

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO ELÉCTRICO Y CONTROL
ELECTRÓNICO DE MICROCENTRAL
HIDROELÉCTRICA AISLADA***

DOCUMENTO 2 - MEMORIA

Alumno/Alumna: Rozas Holgado, Iñigo

Director/Directora (1): Sainz de Murieta Mangado, Joseba

Curso: 2017-2018

Fecha: 28/06/2018

1 Introducción

El presente proyecto parte de una propuesta de Ingeniería Sin Fronteras País Vasco – Euskal Herriko Mugarik Gabeko Ingeniaritza (ISF-MG) y está relacionado con la electrificación rural de comunidades en proyectos de cooperación para el desarrollo.

El acceso a la energía eléctrica en países y comunidades empobrecidas presenta una serie de particularidades y suelen ser procesos costosos y complejos de implantar. En muchas ocasiones, la conexión a la red de distribución es inviable económica y/o técnicamente por lo que es necesario recurrir a técnicas de generación, en la medida de lo posible, renovables.

Cuando es posible recurrir a algún tipo de energía renovable, se evitan dependencias externas y, con la necesaria capacitación a la comunidad, se pueden generar procesos de desarrollo sostenible de las comunidades. El tipo de energía renovable en cada caso (solar fotovoltaica, eólica, biomasa, hidroeléctrica, combinada, etc.) se analizará en cada caso concreto atendiendo a parámetros como disponibilidad, frecuencia, cantidad, coste, etc.

Este proyecto se centra en un tipo de centrales frecuentemente empleado por una de las organizaciones con las que colabora ISF-MGI: la Escuela Móvil de Aguas y Saneamiento Básico (EMAS). Esta organización ha realizado numerosas instalaciones de microhidráulicas de potencias comprendidas entre 5KW y 10KW y funcionamiento aislado (sin conexión a red).

Dentro de estas microcentrales, en países con lluvia abundante y comunidades con ríos en los alrededores, una opción muy indicada puede ser la instalación de una microcentral hidroeléctrica construida con materiales locales, buscando que los costes no sean muy elevados y así apoyando a la industria local.

Por medio de este proyecto y con el apoyo de la Escuela Móvil de Aguas y Saneamiento Básico (EMAS), se pretende, basándose en su diseño de microcentrales hidroeléctricas, realizar un diseño básico de una de estas microcentrales analizando alternativas y posibles mejoras y posteriormente realizar una maqueta a escala que se asemeje a una de estas microcentrales y permita su uso demostrativo.

Una de las partes más importantes será el diseño de un control electrónico de la microcentral que permita equilibrar la producción de energía con el consumo en cada momento, con un coste reducido. Además, se seleccionan las especificaciones precisadas para un generador teórico y las redes de distribución con las protecciones precisadas para una pequeña comunidad rural de un país en vías de desarrollo, usado como ejemplo general. La red es aislada y por tanto está pensada para comunidades que tienen dificultado su acceso a la red eléctrica, ya sea por motivos socioeconómicos o por no existir red eléctrica en su zona.

La parte del proyecto más relacionada con aspectos de ingeniería mecánica, el diseño de la turbina y de la transmisión de potencia, la realizará el estudiante Unai Ayude en su TFG y en este proyecto se plasmarán las características más importantes de éste en el diseño de la microcentral.

1.1 Objetivos

Objetivo principal: Diseño del sistema eléctrico y control electrónico de una microcentral hidroeléctrica aislada.

Objetivos secundarios:

- Comprender los distintos aspectos involucrados en el diseño de una microcentral hidroeléctrica aislada.
- Realizar un proyecto multidisciplinar y ampliar conocimientos sobre electrónica y programación.
- Realizar un diseño de control de bajo coste presente alguna mejora con respecto al empleado por EMAS, con software y hardware abierto y que pueda ser utilizado para otros proyectos de cooperación al desarrollo similares.
- Aplicar conocimientos de ingeniería eléctrica para realizar el diseño del sistema eléctrico de una comunidad rural teórica.
- Realizar una maqueta demostrativa con los medios disponibles que muestre el funcionamiento de una microcentral.

1.2 Justificación y alcance

Este proyecto pretende, desde los conocimientos propios de la ingeniería, dar respuesta a la demanda de un sistema de control sencillo y de bajo coste que presente mejoras frente al rudimentario control empleado en muchas de las microcentrales hidráulicas instaladas en el marco de proyectos de cooperación al desarrollo.

Estas mejoras supondrían un aumento del rendimiento y de la calidad de la tensión suministrada sin complejizar en exceso el control (para que sea fácilmente asumido por las comunidades) y a un bajo costo. Dados los objetivos y las características del proyecto, el hardware libre y la filosofía open source se plantean como una interesante alternativa al desarrollo del sistema de control.

Además, debido al carácter multidisciplinar del proyecto, en este se pueden poner en práctica fundamentos de diversa índole, principalmente centrados en la electrónica analógica, la programación de microcontroladores, la electrónica de potencia y por último las energías renovables y la generación y distribución de energía eléctrica en sistemas aislados.

Por último, el apoyo en la realización de la maqueta a escala de la microcentral, le puede servir a EMAS/TADEH para tener un elemento demostrativo con el que explicar el funcionamiento más básico de estas centrales.

2 Contexto y antecedentes

Este proyecto se enmarca en el ámbito de los proyectos de electrificación rural llevados a cabo por las ONGD en general y por EMAS en particular. Se comenzará por el análisis de la documentación y de las soluciones empleadas por esta organización para, a partir de las conclusiones obtenidas, diseñar un nuevo sistema de control.

Así mismo, se propondrá una maqueta demostrativa que permita observar los principios de la generación microhidráulica de energía eléctrica y de los distintos aspectos vinculados con el control de la misma.

2.1 Antecedentes

En el documento de EMAS (Buchner, 2005), existen diversos apartados que explican los distintos aspectos a tener en cuenta en el diseño de la microcentral. Al ser el más importante dentro del proyecto, se procede a describir el controlador propuesto por la asociación.

Controlador de tensión y velocidad propuesto por EMAS

(Buchner, 2005) EMAS propone en su manual de diseño de una microcentral hidroeléctrica la utilización de un regulador de voltaje que absorba la energía no requerida en momentos de menor consumo al nominal. De esta forma, se previenen los picos de voltaje cuando la potencia disminuye y se aumenta la seguridad en la instalación.

El regulador, consiste principalmente en un sistema de control de tipo electrónico unido a un relé que a su vez está unido a una resistencia. El generador funciona con la misma carga continuamente, de modo que tiene un voltaje y unas revoluciones constantes. Cuando el consumo es bajo, gracias al control electrónico el relé se activa conectando así la resistencia y consiguiendo que la energía sobrante se disipe en la resistencia.

Consta de las siguientes partes:

- a) Interruptor con fusible
- b) Transformador y rectificador en puente
- c) Regulador de voltaje 7806
- d) Potenciómetros de control
- e) Circuito integrado LM324
- f) Circuito integrado 7400HC
- g) Transistor BD679
- h) Relés de control
- i) Resistencia de disipación

El circuito propuesto es el siguiente:

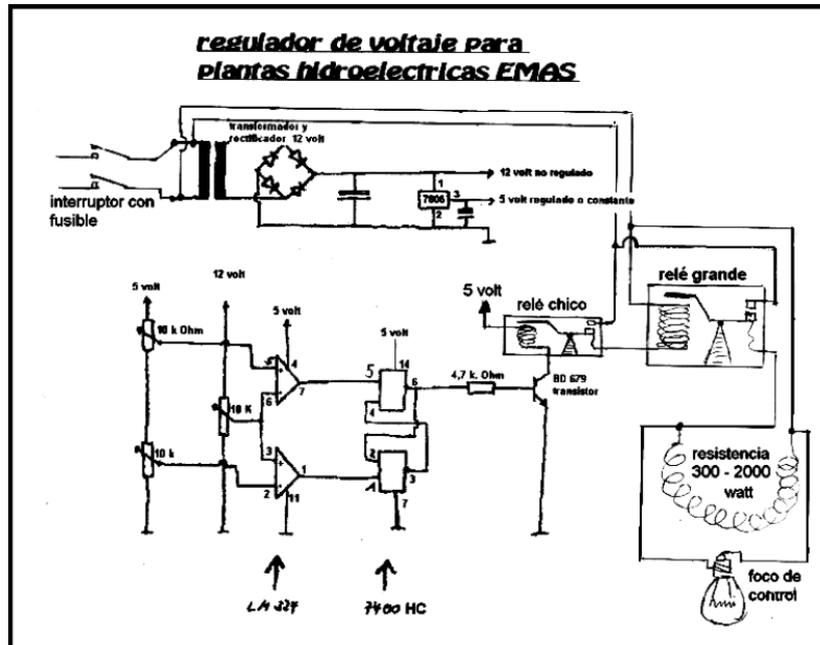


Figura 1. Regulador de voltaje para plantas hidroeléctricas EMAS.

Este regulador, se utilizará para disipar parte de la energía sobrante y por tanto es común que se instalen varios (por lo general 3) en las microcentrales EMAS. Cada uno de estos, debe de diseñarse para actuar en un margen de voltaje diferente para distintas caídas en el consumo. La propuesta inicial es la siguiente: El primer regulador se activa a 215 V y desactiva a 200 V, el segundo activa a 225 V y desactiva a 205 V y el tercero activa a 235 V y apaga a 210 V.

La carga, suele ser repartida de forma que los dos primeros quemen la energía sobrante y el tercero serviría de emergencia, pudiendo quemarlo todo él solo. Este sistema de control aunque barato, es poco preciso. El control se realiza de manera discreta y con saltos excesivos de potencia y su mejora es un objeto principal de este proyecto.

Para alcanzar esta mejora, se ha decidido realizar el diseño de un controlador electrónico de carga o ELC (Electronic Load Controller) que pueda mejorar el control rudimentario utilizado por EMAS, buscando un bajo coste y una complejidad moderada.

Para el diseño del ELC se ha consultado numerosa documentación existente tanto sobre los fundamentos teóricos de este tipo de controladores como sobre diversas propuestas de diseño y notas de aplicación de algunos fabricantes.

A partir de esta documentación, de la proporcionada también por algunas ONGD y del análisis de la documentación técnica de EMAS, se ha diseñado la parte hardware y software de un controlador basado en hardware libre.

3 Beneficios que aporta el trabajo

Por medio de este trabajo de fin de grado se pone en práctica la ingeniería enfocada al desarrollo humano. Se busca aportar una mejora a un caso práctico de diseño de una microcentral de generación eléctrica, que pueda servir para comunidades rurales en países en vías de desarrollo a las que por uno u otro motivo no les puede llegar la energía eléctrica.

Con la mejora del diseño Electrónico, se puede conseguir un sistema de mayor precisión y fiabilidad que el utilizado por EMAS, pero que mantenga un coste relativamente reducido y que no sea excesivamente complejo de realizar.

Además de esto, al ser un diseño ideado con hardware y software open source, es beneficioso debido a que está pensado para la colaboración abierta, estando esto íntimamente relacionado con el desarrollo humano y la cooperación.

Añadido a lo anterior, el carácter multidisciplinar del proyecto, hace que se estudien distintas ramas de la ingeniería, recibiendo nuevos conocimientos sobre electrónica analógica, programación, electrónica de potencia, energías renovables y la generación y distribución de energía eléctrica en sistemas aislados.

Al existir una colaboración con otro proyecto de ingeniería mecánica relacionado con este, también ha existido la posibilidad de observar el desarrollo de un proyecto de esa rama.

4 Marco teórico

4.1 Introducción

Una central hidroeléctrica es una instalación que tiene la capacidad de generar energía eléctrica a partir de la energía cinética que entrega un curso de agua. Además, en caso de estar en una determinada altura respecto de un punto de referencia, el volumen del agua también tendrá energía potencial gravitatoria.

Como concepto general, una central hidroeléctrica tendría la estructura de la figura 2. En primer lugar, está compuesta por una válvula que permite que el agua descienda, a través de una tubería de presión, hasta entrar en la turbina hidráulica. Cuando un determinado volumen de agua ha descendido, su energía potencial llega transformada en cinética y eventualmente en presión.

Esta es transformada en energía mecánica en el eje de rotación, consiguiendo que impulse al generador eléctrico. Este generador transforma la energía mecánica en eléctrica para que sea inyectada a red o para alimentar una carga en sistemas aislados.

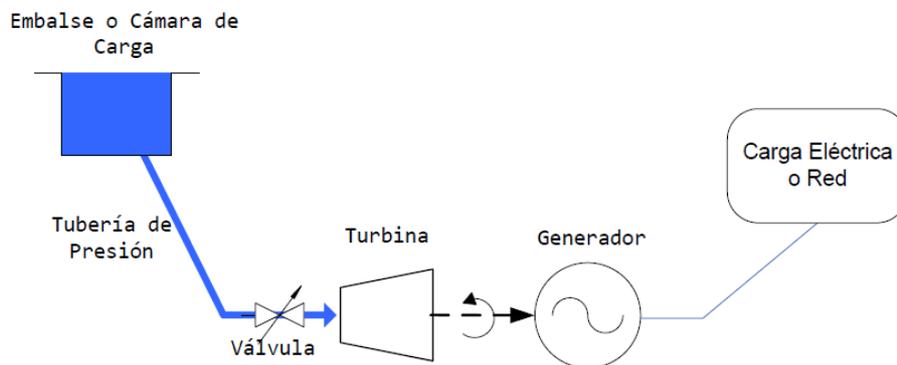


Figura 2. Esquema simplificado microcentral hidroeléctrica.

Dependiendo de su capacidad de almacenamiento del recurso hídrico, las centrales hidroeléctricas pueden ser de embalse, de derivación o mixtas:

- Centrales de agua fuente: No poseen la capacidad para almacenar el agua, estando así su generación eléctrica limitada por la cantidad de agua disponible en cada momento. Consta de un sistema de derivación que no detiene el caudal, sino que lo desvía a un canal y una tubería, dirigiéndolo a la turbina. Tiene la ventaja de tener un bajo costo y ser simple. Su desventaja principal, es el hecho de no poder almacenar el agua según los requerimientos de cada momento.
- Centrales de agua embalsada: Poseen la capacidad de almacenar el agua por medio de un embalse acumulado generalmente por una presa, posibilitando su regulación. Son más costosos y acarrear problemas de sedimentación a largo plazo que pueden ser costosos de solventar, pero poseen la capacidad de regular el agua según las necesidades.

- Centrales mixtas: Corresponde a centrales que poseen una limitada capacidad de almacenamiento, que permite la regulación diaria.

Las centrales hidroeléctricas, según su potencia instalada, pueden clasificarse como se ve en la siguiente tabla:

Tabla I. Clasificación de centrales hidroeléctricas según su potencia.

Tipo	Potencia
Grandes centrales	Superior a 5 MW
Pequeñas centrales	1 - 5 MW
Minicentrales	100 kW - 1 MW
Microcentrales	Inferior a 100 kW

Las microcentrales suelen ser de tipo mixto, poseyendo un pequeño embalse que permita cierta regulación.

4.2 Necesidades energéticas

(Ingeniería sin fronteras) En un sistema de microgeneración, es esencial determinar las necesidades energéticas para un determinado propósito, el coste que se desea tener e incluso valorar la capacidad organizativa de los usuarios.

En ocasiones la gestión de la energía es vista como la provisión e instalación de infraestructuras energéticas, sin tener en cuenta los servicios energéticos requeridos. En una Planificación Energética, es necesario tener en cuenta todos estos aspectos:

- Identificación de necesidades energéticas del área de estudio.
- Comparación de todas las opciones energéticas disponibles, a partir de una previa evaluación de los recursos energéticos existentes.
- Viabilidad social, técnica y económica de implementar una determinada tecnología que satisfaga, al menos algunas de las necesidades energéticas identificadas previamente.

En el caso de una microcentral hidroeléctrica es preciso determinar que como opción energética, exista un recurso hidroenergético suficiente para suplir una determinada demanda, en forma de caudal y salto y en caso contrario, buscar métodos alternativos. En caso de existir alternativas con un menor coste potencial, también es preciso analizarlas.

Identificación de las necesidades

Las necesidades energéticas de los habitantes en zonas rurales están vinculadas a los aspectos socioeconómicos de sus vidas, pudiendo existir grandes variaciones. De cara a determinar sus necesidades energéticas, es necesario conocer las condiciones técnicas y

socioeconómicas requeridas, además del uso de la energía. Por tanto es necesario identificar de forma detallada lo siguiente:

- Consumos.
- Necesidades.
- Demanda.

Tanto la demanda energética, como los consumos y necesidades en zonas rurales, se pueden desglosar en diferentes sectores: Doméstico, agricultura de subsistencia, agricultura productiva, ganadería, industria, comercio, transporte y servicios como escuelas, centros de salud, etc.

Se deben investigar también durante esta fase los métodos mediante los cuales el nuevo suministro de energía puede beneficiar a las personas más desfavorecidas de la comunidad.

Integración de la planificación energética

En cuanto a la integración de la planificación energética, es preciso llevar a cabo una metodología para determinar un grupo de alternativas de electrificación en base a los recursos energéticos disponibles y que esta pueda ser evaluada de acuerdo a criterios que contemplen aspectos socioeconómicos y técnicos.

Estas necesidades pueden ser satisfechas por muy diferentes fuentes de energía y tecnologías de transformación, como generadores diesel, conexión a la red eléctrica, placas fotovoltaicas, generadores hidráulicos o eólicos etc.

En el caso de una microcentral hidroeléctrica es preciso determinar que, como opción energética, exista un recurso hidroenergetico suficiente para suplir una determinada demanda, en forma de caudal y salto y en caso contrario, buscar métodos alternativos. En caso de existir alternativas con un menor coste potencial, también es preciso analizarlas.

Ajuste de las opciones de suministro a las necesidades de servicio

Una vez identificada el área de desarrollo del plan y las localidades en las cuales diseñar un sistema autónomo, se empieza la fase de generación de propuestas de electrificación. Para esto, se debe evaluar el potencial energético de cada localidad para obtener diferentes alternativas de electrificación. La elección final de entre las alternativas posibles debe valorar múltiples criterios y considerar la opción de todos los actores involucrados en el proceso. Algunos de estos criterios clave son los siguientes:

- Disponibilidad de suficiente energía en los momentos en los que se necesita.
- Inversión y costes de operación de cada una de las opciones.
- Disponibilidad local de apoyo tecnológico y de mantenimiento.
- Calidad del servicio energético proveído.
- Políticas públicas e institucionales relacionadas con el sector eléctrico rural.
- La existencia de proveedores que puedan ofrecer una asistencia técnica local.
- Presencia de proyectos de electrificación cercanos que usen tecnología parecida.

La toma de decisiones para escoger las mejores alternativas de electrificación tiende a basarse únicamente específicamente en la minimización de costes. Uno de los retos de la electrificación rural es el desarrollo de instrumentos que tengan en consideración, valoren y evalúen otros aspectos importantes para el desarrollo local y regional, más allá del siempre importante criterio económico.

En cualquier caso, será mucho más efectiva la selección de las opciones si se lleva a cabo bajo un enfoque participativo, de forma que se llegue a seleccionar el sistema de suministro más apropiado que cuente con la aceptación de la comunidad.

4.3 Evaluación del recurso hidroenergético

Tras estimar la demanda, es necesario evaluar el potencial energético de la zona donde se va a realizar la instalación. El objetivo es que la energía disponible este lo más cerca posible de la demandada. Esta capacidad para generar energía se determina por medio del salto y el caudal disponibles.

En este apartado se explican algunos métodos básicos utilizados para medir el recurso de manera efectiva, sin requerimientos técnicos avanzados. Se desarrollan los recogidos por el "Manual de mini y micro centrales hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos" (Federico Coz, 1995).

4.3.1 Medición del salto

La caída es un parámetro muy importante para diseñar el sistema, por tanto se requiere una precisión del 3% aproximadamente. Es recomendable realizar tres o más mediciones en caso de que sean discordantes. Existen varios métodos para realizar la medición, como pueden ser los siguientes: Manguera de nivelación, manguera y manómetro, nivel de carpintero y tablas, método del altímetro o método del nivel de ingeniero.

Manguera de nivelación: Recomendable para pequeños saltos, preciso y económico. Para asegurarse de que los resultados son fiables, es necesario realizar varias medidas e incluso contrastarlo con otros métodos. Aun utilizando la estatura de una persona como referencia, sus resultados suelen ser válidos. Consta de las siguientes etapas:

1. Comenzando en la posición de la futura cámara de carga, sostener una manguera mientras un asistente camina cuesta abajo hasta que sus ojos estén al nivel de los pies del que la sostiene. El asistente debe mantener el extremo de la manguera llena de agua levantada a la altura de su cabeza. El que la sostiene, debe nivelar la manguera con lo que sería el nivel de agua en la cámara de carga. El asistente registrará con una varilla o listón de madera graduada y registrará el nivel de agua.
2. El asistente elegirá una posición; quedándose ahí, el que la sostiene podrá caminar cuesta abajo y colocar la varilla en la otra posición, tiene que llenar una hoja de datos que contengan las posiciones y medidas de altura (altura bruta y suma).
3. Si el suelo no tiene una pendiente definida, haga lo mismo, pero sustrayendo las mediciones apropiadas.
4. En lugar de la varilla, se puede usar la distancia de los pies a los ojos de una persona como altura de referencia.

Método del nivel de carpintero: Idéntico al de la manguera de nivelación, con diferencia de que la horizontalidad se establece por un nivel de carpintero colocado en una tabla de madera recta y fija. Es muy lento para pendientes suaves, pero en fuertes es muy apropiado, sobretodo si hay poca caída.

Método del altímetro: Instrumento de medición fácil de usar, pero relativamente costosos. La precisión obtenida depende de la destreza del operador. En caso de no ser experimentado, servirán como datos de referencia para un estudio preliminar.

Este aparato de medida sirve para medir presión atmosférica. Está relacionada con el nivel del mar, pero puede variar debido al clima y a la humedad relativa. Por ello se deben tomar varias lecturas durante el día y estimar el valor final.

Lo más conveniente en este tipo de centrales es realizar esto a la altura de la cámara de carga y a la del cuarto de máquinas y posteriormente graficar los resultados, trazar líneas de promedio y determinar la diferencia de alturas. De esta forma se obtendría el salto.

Método con nivel topográfico: Es el método más preciso, pero es más costoso y pesado y requiere de operadores especializados. Con él se pueden medir distancias simultáneamente, pero no es apropiado en lugares escarpados o con muchos árboles.

4.3.2 Medición de caudal

El caudal de los ríos, suele variar a lo largo del año. Por ello, una medida de caudal instantáneo es solo un registro aislado. En ocasiones no existe información para realizar un estudio de hidrología y por tanto se deben recolectar datos propios. Lo ideal, sería realizar mediciones a diario, aunque se podrían realizar semanales o mensuales. En caso de existir una época seca, el caudal debe ser medido en esta. Existen varios métodos de medición de caudal, como pueden ser los siguientes:

Método de la solución de la sal: Método fácil y preciso, con errores menores al 5%. Se basa en el cambio de la conductividad del agua si se cambia su grado de concentración de sal. Si se disuelve una masa (M) en un balde y se vierte en una corriente de agua, dándole tiempo para diluirse, se provoca un incremento de conductividad que puede ser medido mediante un conductímetro.

Dicho incremento de conductividad dura un tiempo y no es uniforme. Habrá ligeros incrementos al inicio y al final del paso de la sal, habiendo un máximo en una situación intermedia. Si se mide esa conductividad en microsiemens (μS) cada 5 s y se gráfica la conductividad en función del tiempo, se consigue una curva más o menos uniforme de distribución. Se puede demostrar matemáticamente lo siguiente:

$$Q = (K \cdot M)/A$$

Donde:

Q = Caudal (l/s)

M = Masa de sal (mg)

K = Factor de conversión [$\mu\text{S}/(\text{mg}/\text{l})$]

A = Área bajo la curva ($\mu\text{S}/\text{s}$)

Método del recipiente: El método del recipiente es muy simple. Todo el caudal a medir se desvía hacia un balde y se anota el tiempo que tarda en llenarlo. Conociendo el volumen del envase, el caudal se obtiene dividiendo ese volumen por el tiempo de llenado. La desventaja del método es la necesidad de que todo el caudal debe ser canalizado al envase, siendo a menudo necesario construir una presa temporal. Este método, por otra parte, solo es válido para caudales pequeños. Un ejemplo de realización podría ser el siguiente:

Primero se hace un pocito en el lecho del río para poder sumergir cómodamente uno o varios baldes a la vez. Luego se baldea de este pozo el agua en la velocidad que entra, manteniendo un nivel casi lleno pero que ya no rebalse. Según el caudal del río se necesita varias personas que baldean. Cada uno debe contar sus baldadas durante unos 3 minutos. Otra persona controla el tiempo. Luego se multiplica el contenido de cada balde por el número total de baldadas y se obtiene la cantidad total baldeada durante el tiempo. Este valor se divide entre el tiempo del baldeo y así se obtiene el caudal de los litros por segundo.

4.3.3 Cálculo de la potencia hidroeléctrica

La potencia eléctrica teórica que puede generar una microcentral, viene dada por la expresión:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot Hn$$

Donde:

P: Potencia instalada en kW

Q: Caudal en m³/s

Hn: Salto neto en m

La producción de la microcentral puede estimarse, en una primera aproximación, multiplicando esta potencia por el número previsto de horas de funcionamiento. Sin embargo, la potencia a la salida de la microcentral es igual a:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot Hn \cdot e$$

Donde:

e: Factor de eficiencia de la microcentral

En la microcentral, existirán pérdidas en la captación y su transporte, la turbina, el generador y el transformador elevador (en caso de precisarse). Las del generador y el transformador suelen estar dadas por el fabricante y las de las captaciones y la turbina se podrán estimar generalmente.

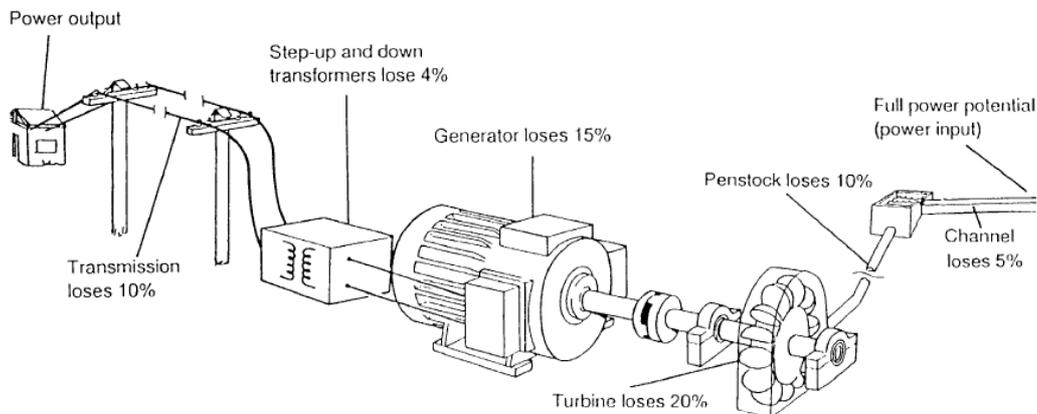


Figura 3. Pérdidas generales en minicentral hidroeléctrica aislada (Harvey, 1993).

4.4 Obras civiles

La totalidad de este apartado relativo a las obras civiles a construir en microcentrales y minicentrales hidroeléctricas está basado en el "Manual de mini y micro centrales hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos" (Federico Coz, 1995).

Debido a que el proyecto trata principalmente aspectos más técnicos relacionados con el control electrónico de la central, el diseño de su generador, los elementos que se encuentran en la casa de máquinas y la distribución eléctrica, no se ha profundizado en aspectos técnicos de las obras civiles.

Por ello, solamente sirve de orientación para explicar las distintas partes de una microcentral y las características más fundamentales a tener en cuenta. Todos los aspectos técnicos se encuentran recogidos en el susodicho manual, con ecuaciones, gráficas y demás herramientas con las que calcularlas.

4.4.1 Introducción

Existen diversos tipos de esquemas de microcentrales hidráulicas, como los que se pueden observar en la figura 3. En el caso de las microcentrales, los saltos serán de pequeña o mediana altura y se tendrá que tomar decisión sobre las longitudes relativas de la tubería de presión y del canal, en caso de ser preciso, además de la mejor ruta a seguir.

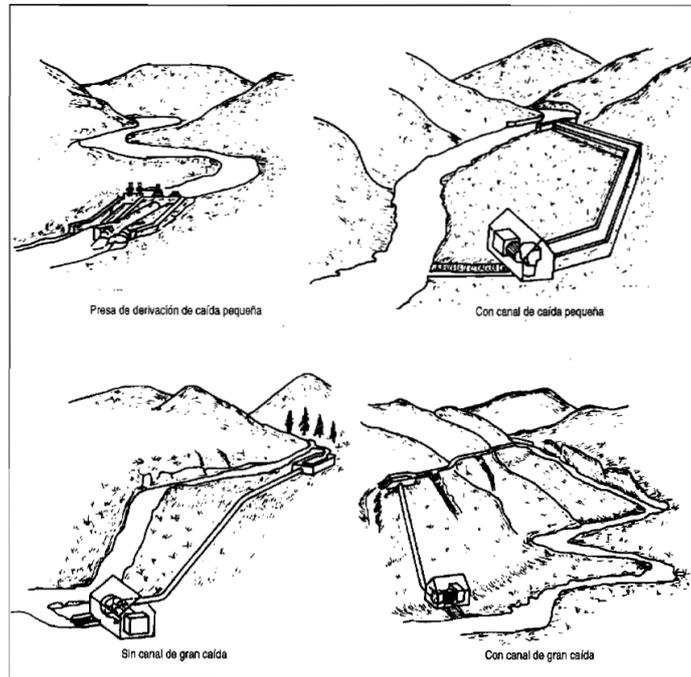


Figura 4. Esquemas generales de microcentrales hidroeléctricas.
(Federico Coz, 1995)

Para diseñar estos componentes es preciso tener en cuenta ciertos factores:

- **Sedimento:** El río puede acarrear sedimentos que pueden ocasionar daños importantes en la turbina que deben extraerse antes de alcanzarla.
- **Caudal adecuado:** Al variar en distintas épocas y ser su captación constante, se debe derivar el caudal adecuado para evitar sobrecargas.
- **Turbulencia:** En las secciones de conducción del agua, cambios bruscos en su dirección crearán turbulencias, pudiendo erosionar las estructuras.
- **Perdidas del salto:** En la conducción del agua, debe de prevenirse pérdidas de energía por fricción excesivas.
- **Golpe de ariete:** En caso de que el flujo del agua en la tubería se detenga de forma brusca, se originan sobrepresiones muy altas. La tubería debe de ser capaz de aguantar esas sobrepresiones.
- **Crecidas:** Requieren especial atención, ya que suelen acarrear gran cantidad de material que puede dañar la derivación, la estructura de toma y los muros del encauce.

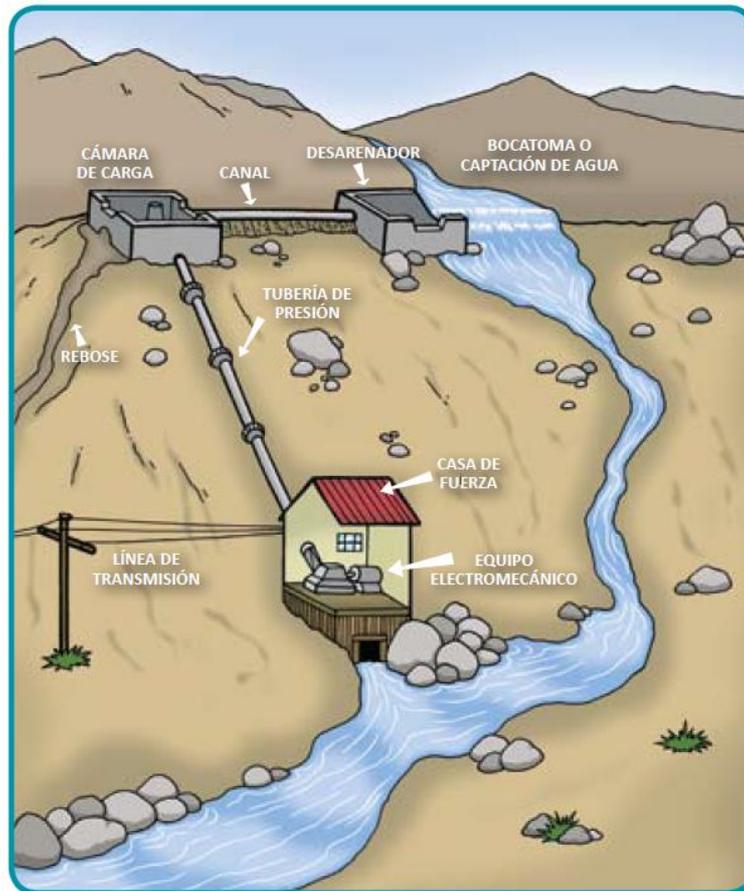


Figura 5. Dibujo de microcentral hidroeléctrica en detalle. (Teodoro Sanchez, Rafael Escobar, 2012)

4.4.2 Esquema general de una microcentral hidráulica

El uso de una tubería resulta más costoso que un canal abierto. Por tanto, en el diseño del sistema debe ser importante que esta sea lo más corta posible. Como ejemplo se proponen dos esquemas posibles según la longitud de esta.

