	5	P	52	84		5	D	80	50					
<b>75</b>	1	P	40	35	<b>150</b>	1	D	60	40	<b>355</b>	2	3R	88	60
	2	P	50	45		2	D	60	45		3	3R	88	60
	3	P	52	54		3	D	68	50		4	3R	88	60
	4	P	52	68		4	D	68	50		5	3R	96	70
	5	P	52	84		5	D	80	50					
<b>80</b>	1	P	45	35	<b>160</b>	1	D	60	40	<b>400</b>	2	6R	88	60
	2	P	50	45		2	D	60	45		3	6R	96	65
	3	P	62	54		3	D	68	50		4	6R	96	65
	4	P	62	68		4	D	80	50		5	6R	96	70
	5	P	62	84		5	D	80	50					
<b>85</b>	1	D	45	35	<b>170</b>	1	D	60	40	<b>450</b>	2	6R	88	60
	2	P	50	45		2	D	60	45		3	6R	96	65
	3	P	62	54		3	D	68	50		4	6R	104	70
	4	P	62	68		4	D	80	50		5	6R	104	70
	5	P	62	84		5	D	80	50					
<b>90</b>	1	D	45	35	<b>180</b>	1	D	65	40	<b>500</b>	2	6R	88	60
	2	P	60	45		2	D	68	50		3	6R	96	65
	3	P	62	54		3	D	68	50		4	6R	104	70
	4	P	68	68		4	D	80	60		5	6R	104	70
	5	P	68	84		5	D	80	65					
<b>95</b>	1	D	45	35	<b>190</b>	1	D	65	40	<b>560</b>	2	6R	88	60
	2	P	60	45		2	D	68	50		3	6R	96	65
	3	P	62	54		3	D	68	50		4	6R	104	70
	4	P	68	68		4	D	80	60		5	6R	104	70
	5	P	68	84		5	D	80	65					
<b>100</b>	1	D	45	35	<b>200</b>	1	D-6F	65	40	<b>630</b>	3	6R	104	65
	2	P	60	45		2	D-6F	68	50		4	6R	112	70
	3	P	62	54		3	D-8F	75	50		5	6R	120	75
	4	P	70	50		4	D	88	60					
	5	P	70	50		5	D	88	65					
<b>106</b>	1	D	45	35	<b>224</b>	1	D-6F	65	40	<b>800</b>	3	6R	128	100
	2	P	60	45		2	D-6F	68	50		4	6R	128	100
	3	P	60	50		3	D-6F	75	50		5	6R	145	110
	4	P	68	50		4	D-6F	88	60					
	5	P	68	50		5	D-6F	88	65					
<b>112</b>	1	D	45	35	<b>236</b>	1	D-6F	68	40					
	2	D	60	45		2	D-6F	68	50					
	3	D	60	50		3	D-6F	75	50					
	4	P	68	50		4	D-8F	88	60					
	5	P	68	50		5	D-8F	88	65					

Figuras	Diseño
P	
D	
R	

W = valor según Tabla 1

JOCAR TRANSMISIONES S.L.  
 c/Lezeaga, 4 48002 Bilbao  
 Tlf 94 427 53 40 Fax 94 427 54 93

[www.jocartransmisiones.com](http://www.jocartransmisiones.com)

e-mail: [jocar@jocartransmisiones.com](mailto:jocar@jocartransmisiones.com)