Tubería corta: Caso con tubería corta y canal largo. Al ser el canal largo está más expuesto a riesgos de bloqueo, colapso o deterioro con mantenimiento escaso. En ocasiones, si la pendiente es escarpada, puede no ser posible la construcción de un canal. Este problema y otros, como pueden ser pérdidas excesivas por filtración, se pueden solventar si se cubren o revisten o sustituyéndolos por tuberías. Aun siendo esto costoso, por lo general acaban siendo inferiores que los de la tubería.

Tubería larga: En este caso, la tubería es instalada a lo largo del río y es un sistema necesario en caso de no poderse construir un canal. Para realizar esta instalación, se deben tomar también determinadas precauciones. En caso de crecidas en el río, se debe asegurar que no se dañe ni deteriore la tubería. Además, es esencial calcular su diámetro más económico, ya que si es larga su costo será muy elevado.

En microcentrales de muy pequeña potencia, se suele optar por tuberías al no precisar por lo general que estas sean excesivamente largas.

4.4.3 Captación de agua

Las captaciones son obras hidráulicas con la función de regular y captar un determinado caudal de agua, para la producción de energía. Permiten tomar el agua del río para conducirla. Deben cumplir las siguientes funciones:

- Garantizar la captación de una cantidad constante de agua.
- Impedir el ingreso de materiales sólidos y flotantes.
- Proteger el resto de sistemas de obra hidráulica de crecidas o embalses en épocas lluviosas.

Ubicación: Su ubicación más apropiada es en tramos rectos y estables del río, dependiendo de la topografía, la geología, el comportamiento de los suelos y principalmente de las variaciones hidrológicas del lugar. Todo este factor sería recomendable que los analizara un especialista. En caso de no existir estas condiciones, debería ubicarse en los primeros tramos de curva y siempre en su parte convexa.

Clasificación: Se pueden clasificar atendiendo a diferentes características:

1. Por el material del que están hechas (Piedra, tierra, madera, hormigón, etc.)
2. Por su vida útil (Permanentes o temporales).
3. Por su forma y diseño (Barraje total, parcial, móvil, sumergido o espigones)
4. Por el método de construcción (Hormigón armado, emboquillado, mampostería, gaviones, etc.)

Criterios de diseño

1. Curso del río (tramo recto o curvo)
2. Configuración del terreno (pendiente del cauce, ancho del valle)
3. Caudal del río, caudal a derivar, ángulo de desvío.
4. Nivel de aguas máximas y mínimas del río y de aguas máximas extraordinarias.
5. Acarreo de materiales.
6. Geología y geotecnia del lugar. Presencia de fallas, arcillas y calizas en la zona de la captación y capacidad portante de los suelos.
7. Importancia de la obra y presupuesto.

4.4.4 Aliviaderos

Un aliviadero es un tipo de vertedor que permiten evacuar caudales superiores a los de diseño, para prevenir daños en componentes del sistema. Se diseñan teniendo en cuenta tres características: Largo, altura y tipo de cresta (definida por un coeficiente de descarga). Es recomendable construir una superficie empedrada en su canal de desagüe.

Este se combina con las compuertas de control para su desagüe. Para prevenir daños en épocas de avenidas, las compuertas deben estar situadas por encima del nivel de la avenida y distanciadas del río para permitir acceso a estas cuando esta crecido. Es conveniente tener más de un mecanismo para cortar el paso del agua al canal.

Se recomienda instalar aliviaderos a intervalos de 100m a lo largo del canal principal así como tener un desagüe para conducir el agua de rebose.

4.4.5 Desarenadores y cámaras de carga

El agua de la captación acarrea pequeñas partículas de materia en suspensión que pueden ocasionar el rápido desgaste de los alabes por la abrasión que ocasionan. Los desarenadores se utilizan para eliminar estos materiales. En ellos se consigue que se reduzca la velocidad del agua, asentándose así las partículas de arena o piedras en el fondo, donde se podrán remover. Es necesario que este se sedimente a la entrada del canal y a la entrada de la cámara de carga.

La cámara de carga es similar al desarenador, solo que a la salida de esta se encuentra la tubería de presión y el desarenador se encuentra a la entrada del canal. Ambos depósitos, deben de cumplir con los siguientes principios importantes:

- Tener una longitud y ancho adecuados para que se depositen los sedimentos.
- Permitir la fácil eliminación de los depósitos.
- Eliminación de sedimentos a través de la compuerta instalada debe hacerse cuidadosamente para evitar la erosión del suelo. Recomendable construir una superficie empedrada similar al canal de desagüe del aliviadero.
- Prevenir las turbulencias de agua, evitando cambios de agua o recodos.
- Debe de tener capacidad suficiente para acumular sedimentos.

4.4.6 Canales

El canal es una estructura hidráulica de forma regular que se construye de forma artificial, que según su pendiente puede conducir agua de un lugar a otro. Generalmente en microcentrales se trata de un conducto abierto de sección diversa (Rectangular, trapezoidal, semicircular o irregular). Se pueden adecuar distintos tipos de canales:

- Canal de tierra sin revestimiento.
- Canal de tierra con revestimiento. Con una capa delgada de material, no agrega resistencia, pero reduce la fricción y filtración.
- Canal de mampostería u hormigón.
- Acueductos de planchas de acero galvanizado, madera o tubos.

Es importante elegir el tipo de canal para cada parte de la ruta a seguir. Una vez elegido el tipo y el material utilizado, se pueden calcular las dimensiones adecuadas y el desnivel necesario entre su inicio y final. Par su diseño es necesario definir los siguientes parámetros.

- Sección y ángulo del talud del canal.
- Velocidad del agua.
- Rugosidad.
- Borde libre.
- Perímetro mojado.
- Radio hidráulico.
- Perdidas por filtración.
- Cruces de canal.

4.4.7 Tuberías de presión

Estas tuberías son las que transportan el agua bajo presión hasta la turbina. Sus principales componentes se pueden observar en la figura siguiente. Su coste puede representar una gran parte del presupuesto total de la microcentral, por lo que es prioritario optimizar su diseño.

Elementos a tener en cuenta en el diseño de una tubería a presión son: el material utilizado (acero, PVC, polietileno, etc.), la pérdida de carga por fricción, los soportes, y las válvulas de control para evitar el golpe de ariete (sobrepresión que se produce al detener el flujo de agua bruscamente).

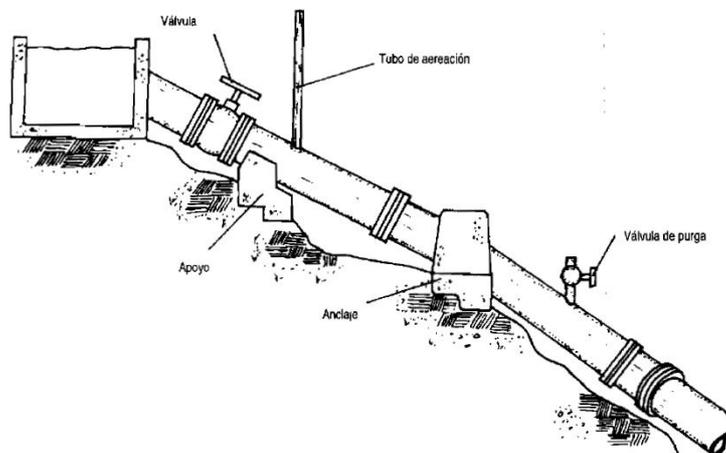


Figura 6. Esquema general de una tubería forzada. (Federico Coz, 1995)

Pautas para la selección de una tubería de presión

1. Considerar el material disponible y los tipos de uniones. También diámetros de tubería y espesores de pared disponibles.
2. Calcular pérdida de altura por fricción en distintos materiales y diámetros.
3. Calcular presión adicional por golpe de ariete en caso de cierre brusco del paso del agua y sumársela a la presión estática.
4. Diseñar soportes, anclajes y uniones para la tubería.
5. Preparar tabla de opciones calculando el costo de cada uno y ver si los componentes necesarios están disponibles.
6. Selección del diámetro tratando de obtener menor costo y menores pérdidas.

Materiales para tuberías de presión: Para la elección del material a emplear en un proyecto, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Presión de diseño.
- Tipo de unión.
- Diámetro y pérdida por fricción.
- Peso y dificultad de la instalación.
- Accesibilidad, clima y terreno.

- Mantenimiento y vida esperada de la instalación.
- Disponibilidad y costo relativo.

Los materiales más frecuentes son los siguientes:

- Acero comercial.
- Policloruro de vinilo (PVC)
- Polietileno de alta densidad.
- Hierro dúctil centrifugado.
- Asbesto-cemento.
- Resina poliéster con fibra de vidrio reforzado.

En la siguiente tabla, se puede ver una comparación resumida entre algunos de estos materiales.

Tabla II. Comparativa de materiales para tuberías de presión. (Federico Coz, 1995)

Materia	Pérdida por fricción	Peso	Corrosión	Costo	Presión de trabajo
Hierro dúctil	4	3	2	1	5
Asbesto cemento	3	3	4	4	4
PVC	5	5	4	4	4
Acero comercial	3	3	3	2	5
Polietileno	5	5	5	3	4

Rango: Malo = 1
Excelente = 5

Cálculo del diámetro de la tubería de presión y las pérdidas por fricción: En el cálculo de la tubería, es importante conocer su diámetro y las pérdidas por fricción dependientes de este. Para seleccionar el diámetro óptimo, hay que realizar una estimación explicada en el manual de microcentrales.

Espesor de pared: El espesor de la pared de la tubería debe calcularse para que en caso de poder existir golpes de ariete este sea capaz de soportarlos, buscando siempre un equilibrio óptimo entre resistencia y coste.

Apoyos y anclajes: Los pilares de soporte, anclajes y bloques de empuje sirven para cumplir la misma función básica: Dar el peso necesario para contrarrestar la fuerza de los fluidos que podrían ocasionar el movimiento de la de la tubería y corra el peligro de romperse.

Tipos de uniones: Por lo general las tuberías vienen en longitudes estándar, debiendo ser unidas in situ. Existen variados métodos de unión y para seleccionar el mejor método hay que considerar los siguientes aspectos:

1. Adecuación al material de tubería seleccionado.
2. Grado de destreza del personal que las instala.
3. Grado de flexibilidad requerido en las uniones.
4. Costos relativos y dificultad de la instalación.

Los siguientes son los métodos de unión utilizados en microcentrales:

- a) Uniones con bridas.
- b) Espiga y campana.
- c) Uniones mecánicas.
- d) Uniones soldadas.

Válvulas: Las válvulas, sirven para controlar el paso del agua. Existen distintos tipos, pero las más utilizadas en microcentrales son las de compuerta y las de mariposa.

- a) Válvula de compuerta.
- b) Válvula de mariposa.

4.5 Turbinas hidráulicas

4.5.1 Elementos fundamentales

Distribuidor: Elemento estático, no posee velocidad angular y no se produce trabajo mecánico. Tiene las siguientes funciones:

- Acelerar el flujo del agua al transformar total (de acción) o parcialmente (de reacción) la energía potencial del agua en cinética.
- Direccionar y dirigir el agua hacia el rodete.
- Actuar como un órgano regulador del caudal.

Adopta distintas formas, pudiendo ser del tipo inyector en turbinas de acción o de forma radial, semiaxial y axial en las turbinas de reacción.

Rodete: Órgano fundamental de las turbinas hidráulicas. Consta esencialmente de un disco provisto de un sistema de alabes, paletas o cucharas, que se acciona con una determinada velocidad angular. La transformación de energía hidráulica del salto en mecánica es producida en el rodete, por medio de aceleración y desviación o simplemente por la desviación del flujo del agua a su paso por los alabes.

Órganos fijos: Sirven para dirigir el flujo y en estos ocurre de forma parcial o total una transformación de energía potencial en energía cinética y cuya solución varía según el tipo de turbina particular.

4.5.2 Clasificación fundamental

Turbinas de acción: Una turbina es denominada de acción si la energía potencial se transforma en cinética íntegramente en órganos fijos anteriores al rodete. Por lo tanto, solo recibe energía cinética y/o la presión del flujo no es modificada a la entrada y la salida de este. Dentro de este grupo se encuentran por ejemplo las siguientes turbinas: Turbina Pelton, turbinas Turgo o turbinas Michell-Banki.

Turbinas de reacción: Una turbina se denomina de reacción (pura) si la transformación de la energía potencial en cinética se realiza íntegramente en el rodete. Por lo tanto, solo recibe energía potencial y/o la presión del flujo a la entrada del mismo es superior a la que tiene a la salida. Dentro de estas, podríamos encontrar por ejemplo las siguientes: Turbina

Francis, turbinas Kaplan y de hélice, turbinas axiales o bomba rotodinámica operando como turbina.

Frecuentemente los canales entre los alabes son convergentes tanto en la corona fija como en el rodete, transformando el flujo su energía potencial en ambos sitios. Esto significa que a la entrada del rodete el flujo tiene energía cinética pero aún le quedara algo de potencial. La turbina, por tanto, sería mixta entre una de acción y una de reacción, ya que no se ha desarrollado de forma industrial la de reacción pura.

4.5.3 Tipos de turbinas más usadas en microcentrales

Turbina Pelton

La turbina Pelton, es una turbina de acción, flujo tangencial y de admisión parcial. Opera con alta eficiencia en condiciones de grandes saltos y bajos caudales, y también en casos de cargas parciales. Son máquinas no reversibles y la velocidad del agua a la salida es casi nula, no ocasionando apenas erosión.

Distribuidor: Constituido por un inyector o varios inyectores. El inyector es una tobera diseñada para poder reducir el caudal a los valores deseados, y así reducir la pérdida de carga. La energía disponible H , que prácticamente entra en forma de presión a la tobera, se transforma a lo largo de esta en velocidad. Esta transformación se da en su totalidad, por ello corresponde a una turbina de acción.

Rodete: Rueda con alabes alrededor, cucharas sobre las que incide el agua del chorro inyector, accionando sobre ellas. El tamaño y número de cucharas dependen de las características de la instalación y/o de la velocidad específica n_s . Menor caudal y mayor salto, menor diámetro del chorro. Sus dimensiones están ligadas directamente por el diámetro del chorro.

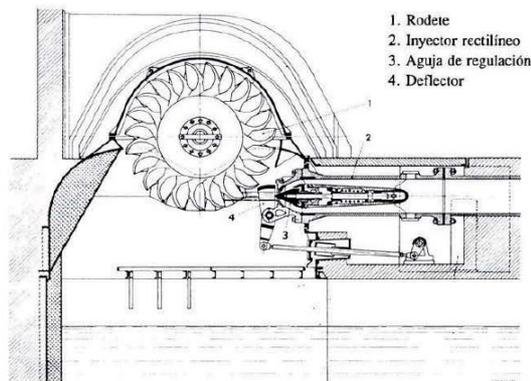


Figura 7. Esquema y rodete de turbina Pelton.

Turbina Francis

Estas turbinas, predominan en casos de poco o medio caudal y media altura. Suele darse en saltos de ríos encañonados, con embalse de pequeña longitud, y altura prácticamente a voluntad. El agua retenida no inunda grandes extensiones.

Distribuidor: El agua procedente del embalse entra en una cámara espiral o que tiene como misión repartir el agua y hacer uniforme su velocidad de entrada por toda la periferia del distribuidor. Si las alturas son importantes, es una espiral metálica y de sección circular; en cambio sí son pequeñas, se construyen de hormigón y sección casi rectangular.

Rodete: El agua sale del distribuidor y gira como un vórtice libre en el espacio comprendido entre éste y los bordes de entrada de los álabes del rodete. La velocidad de salida del distribuidor no corresponde con la velocidad de entrada en el rodete. Como turbina, el flujo se dirige desde el distribuidor hacia el rodete, entrando de forma perpendicular al eje, teniendo dos componentes una radial y otra circunferencial.

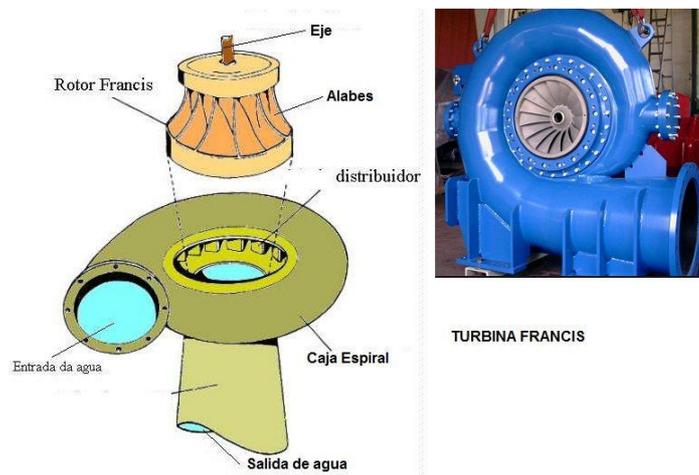


Figura 8. Esquema de turbina Francis

Turbina Michell-Banki o de flujo cruzado

Se trata de una turbina de acción, de flujo radial centrípeto-centrifugo, de flujo transversal, de doble paso y admisión parcial. Su eficiencia es buena dentro de un amplio rango de caudal, aunque es inferior si se compara con las turbinas Pelton y la Francis. Sin embargo, por su bajo costo y fácil construcción local, es una interesante alternativa para microcentrales. Estas turbinas, están recomendadas para valores de hasta 50m de altura y 5m³/s, funcionando correctamente hasta alturas de 200 m.

Distribuidor: Está formado por una tobera de sección rectangular que abarca al rodete en cierto ángulo de admisión parcial. Puede estar dotado de una paleta directriz que permite regular el caudal y puede operarse manual o automáticamente.

Rodete: Tiene forma cilíndrica y está compuesta por un par de discos. Entre estos se fijan periféricamente una cierta cantidad de alabes de perfil circular y curvatura simple. Por lo general, se fijan a los discos por medio de soldadura. En caso de bajas alturas y grandes caudales, se construyen con discos intermedios. La forma cilíndrica que tiene el rodete

permite que esta turbina pueda trabajar en unos grandes rangos de variación de caudal si se le da la longitud que le convenga.

La característica más reseñable de estas turbinas, consiste en que el chorro de agua de sección rectangular incide dos veces, cruzando el interior, sobre los alabes del rodete. Su principal diferencia es que no hay una deflexión axial del chorro, al discurrir el flujo sobre planos que son perpendiculares al eje.

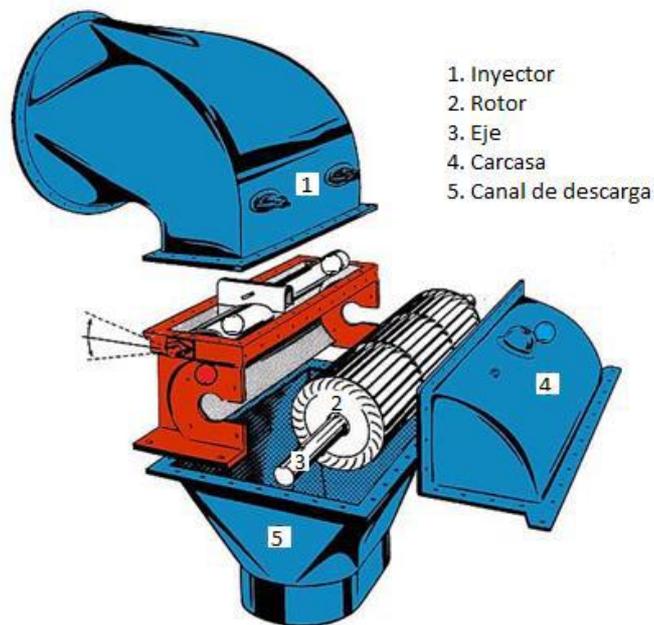


Figura 9. Turbina banki

Turbina Kaplan y de Hélice

Son las usadas en caso de haber mucho caudal y poca altura. Está constituida por una hélice similar a la de los barcos, pero actuando en sentido inverso. En un barco el motor hace girar la hélice para que avance, en una turbina el giro de la hélice debido a la acción del agua acciona sobre el eje del alternador induciéndole el giro.

La turbina Kaplan, es una turbina hélice con los álabes de rodete orientables. Al poder variar la posición de los álabes, puede buscarse que su inclinación coincida en cualquier funcionamiento con la dirección del flujo a la entrada del rodete, adaptándose bien a cualquier carga.

Tienen un buen rendimiento a carga normal, mayor del 90% de la Q de diseño, después decaen fuertemente. Gracias a su sistema de variación de posición de los álabes, se aprovecha un mayor rango de caudal manteniendo el rendimiento. El cambio de posición de los álabes se realiza mediante un servomotor colocado en el interior del cubo de dicho rodete.

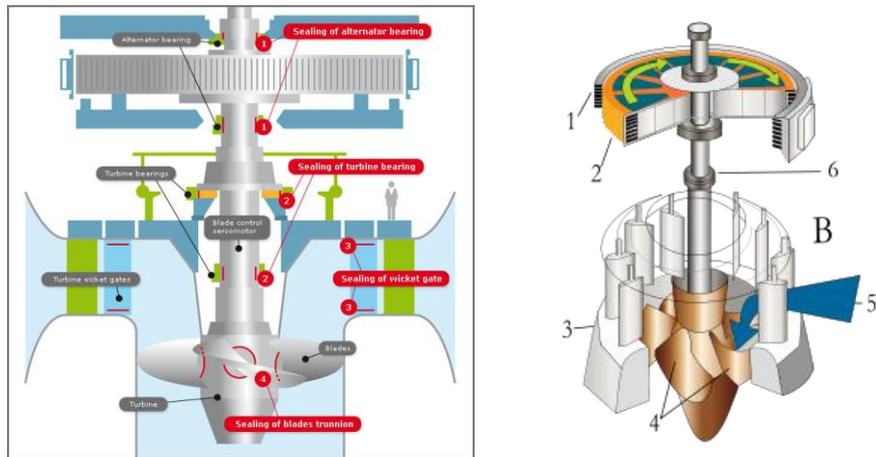


Figura 10. Esquemas de turbinas Kaplan.

4.5.4 Comparativa de características y selección de turbinas

A modo de referencia y para el diseño de microcentrales en zonas rurales, se deben usar:

- Turbinas tipo Pelton para alturas relativamente grandes y pequeños caudales.
- Turbinas tipo Michell Banki para medianas alturas y caudales medianos.
- Turbinas axiales (Hélice o Kaplan) para pequeñas alturas y grandes caudales.

Tabla III. Distintos tipos de turbinas y sus características principales. (Federico Coz, 1995)

TURBINA		Inventor y año de patente	N_s (rpm, HP, m) rpm	Q m^3/s	H m	P kW	$\eta_{m\acute{a}x}$ %		
A C	PELTON	Lester Pelton (EE.UU.) 1880	1 Ch: 30 2 Ch: 30-50 4 Ch: 30-50 6 Ch: 50-70	0.05-50	30-1800	2-300000	91		
		C I	TURGO	Eric Crewdson (G. Bretaña) 1920	60-260	0.025-10	15-300	5-8000	85
				Ó N	MICHELL- BANKI	A.G. Michell (Australia) 1903 D. Banki (Hung.) 1917-1919	40-160	0.025-5	1-50 (200)
R E	FRANCIS	Dionisio Papin (Francia) 1689	30-170			0.05-0.25	10-250	5-500	80
		C C	DERIAZ	James Francis (G. Bretaña) 1848	L: 60-150 N: 150-250 R: 250-400	1-500	2-750	2-750000	92
I Ó	KAPLAN y de hélice			P. Deriaz (Suiza) 1956	60-400	500	30-130	100,000	92
		N	AXIALES: - Tubular - Bulbo - Generador periférico	V. Kaplan (Austria) 1912	300-800	1000	5-80	2-200000	93
Kuhne-1930 Hugenin-1933 Harza-1919	300-800			600	5-30	100,000	93		

4.6 Transmisión de potencia mecánica

En las microcentrales hidroeléctricas, se obtiene energía mecánica a partir de hidráulica en las turbinas y estas a su vez deben de transmitir esa energía al generador para convertirla en eléctrica.

Estos generadores producen en corriente alterna a 50 o 60Hz dependiendo de cada país. En el caso de 50Hz, $n=3000/p$ (rpm), siendo "p" el número de pares de polos. De esta forma se cuenta con velocidades de 3000, 1500, 1000 etc. En el caso de 60Hz, 3600, 1800, 1200 etc. En ambos casos el generador es más costoso a menor velocidad.

Por otra parte, la velocidad de giro de la turbina está ligada con la caída neta, el caudal y las dimensiones del rodete. En grandes centrales se suele poder garantizar una velocidad de giro igual a la del generador, permitiendo su acoplamiento directo. En las microcentrales, no suele ser posible y se precisa de sistemas de transmisión de potencia mecánica entre la turbina y el generador para conseguir que sus velocidades se igualen.

4.6.1 Elementos de un sistema de transmisión

En todos los sistemas de transmisión de movimiento se pueden distinguir dos tipos de elementos fundamentales: Elemento motriz y elemento conducido. Más específicamente, en una transmisión están involucrados los siguientes elementos:

- Rueda impulsora y rueda conducida.
- Ejes que soportan las ruedas y giran con ellas.
- Soportes de los ejes (Cojinetes de rodamiento)
- Acoplamientos.

En estas transmisiones existe una continua participación de los distintos elementos mecánicos. En el ejemplo mostrado en la siguiente figura, el eje motriz entrega el movimiento a la rueda mediante una unión enchavetada, la rueda mueve la faja o correa por fricción, la correa mueve a la rueda conducida y finalmente esta al eje.

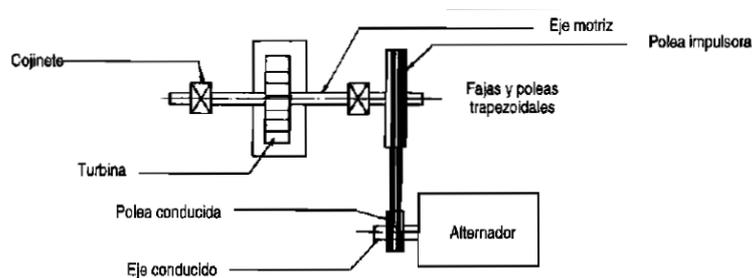


Figura 11. Esquema de un sistema de transmisión. (Federico Coz, 1995)

4.6.2 Tipos de transmisiones

Transmisión por correas

La más ampliamente usada en microcentrales hidroeléctricas. En este sistema, la capacidad de transmisión de potencia depende de la fricción entre la correa y las ruedas que, a su vez, depende del coeficiente de rozamiento y del ángulo de contacto de la correa con la polea menor.

Ventajas

- Posibilidad de unir la parte conductora con la conducida, dispuestos a distancias relativamente grandes.
- Aparte de los cojinetes no se requiere lubricación.
- Al ser transmisión por fricción, en caso de sobrecarga se produce deslizamiento entre correas y poleas, protegiendo la transmisión.
- Funcionamiento relativamente suave, sencillez y coste inicial bajo.

Desventajas

- Grandes dimensiones exteriores
- En bajas velocidades limitado a bajas potencias.
- Debido al deslizamiento relativo entre correa u poleas, no se garantiza una relación de transmisión constante.
- Duración baja que precisa recambio.
- Grandes cargas en ejes y apoyos, considerables pérdidas de potencia.

Dentro de las correas, existen las planas, las trapezoidales y las dentadas.

Transmisión por cadena de rodillos

Transmisiones constituidas por articulaciones de eslabones metálicos que, al entrar en contacto con los dientes de las ruedas les permiten una transmisión sincronizada. Estos eslabones, cuentan con rodillos que entran en contacto directo con los dientes de la rueda. Este contacto por fricción se produce por rodamiento, permitiendo una mayor eficiencia que el anterior por deslizamiento.

Ventajas

- Grandes distancias entre ejes.
- Posibilidad de transmitir movimiento a varios ejes con una cadena.
- Eficiencias muy altas (98%), menores cargas sobre los ejes y mayor vida útil que el caso anterior.

Desventajas

- Costo relativamente elevado.
- Requerimiento de sistemas de lubricación en grandes velocidades y cargas.
- En caso de cambio, las cadenas quedan inutilizables por estiramiento.
- Necesidad de montaje y mantenimiento cuidadoso.

Transmisión por engranajes

Las cajas reductoras de engranajes pueden también significar una opción de transmisión de movimiento. Tienen la ventaja de ocupar muy poco espacio, ser las más eficientes y evitar cargas en los cojinetes. Además se adaptan adecuadamente a bajas y altas velocidades. El mayor inconveniente que tienen, es su elevado costo y mantenimiento, por ello no son recomendadas para microcentrales.

4.7 Generadores

La potencia mecánica que proviene de la turbina puede ser directamente aplicada a otras máquinas como pueden ser aserraderos o molinos de grano. Sin embargo, la aplicación más frecuente es la generación de energía eléctrica, aun teniendo pérdidas de eficiencia en el recurso.

Para el diseño y supervisión de un sistema eléctrico debería ser necesario contar con conocimientos adecuados de electricidad. En caso de ser posible, debería ser recomendable recurrir a un ingeniero eléctrico con experiencia, aunque esto debería de ser costoso, especialmente en sistemas pequeños. En cualquier caso debería contarse al menos con el asesoramiento de un especialista.

Los generadores eléctricos se pueden clasificar básicamente de acuerdo al tipo de señal eléctrica que producen: continua o alterna. Los generadores eléctricos de corriente continua o dinamos están descartados para máquinas de alta potencia, ya que sólo se pueden conectar a la red eléctrica mediante convertidores electrónicos que conviertan la corriente continua en alterna. Únicamente se suelen utilizar en aplicaciones aisladas de baja potencia, en las cuales el sistema de acumulación eléctrica utilizado es una batería. El alto precio de la máquina y su elevado coste de mantenimiento, como el cambio de las escobillas, también hacen que su uso sea marginal y hayan sido sustituidos por alternadores síncronos de imanes permanentes que junto a un puente rectificador son muy útiles para aplicaciones en corriente continua.

Dentro de los generadores de corriente alterna se puede establecer una clasificación de acuerdo a los generadores autoexcitados (síncronos) bien sea con corriente eléctrica continua inyectada en las bobinas del rotor o excitados mediante imanes permanentes, y por otra parte los excitados a partir de la red eléctrica conectada a las bobinas del estator de la máquina (asíncronos).

4.7.1 Componentes

Circuito magnético

El flujo magnético es transportado por un conductor caracterizado por mínimas pérdidas de flujo y de energía impulsora. El elemento utilizado es hierro en aleaciones especiales y generalmente laminado, que si se apila forma un núcleo magnético.

Cuando los conductores alcanzan sus límites de capacidad conductora, a fuertes aumentos de corriente de excitación le corresponden pequeños aumentos de flujo y por tanto de tensión generada. A este estado se le denomina saturación.

Si el flujo es alterno, al girar el campo magnético, se producen pérdidas en el hierro que se disipan en forma de calor. La cantidad disipada es dependiente de la magnitud del flujo, la frecuencia y el espesor y calidad de las láminas del núcleo.

Por último, cabe destacar el magnetismo remanente. Esta es la pequeña cantidad que almacenan los núcleos hechos de material ferromagnético u que sirven para iniciar la generación de electricidad en máquinas autoexcitadas.

Circuito eléctrico

Formado por bobinas y la conexión de estas por donde circula la corriente eléctrica. Comúnmente estas bobinas de campo y de armadura se hacen de cable o pletina de cobre. La conexión de un conductor estático a otro rotativo se suele hacer con escobillas de carbón grafitado como elemento estático y el colector, montado sobre el eje giratorio.

El paso de la corriente por la resistencia natural de los conductores produce pérdidas manifestadas como calor por el efecto Joule. A más corriente mayores son las pérdidas y el calor disipado.

Aislamiento circuito dieléctrico y térmico

El aislamiento eléctrico impide que la corriente pase de un conductor a otro y en un generador se encuentra en:

- El esmalte que cubre el alambre de cobre de las bobinas.
- Las láminas aislantes que separan las bobinas.
- Las láminas aislantes que separan los conductores de cobre de los núcleos.
- Los barnices que recubren a los bobinados.

Según el aislante, se dimensiona su temperatura de trabajo y así la capacidad y periodo de uso de la máquina.

Sistema de enfriamiento: En generadores de microcentrales, puede ser necesario enfriarlos por medio de ventilación forzada montados sobre el mismo eje de la máquina.

Soporte mecánico: Consta de distintas partes que son las siguientes:

- Carcasa: Forma el soporte, anclaje y cubierta metálica que protege las partes activas.
- Soporte de cojinetes: Uno en el extremo accionado por la máquina primaria y otro en el extremo libre.
- Cojinetes: Se usan cojinetes antifricción o rodamientos en ciertas combinaciones según la dirección del eje.

4.7.2 Generador Síncrono

La máquina síncrona es la de uso más común como generador. Está caracterizada por tener una velocidad de giro n (rpm) ligada a frecuencia de la tensión de salida, que se denomina velocidad síncrona. Como generador se denomina alternador y en las centrales eléctricas generan energía eléctrica a partir de primarias

Velocidad síncrona

La velocidad síncrona es la velocidad de giro de la máquina en rpm, siendo invariable y originando en la corriente alterna una frecuencia síncrona normalizada. La velocidad rotativa es dada por la máquina acoplada, que en el presente caso será la turbina hidráulica.

- Frecuencias normalizadas: 50 y 60 Hz.
- Velocidad síncrona, deducible de la frecuencia f y del número de par de polos de la máquina p :

$$n_1 = \frac{60f}{p}$$

Aspectos constructivos

Esta máquina, al igual que los demás tipos de máquinas eléctricas, se constituye por dos devanados independientes:

- Devanado inductor, construido en forma de arrollamiento concentrado o distribuido en ranuras, alimentado con corriente continua. Este da lugar a los polos de la máquina.
- Devanado inducido distribuido formando un arrollamiento recorrido por corriente alterna.

Alternador de armadura rotativa: Para máquinas pequeñas que no superan los 10kVA, el devanado inductor se coloca normalmente en el estator, en forma concentrada, sobre expansiones magnéticas que se denominan polos salientes. El inducido en este caso se sitúa en el rotor, generalmente trifásico, con salida al exterior por medio de anillos deslizantes. Actualmente se utiliza menos aun en potencias pequeñas que la siguiente disposición.

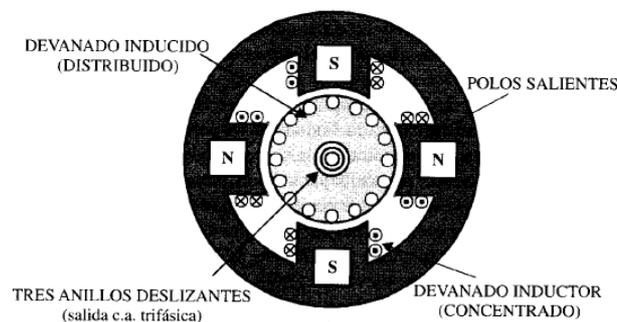


Figura 12. Alternador de armadura rotativa. (Federico Coz, 1995)

Alternador de campo rotativo: En las máquinas grandes, los polos se sitúan en el rotor y el devanado trifásico en el estator. En esta estructura se fabrican dos versiones distintas, pudiendo ser de polos salientes o de polos lisos.

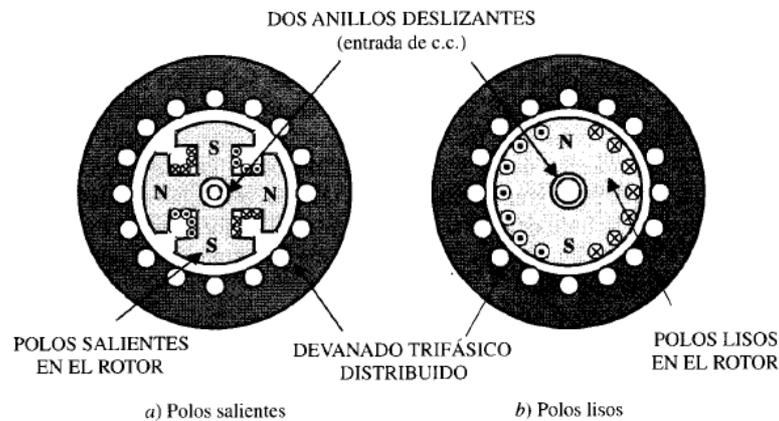


Figura 13. Alternador de campo rotativo de polos salientes y polos lisos. (Federico Coz, 1995)

Otra diferenciación importante, es el uso o no de escobillas.

- 1) Con escobillas: La excitatriz es una dinamo y la corriente continua de excitación se inyecta a través de unos bloques de grafito denominados escobillas y anillos rozantes. Actualmente se utilizan en alternadores de pequeña corriente de excitación o muy grandes donde las excitatrices son dispositivos de estado sólido.
- 2) Sin escobillas: Por ser más confiable (ausencia de elementos rozantes) y económico el uso de rectificadores de silicio, se dio lugar al uso de estos, que se componen de:
 - i) Alternador de campo rotativo como alternador principal.
 - ii) Alternador de armadura rotativa como excitatriz.
 - iii) Puente rectificador con diodos de silicio que convierte en continua la corriente producida por la excitatriz y excita al generador principal.

Principio de operación

Al generador síncrono se le excita el bobinado de campo por corriente continua y la tensión que se desarrolla en su estator es alterna, por ello se le denomina también alternador. La frecuencia de su tensión a la salida es la síncrona, de forma que la onda se puede tomar como senoidal y según las bobinas del estator dar lugar a una o más fases.

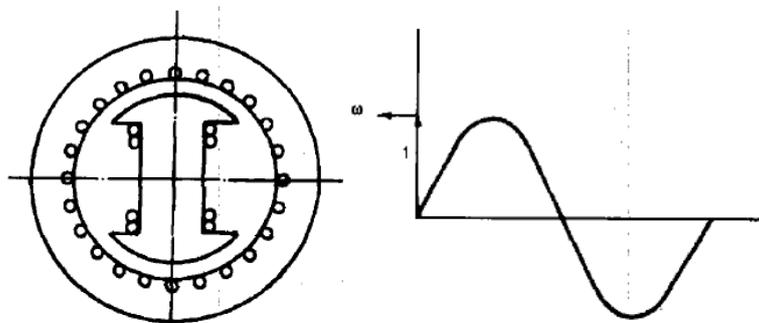


Figura 14. Alternador de campo rotativo monofásico y onda generada. (Federico Coz, 1995)

El monofásico tiene una única fase, posicionándose en la máquina de dos polos como en la figura 15, en la cual también se aprecia la tensión de salida. Se usa principalmente por tres razones:

- Si el alternador debe operar en paralelo con otro existente monofásico.
- En operaciones de muy baja potencia (inferior a 30kVA).
- Si se espera el crecimiento futuro de la demanda.

Por otro lado, el trifásico tiene tres fases distanciadas 120° entre sí. La disposición de las bobinas y las tensiones de salida del estator en el generador de cuatro polos puede observarse en la siguiente figura. La forma de interconectar las fases puede dar lugar a dos principales tipos de conexión: Conexión estrella (γ) y conexión triángulo (Δ).

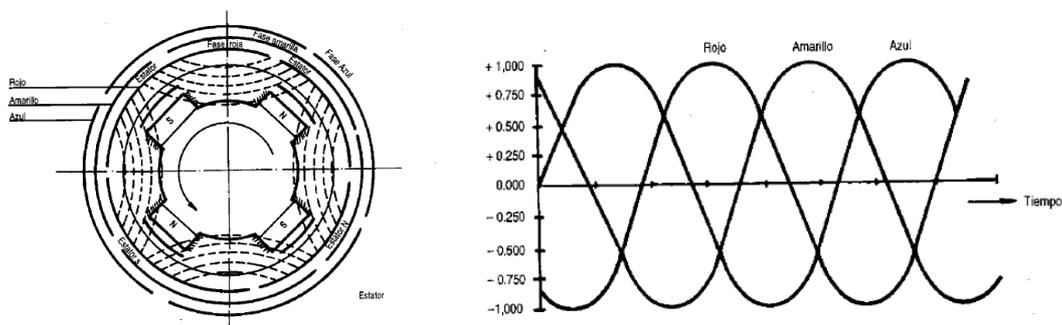


Figura 15. Alternador de campo rotativo trifásico y ondas generadas. (Federico Coz, 1995)

El sistema trifásico es el más difundido por los siguientes motivos:

- Es el método más simple y económico de producir energía eléctrica, siendo su transporte más liviano. El alternador tiene el 75% del peso y el conductor el 87% del equivalente monofásico.
- Método más simple y económico de consumo. (5% de pérdidas en la conducción como máximo, un 2% más eficiente que el monofásico equivalente).
- Motores y generadores eléctricos más simples, menos pesados y más eficientes.

Generador síncrono de imanes permanentes

En sistemas de microgeneración, los generadores síncronos de imanes permanentes son ampliamente usados. El motivo principal de su uso es que no precisan de excitatrices. Dentro de estos, existen diversas topologías, pudiendo tener flujo magnético radial (los de pequeña potencia) o axial.

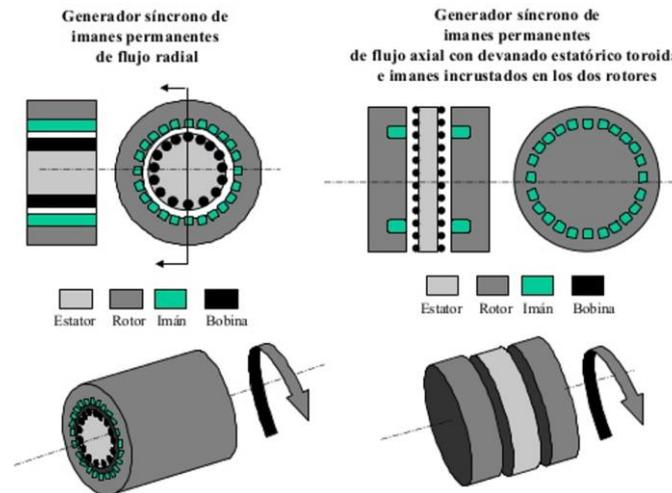


Figura 16. Generador síncrono de imanes permanentes. (Santicar, 2018)

Están compuestos de tierras raras. Los imanes permanentes artificiales se fabrican con materiales ferromagnéticos duros, que son aquellos materiales ferromagnéticos que, tras ser imantados, tienden a mantener las propiedades magnéticas hasta que no son desmagnetizados, fenómeno que se produce cuando es aplicado un campo magnético contrario al inicial. Algunas de las sustancias más utilizadas en la fabricación de imanes permanentes son:

- Alnico: aleación de cobalto, aluminio y níquel. En ocasiones con hierro, cobre y titanio.
- Ferrita: también conocido como hierro- α , es el hierro cristalizado en el sistema cúbico.
- Neodimio: la aleación de neodimio, hierro y boro se utiliza para fabricar el conocido como imán de neodimio, imán NdFeB, NIB o Neo. Pertenece al grupo de los imanes de tierras raras.
- Imán de Samario – Cobalto: otro imán de tierras raras.

Funcionamiento en sistema aislado

El comportamiento de un generador síncrono en carga varía fuertemente dependiendo del factor de potencia y de si está o no en paralelo con otros. El esquema representa al generador síncrono que funciona aisladamente con sus dos controles, el regulador de tensión que varía la I_e de la excitatriz y con ello la tensión de excitación, la I_e y finalmente V ; de otro lado el regulador de velocidad, al variar la estrangulación de la vena líquida, varía el caudal y con él la velocidad de la turbina por consiguiente la frecuencia.

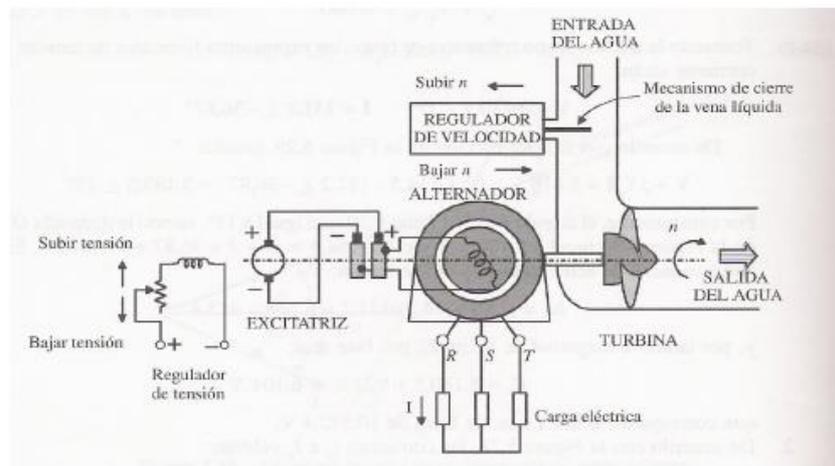


Figura 17. Generador síncrono aislado en central hidroeléctrica (Mora, 2015)

Si la máquina se mueve a $\omega = \text{cte}$, f es fija. Al aumentar la carga crece, por lo que V baja. Esto es más evidente con el circuito equivalente, ya que al ser $\text{cte } I_e$, lo es E_0 . En la última f . En definitiva:

- La frecuencia depende totalmente de la velocidad del motor primario.
- El fdp del generador es el fdp de la carga.
- La tensión depende de ω (la fem depende de f y de Φ), así como de I_e , de la l y del fdp.

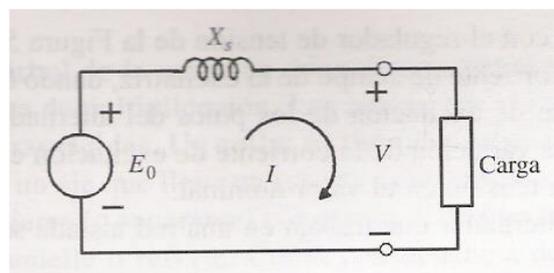


Figura 18. Circuito equivalente máquina síncrona aislada (Mora, 2015)

$$E_0 = V + jX_s \cdot I$$

Sistemas de excitación

La tensión en terminales de una máquina síncrona depende principalmente de la corriente de excitación que circule por el rotor, pudiendo verse afectada por una serie de factores como la velocidad de la máquina, la carga a la que esté conectada, el factor de potencia o la temperatura de los devanados. Por lo tanto se hace necesario ajustar la corriente de excitación del rotor de la máquina en todo momento para mantener constante la tensión en bornes, independientemente de los factores que puedan afectar al cambio de esta tensión.

A la tecnología encargada de conseguir esta corriente se la denomina excitatriz, y debe ser capaz de generar una corriente continua regulable. Actualmente existen muchos tipos de



excitatrices, si bien algunas han quedado ya en desuso. En general pueden clasificarse dentro de dos grandes grupos, máquinas con excitación estática y máquinas con excitación rotativa. Esta clasificación hace referencia a la fuente de la cual procede la corriente continua del rotor, que puede ser fija (estática) o móvil (dinámica). Dentro de las máquinas con excitación estática se encuentran los siguientes tipos:

Excitación independiente

En las máquinas que poseen excitación independiente la excitatriz es totalmente independiente de la máquina, toma la tensión de la instalación eléctrica en la que se encuentre ubicada la máquina (alterna), y la rectifica. Puede controlarse, por ejemplo, mediante un autotransformador, o un rectificador controlado. La corriente llega al rotor mediante anillos rozantes y escobillas.

El sistema de control del regulador actúa principalmente controlando la tensión que se aplica al rotor, que al tener una impedancia inductiva, provocará una corriente por la ley de Ohm. Lo más usado a día de hoy son los puentes rectificadores de tiristores, que pueden controlarse fácilmente con un controlador electrónico.

Generadores autoexcitados

Un generador autoexcitado es un generador en el que la energía necesaria para magnetizar el rotor se obtiene de bornes de la misma máquina. Es decir, la corriente continua del rotor de la máquina proviene de la tensión en bornes de la misma máquina, que se rectifica y se reintroduce en el rotor. Este tipo de sistemas necesita de una batería auxiliar para arrancar, ya que cuando la máquina está parada no tiene tensión en bornes y por lo tanto no puede conseguir la corriente suficiente para magnetizar el rotor.

Este tipo de excitatriz es muy usada en máquinas grandes modernas, ya que las hace más compactas y totalmente independientes excepto en el arranque. Las máquinas pequeñas con este tipo de excitación presentan problemas en el caso de producirse cortocircuitos cercanos, pero por lo demás tienen un correcto funcionamiento.

Por otro lado, las máquinas con excitación rotativa obtienen la corriente continua a partir de máquinas rotativas auxiliares, que pueden ser máquinas de corriente continua u otras máquinas síncronas. En microcentrales, este tipo de generadores suelen ser muy usados.

Excitación con máquina de corriente continúa

En este tipo de excitación la excitatriz es una máquina de corriente continua, con el eje independiente o acoplado al eje de la máquina síncrona. En caso de que el eje esté acoplado, el propio giro de la máquina síncrona mueve a la máquina de continua, que generará la corriente continua que precisa el rotor de la máquina síncrona. Esta corriente puede introducirse en el rotor mediante anillos rozantes y escobillas.

Este método se encuentra actualmente en desuso debida a que las máquinas de continua presentan muchos problemas de conmutación a gran velocidad, y a que el colector de delgas es un elemento que se trata de evitar por los problemas que acarrea.

Excitación con máquina de corriente alterna

En este caso la excitatriz es otra máquina síncrona, con el eje acoplado a la máquina principal, que genera corriente alterna que posteriormente se rectifica mediante un rectificador controlado y se introduce en el rotor de la máquina principal. En los generadores grandes la excitación de esta excitatriz es proporcionada por una segunda excitatriz, llamada excitatriz piloto, para mejorar la rapidez de respuesta. Si hay excitatriz piloto, a la primera de las excitatrices se la llama excitatriz principal.

En cualquier caso, la última de las excitatrices (principal o piloto) es siempre una máquina de imanes permanentes (no necesita excitación). La excitatriz principal puede ser una máquina síncrona convencional, en cuyo caso se precisará de anillos rozantes y escobillas, o puede ser una máquina síncrona invertida, que evita el uso de escobillas y anillos.

A este tipo de excitatrices se les llama "Brushless", dado que no necesitan un sistema de escobillas para hacer circular la corriente por el rotor (se genera en una máquina cuyo inducido es solidario al rotor). Esto representa una fuerte ventaja respecto al resto de excitatrices, ya que las escobillas y anillos rozantes necesitan mucho mantenimiento. También se las conoce como excitatrices de diodos giratorios, ya que la rectificación se hace de forma solidaria al rotor.

Regulación automática de tensión

En sistemas aislados como las microcentrales hidráulicas, los generadores deben alimentar cargas domésticas, de iluminación o incluso de pequeñas industrias. Para conseguir que funcionen correctamente, además de un control de la velocidad, es preciso controlar en todo momento la tensión de salida y mantenerla en valores exactos.

La reacción de armadura que produce el paso de la corriente de carga y su factor de potencia, ocasiona un efecto desmagnetizante que hace caer el valor de la tensión generada. Esta regulación de tensión, es la relación porcentual que existe en la diferencia de la tensión en el vacío menos la tensión con carga referida a la de vacío.

$$V(\%) = \frac{V_0 - V}{V_0} * 100$$

En este apartado, se va a describir el regulador más ampliamente usado, el regulador automático de tensión electrónico o AVR electrónico, pero también existe el regulador de tensión automático compuesto, que sigue otro método de control.

Regulador automático de tensión electrónico

Este regulador, es un dispositivo compuesto de elementos de estado sólido montados sobre un circuito integrado. Su objetivo es mantener la tensión constante ante cualquier condición de carga, dentro del valor nominal del alternador, aun si varía la velocidad.

La señal que toma es la de salida del alternador, la cual compara y después emite de forma automática la corriente continua precisa hacia el campo de la excitatriz para mantener la tensión en el nivel de calibración. Se compone de los siguientes circuitos:

- a) Circuito sensor y comparador: Toma la señal, compara con una referencia y detecta el error.
- b) Circuito amplificador del error y de control de disparo: Detectado el error, se traduce en una señal que se emite para disparar un rectificador controlado.
- c) Circuito de control de potencia: Se forma por diodos de silicio y tiristores. Toma la potencia del alternador y según el error y la señal de disparo rectifica la corriente aplicada al campo de la excitatriz para corregir variaciones de tensión.
- d) Circuito de estabilidad: Consiste en un circuito de realimentación de señal que sirve para detectar si la corrección de excitación es la apropiada. De este circuito dependerá la velocidad de respuesta del equipo ante cambios bruscos de carga.

4.7.3 Generador Asíncrono

En este tipo de máquina eléctrica el campo magnético giratorio se crea a través del estator cuyos devanados deberán, por lo general, estar conectados a una fuente exterior de tensión alterna. Esta es la razón básica por la que la máquina asíncrona es consumidora de energía reactiva, ya que al ser el bobinado una carga inductiva, para generar el campo magnético consumirá corriente desfasada de la tensión.

Aspectos constructivos

Estator: El estator se construye con los siguientes elementos:

- Chapas apiladas de acero al silicio
- Ranuras interiores donde se aloja un devanado trifásico (tres devanados monofásicos desfasados 120° en el espacio)
- Alimentado por un sistema trifásico de corrientes
- Produce un campo magnético giratorio:

$$n_1 = \frac{60f}{p}$$

Rotor: A su vez, el rotor está compuesto de:

- Chapas magnéticas apiladas formando un cilindro
- Ranuras periféricas donde se aloja el devanado rotórico, que pueden ser de:
 - Jaula de ardilla
 - Rotor bobinado

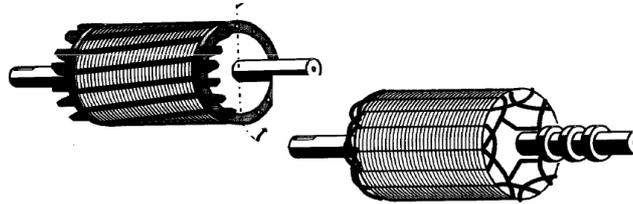


Figura 19. Rotor de una maquina asíncrona.

Otros elementos: Carcasa, tapas laterales, rodamientos, ventilador etc.

Caja de bornes: Conectados a los extremos de los bobinados estatóricas.

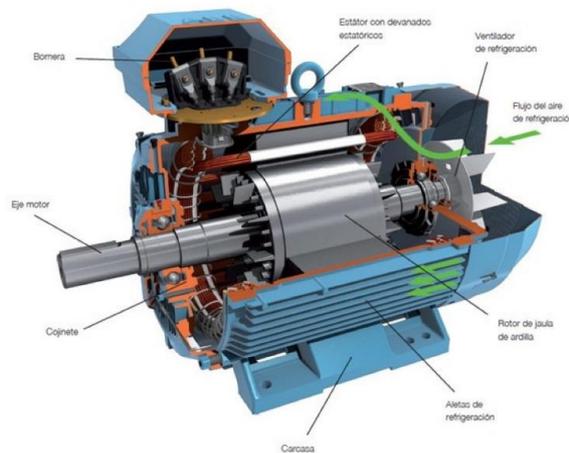


Figura 20. Dibujo en 3D de una maquina asíncrona.

Principio básico de operación

A través de la corriente que circula por el estator y su interacción con el campo magnético del rotor, se genera un par de fuerzas. Estas se producen en el sentido contrario de giro para un generador o en el sentido de giro si es un motor. El motor de inducción es caracterizado por lo siguiente:

- Toma de la red la corriente de magnetización, la cual es inductiva-reactiva.
- Como motor necesita mayor corriente de estator para mantener girando mayores cargas mecánicas en su eje.
- La respuesta al aumento de carga es la reducción de su velocidad. En vacío es muy cercana a la síncrona y con carga disminuye la cantidad porcentual s , llamada deslizamiento, por tanto:

$$s (\%) = \frac{(n_1 - n)}{n_1 \cdot 100}$$

Donde:

n = Velocidad del motor cargado

n_1 = Velocidad síncrona del motor

Operación como generador

El motor de inducción se convierte en generador si el deslizamiento se hace negativo, es decir, si se le acopla un elemento motriz como una turbina hidráulica y se le haga girar a una velocidad superior a la síncrona. De esta forma la potencia mecánica se convierte en eléctrica que fluirá de retorno a la red. Al precisar de la red para magnetizarse, esta operación requiere que la máquina esté conectada a red.

Para uso en sistemas aislados, es necesario autoexcitarlo con condensadores conectados en sus bornes, que entregarán esta corriente eléctrica magnetizante. También se logra el inicio de la generación por medio de magnetismo remanente.

4.8 Reguladores de velocidad

(Díaz, 2018) Los sistemas de las microcentrales hidroeléctricas requieren una operación a velocidad constante de cara a no dañar al generador eléctrico ni a los equipos que utilicen esta energía. Debido a que la frecuencia es proporcional a la velocidad de giro del alternador, una variación en su velocidad de giro se traducirá en la variación de frecuencia del sistema eléctrico.

Para el control automático de la frecuencia y el voltaje generado en pequeñas microcentrales hidroeléctricas que trabajan de forma aislada, se utilizan básicamente dos métodos: por regulación del flujo de agua que entra a la turbina, y por el control de la carga eléctrica que demandan los consumidores.

Para la regulación del flujo se utilizan tres tipos de reguladores:

1. Regulador mecánico o manual.
2. Regulador hidráulico.
3. Regulador eléctrico-electrónico.

Por su parte, para el control de la frecuencia y el voltaje a través del control de la demanda de los consumidores, se utiliza un regulador electrónico de carga. Existe un «regulador mixto» que permite la regulación del caudal de agua que entra a la turbina, y que, además, actúa sobre la demanda eléctrica de los consumidores.

4.8.1 Regulador manual

Consiste en abrir o cerrar una válvula de forma manual, para dejar pasar más o menos flujo de agua a la turbina. Con la regulación manual es muy difícil garantizar que la frecuencia y el voltaje se mantengan constantes, pues estos parámetros dependen de la rotación de la turbina, y ésta varía con la demanda eléctrica; es decir, si la demanda aumenta, la turbina disminuye su velocidad de rotación, y viceversa.

Esa forma de operar las microcentrales hidroeléctricas, sólo se aplica cuando los parámetros de frecuencia y voltaje no son importantes para los consumidores, o cuando no se dispone de otro tipo de regulador.

- Ventajas: Es el más sencillo y barato, controla el flujo de agua a la turbina, y su mantenimiento es simple.
- Desventajas: Requiere de un operador permanentemente, y no garantiza, de forma eficaz, mantener constante la frecuencia y el voltaje.

4.8.2 Regulador hidráulico automático

El uso de estos reguladores para la regulación automática de la velocidad, proporciona un sistema con frecuencia y voltaje estables. Se suele emplear en casos en los que se prevé que el sistema eléctrico tendrá grandes fluctuaciones instantáneas de demanda. Este sistema utiliza reguladores oleomecánicos y sus variaciones como son los taquimétricos, los electro-mecánicos y electro-hidráulicos. Por su elevado costo, es poco apropiado para microcentrales.

Es un equipo que tiene incorporado un regulador de watt conectado mecánicamente al eje de la turbina, de manera que sus revoluciones varían con las de la turbina. Su función es abrir o cerrar la válvula de entrada de aceite a un pistón hidráulico, el cual está acoplado mecánicamente a la válvula que controla el flujo de agua que entra a la turbina. De esta forma, cada vez que aumenta o disminuye la demanda, aumentan o disminuyen las revoluciones de la turbina, y con ellas, las del regulador de watt.

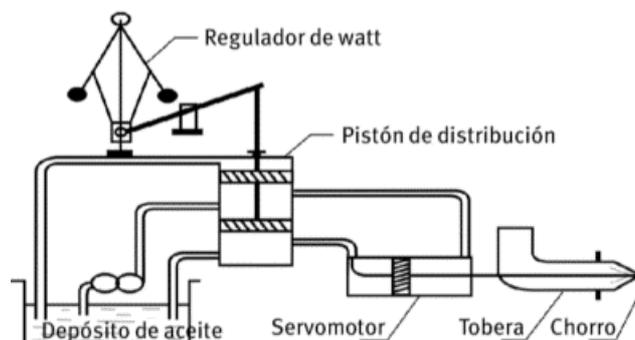


Figura 21. Regulador hidráulico automático (Díaz, 2018)

- Ventajas: Controla el flujo de agua que entra a la turbina, mantiene con pequeñas oscilaciones la frecuencia y el voltaje, y trabaja de forma automática.
- Desventajas: Es costoso, su respuesta ante las variaciones de frecuencia y voltaje son lentas, y requiere personal calificado para su mantenimiento

4.8.3 Regulador eléctrico-electrónico

Es un regulador electrónico acoplado eléctricamente con un motor que gira en los dos sentidos. Este motor está acoplado mecánicamente a la válvula que controla la entrada de

agua a la turbina; es decir, cuando aumenta la frecuencia, el regulador electrónico envía una señal al motor para que gire la válvula de entrada, y disminuya el caudal de agua que entra a la turbina; y cuando disminuye la frecuencia, envía una señal al motor para que abra la válvula. De esta forma se controla la velocidad de rotación de la turbina, y con ello, la frecuencia y el voltaje.

Con este tipo de regulación, debido a la inercia del sistema, no se logra mantener constante la frecuencia, existiendo siempre pequeñas oscilaciones de la misma, alrededor de la frecuencia de trabajo (50 Hz).

- Ventaja: Controla el flujo de agua que entra a la turbina.
- Desventajas: Es relativamente costoso, su respuesta es lenta ante las variaciones de la frecuencia y el voltaje, se mantienen pequeñas oscilaciones de la frecuencia y requiere personal calificado para su mantenimiento.

4.8.4 Regulador electrónico de carga

El regulador electrónico de carga, también llamado por sus siglas en inglés ELC (Electronic Load Controller), tiene como función mantener constante la potencia generada; es decir, la turbina funciona a potencia constante:

$$P_g = P_d + P_c$$

Donde:

P_g : Potencia generada.

P_d : Potencia disipada en el banco de resistencias.

P_c : Potencia consumida por la población.

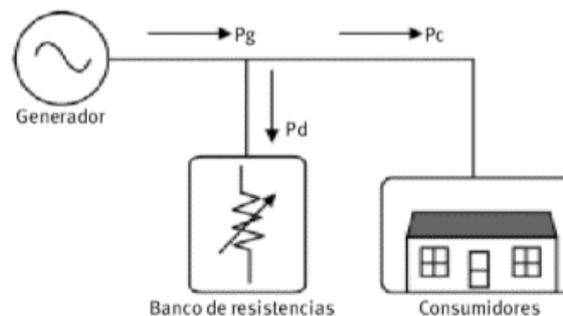


Figura 22. Esquema básico ELC (Díaz, 2018)

La energía no consumida se disipa en forma de calor en un banco de resistencias, que generalmente se ubica en la casa de máquinas. Esta energía disipada está en función de la variación de la frecuencia generada por el generador de la turbina. El regulador está constantemente comparando la frecuencia generada, con un patrón que previamente se fijó como referencia.

Si la frecuencia generada es mayor que la de referencia patrón, el regulador desvía más energía al banco de resistencias. De la misma forma, si la frecuencia generada es menor que



la de referencia patrón, el regulador desvía menos energía al banco de resistencia. Esto último sucede cuando en el consumidor varió la demanda de energía, y el regulador realizó los ajustes para mantener fijos los valores de frecuencia y voltaje.

Para el control de la potencia disipada se utilizan componentes electrónicos, tales como tiristores, triacs, transistores de potencias, etcétera. En este método de control por disipación de energía, la respuesta a las variaciones de la frecuencia es prácticamente instantánea.

En lugares donde el caudal de agua sea limitado, no es recomendable este tipo de regulador, debido a que se gasta determinada cantidad de agua para generar la energía que es necesario disipar para mantener constantes la frecuencia y el voltaje.

- Ventajas: Es relativamente barato, mantiene constantes la frecuencia y el voltaje, y trabaja de forma semiautomática.
- Desventaja: No controla el flujo de agua, por lo que, en lugares donde ésta es escasa, no se debe instalar.

4.8.5 Regulador mixto

Este sistema de regulación está basado en el funcionamiento del regulador electrónico, al cual se le acopla eléctricamente un motor eléctrico que gira en ambos sentidos, por lo que el regulador mixto tiene las características del regulador electrónico y las del eléctrico electrónico; es decir, tiene la posibilidad de controlar la demanda eléctrica y el flujo de agua que entra a la turbina.

Su funcionamiento es totalmente automático y el ajuste de la frecuencia es instantáneo, ya que se realiza por el regulador electrónico, y la disipación de energía es mucho menor que en el caso del regulador electrónico. Con este trabajo combinado se logra mantener la frecuencia y el voltaje constantes y, además, disminuir la cantidad de agua empleada en disipar energía.