## Product Specifications

<b>BRAND</b>	TRITAN	
<b>INTERNAL RADIAL CLEARANCE</b>	0.012 - 0.028	
<b>BORE DIAMETER MILLIMETERS</b>	25	
<b>WIDTH MILLIMETERS</b>	68	
<b>DYNAMIC LOAD RATING (N)</b>	3147	
<b>STATIC LOAD RATING (N)</b>	1765	
<b>MAXIMUM TEMPERATURE</b>	250 F	
<b>CONSTRUCTION</b>	Cast Iron	
<b>LOCKING TYPE</b>	Set Screw	
<b>OVERALL HEIGHT (MM)</b>	35.8	
<b>BOLT HOLE SIZE</b>	3/8" / M10	
<b>MOUNTING SURFACE TO CENTERLINE OF SHAFT (MM)</b>	13	
<b>OVERALL WIDTH (MM)</b>	68	
<b>NUMBER OF BOLTS</b>	2	
<b>OVERALL LENGTH (MM)</b>	130	
<b>DESCRIPTION</b>	2 Bolt Flange - Wide Inner Ring Insert - Set Screw	
<b>MANUFACTURERS PART NUMBER</b>	UCFL205-25MM	
<b>INSERT</b>	UC205-25MM	
<b>BEARING MATERIAL</b>	AISI 52100 Steel	
<b>MOUNTING HOLE CENTER MILLIMETER</b>	99	
<b>BEARING TYPE</b>	Mounted Bearing Unit	

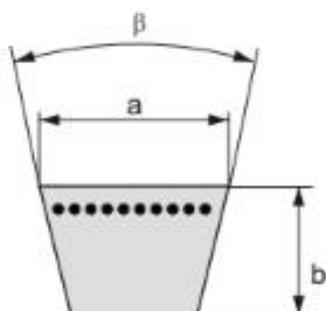
# CORREAS TRAPECIALES "TORQUE-FLEX"

E-19



## DIMENSIONES:

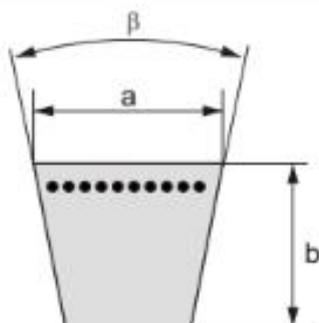
### CORREAS TRAPECIALES DE PERFIL CLASICO "TORQUE-FLEX"



PERFIL	ZX	A / AX	B / BX	C / CX	D / DX
a = ancho base mayor	10	13	17	22	32
b = altura	6	8	11	14	19
$\beta$ = ángulo	40°	40°	40°	40°	40°

PERFIL	ZX	A / AX	B / BX	C / CX	D / DX
La = desarrollo exterior	Lw+16	Lw+20	LW+29	LW+30	Lw+51
Lw = desarrollo primitivo	s/tabla	s/tabla	s/tabla	s/tabla	s/tabla
Li = desarrollo interior	Lw-22	Lw-30	Lw-43	Lw-52	Lw-75

### CORREAS TRAPECIALES DE PERFIL ESTRECHO "TORQUE-FLEX"



PERFIL	SPZ/SPZX	SPA/SPAX	SPB/SPBX	SPC/SPCX
a = ancho base mayor	9,7	12,7	16,3	22
b = altura	8	10	13	18
$\beta$ = ángulo	40°	40°	40°	40°

PERFIL	SPZ/SPZX	SPA/SPAX	SPB/SPBX	SPC/SPCX
La = desarrollo exterior	Lw+13	Lw+18	Lw+22	Lw+30
Lw = desarrollo primitivo	s/tabla	s/tabla	s/tabla	s/tabla
Li = desarrollo interior	Lw-38	Lw-45	Lw-60	Lw-83

JOCAR TRANSMISIONES S.L.