- Ventajas: Controla el flujo de agua que entra a la turbina y mantiene constantes la frecuencia y el voltaje.
- Desventajas: Es caro y requiere personal calificado para su mantenimiento.

4.8.6 Comparativa entre los distintos sistemas

En la siguiente tabla se recoge una comparativa de los anteriores métodos propuestos analizando distintos factores influyentes de cara a su selección.

Tabla IV. Comparativa entre reguladores de velocidad en centrales hidroeléctricas

	Regulador manual	Regulador hidráulico	Regulador eléctrico-electrónico	Regulador electrónico de carga	Regulador mixto
Coste inicial	Bajo	Alto	Alto	Medio	Alto
Precisión	Depende de operador	Alta	Alta	Alta	Muy alta
Instalación	Muy fácil	Difícil	Media	Fácil	Media
Operación y mantenimiento	Muy bajo	Bajo	Medio	Bajo	Medio
Vigilancia de operador	Si	No	No	No	No

4.9 Regulador electrónico de carga (ELC)

Al ser uno de los sistemas más sencillos, baratos y eficaces para regular el caudal de una microcentral, va a ser analizado más profundamente en este apartado.

4.9.1 Tipos de regulación

Regulación por ángulo de fase

(Nan Win Aung, 2015) Este tipo de regulación se consigue por medio del uso de tiristores o transistores, que permiten el paso de la corriente hacia la carga secundaria solo si recibe la pulsación proveniente del circuito de control de disparo. Estas señales, son sucedidas cada medio ciclo, permitiendo así que el semiconductor empleado permita el paso de la corriente alterna hasta que la onda llegue al cero. Variando el ángulo de disparo de 0° a 180° se puede variar el flujo de corriente hacia la carga secundaria y de esta forma la energía que se disipará en esta carga.

El control de la frecuencia se realiza comparando la frecuencia del alternador con una señal preestablecida de referencia. Comparándose estos dos valores, se emite una señal diferencial que va a un circuito integrado de control, para después dirigirse de este a uno de disparo donde se controla el ángulo de fase de cada pulsación. En caso de sistemas trifásicos, existirá uno por fase.

En caso de ser nula la señal diferencial, el ángulo de fase y la carga de lastre permanecen constantes. Si esta frecuencia varia, la señal toma un valor distinto a cero y actúa sobre el ángulo de disparo, cambiando también la carga secundaria hasta que la frecuencia se estabiliza, volviendo a cero la señal diferencial. En algunos casos, se puede realizar también el sensado de la corriente además de la frecuencia para realizar un sistema con una respuesta más veloz para cambios en la demanda.

Regulación por PWM

Por medio de la regulación PWM o modulación por ancho de pulso, también se puede realizar el control de velocidad con el uso de una carga secundaria. En primer lugar, la corriente alterna se rectifica, convirtiéndose en continua y dirigiéndose a la carga de lastre desde la línea principal del generador. En este punto, según las medidas de tensión y frecuencia, e incluso intensidad y su comparación con unas de referencia, se realiza el control de la potencia que le llega a la carga.

Este control se obtiene por medio del apagado y encendido de un conmutador, generalmente un MOSFET o un IGBT, siguiendo un ciclo de trabajo o duty cycle. Este ciclo de trabajo es la relación que existe entre el tiempo en que la señal se encuentra en estado activo y el periodo de la misma. Su valor se encuentra comprendido entre 0 y 1, y viene dado por la siguiente expresión:

$$D = \frac{\tau}{T}$$

Donde:

D es el ciclo de trabajo

τ es la duración donde la función está en nivel alto.

T es el Periodo de la función.

Dependiendo de los valores de control medidos y por medio de un microcontrolador, se calcula el ciclo de trabajo del conmutador. EL control se realiza variando el tiempo de encendido de un ciclo, dependiendo de la potencia que se desea disipar, por medio de una modulación por ancho de pulso.

Este sistema de control tiene una rápida respuesta de control comparado con otros y gran precisión en el control de la velocidad. Por otra parte, puede generar armónicos y calor debido a las intensidades que recorren al rectificador y los transistores, teniendo pérdidas en la conmutación, sobre todo si es a altas frecuencias. Un esquema simplificado de este sistema puede ser el siguiente, en el cual se controla la tensión y la frecuencia:

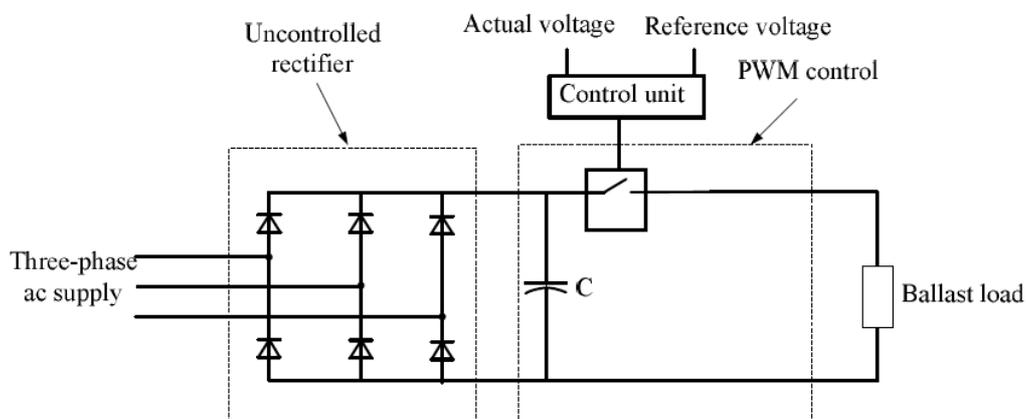


Figura 23. ELC regulado por PWM (Nan Win Aung, 2015)

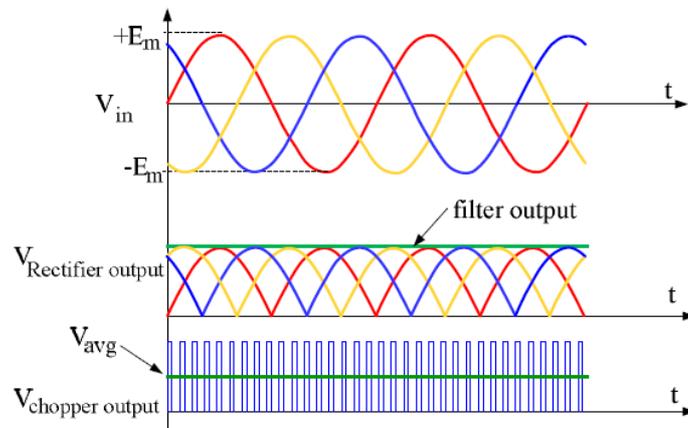


Figura 24. Salida en la carga de un ELC regulado por PWM de la tensión y el duty cycle. (Nan Win Aung, 2015)

Regulación digital o escalonada

En los sistemas de regulación digital o escalonada, el sistema de control se diferencia del analógico en que no se corta la onda de tensión, sino que se utiliza un sistema de relés que actúan conectando o desconectando pequeñas cargas resistivas en la carga secundaria. Estas cargas tienen unos valores fijos, utilizándose varias resistencias de valores diferentes con la finalidad de que el regulador tenga un amplio margen para realizar las combinaciones más adecuadas para el cambio de carga que se ha producido.

Por ejemplo, en caso de requerir de una carga secundaria de 10,5 kW, se podrían instalar las siguientes resistencias: 6kW, 3kW y 1,5kW. Por medio de estas, se podrían conseguir siete combinaciones diferentes o siete escalones de regulación. El aumento del número de estos, puede contribuir a mejorar el control de la frecuencia, pero implica un aumento en el coste al requerir de más resistores.

Una de las mayores ventajas de este sistema frente a los analógicos, es la ausencia de armónicos en el estado estacionario, que en caso de utilizar relés de estado sólido también se ve muy reducida en el transitorio generado cuando conmutan. La mayor desventaja es el requerimiento de una excesiva cantidad de cargas para una regulación óptima.

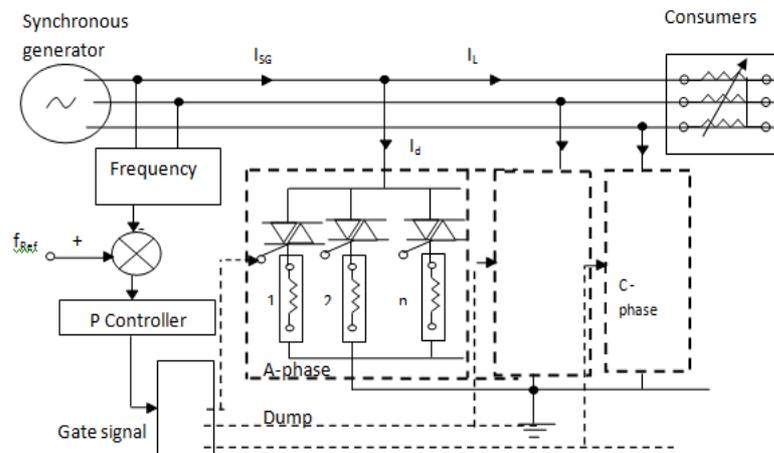


Figura 25. Esquema ELC por regulación digital. (Rojan Bhattarai, 2013)

4.9.2 Control de la conmutación

(Kristian Lendng) Los siguientes elementos conmutadores son los principalmente usados en estos sistemas, y estas son sus características principales:

Relés: Los relés ofrecen buen aislamiento entre el circuito de control y el de potencia, pero no son aptos para PWM debido a que su mejor respuesta puede como mucho ser en el rango de ms y se desgastan rápidamente.

En sistemas más rudimentarios que funcionen con regulación escalonada, puede resultar suficiente al no existir un control tan exacto de la carga secundaria.

Tiristores: Los tiristores se utilizan en la configuración de rectificadores controlados en los casos en el que el control es por ángulo de fase. Este permite el uso de una única carga secundaria, otorgándole mayor flexibilidad al Sistema. El mayor problema de este control, como se ha comentado anteriormente, es la generación de armónicos.

Esta configuración requiere que la carga sea conmutada en una fracción de medio ciclo que aunque no genera interferencias de radio, añade ruido a baja frecuencia que es difícil de eliminar con filtros. Además, los tiristores requeridos tienen un coste superior a los otros elementos de conmutación.

TRIAC: Otra opción para estos sistemas, podría ser el uso de triacs con cargas secundarias separadas por fase. Su frecuencia máxima de conmutación está en el rango de los μs y por ello sirven tanto para PWM como para control por fase. Tienen además un buen factor de potencia y se pueden encontrar por precios muy reducidos.

Respecto a otras alternativas, tienen como inconveniente potencias muy limitadas, pudiendo requerir de más cargas secundarias y además requieren de una corriente de apagado. Por tanto, el PWM es poco práctico al disiparse más potencia en el circuito de control que en los resistores y además requerir de un circuito más complejo.

MOSFET: En el caso del control PWM, son la opción más rápida, permitiendo muy altas frecuencias de control. Aunque este sistema pudiese generar mucha interferencia de radio, al conmutar en muy alta frecuencia es más sencillo filtrarla. Esto significa que tanto las interferencias como los armónicos generados se pueden filtrar muy fácilmente.

IGBT: Combina las ventajas de los BJT y de los Mosfet. Impedancia de entrada elevada y bajas pérdidas en conmutación, sin fenómeno de segunda ruptura, por lo que puede trabajar a elevadas frecuencias y grandes intensidades. Resistencia en conducción muy baja y elevada velocidad de conmutación (frecuencia en el rango de los 50KHz), además de una elevada tensión de ruptura.

Los IGBTs son substitutos válidos para los MOSFET en su misma configuración, sirviendo de manera más efectiva para valores de potencia superiores, pero teniendo un coste superior.

4.9.3 Control de voltaje, de intensidad o de frecuencia

(Austegard, 2015) En estos sistemas, se puede realizar el control de la generación por medio del voltaje o de la frecuencia, pudiendo controlar también la intensidad para prevenir sobrecargas en sistemas trifásicos o desequilibrios. Para seleccionar la variable a controlar, es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- El interés principal es el control del voltaje en estos sistemas, pretendiendo mantener un sistema equilibrado y sin sobrecargas.
- Por otra parte, muchos alternadores ya poseen un control de voltaje automático por medio de la corriente de excitación, el cual requiere que se regule la frecuencia y dependiendo del sistema de control también la intensidad.
- La regulación de frecuencia es más sencilla que la de voltaje, debiéndose basar en la frecuencia siempre los sistemas de regulación más rápidos para prevenir inestabilidad.
- Si hay alternadores sincronizados, es precisa la regulación de la frecuencia.

4.9.4 Control PWM

En el diseño que se plantea posteriormente, se utiliza un control basado en el PWM y por tanto se va a desarrollar en este apartado este control, teniendo en cuenta sus partes generales. Como esquema general, un sistema de regulación PWM podría tener la siguiente forma:

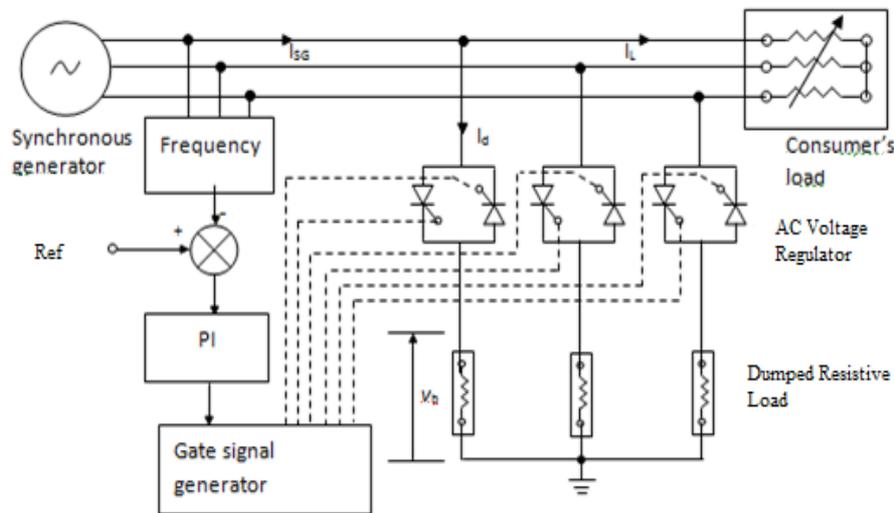


Figura 26. Esquema ELC por regulación PWM. (Rojan Bhattarai, 2013)

Este sistema realiza el control por frecuencia únicamente, tomando una frecuencia de referencia y comparándola con la que existe en el circuito. Tras eso, con un control PI en lazo cerrado, corrige el error que existe en todo momento y genera una señal PWM que activa los elementos de conmutación, en este caso tiristores en antiparalelo.

Fuente de alimentación estabilizada: La fuente de alimentación sirve para tomar la energía del alternador y se encarga de suministrarla en corriente continua y en el voltaje requerido por los circuitos electrónicos que componen el regulador.

Básicamente se utiliza un regulador de voltaje, que es un dispositivo electrónico que se alimenta de una cantidad de tensión determinada y es capaz de entregar una cantidad menor y acondicionada para un equipo determinado. Toda la tensión excedente suministrada por la fuente será absorbida por el regulador y disipada como calor, siendo muy importante también usar un disipador de calor acorde al regulador que se esté utilizando.

Unidad de control: Consiste en los circuitos sensores de frecuencia, voltaje y corriente. Dentro de estos sensores, existirán diversos componentes que dependiendo del tipo de control cumplirán una función determinada.

Unidad de potencia: Contiene los circuitos que regulan el disparo de los elementos de conmutación que sirven para regular la cantidad de energía disipada en la carga secundaria. Están compuestos por un rectificador, conmutadores y la carga secundaria.

Unidad de medida y protección: Contiene los relés, interruptores y fusibles de protección del cuadro general de distribución y también los apartados de medida y otras protecciones. Todos los elementos utilizados para ello son los explicados en el apartado 4.9.



Microcontrolador: El microcontrolador es la unidad encargada de realizar el control. Obtiene los datos que se extraen del circuito de control, los procesa y actúa sobre el conmutador para derivar la potencia requerida a la carga secundaria.

4.10 Cuarto de máquinas y líneas de distribución

4.10.1 Instrumentos de medida

Al emplearse energía eléctrica, es necesario controlarla y conocer exactamente sus valores de tensión, corriente y potencia generada. También es muy útil medir la frecuencia para detectar errores en los sistemas de control. Los principales instrumentos utilizados son los siguientes:

- Voltímetro: Permiten medir la tensión o el voltaje y se deben de conectar en derivación, a los bornes del aparato a medir.
- Amperímetro: Mide la intensidad de la corriente y tiene que conectarse en serie con las cargas.
- Vatímetro: Mide potencia eléctrica. Y está formado por una bobina amperimétrica y otra voltimétrica para su cometido.
- Frecuencímetro: Mide la frecuencia de la tensión alterna.
- Elementos auxiliares de control y protección
 - Transformador de tensión: Empleado para reducir la tensión si la generación es superior a 230V.
 - Transformador de corriente: Empleado para reducir la corriente en sistemas donde sobrepase los 5A.

4.10.2 Corte y seccionamiento

Son los elementos de conexión y desconexión del generador hacia los receptores, que deben cumplir con los siguientes aspectos:

1. Facilidad de conexión y desconexión manual.
2. Desconexión automática por sobrecarga o cortocircuito en la carga.
3. Desconexión automática ante mala operación o avería.

En pequeñas centrales pueden utilizarse los siguientes métodos para este cometido:

Interruptor magnetotérmico o pequeño interruptor automático (PIA)

Es un interruptor que se abre, interrumpiendo así la corriente, de forma automática si tenemos una sobreintensidad en cortocircuito o una sobrecarga. Su objetivo principal es la protección del cable, no de la carga. Este elemento, puede rearmarse tras reparar la avería que haya hecho que dispare.

Intensidad nominal de los magnetotérmicos: La intensidad nominal de este elemento en funcionamiento normal (I_n), debe ser mayor a la que atravesará el cable al que protege (I_b) e inferior a la intensidad máxima que soporta este (I_z). Así pues, debe de cumplirse lugar lo siguiente a la hora de seleccionarlos como elementos de protección:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

Curva de disparo de un pequeño interruptor automático: Los interruptores magnetotérmicos, tienen dos zonas de actuación diferenciadas. La primera es la zona térmica, en esta, el interruptor actúa cuando pase un tiempo predefinido, abriéndose para cortar la corriente. La segunda zona sería la magnética, en la cual el interruptor dispara si tenemos un cortocircuito. Entre las dos, tendremos una zona mixta en la cual podría saltar cualquiera de las dos rápidamente.

Lo anteriormente explicado, se puede graficar mediante unas curvas que varían según la carga que este siendo protegida. Estas curvas se designan por cuatro letras distintas.

Curva B: Cargas resistivas. Intensidad en la cual disparara el magnético (3-5) I_n

Curva C: Cargas mixtas. Intensidad en la cual disparara el magnético (5-10) I_n

Curva D: Cargas con picos de corriente, condensadores por ejemplo. (10-20) I_n

Curva K: Particular para motores con picos de corriente.

Corriente de cortocircuito: Un cortocircuito, se provocará por una conexión accidental o provocada de relativamente baja impedancia. Suele ser una situación accidental que rara vez ocurre, pero en caso de ocurrir y si no tenemos las protecciones pertinentes, puede producir explosiones, incendios y todo tipo de daños graves en las instalaciones.

Dicho lo anterior, la intensidad de cortocircuito que soporten estos interruptores, debe ser mayor a la corriente máxima de cortocircuito que tengamos en el circuito. Esta será mayor cuando se encuentre más cercana al suministro o al transformador, ya que conforme recorra las líneas, la resistencia de los cables aumentará.

Poder de corte: El poder de corte de un interruptor automático, define la capacidad de éste para abrir un circuito automáticamente al establecerse una corriente de cortocircuito. En la norma doméstica, tendremos que tener en cuenta solamente el poder de corte asignado (I_{cn}) en el PIA, que será en la que saltara la parte magnética. En la norma industrial tendremos el poder de corte último (I_{cu}) que será la mayor intensidad de cortocircuito que podrá soportar el elemento y la de servicio (I_{cs}) que será a la que realmente va a saltar.

Polos: Según los sistemas que tengamos, tendremos distinta cantidad de polos para proteger las fases precisas y los neutros en caso de precisarlo. En caso de redes trifásicas (LLLN):

- Interruptores con 3 polos: Principalmente en motores
- Interruptores con 3 polos + N: En cargas trifásicas equilibradas con neutro.
- Interruptores con 4 polos: Cargas trifásicas desequilibradas con neutro en el cual tengamos una intensidad importante.

En los sistemas monofásicos (LN), tendremos las siguientes posibilidades:

- 1 polo + N: Opción más común en este caso.
- 2 polos: Menos común. En diferenciales se utilizará esta.

La diferencia entre poner un polo en el neutro y no ponerlo, será que en caso de no tener polo, no se medirá la intensidad y en caso de haber si la medirá incluso en el neutro, pudiendo saltar también si se detectan sobrecargas o cortocircuitos en este. Esto será análogo para fusibles y diferenciales, pero en estos últimos siempre se protegerá el neutro.

Intensidad de disparo térmico del PIA: La intensidad de disparo térmico del dispositivo de protección, es en la que saltará el térmico al pasar un determinado tiempo (I_2).

Teniendo en cuenta eso, además de la condición que debía cumplir la intensidad nominal en el magnetotérmico, otra condición indispensable es que esta intensidad cumpla las siguientes relaciones:

$$I_2 \leq 1,45 I_z$$

Intensidad de disparo magnético del PIA: La intensidad de disparo magnético es la corriente que asegura el disparo magnético (I_m). En estos se debe cumplir que $I_{cc\ min} > I_m$. La corriente de cortocircuito mínima, será la que se encuentre lo más cercana a la carga.

Para poder aumentar la $I_{cc\ min}$ hay que aumentar la sección del cable. De esta forma, la impedancia del cable será mayor y menor esta tensión.

Fusible y seccionador

Un fusible es un componente eléctrico hecho de un material conductor, de punto de fusión bajo que es colocado en el circuito para fundirse y así, abriendo el circuito, interrumpir la corriente si es excesiva. En las instalaciones de baja tensión se utilizará en la caja general de protección.

Intensidad nominal y tensión nominal de los fusibles: La intensidad nominal de este elemento en funcionamiento normal (I_n), será la intensidad que será capaz de soportar de forma indefinida sin que funda. Esta intensidad deberá cumplir la relación que también cumplía el magnetotérmico, respecto a la intensidad por el cable:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

La tensión nominal del fusible (U_n), a su vez, es el valor eficaz máximo para el cual está diseñado.

Corriente de cortocircuito o de fusión en los fusibles: La corriente de fusión en un fusible es a partir de la cual este fundirá de manera instantánea. Para calcular este valor, se aplica la siguiente ecuación:

$$I_{cc} = \frac{k \cdot S}{\sqrt{t}}$$

K será una constante para cada tipo de cable. S será la sección del cable (mm²). t será la duración (s). La duración máxima que se supone en el cálculo, será de 5 s. En estos, al igual que en los PIA, se debe cumplir que $I_{cc \text{ mín}} > I_m$. Normalmente esta segunda condición suele ser más restrictiva que la anterior

Poder de corte en los fusibles: Es el valor de la máxima corriente de cortocircuito que podrá interrumpir, estando en la tensión nominal, sin que se vea afectado o dañado. Cuanto mayor sea su valor, el fusible tendrá mayor capacidad para proteger las instalaciones de corrientes de cortocircuito.

Intensidad de disparo térmico del fusible: La intensidad de disparo térmico del fusible, es a en la que fundirá al pasar un determinado tiempo (I_2). Teniendo en cuenta eso, además de la condición que debía cumplir la intensidad nominal en el magnetotérmico, otra condición indispensable es que esta intensidad cumpla las siguientes relaciones:

$$I_2 = I_f = 1,6 I_n$$

4.9.3 Relés de protección

Estos elementos protegen al generador actuando sobre la bobina de disparo del interruptor o contactor.

Relé de sobrefrecuencia (81): Sirve para medir el exceso de frecuencia y debe ser graduable sobre el 120%. Este debe actuar sobre la válvula, el regulador de velocidad y el interruptor si el regulador de velocidad es defectuoso o si hay un exceso de agua en el recurso.

Relé de mínima tensión (27): Sirve para medir una caída anormal de tensión, siendo graduable del 75 al 100%. Actuará sobre el interruptor, la válvula y el regulador de velocidad de la turbina cuando:

El AVR está defectuoso, hay una sobrecarga de corriente, el factor de potencia de la carga es bajo o la velocidad de giro es menor a la normal.

Relé de sobretensión (59): Sirve para medir exceso en el nivel de tensión, siendo graduable del 100 al 125%. Actuará sobre el interruptor, la válvula y el regulador de velocidad de la turbina cuando:

El AVR está defectuoso, el factor de potencia de la carga es capacitivo o la velocidad de giro es mayor a la normal o hay exceso de agua.

Relé diferencial: Este relé detectará valores distintos de intensidad entre fases, lo cual significara que hay fallos de aislamiento en el sistema o elemento medido. Sirve para proteger a las personas de posibles derivas a tierra de la energía eléctrica.

La diferencia de intensidades que detecta se denomina intensidad diferencial (I_d). El valor máximo de esta intensidad, a partir del cual disparará, viene determinado por la resistencia del terreno (R_T) en el que vaya a ejercer la protección. Cuanto menor sea esta resistencia, deberá de saltar con una intensidad inferior. Su valor se obtiene mediante:

$$I_D = \frac{U_0}{R_T}$$

U_0 será la tensión de seguridad, según el local (50 V local seco, 24 V local húmedo).

Ambientes de alta humedad → $I_d=3\text{mA}$

Uso doméstico o iluminación a nivel industrial → $I_d=30\text{mA}$

A nivel industrial → $I_d=300\text{-}500\text{mA}$

La intensidad nominal de este elemento, deberá de ser igual o superior a la del magnético que tengamos aguas abajo, recomendándose que sea al menos 1,4 veces mayor. En este caso también se tendrá que cumplir que:

$$I_b \leq I_n \leq I_z.$$

En instalaciones eléctricas, debe existir una adecuada coordinación entre el esquema de conexión a tierra TT y las características de los dispositivos de protección. La intensidad de defecto se puede calcular mediante la expresión:

$$I_d = \frac{U_o}{R_A + R_B}$$

Con:

I_d Corriente de defecto

U_0 Tensión entre fase y neutro

R_A Suma de las resistencias de la toma de tierra y de los conductores de protección de las masas

R_B Resistencia de la toma de tierra del neutro, sea del transformador o de la línea de alimentación.

La intensidad diferencial residual o sensibilidad de los diferenciales debe ser tal que garantice el funcionamiento del dispositivo para la intensidad de defecto del esquema eléctrico.

4.9.4 Cuadros de distribución

Son las cajas metálicas que contienen los instrumentos de medición y palancas de seccionamientos, conteniendo en su interior elementos de control, protección y el cableado de interconexión. De esta forma, se evita el contacto de las personas y el ingreso de polvo, humedad u otros objetos extraños.

4.9.5 Otras protecciones

Pararrayos: Son dispositivos que permiten desviar a tierra los elevados picos de tensión inducidos por descargas atmosféricas sobre líneas de transmisión. De colocarse tras el cuadro de distribución del generador.

Puesta a tierra: Los tableros de control, el generador y todo dispositivo con cubierta metálica conductoras con elementos activos, deben de ser puestos a tierra mediante la conexión de un borne montado sobre la parte metálica y un cable desnudo de hilos trenzados de cobre que se unirá a la red de tierra. De esta manera, se protege al personal de los elementos activos. Para el caso de un conductor enterrado horizontal, la resistencia de tierra, en función de la resistividad del terreno, es:

$$R = \frac{2\rho}{L}$$

Con:

R: Resistividad del terreno (Wm)

L: Longitud total del conductor (m)

Para el caso de una pica vertical aislada, la resistencia de tierra, en función de la resistividad del terreno, es:

$$R = \frac{2\rho}{L}$$

Con:

R: Resistividad del terreno (Wm)

L: Longitud de una pica (m)

La resistencia conseguida para el conjunto de electrodos de la instalación de puesta a tierra se calcula de la forma siguiente:

$$\frac{1}{R_T} = \sum \frac{1}{R_e}$$

Con:

R: Resistividad del terreno (Wm)

L: Longitud de una pica (m)

4.9.6 Cálculos en redes de distribución

Para el cálculo de las redes de distribución, se aplicará el reglamento de baja tensión español. Este es válido para el diseño de una red eléctrica, pero el diseño de la red eléctrica podría variar entre normativas de distintos países. En caso de no existir una norma definida

en el país donde se va a realizar el sistema eléctrico o en caso de no ser ampliamente conocida, se podrían utilizar los siguientes cálculos como base.

4.9.6.1 Intensidad máxima admisible

En el cálculo de las instalaciones se comprobará que las intensidades máximas de las líneas son inferiores a las admitidas por el Reglamento de Baja Tensión, teniendo en cuenta los factores de corrección según el tipo de instalación y sus condiciones particulares.

1. Intensidad nominal en servicio monofásico:

$$I_n = \frac{P}{U_f \cdot \cos\varphi}$$

2. Intensidad nominal en servicio trifásico:

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_f \cdot \cos\varphi}$$

4.9.6.2 Caída de tensión

En circuitos interiores de la instalación, la caída de tensión no superará un porcentaje del 3% de la tensión nominal para circuitos de alumbrado y del 5% para el resto de circuitos, siendo admisible la compensación de caída de tensión junto con las correspondientes derivaciones individuales, de manera que conjuntamente no se supere un porcentaje del 4,5% de la tensión nominal para los circuitos de alumbrado y del 6,5% para el resto de circuitos. Las fórmulas empleadas serán las siguientes:

Caída de tensión en monofásico:

Caída de tensión en trifásico:

Con:

- I: Intensidad calculada (A)
- R: Resistencia de la línea (W)
- X: Reactancia de la línea (W)
- J: Ángulo correspondiente al factor de potencia de la carga;

4.9.6.3 Corrientes de cortocircuito

El método utilizado para el cálculo de las corrientes de cortocircuito, según el apartado 2.3 de la norma UNE-EN 60909-0, está basado en la introducción de una fuente de tensión equivalente en el punto de cortocircuito. La fuente de tensión equivalente es la única tensión activa del sistema. Todas las redes de alimentación y máquinas síncronas y asíncronas son reemplazadas por sus impedancias internas.

En sistemas trifásicos de corriente alterna, el cálculo de los valores de las corrientes resultantes en cortocircuitos equilibrados y desequilibrados se simplifica por la utilización de las componentes simétricas.

Utilizando este método, las corrientes en cada conductor de fase se determinan por la superposición de las corrientes de los tres sistemas de componentes simétricas:

- Corriente de secuencia directa $I(1)$
- Corriente de secuencia inversa $I(2)$
- Corriente homopolar $I(0)$

Se evaluarán las corrientes de cortocircuito, tanto máximas como mínimas, en los puntos de la instalación donde se ubican las protecciones eléctricas.

Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito, el sistema puede ser convertido por reducción de redes en una impedancia de cortocircuito equivalente Z_k en el punto de defecto.

Se tratan los siguientes tipos de cortocircuito:

- Cortocircuito trifásico;
- Cortocircuito bifásico;
- Cortocircuito bifásico a tierra;
- Cortocircuito monofásico a tierra.

5 Diseño de la microcentral hidroeléctrica teórica

5.1 Introducción

En este apartado, se realizará un diseño teórico de una microcentral hidroeléctrica basado en las microcentrales EMAS y el documento "Manual de mini y micro centrales hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos".

Debido a que el objeto de este proyecto es el diseño del control electrónico y el sistema eléctrico, estos apartados serán los más desarrollados, explicando requisitos generales, obra civil y el diseño de elementos más mecánicos comentando únicamente los requisitos generales.

5.2 Demanda eléctrica

El presente proyecto pretende servir como guía para la electrificación de una comunidad rural de pequeño tamaño. En concreto se ha desarrollado para 18 núcleos familiares, dos de estos con pequeños locales comerciales en sus viviendas y dos pequeños talleres comunitarios con funciones relacionadas con la agricultura. Cada uno de estos talleres, alimenta a un motor asíncrono monofásico.

En los proyectos de EMAS se suponen 100 W de potencia instalada por familia, teniendo en cuenta que el consumo de cada familia es variable en cada momento. En el presente caso, se supondrán 160 W por familia con un factor de simultaneidad de 0,6, el cual nos indica que se consumirá de media el 60% de la energía instalada en cada momento, tendiendo esta suposición a la alza. Por otra parte, en cuanto a las viviendas con locales comerciales, se les supondrá 260 W de potencia instalada, con un factor de simultaneidad de 0,7.

En cuanto a los talleres, la potencia que requerirán será de 230 W para iluminación y tomas generales y de 530 W extra debido a los motores monofásicos instalados. El factor de simultaneidad de los requisitos generales será de 0,6 y el del motor de 0,5. Por último, la casa comunitaria precisará de 330 W de potencia instalada, con un factor de simultaneidad del 0,5.

La potencia neta a instalar en un caso con 18 familias debería ser de 1800 W, pero teniendo en cuenta la existencia de talleres y para asegurar el cubrimiento de la demanda se ampliará a 3600 W. El diseño se realizará suponiendo que las pérdidas podrían llegar al 40% y por tanto la turbina de diseño tendrá 6000W de potencia nominal descontando pérdidas y con las pérdidas se generarán 3600 W.

La demanda teórica total de la comunidad se recoge en la siguiente tabla:

Tabla V. Demanda comunidad rural teórica

	Potencia unitaria (W)	Cantidad	Potencia instalada (W)	Factor de Simultaneidad	Potencia demandada (W)
Viviendas	160	16	2560	0,6	1536
Vivienda con comercio	260	2	520	0,7	364
Talleres	230	2	460	0,6	276
Motores	370	2	740	0,5	530*
Casa comunitaria	330	1	330	0,5	165
Total			4600		2871

*En el cálculo de la demanda, se tiene en cuenta el rendimiento de los motores.

Se estima que el consumo de los motores sea pleno durante el día, cuando no existe iluminación de las viviendas y que el consumo por iluminación tenga picos durante la noche. De esta forma se compensan las cargas. El consumo extra de los talleres en horas nocturnas tampoco existirá, pero si lo harán pequeños refrigeradores instalados en las viviendas con comercios.

La potencia total instalada es de 4600 W, pero debido a que no estarán las cargas activas en todo momento y teniendo en cuenta los factores de simultaneidad supuestos, la potencia demandada rondará los 2871 W. De esta forma, queda un margen de seguridad de 729 W que podrán suplirse en caso de precisarse, teniendo en cuenta las pérdidas. Con este margen, se pueden suplir pérdidas mayores o picos en la demanda.

La disposición de las viviendas y talleres de la comunidad rural teórica se muestra en los planos contenidos en el anexo I. En estos también se muestran sus cargas a modo de esquema unifilar y la distribución de la energía eléctrica en la comunidad.

5.3 Evaluación del recurso hidroenergético

Al ser un proyecto teórico basado en los de EMAS/TADEH, en este apartado se suponen unos resultados acordes a las centrales más comúnmente instaladas por esta organización. Los datos supuestamente obtenidos por métodos utilizados por EMAS, sirven para mostrar resultados que podrían ser acordes a los obtenidos en un caso real.

5.3.1 Medición del salto

La medición del salto teórico ha sido obtenida por medio de un altímetro, en el cual se ha obtenido una altura neta de aproximadamente 60m. Se ha realizado a partir de las mediciones una gráfica que muestra el cambio a lo largo del día:

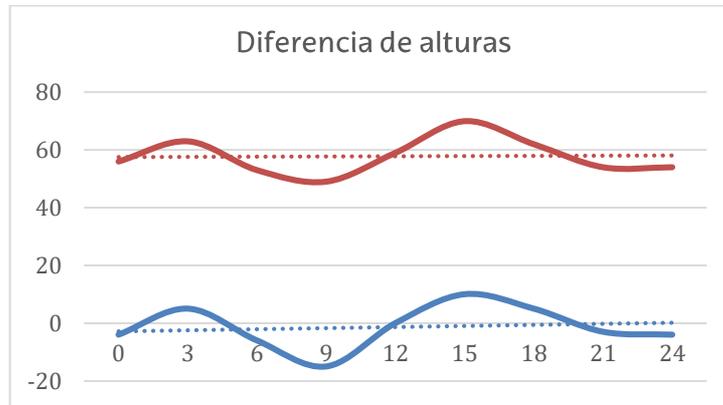


Figura 27. Gráfica de la diferencia de alturas obtenida con altímetro en caso teórico.

5.3.2 Medición de caudal

El caudal ha sido medido mediante baldeo, con un balde de $V = 50$ l. Las medidas se han efectuado en época seca, en distintos momentos del día durante un mes, obteniéndose con la media de medidas en distintas horas la siguiente tabla:

Tabla VI. Medida del caudal por baldeo en caso teórico.

Balde	t de llenado (s)	Caudal obtenido (m^3/s)
50	5,23	9,56
50	4,87	10,26
50	4,9	10,20
50	5,12	9,76
50	5,01	10
50	4,96	10,08
50	4,93	10,14
Valor medio	5	10

5.3.3 Cálculo de la potencia neta

La potencia eléctrica que puede generar la microcentral del proyecto, viene dada por la siguiente expresión:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H_n \cdot e_{Civil} \cdot e_{turbina} \cdot e_{generador} \cdot e_{distribución}$$

Donde:

Q: Caudal en m^3/s

H_n : Salto neto en m

e_{Civil} : Rendimiento de captación y tubería forzada. Debe diseñarse para ser del 90%.

e_{Turbina} : Rendimiento de la turbina banki. Simulación 80%.

$e_{\text{Generador}}$: Rendimiento del generador y ELC. Estimado 90%.

$e_{\text{Distribución}}$: Rendimiento de la distribución eléctrica. Estimado del 90%.

$$P = 9,81 \cdot 10 \cdot 60 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 3433 \text{ W}$$

Por tanto, se puede observar como la potencia generada es suficiente para suplir la demanda, siendo ligeramente superior a esta. De esta forma, se puede prever que en caso de existir un rendimiento inferior o de que en determinados momentos la demanda pueda aumentar, existe un excedente de 400 W que podría cubrirlo.

5.4 Obras civiles

5.4.1 Esquema general

En lo relativo al esquema general escogido para la microcentral teórica, se ha decidido elegir un esquema similar al escogido por EMAS. Este consiste en una toma sencilla de la cual sale una tubería de presión directamente, sin necesidad de canal, hacia la turbina. Se podría definir como un esquema sin canal y de gran caída.

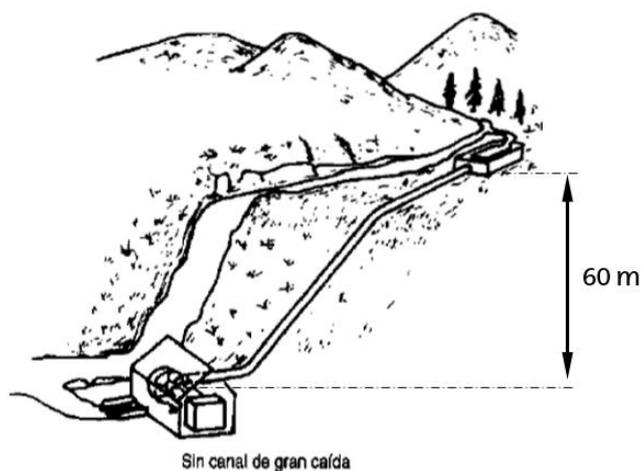


Figura 28. Esquema general de la microcentral teórica. (Buchner, 2005)

Para su diseño, se debe tener en cuenta diversos aspectos que para el caso actual se podrían expresar de la siguiente manera:

- **Sedimento:** Según el terreno, se supone un acarreamiento de sedimentos moderados, que serán eliminados por medio del desarenador y con un mantenimiento mensual según propone EMAS.
- **Caudal adecuado:** Al variar en distintas épocas y ser su captación constante, se debe derivar el caudal adecuado para evitar sobrecargas. Para ello se instalará un aliviadero capaz de derivar el agua cuando existan crecidas o lluvia abundante.

- **Turbulencia:** Las turbulencias se supondrán mínimas, al no existir cambios bruscos en su dirección. Estas se supondrán del 2%
- **Perdidas del salto:** Por medio de la búsqueda de un diámetro de tubería adecuado, se conseguirán minimizar estas pérdidas, que serán de aproximadamente el 8%.
- **Golpe de ariete:** Para soportar el golpe de ariete el espesor de la tubería deberá soportar grandes sobrepresiones y además se deberán evitar cierres bruscos de válvulas en la medida de lo posible.
- **Crecidas:** En caso de crecidas, debe existir un aliviadero capaz de derivar el caudal adecuado y además se deberán de hacer actividades de mantenimiento en toda la instalación, para así retirar el material que haya podido acarrear la crecida.

5.4.2 Captación de agua

La captación debe garantizar que el agua captada sea constante y en caso de ser superior en época húmeda y/o por crecidas en el río, poder derivarla por medio de aliviaderos. Además, no deberán poder ingresar materiales sólidos de tamaño considerable.

Se ubicará en un tramo recto y estable del río, con un comportamiento correcto de los suelos para que esta captación pueda asentarse de manera correcta y previniendo que una crecida pueda destruirla. En un caso real, esto debería ser analizado por un especialista en la materia.

Dependiendo del presupuesto previsto y de los materiales disponibles, esta deberá ser construida de madera u hormigón y deberá ser permanente. Su forma y diseño las debe diseñar un especialista y el método de construcción también.

Sus posibles distintas partes, dependiendo del diseño precisado, se deberán incluir o no. En la siguiente figura, se muestra una posible toma sencilla utilizada por EMAS en sus proyectos de microcentrales.

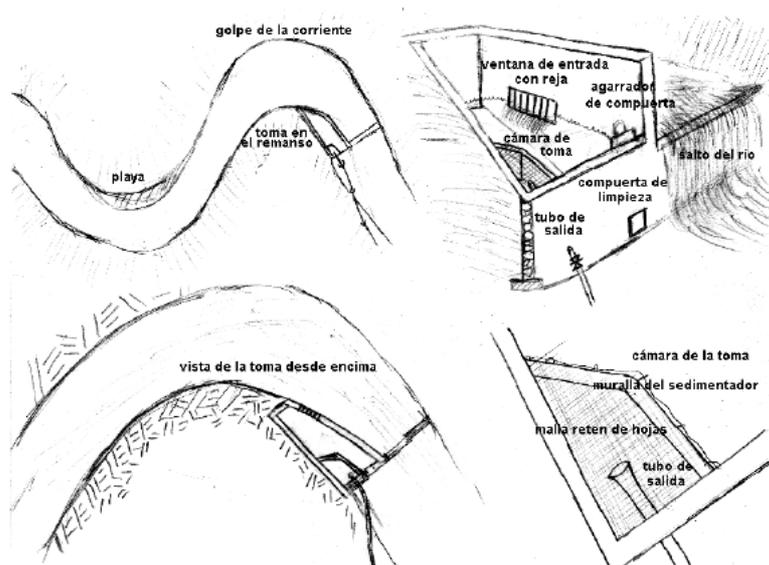


Figura 29. Planteamiento de captación para microcentral teórica basada en la de EMAS. (Buchner, 2005)



5.4.3 Aliviaderos

Se diseñará teniendo en cuenta tres características: Largo, altura y tipo de cresta (definida por un coeficiente de descarga). Es recomendable construir una superficie empedrada en su canal de desagüe.

Este se debe combinar con las compuertas de control para su desagüe. Para prevenir daños en épocas de avenidas, las compuertas deben estar situadas por encima del nivel de la avenida y distanciadas del río para permitir acceso a estas cuando esta crecido. Es conveniente tener más de un mecanismo para cortar el paso del agua al canal.

5.4.4 Cámara de carga

Debido a que este proyecto no tendrá un canal, no se precisará de desarenador y solamente se debe instalar por tanto una cámara de carga. Esta debe cumplir los siguientes criterios:

- Tener una longitud y ancho adecuados para que se depositen los sedimentos.
- Permitir la fácil eliminación de los depósitos.
- La eliminación de sedimentos a través de la compuerta instalada debe hacerse cuidadosamente para evitar la erosión del suelo. Es recomendable construir una superficie empedrada similar al canal de desagüe del aliviadero.
- Prevenir las turbulencias de agua, evitando cambios de agua o recodos. Debe de tener capacidad suficiente para acumular sedimentos.

5.4.5 Tubería de presión

La tubería de presión del proyecto, hay que seleccionarla siguiendo las siguientes pautas:

1. Considerar el material disponible y los tipos de uniones. También diámetros de tubería y espesores de pared disponibles.
2. Calcular pérdida de altura por fricción en distintos materiales y diámetros.
3. Calcular presión adicional por golpe de ariete en caso de cierre brusco del paso del agua y sumársela a la presión estática. Seleccionar el espesor de pared según los datos de los fabricantes y la sobrepresión calculada.
4. Diseñar soportes, anclajes y uniones para la tubería.
5. Preparar tabla de opciones calculando el costo de cada uno y ver si los componentes necesarios están disponibles.
6. Selección del diámetro tratando de obtener menor costo y menores pérdidas, en este caso de menos del 10%.

Uno de los mejores materiales en cuanto a calidad/precio es el PVC y por tanto, en la medida de lo posible debería seleccionarse este.

5.5 Turbina Banki y transmisión de potencia

En este apartado se presenta una parte del trabajo colaborativa con Unai Ayude, quien ha realizado a su vez un proyecto para EMAS de diseño de una turbina Banki (Ayude Prieto, 2018), tomando una microcentral hidroeléctricas de las mismas características que la del presente proyecto.

El diseño de esta turbina banki está enfocado a diseñar una turbina comercial, pero siempre hay que tener en cuenta los medios disponibles por las comunidades, ya que una de estas turbinas suelen ser de peores características que las comerciales por diseñarse con medios reducidos in situ.

Por lo tanto, este caso sería un planteamiento de turbina banki ideal, diseñada de una forma en la que funciona óptimamente y posteriormente simulada por Unai Ayude, consiguiendo así su rendimiento.

5.5.1 Requisitos principales

El requisito más importante para un montaje real es el de la sencillez en la fabricación. Las zonas donde se pretende implementar este tipo de turbinas no están industrializadas y por tanto no tienen los medios necesarios para implementar la opción ideal. El montaje constará de un eje biapoyado en dos rodamientos, de un rodete y de una polea dentada en al que se ubicará una correa para transmitir la potencia al generador.

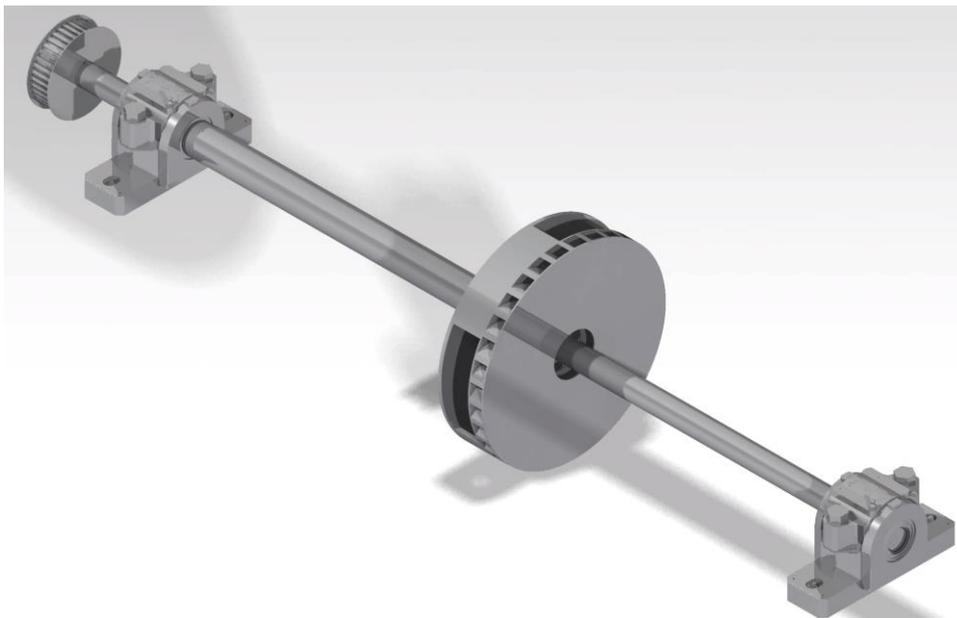


Figura 30. Turbina banki seleccionada con eje y rodamientos (Ayude Prieto, 2018)

Para el cálculo del rodete se ha utilizado la hoja de cálculo realizada por Unai Ayude (Ayude Prieto, 2018) que devuelve los parámetros necesarios para poder fabricar el rodete. Los datos de entrada en la hoja de cálculo han sido proporcionados por EMAS y en base a esos datos se ha realizado un montaje que asegure una vida útil lo suficientemente larga para los elementos que componen el montaje. Los datos iniciales y proporcionados por EMAS son los siguientes:

Tabla VII. Característica básica turbina banki para microcentral teórica.

Caudal	0.01m/s
Altura	60m
Velocidad de giro del generador habitualmente utilizado	1500r.p.m.
Velocidad recomendable del rodete	1000r.p.m.
Diámetro interior de los álabes del rodete	37mm

Como se ha mencionado antes es necesario encontrar la forma de que el rodete no se complicado de fabricar, por ello un dato de entrada es el diámetro de los álabes. La intención es la de aprovechar tubos que se encuentren en esas zonas en vías de desarrollo, para este montaje se usarán tubos de 37mm de diámetro interior. El resto del diseño se encuentra en su proyecto y en este se adjuntará un plano general extraído del suyo.

El rendimiento obtenido con esta turbina, fue del 80% según unas simulaciones realizadas por Unai, como se ha expuesto en el apartado de demanda eléctrica.

5.5.2 Justificación

La elección de esta turbina, se ha realizado atendiendo a diversos aspectos. Estos se podrían resumir en los siguientes puntos.

1. Al ser la más utilizada por EMAS en sus microcentrales y al haber obtenido información sobre los proyectos que ellos realizan, desde el principio se decidió realizar el proyecto con esta turbina.
2. Además de lo anterior, es una turbina de bajo costo y fácil construcción local.
3. Tiene una eficiencia algo inferior a alternativas de similares características, pero el rendimiento se mantiene en caso de existir variaciones de caudal.

En conclusión, aun pudiendo tener un rendimiento inferior a las turbinas más comercialmente usadas, esto es compensado con una sencillez en su fabricación de manera local y un bajo costo, afectando de manera positiva en el desarrollo socioeconómico de la comunidad rural y obteniéndose resultados notables.

5.6 Transmisión de la potencia mecánica y elementos mecánicos

Requisitos para el eje: como todos los ejes estará dimensionado a vida infinita, superando los criterios tensionales, de deformación y de vibraciones. Es necesario tener en cuenta que una parte del eje tendrá que ser roscada para fijar el rodete al eje. Además llevará un chavetero en el extremo que se encuentra en voladizo para mover solidariamente la polea dentada. El eje tendrá una pequeña parte de él mismo en voladizo para facilitar el recambio de las correas o cualquier tipo de incidencia con ella.

También será necesario tener en cuenta las concentraciones de tensiones producidas en los cambios de sección. Serán necesarias 3 cambios de sección, dos para introducir el eje en los rodamientos y otro para fijar el rodete. El esquema del eje sería el siguiente:

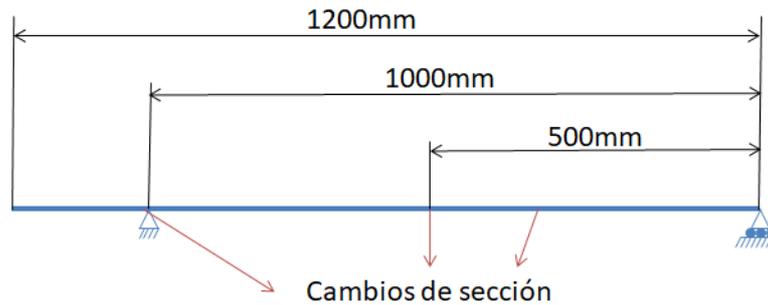


Figura 31. Esquemas del eje de la turbina microcentral teórica

Requisitos para los rodamientos: Los rodamientos irán en los apoyos indicados en la figura anterior, cabe destacar que el rodamiento de la derecha no soportará carga axial ya que el cambio de sección se produce antes del rodamiento el eje pudiendo moverse axialmente en ese punto.

Sin embargo el rodamiento de la izquierda sí que soportará carga axial, aunque en un funcionamiento normal no debería de existir ningún tipo de carga en ese sentido. Los rodamientos deben asegurar como mínimo una duración de al menos 2 meses (100 millones de ciclos) con una fiabilidad del 90%. Esta duración se ha estimado de 15 años al final.

Requisitos de la transmisión de potencia: en este tipo de turbinas lo habitual es usar una transmisión por correas dentadas o sincronizantes. Además la correa usada debe de poder encontrarse comercialmente, debe aguantar las cargas generadas en el eje. El generador necesita girar a 1500 r.p.m. y el eje del rodete girará a 1000 r.p.m. por lo que la relación de transmisión será de 1,5.

5.7 Generador síncrono

5.7.1 Generador síncrono monofásico

De cara a realizar la conversión de energía mecánica que viene de la turbina en eléctrica, se ha decidido utilizar un generador monofásico convencional de 5kW. El modelo seleccionado es el Generador ST-5, de la empresa China Mindong. Sus características eléctricas principales se recogen en la siguiente tabla:

Tabla VIII. Características generadores ST

Model	Output (kw)	Current(A)		Voltage(V)		Power factor (cos ϕ)	Pole number	Speed(r/min)	
		Series Connection	Parallel Connection	Series Connection	Parallel Connection			50Hz	60Hz
ST-2	2	8.7	17.4	230	115	1.0	4	1500	1800
ST-3	3	13	26	230	115	1.0	4	1500	1800
ST-5	5	21.8	43.5	230	115	1.0	4	1500	1800
ST-7.5	7.5	32.6	65.2	230	115	1.0	4	1500	1800
ST-10	10	43.5	87	230	115	1.0	4	1500	1800
ST-12	12	52.2	104	230	115	1.0	4	1500	1800
ST-15	15	65.3	130	230	115	1.0	4	1500	1800
ST-20	20	87	174	230	115	1.0	4	1500	1800
ST-24	24	104.4	208.8	230	115	1.0	4	1500	1800

Según el fabricante, este tipo de generadores están principalmente pensados para sistemas aislados de pequeña potencia, principalmente sistemas de iluminación o como generadores auxiliares de reserva. Los generadores son a prueba de goteo, con lo cual pueden aguantar posibles salpicaduras.

El generador es de campo rotativo y autoexcitado, no precisando por tanto de ningún sistema auxiliar de excitación para el generador. De esta manera, se tiene un generador de fácil operación y mantenimiento. El generador es monofásico con una tensión de 230 V a 50 Hz. El factor de potencia del generador es de 1 y por ello su potencia activa nominal es de 5 kW.

Pueden acoplarse directamente con una fuente de energía primaria o por medio de una transmisión de potencia mecánica, siendo este segundo caso el del proyecto. Por medio de este acoplamiento se consigue la rotación a la velocidad deseada con la turbina. En caso de cambiar la velocidad de rotación de la turbina un 3% o más o que la carga varíe, el generador tiene un sistema AVR que mantiene la tensión a la salida prácticamente constante, sin ser suficiente para conseguir una regulación de velocidad satisfactoria y un equilibrio en la generación.

La clase de aislamiento del estator y del rotor es B, teniendo las siguientes características cada una de las clases:

- Clase B: temperatura máxima de operación de 130°C. Materiales: vidrio, mica y pegado de resinas.
- Clase F: temperatura máxima de operación de 155°C. Materiales: elastómero de silicona, mica, vidrio, pegado de resinas de silicona.

Elección de un sistema monofásico

Un sistema monofásico, aun siendo menos sólido que uno trifásico, también puede presentar alguna ventaja respecto a este, pero posee más inconvenientes técnicos. Sus ventajas son las siguientes:

- El cableado y las protecciones son menos complejas que el trifásico.

- El control ELC es más sencillo y de menor coste.
- No se precisa de un generador de mayor carga que la carga máxima, por no existir la posibilidad de que haya desequilibrios entre cargas.

Elección de generador síncrono convencional

En la realización de este proyecto, se han observado dos opciones para el generador, siendo ambas síncronas e igualmente válidas: Generador síncrono convencional y generador síncrono de imanes permanentes. Los motivos por los cuales se ha seleccionado el convencional son los siguientes:

- Menor coste para generadores de similares características.
- Existencia de más generadores de 4 polos.
- Problemas de excitación solventados con el sistema autoexcitado.
- Las tierras raras no son materiales de sencilla obtención para reparaciones.

Elección de sistema de excitación autoexcitado

Dentro de los sistemas de excitación, las dos opciones más indicadas para este tipo de centrales aisladas son los generadores Brushless y los autoexcitados. La excitación independiente presenta problemas para poder comenzar a generar en un sistema aislado y la excitación por máquinas de corriente continua está en desuso debido a los problemas que acarrea.

Visto esto, la elección del autoexcitado frente al brushless se ha realizado por tener un coste inferior. Un generador brushless, es la mejor opción para estos sistemas de generación, pero el generador autoexcitado seleccionado, cumple con las necesidades y tiene un coste inferior. Además, al incluir un control AVR, su funcionamiento mejora en ese sentido.

5.7.2 Generador síncrono trifásico

Para realizar la conversión de energía mecánica que viene de la turbina en eléctrica, se ha decidido utilizar un generador síncrono trifásico convencional de 6,3 kVA. El modelo seleccionado es el Generador STC-5, de la empresa China Mindong. Sus características eléctricas principales se recogen en la siguiente tabla:

Tabla IX. Características generador STC

Model	Output KVA	Output KW	Voltage(V)	Current(A)	Power factor (cos ϕ)	Speed(r/min)	Pole number	Volt.Reg.
STC-3	3.8	3.0	400	5.4	0.8	1500	4	$\pm 7\%$
STC-5	6.3	5.0	400	9	0.8	1500	4	$\pm 7\%$
STC-7.5	9.4	7.5	400	13.5	0.8	1500	4	$\pm 7\%$
STC-10	12.5	10	400	18.1	0.8	1500	4	$\pm 7\%$
STC-12	15	12	400	21.7	0.8	1500	4	$\pm 7\%$
STC-15	18.8	15	400	27.1	0.8	1500	4	$\pm 7\%$
STC-20	25	20	400	36.1	0.8	1500	4	$\pm 7\%$
STC-24	30	24	400	43.3	0.8	1500	4	$\pm 7\%$
STC-30	37.5	30	400	54.1	0.8	1500	4	$\pm 7\%$
STC-40	50	40	400	72.2	0.8	1500	4	$\pm 7\%$
STC-50	62.5	50	400	90.2	0.8	1500	4	$\pm 7\%$

Según el fabricante, este tipo de generadores están principalmente pensados para sistemas aislados de pequeña potencia, principalmente sistemas de iluminación o como generadores auxiliares de reserva. Los generadores son a prueba de goteo, con lo cual pueden aguantar posibles salpicaduras.

El generador es de campo rotativo y autoexcitado, no precisando por tanto de ningún sistema auxiliar de excitación para el generador. De esta manera, se tiene un generador de fácil operación y mantenimiento.

El generador es trifásico a cuatro hilos, teniendo una conexión en estrella con punto neutro. En este sistema, su tensión de línea es de 400V y su tensión de fase de 230V a 50Hz. El factor de potencia del generador es de 0,8 y por ello su potencia activa nominal es de 5kW.

Pueden acoplarse directamente con una fuente de energía primaria o por medio de una transmisión de potencia mecánica, siendo este segundo caso el del proyecto. Por medio de este acoplamiento se consigue la rotación a la velocidad deseada con la turbina. En caso de cambiar la velocidad de rotación de la turbina un 3% o más o que la carga varíe, el generador tiene un sistema AVR que mantiene la tensión a la salida prácticamente constante, sin ser suficiente para conseguir una regulación de velocidad satisfactoria y un equilibrio en la generación. La clase de aislamiento del estator es F y la del rotor es B.

Como ya se ve, este generador es el mismo modelo que el anterior, generando en trifásica. Por tanto, los motivos por los que se ha seleccionado atendiendo al tipo de generador y su sistema de excitación, son los mismos que para el anterior. En cambio, al ser trifásico se explicarán las ventajas de estos generadores.

Elección de un sistema trifásico

Ventajas del sistema trifásico

- Es el método más simple y económico de producir energía eléctrica, siendo su transporte más liviano. El alternador tiene el 75% del peso y el conductor el 87% del equivalente monofásico.
- Método más simple y económico de consumo. (5% de pérdidas en la conducción como máximo, un 2% más eficientes que el monofásico equivalente).
- Generadores eléctricos más simples, menos pesados y más eficientes.
- Menores corrientes por cada cable y elementos de protección más reducidos

Inconvenientes del sistema trifásico

- Cableado y protecciones más complejos que el monofásico.
- Control ELC más complejo y costoso.
- Necesidad de un generador de mayor carga que la carga máxima, por posibilidad de existir desequilibrios entre cargas.

Vistas las ventajas e inconvenientes, se puede optar por utilizar un sistema trifásico por los siguientes puntos clave:

1. Aun precisando de tres veces el cableado y las protecciones, los valores de corriente por cada cable son muy inferiores, pudiendo tener estos menor sección y utilizando así protecciones con valores nominales muy inferiores.
2. En caso de existir problemas de funcionamiento en alguna de las fases aguas abajo del suministro, no se quedará toda la comunidad sin electricidad y solamente se activarán las protecciones de esa fase.
3. Los generadores son más ligeros, menos pesados y más eficientes que el equivalente monofásico, teniendo precios similares.
4. Aun con la posibilidad de existir desequilibrios entre cargas, por medio del control electrónico de carga se evitan estos.

Simulación en Matlab

En este apartado, se propuso realizar una simulación en Matlab del generador trifásico con el control ELC que tiene un rectificador de potencia. No pudo ser posible realizarlo, pero por medio de una simulación del generador idealmente y sin control, se pudieron deducir comportamientos del generador en caso de que el consumo y la generación no estuvieran equilibrados. El esquema de Matlab es el siguiente:

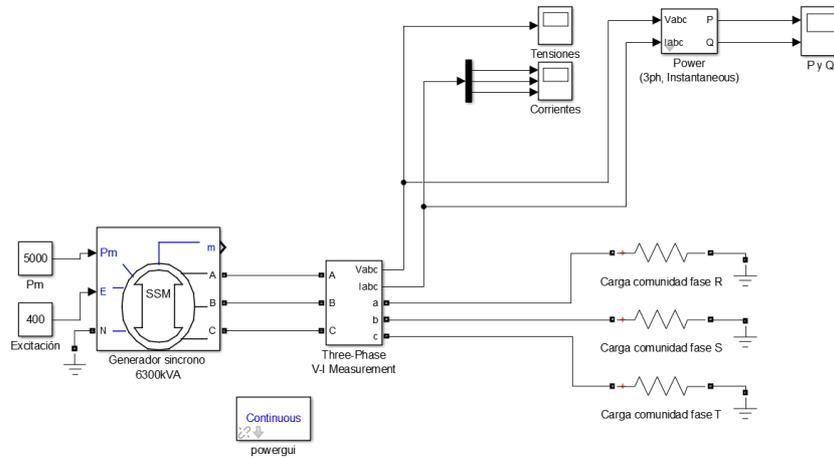


Figura 32. Generador síncrono trifásico ideal en Matlab

Introduciendo los datos más básicos del anterior generador y suponiendo una carga con fdp la unidad, se pudo medir el comportamiento de las intensidades, el voltaje y la corriente.