www.jocartransmisiones.com

c/Lezeaga, 4 48002 Bilbao

Tlf 94 427 53 40 Fax 94 427 54 93

e-mail: jocar@jocartransmisiones.com

# TRAPEZIAL DE PERFIL CLASICO "TORQUE-FLEX"

## PERFIL ZX

REF.	Lw. (mm)	REF.	Lw. (mm)	REF.	Lw. (mm)
ZX 15	405	ZX 33,5	875	ZX 46,5	1205
ZX 17,5	465	ZX 34	895	ZX 47	1220
ZX 18	475	ZX 34,5	900	ZX 47,25	1230
ZX 19	500	ZX 35	915	ZX 47,5	1230
ZX 20	530	ZX 35,25	920	ZX 48	1245
ZX 20,5	545	ZX 35,75	930	ZX 48,5	1255
ZX 21	555	ZX 36	945	ZX 49	1270
ZX 21,5	565	ZX 36,5	950	ZX 49,5	1280
ZX 22	585	ZX 36,75	960	ZX 50	1295
ZX 22,5	590	ZX 37	965	ZX 50,5	1310
ZX 23	610	ZX 37,5	975	ZX 51	1320
ZX 24	635	ZX 38	990	ZX 52	1340
ZX 24,75	650	ZX 38,5	1000	ZX 53	1370
ZX 25	660	ZX 39	1010	ZX 53,5	1385
ZX 25,5	670	ZX 39,5	1025	ZX 54,5	1410
ZX 26	685	ZX 40	1040	ZX 55	1420
ZX 26,5	690	ZX 40,5	1050	ZX 55,5	1435
ZX 27	710	ZX 41	1060	ZX 56	1450
ZX 28	735	ZX 41,5	1075	ZX 57	1470
ZX 28,25	740	ZX 42	1085	ZX 60	1550
ZX 28,75	750	ZX 42,25	1095	ZX 61	1570
ZX 29	760	ZX 42,5	1100	ZX 62	1600
ZX 29,5	775	ZX 43	1110	ZX 63	1620
ZX 30	780	ZX 43,5	1125	ZX 64	1650
ZX 30,5	800	ZX 44	1135	ZX 65	1670
ZX 31	810	ZX 44,5	1150	ZX 66	1700
ZX 31,5	825	ZX 45	1160	ZX 67	1720
ZX 32	835	ZX 46	1195	ZX 68	1750
ZX 33	865				



JOCAR TRANSMISIONES S.L.

c/Lezeaga, 4 48002 Bilbao

Tlf 94 427 53 40 Fax 94 427 54 93

[www.jocartransmisiones.com](http://www.jocartransmisiones.com)

e-mail: [jocar@jocartransmisiones.com](mailto:jocar@jocartransmisiones.com)