Introduciéndole como potencia mecánica 5000 W (Suponiendo que existen pérdidas desde la turbina que la reducen de 6000 W a 5000 W aproximadamente) y una excitación constante de 400 V (simulando un AVR muy simplificado) que consiguiera 230 V a la salida, se realizaron varias medidas con distintas cargas. En las siguientes tablas se muestra los valores de tensión e intensidad obtenidos en varios casos:

Tabla X. Resultados ensayo generador teórico en MATLAB

Caso	R_R (kW)	R_S (kW)	R_T (kW)	V_{abc} (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	I_3 (A)	P (kW)	Q (kvar)
1	1,66	1,66	1,66	230	7,2 A	7,2 A	7,2 A	5,0	0
2	1,00	1,00	1,00	230	4,3 A	4,3 A	4,3 A	3,0	0
3	1,66	0,40	1,00	230	7,1 A	1,7 A	4,3 A	2,0-4,0	$\pm 1,0$

El voltaje, se mantiene en todo momento constante a 230 V en esta simulación, debido al control AVR que se está simulando. En el osciloscopio se observan las siguientes tensiones, cuyos valores eficaces son los mostrados en la anterior tabla:

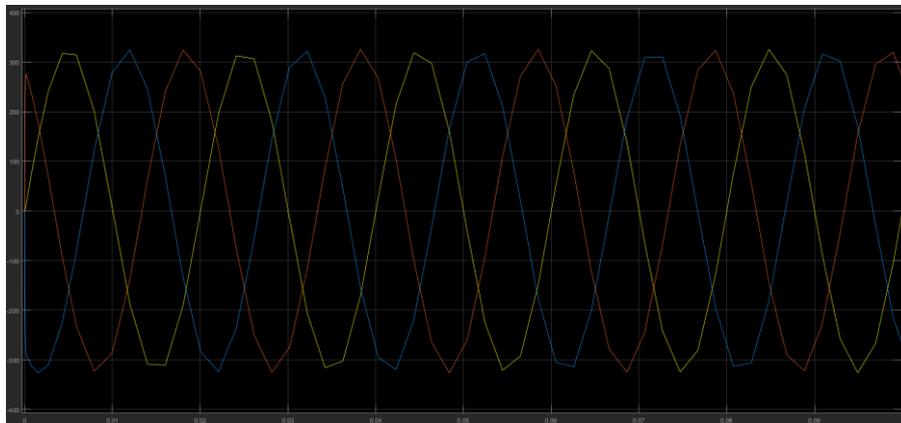


Figura 33. Gráfica de tensión obtenida en simulación de MATLAB

En cuanto a las intensidades, en las siguientes graficas se pueden observar sus valores

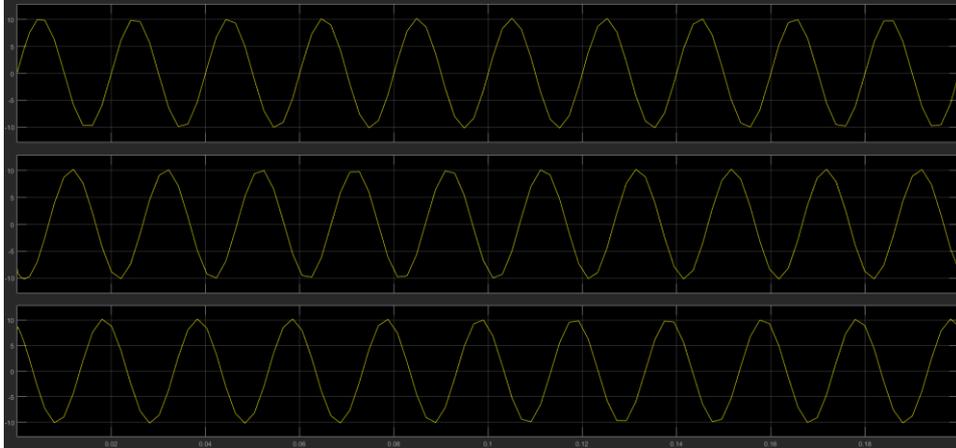


Figura 34. Gráfica de intensidad MATLAB caso 1

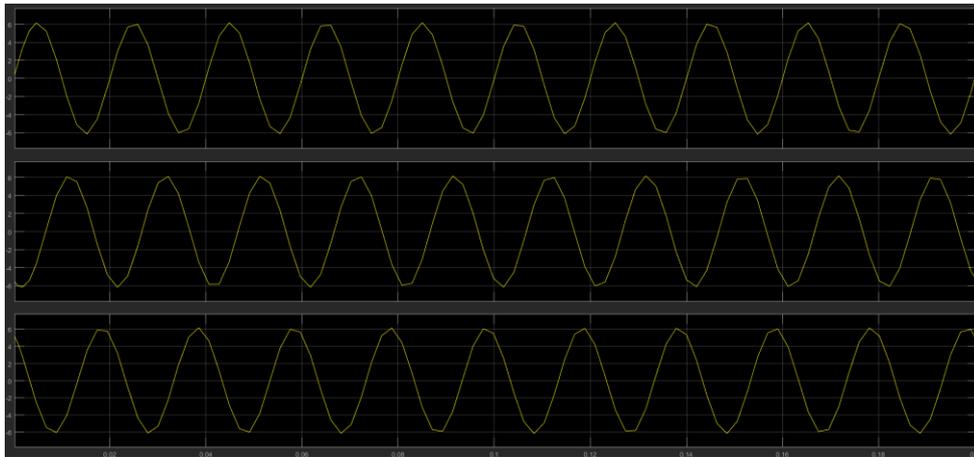


Figura 35. Gráfica de intensidad MATLAB caso 2

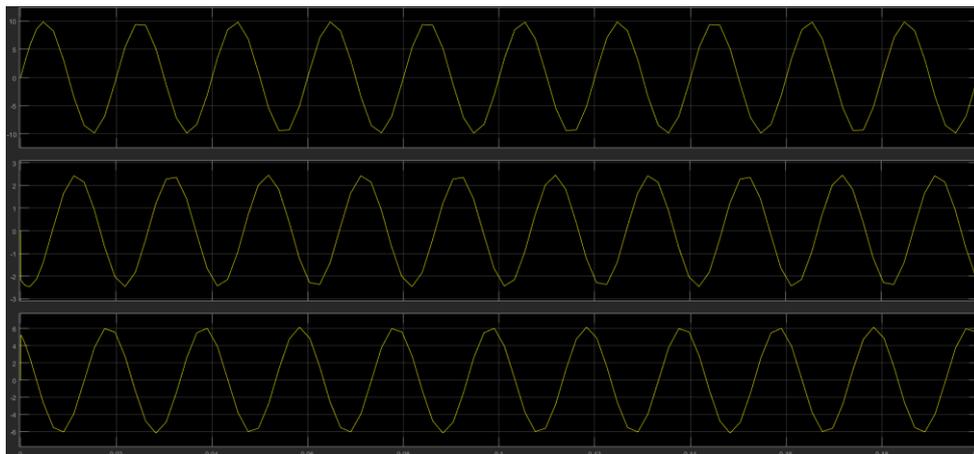


Figura 36. Gráfica de intensidad MATLAB caso 3

Se observa como disminuyen conforme la potencia de la carga disminuye. Por ese motivo, su control debe ser importante para controlar la microcentral.

Las potencias, se mantienen continuas en caso de no existir desequilibrios en la carga, siendo la reactiva prácticamente inexistente. Conforme aumenta el desequilibrio, también se desequilibran las potencias y aparece potencia reactiva.

Así pues, cuando la potencia de las cargas es la nominal, la potencia es idealmente igual a la mecánica y la reactiva es del orden de 10^{-13} , prácticamente inexistente. En cambio, cuando hay desequilibrio la potencia varia. En el tercer supuesto, aparece una potencia reactiva oscilante de ± 1000 var.

Esto se puede observar en las siguientes graficas:

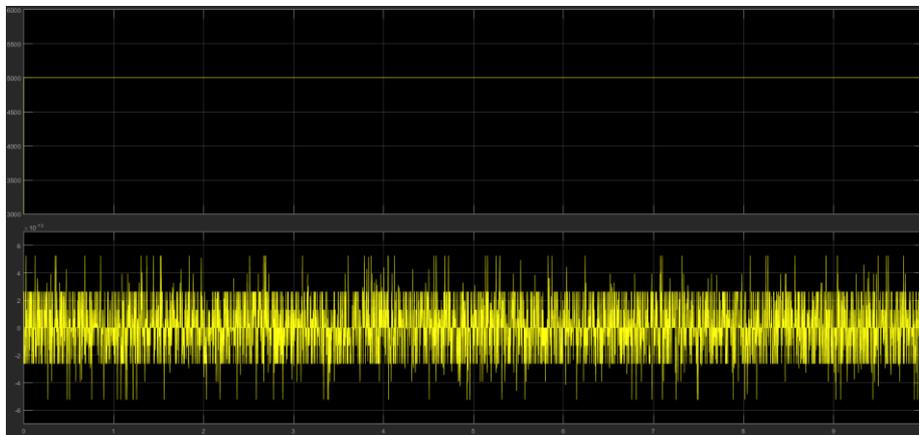


Figura 37. Gráfica de potencias MATLAB caso 1

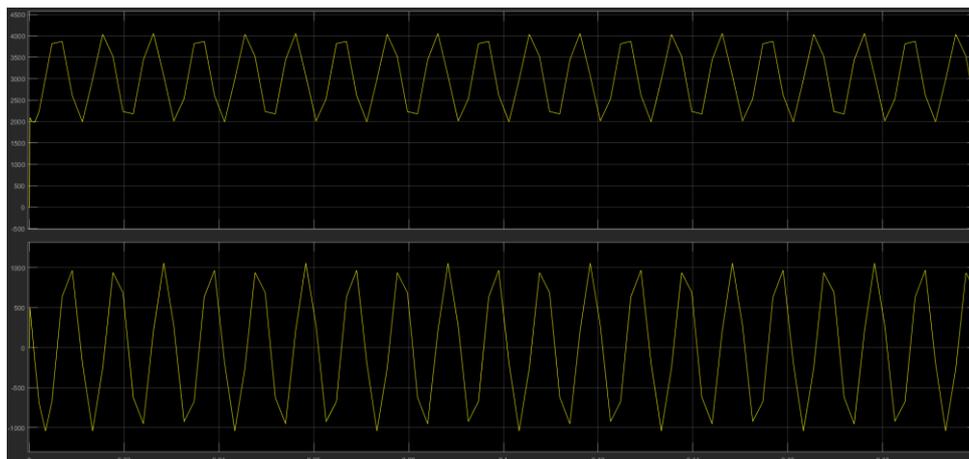


Figura 38. Gráfica de potencias MATLAB caso 3

Debido a que la frecuencia está fijada en 50 Hz en la simulación, no se ven cambios en esta, pero debido al desequilibrio de generación y consumo, esta aumenta o disminuye en la realidad. Cuando la demanda es mayor que la generación disminuye la frecuencia y cuando la generación sube por encima de la demanda, aumenta la frecuencia.

5.8 ELC monofásico

5.8.1 Diseño básico

El sistema propuesto para el control de la microcentral hidroeléctrica es un ELC regulado por PWM que controla la carga secundaria conectada al generador de 5 kW. Con este control se pretende conseguir que la energía generada no requerida por la carga principal se disipe en la secundaria.

Para calcular el duty cycle que se le va a enviar al conmutador (en este caso un IGBT), se mide la tensión, la corriente y la frecuencia por medio de circuitos electrónicos. Con el control de estas variables, se consigue disparar el IGBT de forma que la energía disipada sea la correcta. Este diseño básico se puede observar en la siguiente figura.

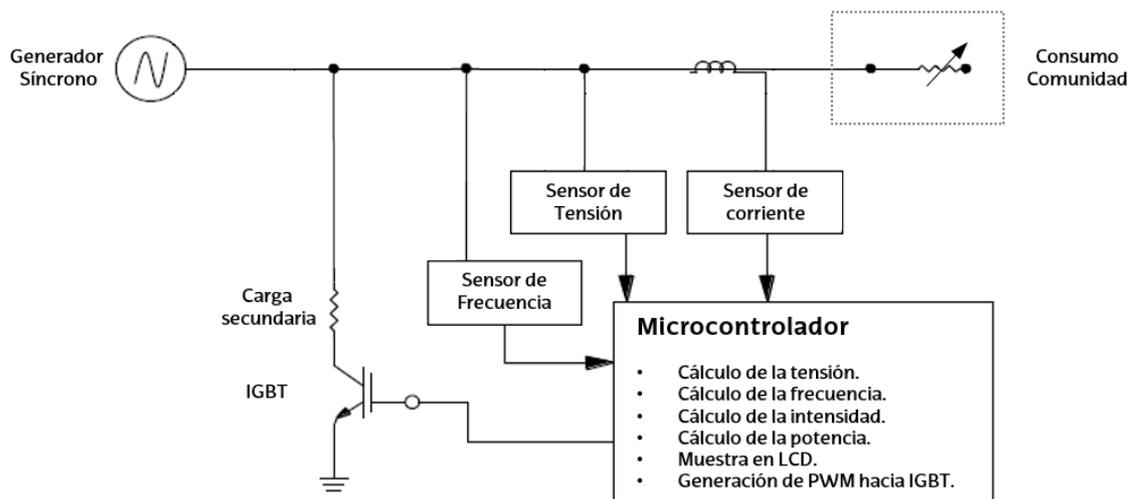


Figura 39. Esquema simplificado de ELC monofásico

Cada una de las variables medidas se utiliza con distintos propósitos. La tensión se mide para poder observar en un display su correcto funcionamiento y conociendo el valor de la frecuencia y la intensidad, se puede controlar el disparo de la puerta del IGBT.

5.8.2 Determinación de la carga secundaria

El diseño de la carga secundaria está basado en el requerimiento de que, si todas las cargas principales están desconectadas, esta carga debe de ser capaz de consumir toda la potencia generada. En estas condiciones, el IGBT debe estar totalmente en conducción, con un duty cycle del 100%. Por medio de unos sencillos cálculos, se puede conocer la resistencia precisada y su potencia.

$$P_n = U_n \cdot I_n = \frac{U_n^2}{R_s} \rightarrow R_s = \frac{U_n^2}{P_n}$$

Donde:

Un = Tensión nominal del generador (V)

In = Corriente nominal del generador (A)

Rs = Carga secundaria (Ω)

$$R_s = \frac{230^2}{5000} = 10,6 \Omega$$

Por tanto, la carga secundaria será de aproximadamente $10,6\Omega$ y al menos $5000W$. En caso de querer aprovechar el calor generado en esta resistencia, se podría utilizar un resistor de inmersión como calentador de agua. Como no es objeto de análisis de este proyecto, se disipará en varias resistencias de las cuales se obtiene una equivalente de aproximadamente $10,6 \Omega$.

5.8.3 Sistema de control de intensidad

Para controlar la intensidad que llega a la carga secundaria, se aplica un control proporcional que controla la corriente que llega a la carga principal y la frecuencia y actúa en lazo cerrado, generando una PWM distinta dependiendo de su valor.

La intensidad se controla suponiendo que al disminuir la energía requerida por la carga principal, la tensión en las cargas tiende a aumentar, reduciéndose así la corriente. Aun existiendo en el generador un control AVR que reduce las variaciones de voltaje, la línea se verá afectada por este fenómeno y por tanto será necesario controlarlo. La ecuación utilizada para ello es la siguiente:

$$k_1 = (I/I_n)$$

Si I es la corriente medida en cada momento e I_n la nominal del generador, conforme la intensidad medida disminuya, k_1 disminuirá de manera proporcional, consiguiendo que el circuito de disparo del IGBT disminuya su duty cycle y así consiguiendo a la salida del IGBT un duty cycle mayor. Este control, podría ser mejorable con un control integral añadido, pero para valores de potencia reducidos el control P es suficiente si además se controla la frecuencia.

En el caso de la frecuencia, también existe un control proporcional que servirá para ajustar posibles faltas de linealidad en el control de la intensidad. El efecto de la frecuencia en el motor síncrono, se puede explicar por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e)$$

Donde:

dw/dt: Derivada respecto del tiempo de la velocidad angular.

f: Frecuencia de la máquina.

H: Constantes de la máquina.

P_m: Potencia mecánica en el rotor.

P_e: Potencia eléctrica demandada.

La conclusión que puede sacarse de esta ecuación es que la frecuencia, en caso de que el generador genere una potencia mayor (P_m) a la requerida por la carga (P_e), aumenta en caso de que la velocidad de giro se mantenga. Por tanto, ese aumento se debe traducir en un aumento del duty cycle y en consecuencia de la potencia disipada. El control realizado con la frecuencia, se puede expresar por medio de la siguiente ecuación:

$$k_f = (f_n / f)$$

En esta, f es la frecuencia medida y f_n la nominal y se puede observar como conforme aumente la frecuencia medida, el valor k_f disminuirá, disminuyendo así el duty cycle del circuito disparador y aumentando así el del IGBT. Combinando esta ecuación y la anterior, se tiene un duty cycle que se define como:

$$OCR4A = k_1 \cdot k_f = (I / I_n) \cdot (f_n / f)$$

En el proyecto actual, I_n se define con un valor de 21,8 A y f_n de 50 Hz. En cuanto a la intensidad, en un proyecto real debería calibrarse teniendo en cuenta las pérdidas reales, pero siempre dejando un pequeño margen para que no pueda ser superado.

En caso de superarse, el control se volvería inestable. Por otra parte, cuanto más cercana a la real sea esa intensidad máxima que se genera, más preciso será el control de intensidad. En caso de no ser tan preciso, el control de frecuencia está pensado para que ejerza un ajuste más fino de la potencia disipada.

5.8.4 Configuración inicial en Arduino

Para este proyecto se ha seleccionado una placa Arduino Mega 2560, cuyo microcontrolador es un ATmega2560. Se ha seleccionado por su buena relación calidad precio y por tener unas características más que suficientes para realizar el control precisado.

Además, al ser una compañía de hardware y software libre enfocado en facilitar el uso de la electrónica y programación de sistemas, va en consonancia con el desarrollo de un proyecto enfocado al desarrollo sostenible.

En este apartado se explican sus características y las configuraciones previas del control ELC programadas en el microcontrolador.

Características y modelo de Arduino Mega

Arduino Mega es una tarjeta de desarrollo open-source construida con un microcontrolador modelo Atmega2560 que posee pines de entradas y salidas (E/S), analógicas y digitales. Esta tarjeta es programada en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje Processing/Wiring. Arduino puede utilizarse en el desarrollo de objetos interactivos autónomos o puede comunicarse a un PC a través del puerto serial (conversión con USB) utilizando lenguajes como Flash, Processing, MaxMSP, etc.

El Arduino Mega tiene 54 pines de entradas/salidas digitales (14 de las cuales pueden ser utilizadas como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serial por hardware), cristal oscilador de 16MHz, conexión USB, jack de alimentación, conector ICSP y botón de

reset. Esta nueva versión de Arduino Mega 2560 adicionalmente a todas las características de su sucesor utiliza un microcontrolador ATmega8U2 en vez del circuito integrado FTDI.

Características:

- Microcontrolador ATmega2560.
- Voltaje de entrada de 5-12V.
- 54 pines digitales de Entrada/Salida (14 salidas PWM).
- 256k de memoria flash y 16 bits de CPU Speed.
- 16 entradas análogas.
- 5 timers (4 de 16bits y 1 de 8bits)

Definición de variables y setup

Dentro del programa diseñado en Arduino.cc, lo primero que se realiza es adición de librerías del LCD y la definición de los pines con sus parámetros de entrada, con el nombre de sus pines en el caso del LCD y con su función de salida en el caso del PWM. El código para ello es el siguiente:

```
//***** ADICIÓN DE LIBRERÍAS PARA LCD *****  
  
#include <LiquidCrystal.h>  
  
//***** DEFINICIÓN DE PINES *****  
  
#define rs 8  
#define en 9  
#define D4 4  
#define D5 5  
#define D6 6  
#define D7 7 //Pines de conexión del LCD  
  
#define freq 47 //Pin de entrada para la lectura de la frecuencia  
#define PWM_Pin 2 //Pin de salida del PWM  
  
#define V A1 //Pin de entrada para la lectura de Vr  
  
#define I A4 //Pin de entrada para la lectura de I1  
  
LiquidCrystal lcd(rs, en, D4, D5, D6, D7); //Inicialización de la librería para el LCD
```

Figura 40. Código ELC caso monofásico, definición de pines

Tras esto, se definen las variables que se utilizan durante el programa:

```

//***** DEFINICIÓN DE VARIABLES *****

double AcsOffset=2.27;           //Offset del sensor de corriente
double Sensibl=0.088;          //Sensibilidad del sensor de corriente
double I1;                       //Valor de la corriente
double In=21.8;                 //Valor de la corriente nominal

volatile unsigned int cont_t=0; //Contador para el calculo de la frecuencia
volatile unsigned int f;        //Valor de la frecuencia medida
double fn = 50;                 //Valor de la frecuencia nominal
double kf;                       //Control P de la frecuencia

int V1;                          //Valor de la tensión

double W1;                       //Valor de la potencia activa

double k1;                       //Valor del control de la corriente
  
```

Figura 41. Código ELC caso monofásico, definición de variables

Las variables definidas con double, utilizan 4 bytes del ATMEGA, siendo más precisas, pudiendo mostrar varios decimales. Por otro lado, las definidas como int utilizan 2 bytes y solo mostraran valores sin decimales. Cada una de las variables, están explicadas a su derecha en la programación.

Ya dentro del setup, se definen los distintos pines como entradas o salidas:

```

void setup() {

//***** DEFINICION DE PINES COMO IN/OUT *****

pinMode (D4, OUTPUT); pinMode (D5, OUTPUT);pinMode (D6, OUTPUT);pinMode (D7, OUTPUT);
pinMode (rs, OUTPUT);pinMode (en, OUTPUT);

pinMode (V, INPUT);

pinMode (I, INPUT);

pinMode (PWM_Pin, OUTPUT);
pinMode (frec, INPUT);
  
```

Figura 42. Código ELC caso monofásico, definición de pines como entradas y salidas

Tras esto, dentro del setup se definen los temporizadores utilizados y el mensaje inicial del LCD, los cuales se explican en apartados siguientes.

Configuración de temporizador como fuente de interrupción

Para poder realizar las medidas sin que interfieran entre ellas, es preciso programar una interrupción en el arduino. A un nivel básico, una interrupción es una señal que interrumpe la ejecución normal del microprocesador, y salta a ejecutar una función especial denominada Interrupt Service Handler o ISH (Servicio de gestión de interrupción). Cuando el ISH finaliza, el procesador vuelve a su ejecución normal.

En el proyecto actual, se programa una interrupción con un timer que salta cada 2 ms para realizar medidas y cálculos y después retomar el loop principal. De esta forma, el microprocesador dispone de un tiempo para realizar las medidas y los cálculos y así permitirle recibir y procesar las señales que recibe.

Si bien el lenguaje de alto nivel desarrollado para la programación de los entornos de desarrollo Arduino dispone de varias funciones para el manejo de tiempos, en este proyecto se ha optado por programar a bajo nivel los temporizadores (tanto para la interrupción como para la generación de la señal PWM). Si bien esto complejiza un poco el programa, se aprovecha toda la potencia de programas estos periféricos accediendo directamente a sus registros asociados en el microcontrolador.

El funcionamiento de los temporizadores así como del significado y utilidad de sus modos de funcionamiento y registros se ha estudiado a partir de los datasheets del fabricante del microcontrolador. En concreto el ATMEGA 2560 del fabricante ATMEL.

El microprocesador utilizado posee 5 temporizadores, utilizándose para esta función el 4. La línea de código para utilizar este temporizador como una interrupción es la siguiente:

```

//***** CONFIGURACION DEL TIMER 4 COMO FUENTE DE INTERRUPCION *****

TCCR4A=B00000000; //WGM41=0 y WGM40=0
TCCR4B=B00001001; //001-1 010-8 011-64 100-256 101-1024
OCR4A=16000-1; //T=(1/Fosc)*2*PS*(1+OCR4A) -----> CONFIGURADO A 2ms
TIMSK4=B00000010;
  
```

Figura 43. Código ELC caso monofásico, configuración timer 4 como interrupción

El modo de funcionamiento de este timer está configurado como CTC, que es el que realiza la función de la interrupción. Los distintos bits que se han definido, vienen explicados en el manual de usuario del microcontrolador ATMEL2560.

La ecuación utilizada para configurar el tiempo de la interrupción en OCR4A es la siguiente:

$$T = \frac{1}{f_{osc}} \cdot 2 \cdot PS \cdot TCNT$$

$$TCNT = (1 + OCR4A)$$

Donde:

f_{osc} = Frecuencia de oscilación del microcontrolador = 16×10^6 Hz

PS = Pre Scaler = 1 (Definido por los últimos bits de TCCR4B)

OCR4A = 15999

Con lo que se obtiene:

$$T = \frac{1}{16 \cdot 10^6} \cdot 2 \cdot 1 \cdot 16000 = 0,002 \text{ s} = 2 \text{ ms}$$

Por tanto, esta interrupción salta cada 2 ms, consiguiendo que se interrumpa el loop de arduino para realizar los cálculos precisados.

Configuración de temporizador como contador para la frecuencia

Para esta función, se utiliza el temporizador 5. El código para esta configuración es el siguiente:

```

//***** CONFIGURACION DEL TIMER 5 COMO CONTADOR DE FRECUENCIA (pin 47) *****
TCCR5A = B00000000; //Modo Normal sin pines de salida
TCCR5B = B01000111; //Modo contador con flanco de subida en T5
TCNT5 = 0;
  
```

Figura 44. Código ELC caso monofásico, configuración timer 5 como contador de frecuencia

En este caso, el modo configurado es el modo normal de funcionamiento como contador. En este modo, se ha programado además que se active TCNT5 y cuente cada vez que exista un flanco de subida en el timer 5.

Así se pretende que cada 1000 interrupciones del timer 4 se compruebe el valor del timer 5, conectado al circuito de control de la frecuencia a través del pin 47, del que se obtendrán los flancos para conocer la frecuencia en la red.

Estos valores se almacenan en TCNT5 y después se comprueban para realizar el cálculo de la frecuencia, comparándolos las interrupciones que ha habido.

Configuración del temporizador para el PWM

Por último, se utiliza un último timer, que en este caso es el 3, para la generación del PWM con salida en el pin 2 de la placa. El código para esta configuración es el siguiente:

```

//***** CONFIGURACION DEL TIMER 3 COMO GENERADOR DE PWM (pin 4) *****
TCCR3A = B00100010; //phase and frequency correction pwm
TCCR3B = B00010010; //PS=8
ICR3 = 200; //Periodo de la PWM en us ----> CONFIGURADO A 5000Hz
OCR3B = 0; //Duty Cycle inicial
  
```

Figura 45. Código ELC caso monofásico, configuración timer 3 para PWM

Está definido como un PWM de corrección de fase y frecuencia, con un periodo de PWM de 2 ms (5000Hz). La ecuación que lo define es la siguiente:

$$T = \frac{1}{f_{osc}} \cdot 2 \cdot PS \cdot ICR3$$

Donde:

f_{osc} = Frecuencia de oscilación del microcontrolador = 16×10^6 Hz

PS = Pre Scaler = 8 (Definido por los últimos bits de TCCR3B)

ICR3 = 200

Con lo que se obtiene:

$$T = \frac{1}{16 \cdot 10^6} \cdot 2 \cdot 8 \cdot 200 = 0,002 \text{ s} = 2 \text{ ms}$$

Por tanto, ese es el valor máximo que se tiene en OCR3B para el PWM que es igual al valor de un duty cycle del IGBT de valor unidad.

5.8.5 Diseño de la unidad de control

En este apartado se presentan todos los circuitos utilizados para el control del ELC. Los cálculos menos relevantes de estos se han presentado en el apartado de cálculos de este documento.

Fuente de tensión estabilizada

En primer lugar, para poder alimentar los componentes electrónicos que precisen de alimentación y el microcontrolador, es necesario realizar el montaje de una fuente de tensión estabilizada. Dadas las bajas potencias y consumos de los circuitos de control, se ha optado por un sencillo regulador lineal.

El circuito, está compuesto a su entrada por un transformador 230/12 V, al cual le llega la tensión de fase del generador, que es de 230 V. Tras transformarse la tensión, se tiene un rectificador monofásico en puente que convierte la tensión alterna en unidireccional. Esta tensión unidireccional se filtra con un filtro de condensador de 180 μF , reduciendo así su rizado y consiguiendo de esta forma una tensión que, si bien presenta todavía un cierto rizado, garantiza los valores de tensión mínimos requeridos por el estabilizador lineal.

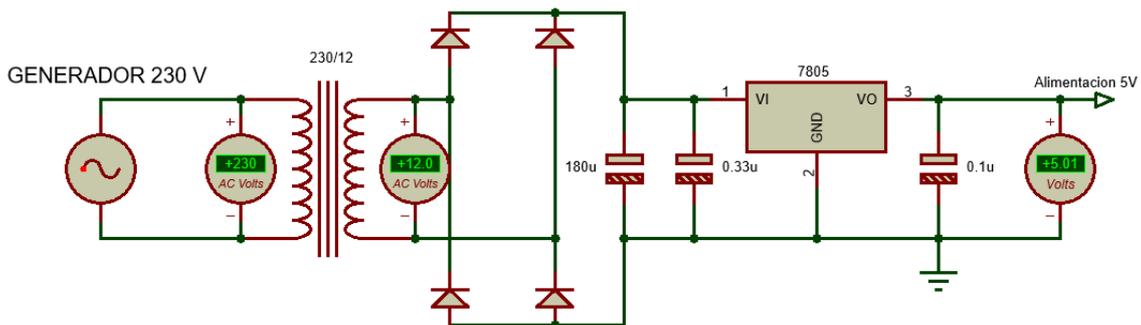


Figura 46. Fuentes de tensión equilibrada ELC caso monofásico

Tras el filtro, se tiene un regulador de voltaje LM7805 que tiene la capacidad de regular voltaje positivo de 5 V a 1 A. Los condensadores de 0,33 y 0,1 μF son los recomendados por el fabricante. Por lo tanto, podrá entregar un voltaje de 5 V a cargas que no superen en total 1 A. Es recomendable que para su correcto funcionamiento el capacitor a la entrada sea tres veces mayor que el de la salida y por ello este último es de 100 μF .

Los componentes seleccionados para el circuito se recogen en la siguiente tabla:

Tabla XI. Componentes necesarios fuente de alimentación ELC monofásico

Componente	Fabricante	Función	Cantidad
Transformador de PCB 44328	Myrra	Transformador 230/12	1
Diodo 1N4001	Vishai	Rectificador en puente	4
Condensador electrolítico de aluminio 860010675017 de 180 μ F	Würth Elektronik	Filtro de entrada	1
Condensador electrolítico de aluminio 860010672003 de 330 nF	Würth Elektronik	Filtro de entrada del fabricante	1
LM7805	On Semiconductor	Regulación de voltaje	1
Condensador electrolítico de aluminio 860010672001 de 100 nF	Würth Elektronik	Filtro de salida del fabricante	1

Configuración LCD

Para poder mostrar las medidas obtenidas por el control y así observar su correcto funcionamiento, se utiliza un LCD de dos líneas por 16 caracteres (2X16) compatible con Arduino. Este está configurado según se mostraba en el código y su conexión por tanto es la siguiente:

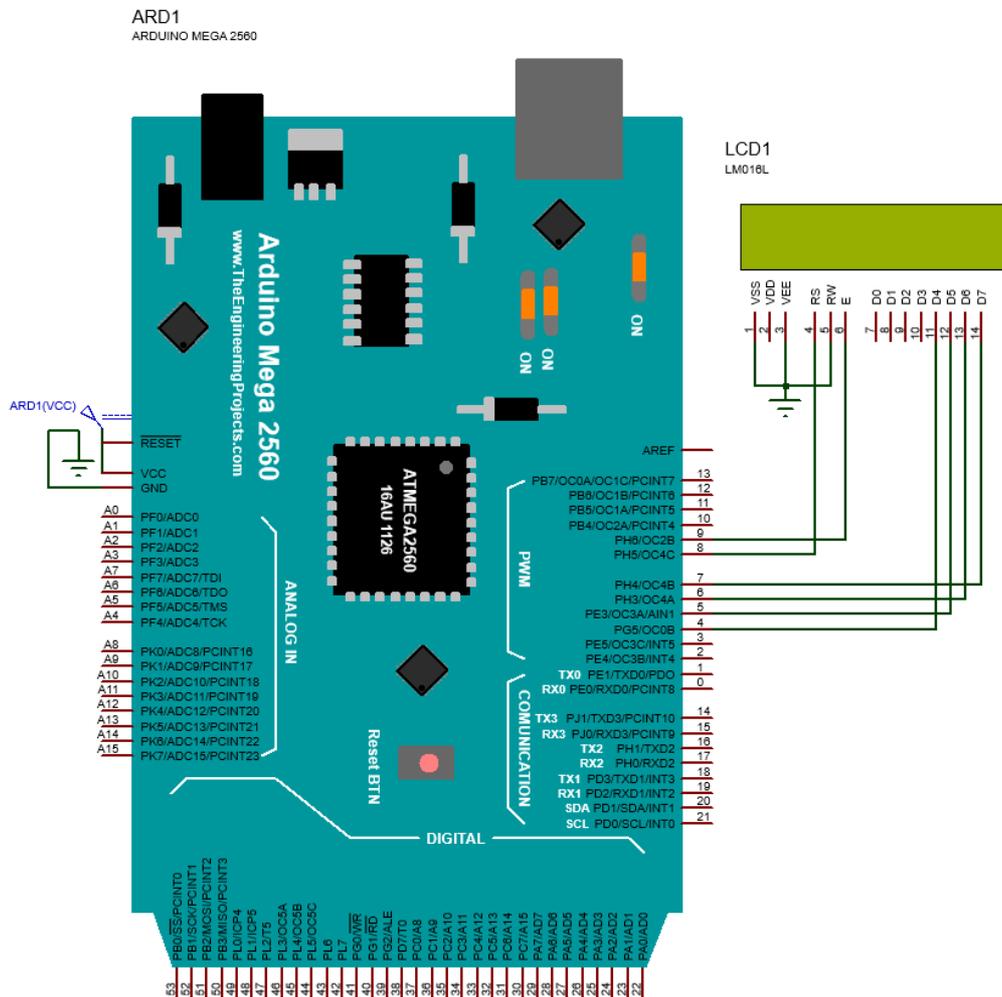


Figura 47. Arduino Mega 2560 simulado en proteus con conexión a LCD en ELC caso monofásico

En primer lugar, dentro del setup del programa, se debe mostrar el texto fijo de cada variable con sus unidades:

```
//***** MENSAJE INICIAL DE LA LCD *****

lcd.begin(16,2);
lcd.setCursor(0,0);lcd.print("v1:");
lcd.setCursor(6,0);lcd.print("V");

lcd.setCursor(8,0);lcd.print("I1:");
lcd.setCursor(15,0);lcd.print("A");

lcd.setCursor(0,1);lcd.print("P:");
lcd.setCursor(5,1);lcd.print("kW");

lcd.setCursor(8,1);lcd.print("f:");
lcd.setCursor(14,1);lcd.print("Hz");
}
```

Figura 48. Código ELC caso monofásico, mensaje inicial LCD

En esta línea de código, se posiciona el cursor del LCD para mostrar un texto fijo en el que se organizan las distintas variables del circuito. El LCD seleccionado es el siguiente:

Medición de la tensión

Para medir la tensión de la red y así poder comprobar el correcto funcionamiento del sistema, se utiliza un circuito compuesto por un transformador 230/12 V, un rectificador en puente y un circuito regulador de tensión con un diodo zener. Este se muestra en la siguiente figura.