 **TUBOS RECTANGULARES**

		ESPESOR										
		1,50	2	3	4	5	6	7	8	10	12	12,5
<b>MEDIDAS</b>	<b>80x30</b>	2,66	3,54	5,15	6,32							
	<b>80x40</b>	2,87	3,82	5,47	7,16	8,63						
	<b>80x45</b>			5,64	7,30							
	<b>80x50</b>	3,14	3,95	5,66	7,63	8,91	10,82					
	<b>80x60</b>	3,37	4,39	6,43	8,48	9,70	12,42					
	<b>90x20</b>	2,64	3,53									
	<b>90x30</b>	2,87	3,79	5,40	6,98							
	<b>90x40</b>	3,14	4,11	5,89	7,63	9,27						
	<b>90x50</b>	3,37	4,29	6,38	8,29	10,09	11,75					
	<b>100x20</b>	2,87	3,65									
	<b>100x30</b>	3,14	4,11									
	<b>100x40</b>	3,33	4,44	6,66	7,79	10,48	11,75					
	<b>100x50</b>	3,59	4,68	7,30	9,34	10,68	12,79					
	<b>100x60</b>		4,94	7,27	9,47	11,78	13,70		17,16			
	<b>100x80</b>		7,42	8,28	10,60	13,56	15,10		19,76			
	<b>110x70</b>			8,33	10,92							
	<b>120x40</b>		4,90	7,25	9,55	11,75	13,73		17,16			
	<b>120x50</b>			7,84	10,24							
	<b>120x60</b>		5,82	8,43	11,23	14,04	16,84		19,76			
	<b>120x80</b>		6,07	9,36	11,93	14,40	17,00	21,11	22,36	26,73		
	<b>120x100</b>			10,30	13,00	16,00	18,90	22,88				
	<b>140x60</b>			8,80	13,40	14,79	17,00	21,11	22,36			
	<b>140x80</b>			9,90	13,08	16,02	1,00	22,88	24,96			
	<b>140x100</b>			11,23	14,82	18,30	20,70	25,58	27,56	29,85		
	<b>150x50</b>			9,17	12,03	14,80						
	<b>150x100</b>			11,75	14,90	18,99	21,70	26,52	30,16	34,84		40,56
	<b>160x80</b>			10,80	14,40	18,19	20,70	25,58	27,56	33,28	37,44	38,48
	<b>160x100</b>				15,50							
	<b>160x120</b>			13,21	17,47	20,70	24,50		32,94			
	<b>160x140</b>			14,25	18,72	23,19	27,46	30,16	36,40			
	<b>180x80</b>			11,80	16,12	19,10	23,50		30,06	36,40	41,18	42,54
	<b>180x100</b>			13,21	16,80	20,96	25,00	29,45	31,40	39,73	45,24	46,80
	<b>180x120</b>			14,25	18,72	23,19	17,46	32,45	36,40	43,16	49,40	50,96
<b>180x140</b>			15,18	20,07	24,75	29,43	34,63	39,31				
<b>200x80</b>				17,30	20,96	25,00		33,50				
<b>200x100</b>			14,25	18,00	22,30	26,40	32,45	36,40	43,16	49,40	50,96	
<b>200x120</b>			15,18	20,07	23,80	28,30	41,08	36,50	46,28	53,04	54,81	
<b>200x150</b>			16,64	22,05	27,25	31,10	28,06	43,06	51,48	59,28	61,05	
<b>200x160</b>			17,16	22,67	28,08	33,38		43,16	52,73	60,84	62,92	
<b>250x100</b>			16,64	21,20	27,25	32,34	38,06	43,06	51,48	59,28	61,05	
<b>250x150</b>				25,27	31,30	37,23		48,36	59,28	68,64	71,03	
<b>250x200</b>				28,50	35,36	42,12		54,91	67,39	78,42	81,22	
<b>300x100</b>				25,27	31,30	37,23		48,36	59,28	68,64	71,03	
<b>300x150</b>				28,50	35,36	40,50		54,91	67,39	78,42	81,22	
<b>300x200</b>					39,42	47,01		61,46	75,61	88,19	91,52	
<b>300x220</b>					41,08	48,98		64,06	78,83	92,14	95,58	

(Pesos Teóricos expresados por Kilogramo/Metro lineal)

**AKWA/SILVANI**

Le 03/09/2018

MARTIAL ABOUTOU  
DOUALA

**PROFORMA**  
N° 3-D-203303  
Date de validité 18/09/2018  
N° Compte 452

A l'attention de  
Vos références  
Prix : **PRIX NET TTC**  
Options : **2 SEMAINES**

Contact : **POUR FICHER CLIENT**      **SECKE STEPHANE**  
du :  
Délai : **DISPONIBLE SAUF VENTE**      **VOTRE CONTACT**  
Règlement : **COMPTANT A LA LIVRAISON**

Article	Designation	UP	Quantité	UV	Prix Unitaire	Montant	Ta
001	049137 TOLE INOX 304L 2000X1000X8/10MM	P	1,00	P	32 030	M	32 030 03
002	004409 TOLE INOX 304L 2000X1000X10/10MM	P	1,00	P	41 485	M	41 485 03
003	004410 TOLE INOX 2000 X 1000 X 15/10 MM	P	1,00	P	74 935	M	74 935 03
004	004412 TOLE INOX 2000 X 1000 X 25/10 MM	P	1,00	P	155 075	M	155 075 03
005	000660 TOLE INOX 2000 X 1000 X 60/10 MM	P	1,00	P	293 170	M	293 170 03
006	049527 TOLE INOX 304L 3000x1500x1.5 MM	P	1,00	P	174 561	M	174 561 03
007	049529 TOLE INOX 304L 3000x1500x 2MM	P	1,00	P	182 000	M	182 000 03
008	049531 TOLE INOX 304L 3000x1500x 3MM	P	1,00	P	242 025	M	242 025 03
009	046982 TOLE INOX 316L 2000x1000x2 MM	P	1,00	P	100 035	M	100 035 03
010	046963 TOLE INOX 316L 2000x1000x3 MM	P	1,00	P	206 020	M	206 020 03
011	043371 TOLE INOX 304LSIMP. 2000x1000x15MM	P	1,00	P	556 900	M	556 900 03

TVA sur marchandise Taux Normal 19.25 % 2 462 236 473 981

**BERNARD CAMEROUN**  
S.A. au capital 1 588 125 000 de Frs CFA - R.C/DW/1951/B/1255 - N° STAT 080 601 A - I.C.A 2LT0060 Q - N° CONT. M015100001701L - REGIME: REEL  
SIC 10003.00100.05000331945-78 - BICEC 10001.06800.00101401000.85 - CA 9CB 10002.00030.01831873150.21 - AFRILAND 10005.00002.04831771001 - 78  
Nos ventes et vos ventes de traites ne sont pas une dérogation au lieu du paiement fixé à Douala. Pour toutes contestations les tribunaux de DOUALA seront les seuls compétents.  
**RESERVE DE PROVISION**

MONTANT H.T.	TOTAL TVA	TOTAL TAXES SUP	NET A PAYER
2 462 236	473 981		2 936 217

Rue Sylvani - B.P.529 - Douala - République du Cameroun - Tél. : (237) 699 50 31 03 / 699 50 31 02 - E-mail : commercial.dia@benabehaque.com  
S.A au capital 1 588 125 000 de Frs CFA - R.C/DW/1951/B/1255 - N° STAT 080 601 A - I.C.A 2LT0060 Q - N° CONT. M015100001701L - REGIME: REEL  
SIC 10003.00100.05000331945-78 - BICEC 10001.06800.00101401000.85 - CA 9CB 10002.00030.01831873150.21 - AFRILAND 10005.00002.04831771001 - 78  
Nos ventes et vos ventes de traites ne sont pas une dérogation au lieu du paiement fixé à Douala. Pour toutes contestations les tribunaux de DOUALA seront les seuls compétents.  
**RESERVE DE PROVISION**



**Bernabé**  
COMMERCE

**AKWA/SILVANI**

Page 1 / 2

Le 03/09/2018

**MARTIAL ABOUTOU,**  
**DOUALA**

**PROFORMA**

N° 3-0-263320 / 1

Date de validité: 18/09/2018

N° Compte: 462

A l'attention de:  
Vos références:

Contact: **POUR FICHIER CLIENT**  
du:

**SECKE STEPHANE**

Prix: **PRIX NET TTC**  
Options: **2 SEMAINES**

Délai: **DISPONIBLE SAUF VENTE**  
Règlement: **COMPTANT A LA LIVRAISON**

**VOTRE CONTACT:**

Article	Désignation	UP	Quantité	UV	Prix Unitaire	Montant	Tc
001	045243 TUBE INOX 26,90 X 1,6 ISO	L	6,00	L	4 590	M	27 540 03
002	045239 TUBE INOX 33,70 X 1,6 ISO	L	6,00	L	5 400	M	32 400 03
003	048881 TUBE SOUDE 42,4X3,2 ISO EN 10217-17	L	6,00	L	12 373	M	74 238 03
004	048882 TUBE R SOE 48,3X3,2 ISO EN 10217-17	L	6,00	L	14 080	M	84 480 03
005	050095 TUBE ROUL 48,3X2 ISO EN 6M	L	6,00	L	10 720	M	64 320 03
006	048883 TUBE SOUDE 60,3X3,6 ISO EN 10217-7	L	6,00	L	19 160	M	114 960 03
007	004438 TUBE INOX 70 X 2 DIN	L	6,00	L	25 345	M	152 070 03
008	048884 TUBE SOUDE 76,1X3,6 ISO EN 10217-17	L	6,00	L	26 000	M	156 000 03
009	045245 TUBE INOX 76,10 X 2 ISO	L	6,00	L	16 210	M	97 260 03
010	045247 TUBE INOX 88,90 X 2 ISO	L	6,00	L	16 200	M	97 200 03
011	048879 TUBE SOUDE 88,9X4 316L ISO	L	6,00	L	47 945	M	287 670 03
012	048885 TUBE SOUDE 88,9X4 304L	L	6,00	L	30 215	M	181 290 03
013	050097 TUBE INOX ROND 154X2 DIN EN 6M	L	6,00	L	46 805	M	279 630 03
014	048804 TUBE INOX 304 ROND 42,4X1,6 ISO 6M	L	6,00	L	7 320	M	43 920 03
015	048806 TUBE INOX 304 ROND 48,3X1,6MM 6M	L	6,00	L	6 120	M	48 720 03
016	048808 TUBE INOX 304 ROND 60,3X 2 ISO 6M	L	6,00	L	10 720	M	64 320 03
017	049078 TUBE INOX ROND 168,3X2MM 6M	L	6,00	L	32 425	M	194 550 03
018	048063 TUBE INOX ROND 219X2 ISO 6M	L	6,00	L	38 885	M	232 110 03
019	048798 TUBE INOX 304 CARRE 30X30X1,5MM 6M	L	6,00	L	5 835	M	35 010 03
020	048800 TUBE INOX 304 CARRE 40X40X2MM 6M	L	6,00	L	9 600	M	57 600 03
021	048802 TUBE INOX 304 CARRE 50X50X2MM 6M	L	6,00	L	12 000	M	72 000 03

OCRIAL CAMEROUN  
 Report  
 03 25 25 25

MONTANT H.T.	TOTAL TVA	TOTAL TAXES SUP.	NET A PAYER
2 397 288			

Rue Sylvani - B.P 529 - Douala - République du Cameroun - Tél : (237) 891 50 31 03 / 699 50 31 03 - E-mail : commercial@bernabecom.com  
 S.A au capital 1 588 123 000 de Frs CFA - R.C/Da/19018/1255 - N° STAT 060 601 A - T.C.A.28.70068 Q - N° CONT. M016100001/016 - REGIME: REEL  
 SGC 10003.00100.05000331949-78 - BICEC 10001.06800.00101401600 85 - CA SCS 10002.00000.01831673150 21 - AFRILAND 10008.00002.04631771001 - TN  
**CONDITIONS GENERALES DE VENTES:** Prix nets remise déduite pour marchandises prises en nos magasins ou expédiés à vos risques et périls payables à DOUALA.  
 Réserves et vos remises de taxes ne sont pas une dérogation au lieu de paiement fixé à Douala. Pour toutes consultations les tribunaux de DOUALA sont les seuls compétents.  
**RESERVE DE PROPRIETE** jusqu'au complet paiement du prix.  
 CONDITIONS DE RECEPTION

N°	DESIGNATIONS	CARCTERISTIQUE	quantités	PU	PT
1	Alternateur	s15-45/A 1,2kva	1	150 000	150 000
2	Poulie en acier	diametre 73	1	25 000	25 000
3	Poulie en acier	diametre 63	1	25 000	25 000
4	Poulie en acier	diametre 51	1	25 000	25 000
5	Poulie en acier	diametre 44	1	25 000	25 000
6	Poulie en	diametre 50	1	20 000	20 000
7	poulie en	diametre 32	1	20 000	20 000
8	tube inox	40x40x6000	1	25 000	25 000
9	axe cylindrique en acier	diametre 32mm longuer 210	1	10 000	10 000
10	circlip	diametre 25mm	1	5 000	5 000
11	roulement	diamtre 25mm	1	15 000	15 000
TOTAL					345 000

Proforma 3