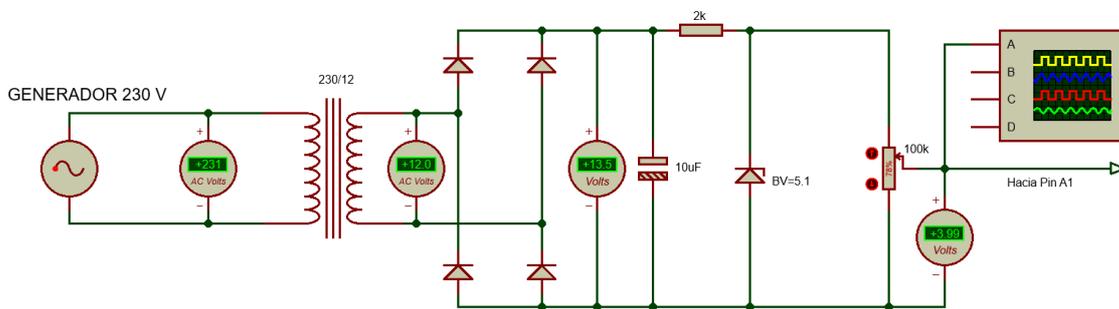


Figura 49. Circuito medidor de tensión caso monofásico

Con el transformador se reduce la tensión a valores asumibles por el circuito, después se rectifica con un puente de diodos, consiguiendo una tensión unidireccional y prácticamente continua. A esta tensión se le reduce el rizado con un filtro de 100 µF, de forma que prácticamente es continua y consiguiendo que el zener este siempre alimentado a la intensidad requerida.

Tras esto, se ajustan los valores de tensión por medio de un resistor de 2 kΩ y un potenciómetro de 10k de forma que a la salida se obtengan 4 V si la tensión a la entrada es de 230 V. En el caso de la simulación, se obtienen esos valores cuando el potenciómetro esta con 7,8 kΩ. Con 4 V equivalentes a 230 V, se le permite al microcontrolador poder obtener valores de hasta 287,5 V, que son equivalentes a 5 V.

Para que estos 5 V máximos no se superen, el diodo zener limita la tensión a ese valor. No son previsibles valores de tan alto valor, pero dejar un margen es recomendable. Tampoco se previenen que disminuya por debajo de 230 V la tensión y por ello el limitador es funcional. Los componentes usados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla XII. Componentes necesarios circuito medidor de tensión ELC monofásico

Componente	Fabricante	Función	Cantidad
Transformador de PCB 44057	Myrra	Transformador 230/12	1
Diodo 1N4001	Vishay	Rectificador en puente	4
Condensador electrolítico de aluminio 860160672009 10 µF	Wuth Elektronik	Filtro de condensador	1

Resistor 2K MRS25	Vishay	Regulación de voltaje	1
Diodo Zener 1N5338B	On Semiconductor	Circuito estabilizador	1
Potenciómetro RK11K1140A3L	Alps Electric	Ajuste fino de tensión	1

Medición de la intensidad

En cuanto a la medición de la intensidad, se realiza con el uso del sensor de corriente Allegro ACS712ELCTR-30A-T. Este componente consiste en un circuito integrado con un sensor de efecto Hall y una línea de conducción eléctrica de cobre. El sensor detecta el campo magnético que se produce por inducción de la corriente que circula por la línea que se está midiendo, la cual se conecta a la línea de cobre del propio componente, convirtiendo este campo en un voltaje proporcional.

El sensor entrega una salida de voltaje proporcional a la corriente que fluye por el conductor de cobre (Del Pin 1 al 2 y del 3 al 4), que en el caso del ACS712ELCTR-30A-T, puede llegar hasta los -30A y 30 A. El grosor de los cables de cobre del sensor permite que soporte sobretensiones de hasta 5 veces su valor máximo. Los pines donde se genera la señal de salida (desde el pin 5 al 8), están internamente aislados de la línea de cobre, con lo cual no se precisa de métodos de aislamiento adicionales.

Este elemento se puede encontrar en módulos, los cuales facilitan su conexión, trayendo una bornera para conectar la línea a medir y 3 pines, dos para conectar la alimentación y un pin para la salida analógica. El componente y su conexión típica se pueden observar en las siguientes figuras.

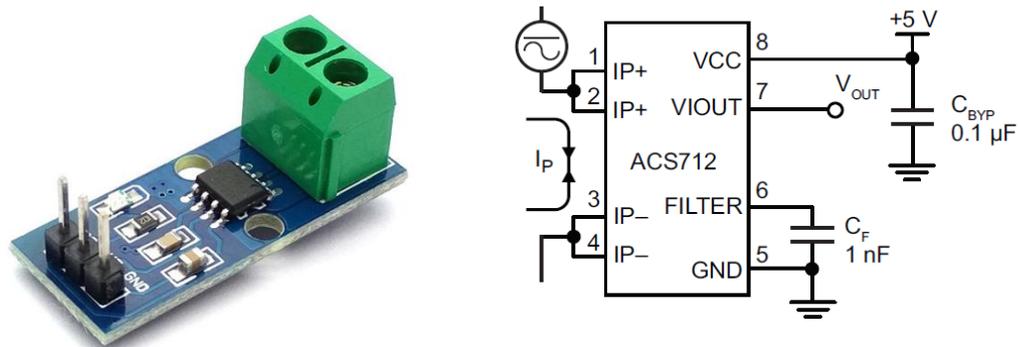


Figura 50. Sensor de corriente ACS712ELCTR-30A-T y filtro recomendado.

El rango de corriente que se puede medir y su sensibilidad varían dependiendo del modelo del circuito integrado, existiendo tres modelos y teniendo el de 30A las siguientes características:

Tabla XIII. Características generales sensor de corriente ACS712ELCTR-30A-T

Modelo	Rango	Sensibilidad
ACS712ELCTR-30A-T	-30 a 30 A	66 mV/A

El sensor entrega un valor de 2,5 voltios para una corriente de 0A y a partir de allí incrementa proporcionalmente de acuerdo a la sensibilidad, teniendo una relación lineal entre la salida de voltaje del sensor y la corriente.

Dicha relación es una línea recta en una gráfica Voltaje vs Corriente donde la pendiente es la sensibilidad y la intersección en el eje Y es 2,5 voltios. La ecuación de la recta sería la siguiente:

$$V = mI + 2,5$$

Donde la pendiente es m y equivale a la Sensibilidad.

Despejando se obtiene la ecuación para hallar la corriente a partir de la lectura del sensor:

$$I = \frac{V - 2,5}{m}$$

Con el uso de este sensor de intensidad, se ha diseñado el siguiente circuito donde se simula el generador como un sistema trifásico y la carga:

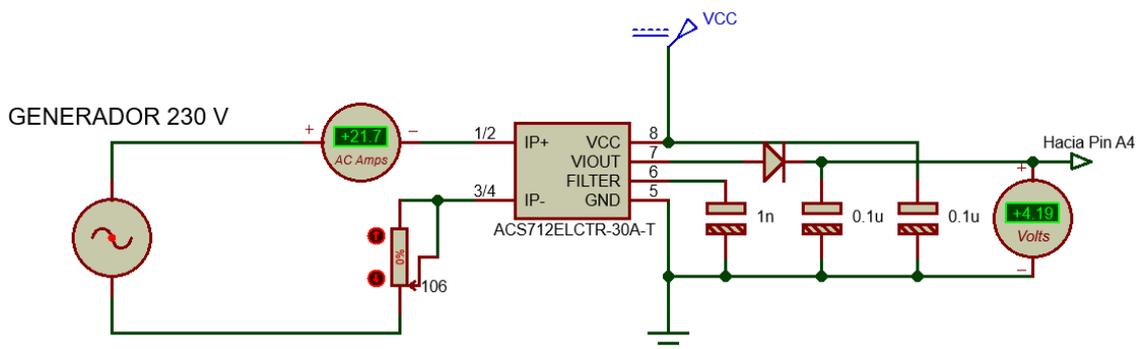


Figura 51. Circuito medidor de corriente ELC caso monofásico

El generador es monofásico, siendo el mismo que el del sensor de tensión. La carga primaria se simula por medio de un potenciómetro de 106 Ω, cuyo valor mínimo es de 10,6 Ω. Con este último se obtiene el valor nominal de tensión a la salida, 21,7 A.

En el circuito, se utilizan tres condensadores de distintos valores, según su conexión típica. Uno se posiciona entre el pin de filtro y la tierra, teniendo un valor de 1 nF, otro a la salida al microcontrolador, teniendo un valor de 0,1 μF y por último uno en el pin de alimentación, de 0,1 μF. De esta manera, se filtra la tensión para obtener una lo más continua posible con los filtros recomendados por el fabricante.

Por último, se precisa de un diodo de baja potencia, en este caso un 1N4004GL, para prevenir que la tensión pueda retornar al sensor de intensidad por el terminal de salida.

Calibración del sensor de corriente

Teóricamente, el sensor utilizado tiene unos rangos de intensidad y una sensibilidad predefinida. Estos pueden variar, manteniendo su linealidad, debido a que pueden existir errores al no ser los valores del fabricante exactos. Al ser lineal la relación, se pueden obtener dos puntos de funcionamiento del componente. Para ello, se precisa de un multímetro de buena precisión.

El primero punto que se debe medir es para una corriente de 0 A. En el circuito que se desea simular, el valor de voltaje obtenido fue de 2,27 V en vez de 2,5 V. Por tanto, el punto uno será P1 (2,27; 0).

Para obtener la segunda medida, es preciso buscar un valor que no sea excesivamente cercano al anterior. Una carga cuya corriente sea superior a 1 A podría ser suficiente en este caso. En la simulación, al disponer de la carga deseada, se ha realizado con una de 21,7 A, obteniéndose aproximadamente 4,04 V. Por tanto el segundo punto será P2 (4,19; 21,7).

Conociendo estos valores, para calcular su sensibilidad bastará con calcular la pendiente entre ambos puntos de la siguiente manera:

$$sensibilidad = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} = \frac{4,19 - 2,27}{21,7 - 0} = 0,088 \text{ V/A}$$

Debido a que el presente proyecto es teórico y parte de una simulación, en un caso real sería preciso recalibrarlo sin tener en cuenta los valores de la simulación, ya que podrían variar notablemente. En conclusión, hay que tener en cuenta de que cada sensor tendrá su característica y que es preciso calibrarlo siempre. El valor de tensión del P1 en el programa, se introduce en la variable AcsOffset y el de sensibilidad en Sensibl.

Componentes

Tabla XIV. Componentes necesarios circuito medidor de corriente ELC monofásico

Componente	Fabricante	Función	Cantidad
ACS712ELCTR-30A-T	Allegro Microsystems	Transformador 230/12	1
Diodo 1N4001	Vishai	Rectificador de media onda	1
Condensador electrolítico de aluminio 0,1 µF 860010672001	Würth Elektronik	Filtros Vcc y Vout	2
Condensador 1 nF PFR5102J63J11L4BULK	KEMET	Filtro GND	1

Medición de la frecuencia

Para poder medir la frecuencia del circuito en cada momento y corregirla, se utiliza un circuito compuesto por un rectificador monofásico de media onda unido a un optoacoplador, con el cual se consigue a la salida del optoacoplador una onda cuadrada con un periodo variable que depende de la frecuencia de la red.

Primeramente, se transforma la tensión de entrada de 230 V a 12 V con el mismo transformador que el del medidor de tensión, ya que la potencia que manejan estos circuitos es muy reducida.

A la entrada del optoacoplador, en el fotodiodo, se limita la intensidad por medio de un resistor de 0,47 kΩ. A la salida, el colector del fototransistor está conectado en paralelo a la fuente de corriente de 5 V por medio de un resistor de 1 kΩ.

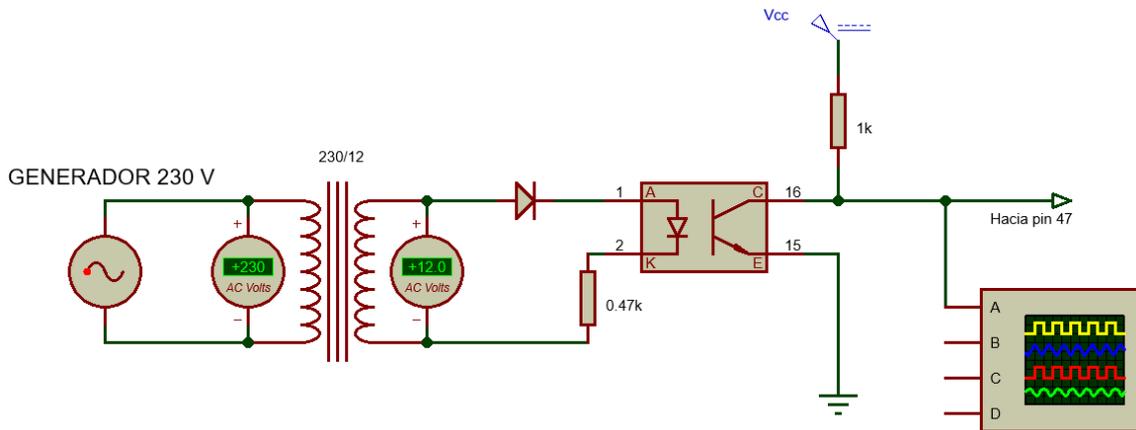


Figura 52. Circuito medidor de frecuencia ELC caso monofásico

El rectificador monofásico consigue que al optoacoplador le lleguen pulsos cada semiciclo, que a su salida se traducen en una onda cuadrada con la forma mostrada en la siguiente figura en caso de ser una red de 50Hz.

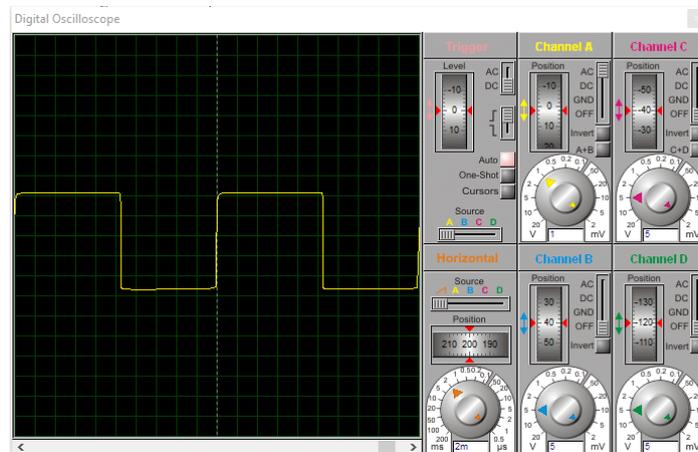


Figura 53. Entrada de frecuencia en pin 47 ELC monofásico a 50 Hz

Los componentes usados para esta función son los siguientes:

Tabla XV. Componentes necesarios circuito medidor de frecuencia ELC monofásico

Componente	Fabricante	Función	Cantidad
------------	------------	---------	----------

Diodo 1N4001	Vishai	Rectificador de media onda	1
Optoacoplador LTV-814	Lite-On	Generador de onda cuadrada	1
Resistor CFR100 0,47 kΩ	TE connectivity	Resistencia fotodiodo	1
Resistor CFR50 1 kΩ	TE connectivity	Resistencia colector	1

5.8.6 Diseño de la unidad de potencia

Por último, tras realizar el control electrónico, es preciso disponer de un conmutador por fase que reciba el PWM del microcontrolador, unidos a la carga secundaria, de forma que se pueda disipar la potencia necesaria en cada momento. Esta es la denominada unidad de potencia.

En este caso, se utiliza un IGBT unido a un circuito que dispara su puerta haciendo que conduzca cuando le lleguen ceros. Por tanto, conforme aumenta el PWM, se consigue que el IGBT disminuya su duty cycle y si disminuye, el IGBT lo aumenta. Es necesario añadir este control de disparo, para no unir el neutro de la parte de potencia con la de control y así tenerlos aislados uno del otro. Esto se consigue con el siguiente circuito:

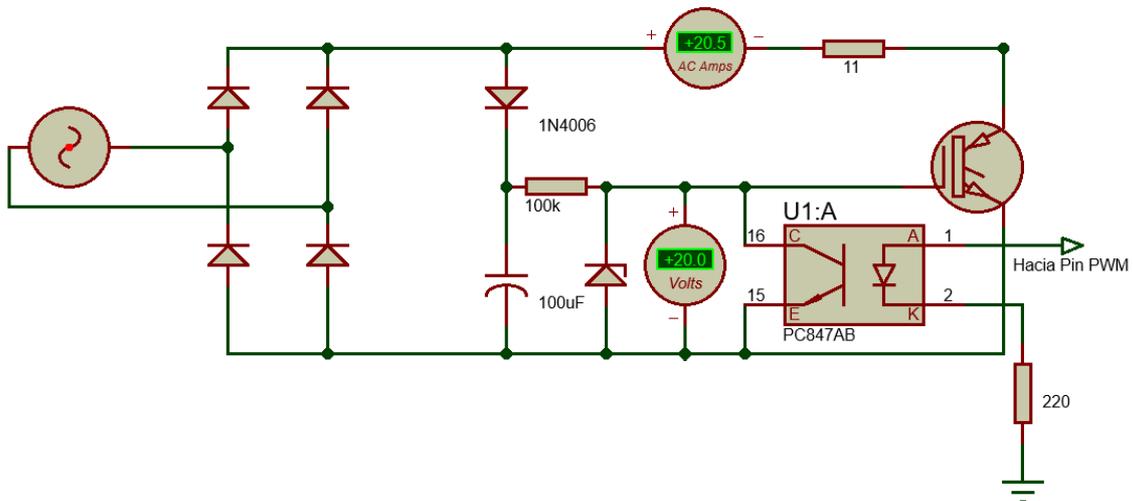


Figura 54. Unidad de potencia ELC caso monofásico

En este se puede observar como primeramente se rectifica por medio de un rectificador en puente la tensión alterna que llega del generador, para posteriormente derivarse entre dos circuitos. El primero es el compuesto por la carga secundaria, calculada de $10,6 \Omega$ para este caso, que se encargará de quemar la energía sobrante, dependiendo del duty cycle que exista en el IGBT.

El segundo circuito, está compuesto por un diodo, un filtro por condensador de $100 \mu\text{F}$ usado para filtrar la tensión que le llega al circuito de control y una carga de 10k que

consigue que la intensidad derivada al circuito sea la óptima para que el zener esté en funcionamiento, pero que sirva para reducir la intensidad que le llega al circuito de disparo.

Este zener, limita la tensión a la tensión de disparo que necesita la puerta del IGBT para que este en conducción, la cual es de 20 V. En este caso, el IGBT está en conducción, derivando toda la energía. Tras el zener, se posiciona un optoacoplador que tendrá el neutro unido al de arduino, consiguiendo así un aislamiento entre la zona de potencia y la de control.

Cuando a este optoacoplador le llegue tensión del PWM generado, conducirá consiguiendo que se sature el fototransistor y de esta forma haciendo que la tensión que le llegue al IGBT sea nula y que por tanto se comporte como un circuito abierto. De esta forma, se consigue que cuando el duty cycle de arduino sea la unidad, el del IGBT sea nulo y viceversa. Ajustando el PWM que le llega a la puerta de este IGBT con el control de arduino, se consigue ajustar la potencia disipada en cada momento.

Los componentes usados para esto son los siguientes:

Tabla XVI. Componentes necesarios circuito unidad de potencia ELC monofásico

Componente	Fabricante	Función	Cantidad
Módulo 2 diodos MDD26-08N1B, 36A, 800V	IXYS	Rectificador en puente	2
Diodo 1N4006, 800 V 1 A	Vishai	Diodo	1
Condensador serie RS 100uF, 400 V	RS Pro	Filtro de condensador	1
Diodo zener 1N5357B, 20V	On semiconductor	Diodo estabilizador	1
Resistencia fija CFR100J100K	TE Connectivity	Resistencia estabilizadora	1
Optoacoplador LTV-814	Lite-On	Actuador del IGBT	1
Resistor CFR100 0,47 kΩ	TE connectivity	Resistencia fotodiodo	1
Módulo IGBT, IXGN320N60A3	IXYS	IGBT de conmutación	1
Resistencia en Panel 2,2 Ω 1 kW	TE Connectivity	Carga comunidad	5

5.8.7 Programa de control con Arduino

El siguiente diagrama de bloques, nos muestra el funcionamiento general del programa:

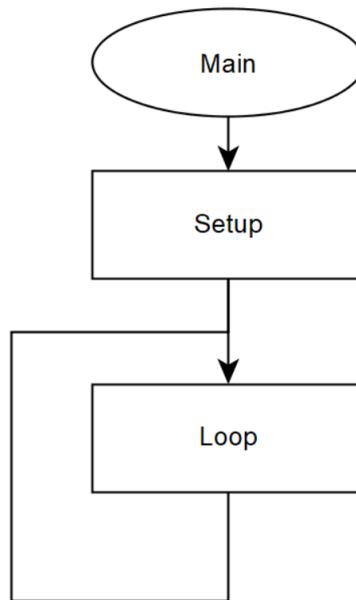


Figura 55. Diagrama de bloques general de los ELC

Paralelamente, existe una interrupción que se activa cada 2 ms, cuyo diagrama de bloques se presenta a continuación. El programa de control con arduino, está dividido en la parte del loop principal y la parte de la interrupción. El código del loop principal es el siguiente:

```

//***** INICIO DEL LOOP PRINCIPAL *****
void loop() {
//***** ESCRITURA DE VARIABLES EN LCD *****

lcd.setCursor(3,0);lcd.print(" ");
lcd.setCursor(3,0);lcd.print(V1);

lcd.setCursor(11,0);lcd.print(" ");
lcd.setCursor(11,0);lcd.print(I1,1);

lcd.setCursor(2,1);lcd.print(" ");
lcd.setCursor(2,1);lcd.print(W1,1);

lcd.setCursor(10,1);lcd.print(" ");
lcd.setCursor(10,1);lcd.print(F);

delay(200);
}
  
```

Figura 56. Código ELC caso monofásico, loop principal

En esta parte de la programación, básicamente se realiza la muestra de las variables medidas en la interrupción en el LCD 16x2. Estas, con un delay de 200 ms, se van limpiando y reescribiendo. Por otra parte, en la interrupción se tiene lo siguiente:

```

//***** VECTOR DE INTERRUPCIÓN CONTROLADO POR TIMER4*****

ISR(TIMER4_COMPA_vect) {

cont_t ++; //Cuenta 1 cada vez que se activa la interrupción

V1 = map(analogRead(V),0,1023,0,287.5); //Mapeo de la tensión

double Va =(analogRead(I)*5.0/1023); //Mapeo de la tensión del sensor de intensidad
I1 = (Va-AcsOffset)/Sensibl; //Conversión de tensión a intensidad

W1 =(I1*V1)/1000; //Cálculo de la potencia

k1=((I1/In))*200; //Cálculo de k1

if (cont_t == 1000){ //Comprobación de cont_t
  f = TCNT5; //Cálculo de la frecuencia
  kf=(fn/f); //Cálculo de kf

  TCNT5 = 0;
  cont_t = 0;

}

OCR3B=k1*kf; //Cálculo del duty cycle
OCR3B=constrain(OCR3B,0,200); //Limitación del duty cycle entre 0 y 200

```

Figura 57. Código ELC caso monofásico, interrupción (ISR)

Para explicar esta parte de forma más sencilla, se ha realizado el siguiente diagrama de bloques:

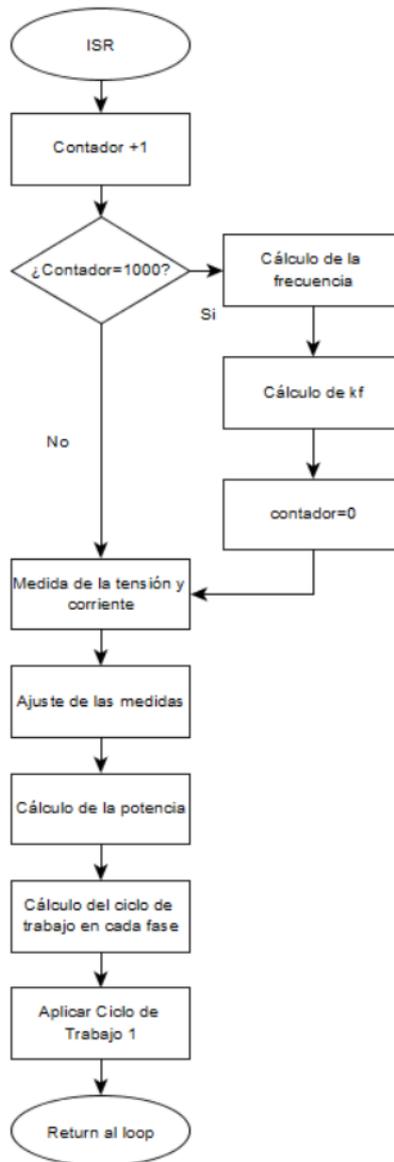


Figura 58. Diagrama de bloques ELC caso monofásico, interrupción (ISR)

En el diagrama de bloques se observa como primeramente, cada vez que se activa la interrupción, se activa un contador que realiza una cuenta. Después, se comprueba que la cuenta sea 1000 y en cuanto lo es se calcula la frecuencia, que será igual a TCNT5 que es el timer configurado para contar cada flanco de subida. Esta frecuencia se introduce en el cálculo de k_f y después se resetean los contadores.

Tras realizar ese cálculo, o en caso de que la cuenta no haya llegado a 1000, se realiza la medida de la corriente y la tensión, las cuales se pasan de digital a analógico (por medio de un mapeo) y en el caso de la intensidad, con la sensibilidad y el offset se consigue la intensidad a la salida. Con estos datos se calcula la potencia y k_1 y por último se introduce el ciclo de trabajo en OCR3B, multiplicando k_1 por k_f y por 200 (5000 Hz para el timer 3).

La frecuencia es igual al valor de TCNT5, porque con 1000 interrupciones se cuentan 2000 ms, y en TCNT5 se mide 1 flanco de subida cada 20 ms (En el caso de ser la frecuencia de 50Hz). De esta forma, se miden 100 flancos de subida en 2000 ms y se sabe que:

$$TCNT5 = \frac{100 \cdot 1000 \text{ Hz}}{2000 \text{ ms} \cdot 1 \text{ ms}} = 50 \text{ Hz}$$

5.9 ELC trifásico con una carga por fase

5.9.1 Diseño básico

El sistema propuesto para el control de la microcentral hidroeléctrica, es un ELC regulado por PWM que controlará la carga secundaria conectada al generador de 6,3kVA y servirá para desviar la energía sobrante a esta.

El control es igual al del caso monofásico, pero con un controlador por fase y con reajustes en los valores de intensidad. Se utiliza para ello un único arduino ATmega2560, pero se obtendrán del timer 3 tres PWM distintos, controlando cada uno de estos un circuito disparador de IGBT que controlará a su vez la disipación de potencia de la fase a la que está conectado.

5.9.2 Determinación de la carga secundaria

La determinación de la carga en cada fase, se realizará con la misma misión que en el monofásico, suponiendo que la potencia máxima que se generará es de 5000W.

$$R = \frac{230^2}{5000/3} \cong 32 \Omega$$

Por tanto, la carga secundaria será de 32 Ω por fase y al menos de 5000W. En caso de quererse aprovechar el calor generado en esta resistencia, se podría utilizar un resistor de inmersión como calentador de agua. Este caso no será observado en el desarrollo del proyecto.

5.9.3 Determinación del sistema de control de intensidades

Este control se fundamenta en lo mismo que el monofásico, pero con otros valores de intensidad. En este caso, en vez de existir un único duty cycle, existirán tres y cada uno controlará cada fase. Estos son los siguientes:

$$OCR3A = k_1 \cdot k_f = (I_1/I_n) \cdot (f_n/f)$$

$$OCR3B = k_2 \cdot k_f = (I_2/I_n) \cdot (f_n/f)$$

$$OCR3C = k_3 \cdot k_f = (I^3/I_n) \cdot (f_n/f)$$

La frecuencia, servirá en este caso sobretodo para compensar desequilibrios de intensidad entre fases de una forma más precisa. En este caso, la I_n se supondrá con un valor de 7,2 A, debiendo realizarse los ajustes precisos en un caso real al igual que en el monofásico.

En este caso, debido a la presencia de cargas con factor de potencia algo inferior a la unidad (0,95 obtenido de la distribución eléctrica), la potencia podría subir sobre el valor de 5000 W. En cualquier caso, debido a que las pérdidas harán que la potencia generada se reduzca, suponer un factor de potencia de unidad solamente conseguirá mayor precisión y no se alcanzarán esas intensidades.

5.9.4 Configuración inicial en Arduino

En la configuración inicial, existen los mismos temporizadores ligeramente modificados y se utilizarán distintos pines y el mensaje del LCD muestra una distinta disposición. Además, existirán tres PWM distintas. Al tener que usarse otro sensor de corriente en este caso, por ser esta más reducida, los valores que cambiaran son los relacionados con esta. Además, se triplican los parámetros, existiendo uno por fase.

```

//***** ADICIÓN DE LIBRERÍAS PARA LCD *****

#include <LiquidCrystal.h>

//***** DEFINICIÓN DE PINES *****

#define rs 10
#define en 11
#define D4 6
#define D5 7
#define D6 8
#define D7 9 //Pines de conexión del LCD

#define freq 47 //Pin de entrada para la lectura de la frecuencia
#define PWM_Pin_A 5 //Pin de salida del PWM
#define PWM_Pin_B 2 //Pin de salida del PWM
#define PWM_Pin_C 3 //Pin de salida del PWM

#define Vr A1 //Pin de entrada para la lectura de Vr
#define Vs A2 //Pin de entrada para la lectura de Vs
#define Vt A3 //Pin de entrada para la lectura de Vt

#define Ir A4 //Pin de entrada para la lectura de I1
#define Is A5 //Pin de entrada para la lectura de I2
#define It A6 //Pin de entrada para la lectura de I3

LiquidCrystal lcd(rs, en, D4, D5, D6, D7); //Inicialización de la librería para el LCD

//***** DEFINICIÓN DE VARIABLES *****

double AcsOffset=2.27; //Offset del sensor de corriente
double Sensibl=0.129; //Sensibilidad del sensor de corriente
double I1, I2, I3; //Valor de las corrientes de cada fase
double In=7.2; //Valor de la corriente nominal

volatile unsigned int cont_t=0; //Contador para el calculo de la frecuencia
volatile unsigned int f; //Valor de la frecuencia medida
double fn = 50; //Valor de la frecuencia nominal
double kf; //Control P de la frecuencia

int V1, V2, V3; //Valor de las tensiones de cada fase

double W1, W2, W3, W; //Valor de la potencia activa de cada fase

double k1, k2, k3; //Valor del control de la corriente de cada fase

//***** INICIO DEL SETUP *****

void setup() {

//***** DEFINICION DE PINES COMO IN/OUT *****

pinMode (D4, OUTPUT); pinMode (D5, OUTPUT);pinMode (D6, OUTPUT);pinMode (D7, OUTPUT);
pinMode (rs, OUTPUT);pinMode (en, OUTPUT);

pinMode (Vr, INPUT); pinMode (Vs, INPUT); pinMode (Vt, INPUT);

pinMode (Ir, INPUT); pinMode (Is, INPUT); pinMode (It, INPUT);

pinMode (PWM_Pin_A, OUTPUT);pinMode (PWM_Pin_B, OUTPUT);pinMode (PWM_Pin_C, OUTPUT);
pinMode (freq, INPUT);

```

Figura 59. Código ELC trifásico con una carga por fase, definición de pines, variable y pines

Los timers son los siguientes:

```

//***** CONFIGURACION DEL TIMER 4 COMO FUENTE DE INTERRUPCION *****

TCCR4A=B00000000; //WGM41=0 y WGM40=0
TCCR4B=B00001001; //001-1 010-8 011-64 100-256 101-1024
OCR4A=32000-1; //T=(1/Fosc)*2*PS*(1+OCR4A) -----> CONFIGURADO A 4ms
TIMSK4=B00000010;

//***** CONFIGURACION DEL TIMER 5 COMO CONTADOR DE FRECUENCIA (pin 47) *****
TCCR5A = B00000000; //Modo Normal sin pines de salida
TCCR5B = B01000111; //Modo contador con flanco de subida en T5
TCNT5 = 0;

//***** CONFIGURACION DEL TIMER 3 COMO GENERADOR DE PWM (pin 4) *****

TCCR3A = B10101010; //phase and frequency correction pwm
TCCR3B = B00010010; //PS=8
ICR3 = 200; //Periodo de la PWM en us -----> CONFIGURADO A 2ms
OCR3A = 0; //Duty Cycle inicial
OCR3B = 0; //Duty Cycle inicial
OCR3C = 0; //Duty Cycle inicial
  
```

Figura 60. Código ELC trifásico con una carga por fase, definición de timers

Se observa como en OCR4A se define la interrupción para que actúe cada 4 ms en vez de cada 2 ms, ya que la CPU no tenía la capacidad para hacerlo a 4 ms. Además TCCR3A se define para que se activen OCR3A, OCR3B y OCR3C como generadores de PWM a 5000 Hz. EL contador de frecuencia es exactamente igual al del caso anterior.

5.9.5 Diseño de la unidad de control

Al utilizarse los mismos circuitos que en el monofásico como fuente, para la medida de la tensión y para la medida de la frecuencia, solo es reseñable explicar los cambios en el de intensidad y en el LCD. El medidor de frecuencia, la fuente y el circuito medidor de voltaje serán iguales, viéndose este último triplicado.

LCD

La conexión del LCD en este caso, se ha tenido que realizar de otra forma para permitir que los pines que generan las tres PWM puedan estar disponibles (2,3 y 5). Además, se utiliza un LCD 16x4 para poder mostrar las variables de todas las fases.

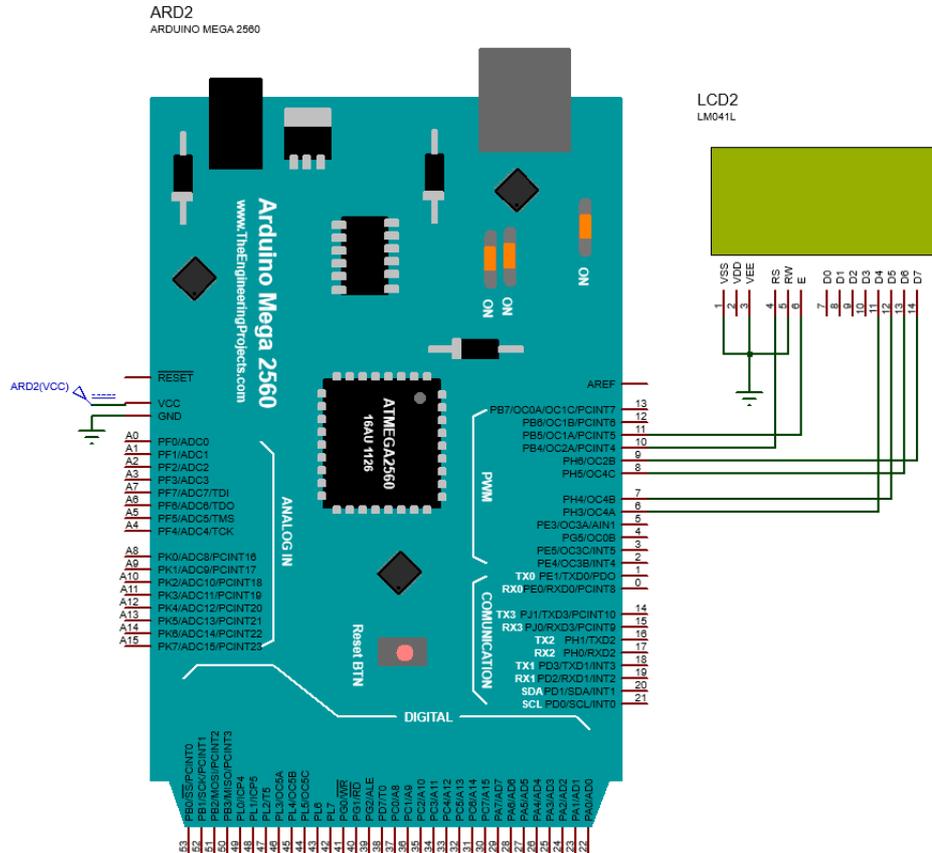


Figura 61. Arduino Mega 2560 con conexión a LCD en ELC, caso trifásico con carga por fase.

Las variables mostradas se programan de la siguiente manera:

```
//***** MENSAJE INICIAL DE LA LCD *****

lcd.begin(16,4);
lcd.setCursor(0,0);lcd.print("V1:");
lcd.setCursor(0,1);lcd.print("V2:");
lcd.setCursor(0,2);lcd.print("V3:");
lcd.setCursor(6,0);lcd.print("V");
lcd.setCursor(6,1);lcd.print("V");
lcd.setCursor(6,2);lcd.print("V");

lcd.setCursor(8,0);lcd.print("I1:");
lcd.setCursor(8,1);lcd.print("I2:");
lcd.setCursor(8,2);lcd.print("I3:");
lcd.setCursor(15,0);lcd.print("A");
lcd.setCursor(15,1);lcd.print("A");
lcd.setCursor(15,2);lcd.print("A");

lcd.setCursor(0,3);lcd.print("P:");
lcd.setCursor(5,3);lcd.print("kW");

lcd.setCursor(8,3);lcd.print("f:");
lcd.setCursor(14,3);lcd.print("Hz");
```

Figura 62. Código ELC trifásico con una carga por fase, mensaje inicial LCD.

Medición de la intensidad

En esta ocasión, la medida de la corriente con el uso de un sensor de corriente Allegro ACS712ELCTR-20A-T por fase. Este componente es una versión del usado en el monofásico que soporta valores de intensidad de -20 a 20 A. Su sensibilidad es de 100 mV/A en este caso.

El sensor entrega una salida de voltaje proporcional a la corriente que fluye por el conductor de cobre (Del Pin 1 al 2 y del 3 al 4), que en el caso del ACS712ELCTR-20A-T, puede llegar hasta los -20 A y 20 A.

El sensor entrega un valor de 2.5 voltios para una corriente de 0A y a partir de allí incrementa proporcionalmente de acuerdo a la sensibilidad, teniendo una relación lineal entre la salida de voltaje del sensor y la corriente. La ecuación usada para hallar la corriente a partir de la lectura del sensor es igual a la del caso monofásico:

$$I = \frac{V - 2,5}{m}$$

Con el uso de este sensor de intensidad, se ha diseñado el siguiente circuito donde se simula el generador como un sistema trifásico y la carga:

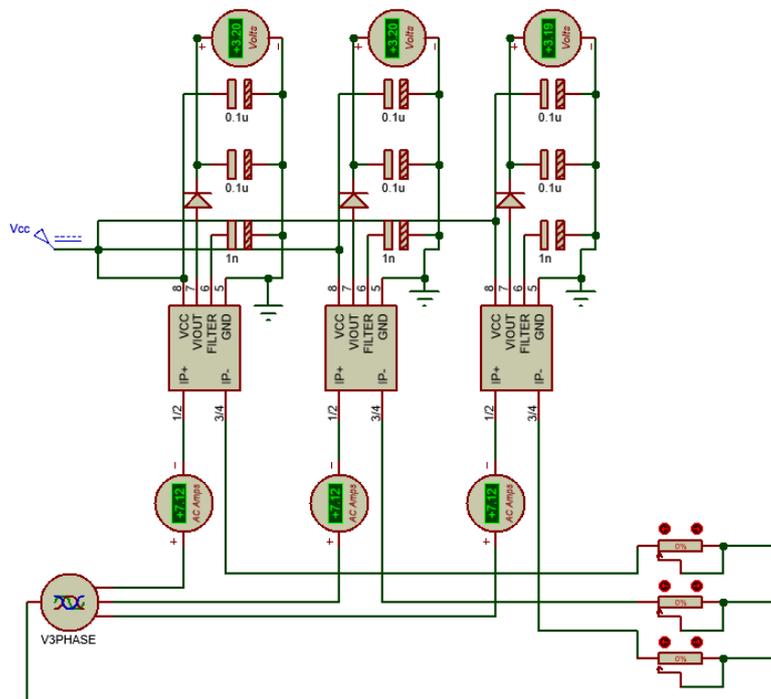


Figura 63. Circuito medidor de corriente ELC caso trifásico con carga por fase.

El generador es trifásico y la carga primaria se simula por medio de un potenciómetro de 320 Ω , con 32 Ω de valor mínimo. Con ese valor mínimo de resistencia nos da una intensidad de casi 7,2 A. Con esos valores de intensidad, se supone una carga resistiva máxima de 5000 W entre las tres fases, obtenido a partir de los siguientes cálculos:

$$P = 3 * V_{1n} * I_1 * \cos\varphi = 3 * 230 * 9 * 0,8 = 5000 \text{ W}$$

Si suponemos que el factor de potencia de la carga es la unidad, ya que en los generadores síncronos aislados esta impuesta por la carga y teniendo en cuenta que el voltaje es prácticamente fijo:

$$P = 3 * 230 * 7,2 = 5000 \text{ W}$$

Lo cual es igual a:

$$P = 3 * \frac{230^2}{R_1} = 5000 \text{ W} \rightarrow R_1 = 3 * \frac{230^2}{5000} \cong 32\Omega$$

Aun existiendo una carga con un factor de potencia ligeramente inferior a la unidad, por el efecto de las pérdidas en la propia microcentral, nunca llegará la potencia nominal a la carga y por tanto se puede suponer un valor de potencia ligeramente inferior al real. De esta forma, el control será más exacto.

En cualquier caso, como ya se ha comentado anteriormente, la potencia generada debe calibrarse una vez se realice el montaje de la microcentral, teniendo en cuenta las pérdidas existentes.

Calibración del sensor de corriente

Este sensor, al igual que el otro, precisa de calibración antes de ser instalado. El primero punto que se debe medir es para una corriente de 0 A. En el circuito que se desea simular, el valor de voltaje obtenido fue de 2,29 V en vez de 2,5 V. Por tanto, el punto uno será P1 (2,29; 0).

Para obtener la segunda medida, es preciso buscar un valor que no sea excesivamente cercano al anterior. Una carga cuya corriente sea superior a 1 A podría ser suficiente en este caso. En la simulación, al disponer de la carga deseada, se ha realizado con una de 7,12 A, obteniéndose aproximadamente 3,2 V. Por tanto el segundo punto será P2 (3,2; 7,12).

Conociendo estos valores, para calcular su sensibilidad bastará con calcular la pendiente entre ambos puntos de la siguiente manera:

$$\text{sensibilidad} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} = \frac{3,2 - 2,27}{7,12 - 0} = 0,129 \text{ V/A}$$

Debido a que el presente proyecto es teórico y parte de una simulación, en un caso real sería preciso recalibrarlo sin tener en cuenta los valores de la simulación, ya que podrían variar notablemente. En conclusión, hay que tener en cuenta de que cada sensor tendrá su característica y que es preciso calibrarlo siempre y posteriormente cambiar los valores de AcsOffset y Sensibl en el programa de arduino.

5.9.6 Diseño de la unidad de potencia

La unidad de potencia será igual a la del caso monofásico, pero existiendo tres en vez de una, ya que los rectificadores en panel y el IGBT en panel encontrados son los de menores características.

La única diferencia, será la resistencia de carga de cada uno de los IGBT, la cual será de 2000kW al precisar de una mayor a 1656W.

Tabla XVII. Componentes necesarios unidad de potencia ELC trifásico con carga por fase

Componente	Fabricante	Función	Cantidad
Módulo 2 diodos MDD26-08N1B, 36A, 800V	IXYS	Rectificador en puente	6
Diodo 1N4006, 800 V 1 A	Vishai	Diodo	3
Condensador serie RS 100uF, 400 V	RS Pro	Filtro de condensador	3
Diodo zener 1N5357B, 20V	On semiconductor	Diodo estabilizador	3
Resistencia fija CFR100J10K	TE Connectivity	Resistencia estabilizadora	3
Optoacoplador LTV-814	Lite-On	Actuador del IGBT	3
Resistor CFR100 0,47 kΩ	TE connectivity	Resistencia fotodiodo	3
Módulo IGBT, IXGN320N60A3	IXYS	IGBT de conmutación	3
Resistencia en Panel 100 Ω 1 kW	TE Connectivity	Carga comunidad	3
Resistencia en Panel 47 Ω 1 kW	TE Connectivity	Carga comunidad	3

5.9.7 Programa de control con Arduino

El programa de control es prácticamente igual al explicado en el monofásico, solo que en este caso existen tres k distintos y las cuentas se realizan cada 500 interrupciones. En el loop principal, se escriben las variables en el LCD:

```
void loop() {
//***** ESCRITURA DE VARIABLES EN LCD *****
lcd.setCursor(3,0);lcd.print("  ");
lcd.setCursor(3,0);lcd.print(V1);
lcd.setCursor(3,1);lcd.print("  ");
lcd.setCursor(3,1);lcd.print(V2);
lcd.setCursor(3,2);lcd.print("  ");
lcd.setCursor(3,2);lcd.print(V3);

lcd.setCursor(11,0);lcd.print("  ");
lcd.setCursor(11,0);lcd.print(I1,1);
lcd.setCursor(11,1);lcd.print("  ");
lcd.setCursor(11,1);lcd.print(I2,1);
lcd.setCursor(11,2);lcd.print("  ");
lcd.setCursor(11,2);lcd.print(I3,1);

lcd.setCursor(2,3);lcd.print("  ");
lcd.setCursor(2,3);lcd.print(W,1);
lcd.setCursor(10,3);lcd.print("  ");
lcd.setCursor(10,3);lcd.print(f);

delay(100);
}
```

Figura 64. Código ELC caso trifásico con carga por fase, loop principal

Tras esto se realiza el control resumido en este diagrama de bloques, en el cual se realiza anteriormente lo mismo que lo presentado en el monofásico, pero tras el cálculo del ciclo de trabajo en cada fase, se realiza lo siguiente:

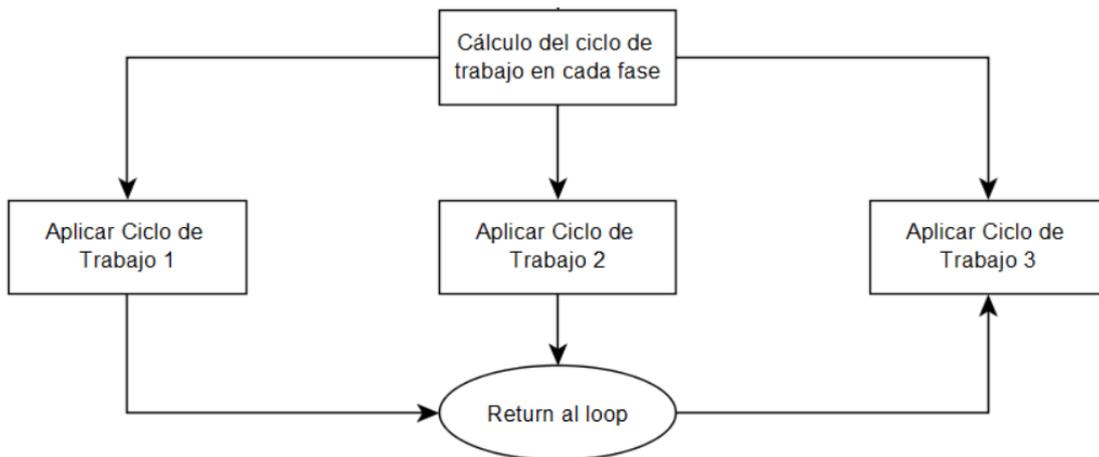


Figura 65. Diagrama de bloques ISR, ciclo de trabajo en ELC caso trifásico con carga por fase

La programación en el arduino es la siguiente:

```

//***** VECTOR DE INTERRUPCIÓN CONTROLADO POR TIMER4*****

ISR(TIMER4_COMPA_vect) {

  cont_t ++; //Cuenta 1 cada vez que se activa la interrupción

  if (cont_t == 500) { //Comprobación de cont_t
    f = TCNT5; //Cálculo de la frecuencia
    kf=(fn/f); //Cálculo de kf

    TCNT5 = 0;
    cont_t = 0;
  }

  V1 = map(analogRead(Vr),0,1023,0,287.5);
  V2 = map(analogRead(Vs),0,1023,0,287.5);
  V3 = map(analogRead(Vt),0,1023,0,287.5); //Mapeo de la tensión

  double Va =(analogRead(Ir)*5.0/1023);
  I1 = (Va-AcsOffset)/Sensibl;
  double Vb =(analogRead(Is)*5.0/1023);
  I2 = (Vb-AcsOffset)/Sensibl;
  double Vc =(analogRead(It)*5.0/1023); //Mapeo de la tensión del sensor de intensidad
  I3 = (Vc-AcsOffset)/Sensibl; //Conversión de tensión a intensidad

  W1 =(I1*V1)/1000;
  W2 =(I2*V2)/1000;
  W3 =(I3*V3)/1000; //Cálculo de la potencia por fase
  W = W1+W2+W3; //Cálculo de la potencia total

  k1=((I1/In))*200; //Cálculo de k1
  k2=((I2/In))*200; //Cálculo de k2
  k3=((I3/In))*200; //Cálculo de k3

  OCR3A=k1*kf; //Cálculo del duty cycle 1
  OCR3A=constrain(OCR3A,0,200); //Limitación del duty cycle entre 0 y 200

  OCR3B=k2*kf; //Cálculo del duty cycle 2
  OCR3B=constrain(OCR3B,0,200); //Limitación del duty cycle entre 0 y 200

  OCR3C=k3*kf; //Cálculo del duty cycle 3
  OCR3C=constrain(OCR3C,0,200); //Limitación del duty cycle entre 0 y 200
}

```

Figura 66. Código ELC trifásico con una carga por fase, ISR.

Básicamente en el código se realiza lo mismo que en el caso monofásico, pero se observa como al final existen tres duty cycles distintos, actuando cada uno en un IGBT.

La frecuencia es igual al valor de TCNT5 de nuevo porque con 500 interrupciones se cuentan 2000 ms, y en TCNT5 se mide 1 flanco de subida cada 20 ms (En el caso de ser la frecuencia de 50Hz). De esta forma, se miden 100 flancos de subida en 2000 ms y se sabe que:

$$TCNT5 = \frac{100 \cdot 1000 \text{ Hz}}{2000 \text{ ms} \cdot 1 \text{ ms}} = 50 \text{ Hz}$$

5.10 ELC trifásico con una carga para las tres fases.

5.10.1 Diseño básico

El sistema propuesto para el control de la microcentral hidroeléctrica, es un ELC regulado por PWM que controlará la carga secundaria conectada al generador de 6,3kVA y servirá para desviar la energía sobrante a esta.

Este regulador PWM, posee una particularidad respecto a los comúnmente usados, ya que su control se realiza con una única carga secundaria en vez de con una por fase. Por medio de un rectificador trifásico de media onda, se rectifica la tensión trifásica y se posiciona un único elemento de conmutación, en este caso un IGBT, que controlado por la señal PWM permite el paso de más potencia a la única carga. Este diseño básico se puede observar en la siguiente figura.

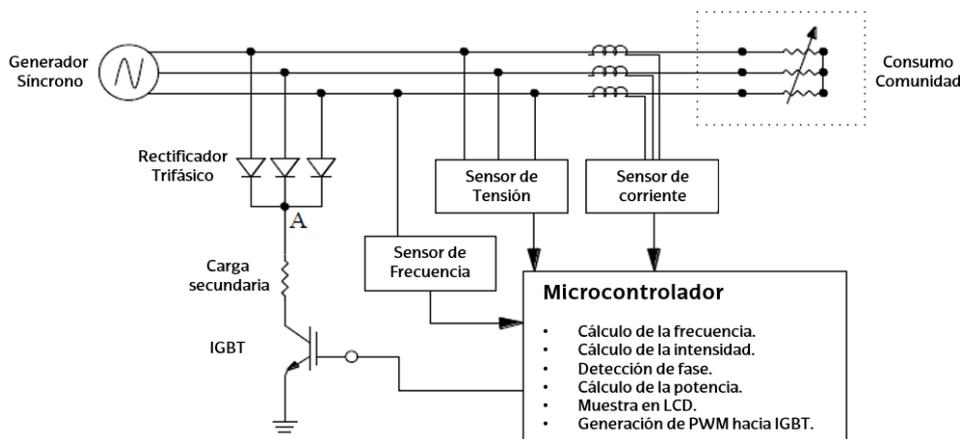


Figura 67. Diseño básico ELC caso trifásico con una carga

El control, como se puede ver en la figura, se realiza midiendo la tensión, la frecuencia y la intensidad y utilizando cada una de estas con distintos propósitos. Con la tensión se determina la fase en la que se está actuando en cada momento. Conociendo cuando se está en cada fase, se puede controlar el disparo del circuito de control de la puerta del IGBT con las medidas de frecuencia e intensidad obtenidas para cada una de estas.

De esta forma se consigue mantener las fases equilibradas y disipar toda la energía sobrante en la carga secundaria, disipándose de distinta forma en cada fase según los requerimientos.

5.10.2 Control de la tensión por fase

Para poder realizar el control de la tensión por fase de la generación, es preciso que el controlador tenga la capacidad de diferenciar en qué fase está actuando en cada momento para derivar una mayor o menor cantidad de la energía a la carga.

Si se desea conseguir eso, es preciso que cada 120° se tenga un distinto ciclo de trabajo o duty cycle que controle la potencia dirigida a la carga secundaria. Por ejemplo, si

denominamos a las fases R-S-T y solo se modifica el ciclo de la fase "R", la corriente consumida por la carga secundaria solo se variará para esa fase.

El método seleccionado en este caso para detectar las fases es la comparación entre el valor de las tensiones en cada instante. Estas tensiones se obtienen proporcionalmente a partir de un circuito electrónico y se comparan según la siguiente tabla de verdad:

Tabla XVIII. Tabla de la verdad tensiones caso trifásico con una carga

Región alcanzada	Condiciones requeridas			Tensión más grande
	$V_r > V_s$	$V_s > V_t$	$V_t > V_r$	
R	1	X	0	V_r
S	0	1	X	V_s
T	X	0	1	V_t

En la siguiente figura puede observarse un ejemplo de lo anterior, en el cual existe un duty cycle para cada una de las fases (k_1 , k_2 y k_3).

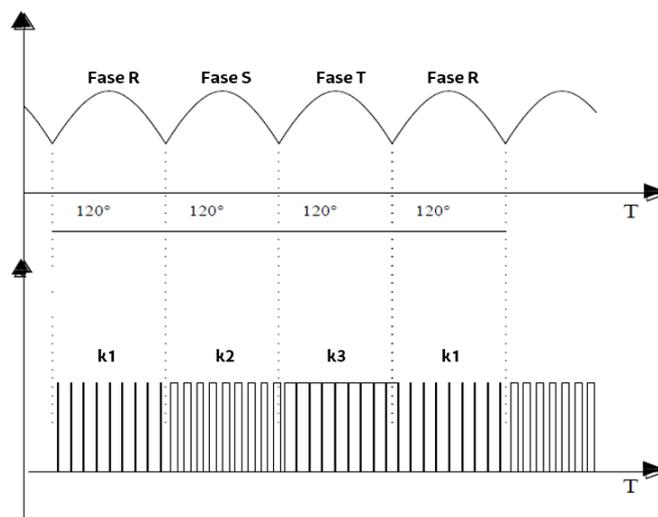


Figura 68. Ejemplo de duty cycle caso trifásico con una carga (Rojan Bhattarai, 2013)

Como se puede observar, debe ser necesario que en la interrupción que existe en el control de este ELC sea capaz de realizar medidas intentando captar la mayor cantidad posible de puntos dentro de cada fase.

Tiene una duración de 6,66 ms cada una de estas, obteniéndose este valor teniendo en cuenta que en 50 Hz hay 20 ms y por tanto, al existir tres ondas desfasadas 120°, cada una tendrá una duración de 6,66 ms hasta que llegue la siguiente a superarla.

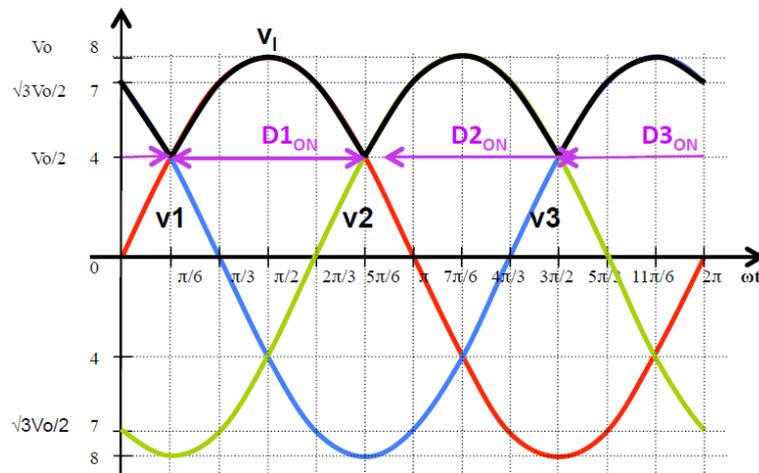


Figura 69. Tensiones de salida rectificador de media onda trifásico

En conclusión, para realizar un control correcto es muy necesario que la velocidad de la interrupción sea de al menos 2 ms, siendo más óptima conforme se realiza más rápidamente, pero consumiendo más recursos.

En el caso actual, debido a que el microcontrolador solo ha sido capaz de poner en funcionamiento el control a 8 ms, no ha sido posible realizarlo de forma correcta.

5.10.3 Determinación de la carga secundaria y el rectificador

Dentro del IGBT, es preciso calcular su rectificador trifásico y la carga que se va a precisar para disipar la potencia que le llegue a la carga. El diseño de la carga secundaria está basado en el requerimiento de que, si todas las cargas principales están desconectadas, esta carga debe de ser capaz de consumir toda la potencia generada. En estas condiciones, el IGBT debe estar totalmente en conducción, con un duty cycle del 100%.

Para el actual proyecto, al utilizar una única carga que absorbe la potencia de las tres fases, transformándola antes en una corriente prácticamente continua por medio de un rectificador trifásico de media onda, es preciso calcular la tensión media en la carga en la anterior condición. Se supondrá un rectificador sin pérdidas, debido a que será la máxima tensión que le puede llegar. La expresión utilizada para ello es la siguiente:

$$V_{LC} = \frac{3\sqrt{3}V_0}{2\pi}$$

Donde:

V_{LC} = Tensión media en la carga (V).

V_0 = Valor de la tensión a la entrada (V).

Sabiendo que $V_0 = 230\sqrt{2}$ V:

$$V_{LC} = \frac{3\sqrt{3} \cdot 230\sqrt{2}}{2\pi} = 269 \text{ V}$$

Calculada la tensión y asumiendo que la potencia máxima generada es de 5000 W, se seleccionará una $R_L = 11 \Omega$ disponible en el mercado para calcular después la intensidad máxima que recorre al circuito:

$$I_{LC} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi \cdot R_L} \cdot V_0 = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi \cdot 11} \cdot 230\sqrt{2} = 24 \text{ A}$$

5.10.4 Determinación del sistema de control de intensidades

Tras conseguir detectar la fase de la tensión, se debe controlar la intensidad en cada una de estas fases de manera separada, manejando un ciclo de trabajo distinto. Con esto se consigue que en cada fase se pueda disipar una potencia distinta y así mantener el equilibrio entre fases y entre generación y consumo, previniendo posibles sobrecargas en el generador.

El cálculo realizado es muy similar al del caso trifásico, teniendo la diferencia de que todos los duty cycles los debe manejar el mismo microcontrolador y además irán cambiando según la fase en la que nos encontremos en cada momento.

- Si la fase es R ($V_r > V_s$ y $V_t < V_r$):

$$OCR3B = k_1 \cdot k_f = (I^1/I_n) \cdot (f^n/f)$$

- Si la fase es S ($V_s > V_t$ y $V_r < V_s$):

$$OCR3B = k_2 \cdot k_f = (I^1/I_n) \cdot (f^n/f)$$

- Si la fase es T ($V_t > V_r$ y $V_t > V_s$):

$$OCR3B = k_3 \cdot k_f = (I^1/I_n) \cdot (f^n/f)$$

En este caso, la I_n se supondrá de nuevo con un valor de 7,2 A, debiendo realizarse los ajustes precisos en un caso real al igual que en el monofásico.

Por otra parte, debido a la presencia de cargas con factor de potencia algo inferior a la unidad. (0,95 obtenido de la distribución eléctrica), la potencia podría subir sobre el valor de 5000 W. En cualquier caso, debido a que las pérdidas harán que la potencia generada se reduzca, suponer un factor de potencia de unidad solamente conseguirá mayor precisión y no se alcanzarán esas intensidades.

5.10.5 Configuración inicial en Arduino

En el proyecto realizado, este control está planteado para un Arduino Mega 2560. En cualquier caso, debido a que no tiene la velocidad de procesamiento necesaria para realizar las funciones exigidas, habría que buscar una alternativa válida para realizar este control.

En este caso, el LCD se programa en los mismos pines a los del trifásico con carga por fase y solo se utiliza un PWM por fase, el cual es el OCR3A en el pin 5. El código sigue la línea de los dos casos anteriores y por tanto solo se adjuntaran como anexo del código completo.

Las tensiones, corrientes, frecuencia y potencias son iguales y se añaden unos voltajes denominados V_{1m} , V_{2m} y V_{3m} , que muestran el valor máximo de la tensión. De esta forma esta se muestra en el LCD sin que se vea la variación que existe al mantenerse su rizado intacto en el circuito detector de las fases.

Los timers en este caso son los siguientes:

```

//***** CONFIGURACION DEL TIMER 3 COMO GENERADOR DE PWM (pin 4) *****

TCCR3A = B10101010; //phase and frequency correction pwm
TCCR3B = B00010010; //PS=8
ICR3 = 200; //Periodo de la PWM en us ----> CONFIGURADO A 2ms
OCR3A = 0; //Duty Cycle inicial

//***** CONFIGURACION DEL TIMER 4 COMO FUENTE DE INTERRUPCION *****

TCCR4A=B00000000; //WGM41=0 y WGM40=0
TCCR4B=B00001001; //001-1 010-8 011-64 100-256 101-1024
OCR4A=63999; //T=(1/Fosc)*2*PS*(1+OCR4A) -----> CONFIGURADO A 8ms
TIMSK4=B00000010;

//***** CONFIGURACION DEL TIMER 5 COMO CONTADOR DE FRECUENCIA (pin 47) *****
TCCR5A = B00000000; //Modo Normal sin pines de salida
TCCR5B = B01000111; //Modo contador con flanco de subida en T5
TCNT5 = 0;
  
```

Figura 70. Timers caso trifásico con una carga

Se observa como en OCR4A se define la interrupción para que actúe cada 8 ms en vez de cada 2 ms, ya que la CPU no tenía la capacidad para hacerlo a 2 ms. Por lo tanto, este código presentado que es funcional, no será capaz de realizar el control de las fases de forma correcta.

5.10.6 Diseño de la unidad de control

Medición de la tensión para determinar la fase

La medida de la tensión en el presente controlador, está principalmente pensada para poder comparar las tensiones de cada fase en cada momento y así conocer la fase que hay que controlar. Se utilizará por tanto un circuito por cada fase del cual no se podrán extraer valores concluyentes de tensión. En cualquier caso con V_{1m} , V_{2m} y V_{3m} se estimará.

Para ello, se precisa de un circuito que permita reducir a valores adecuados para el microprocesador (0-5 V), pero permitiendo que tengan un elevado rizado de cara a que sea posible compararlos y determinar la fase. Para cumplir ambas funciones, se ha diseñado el siguiente circuito:

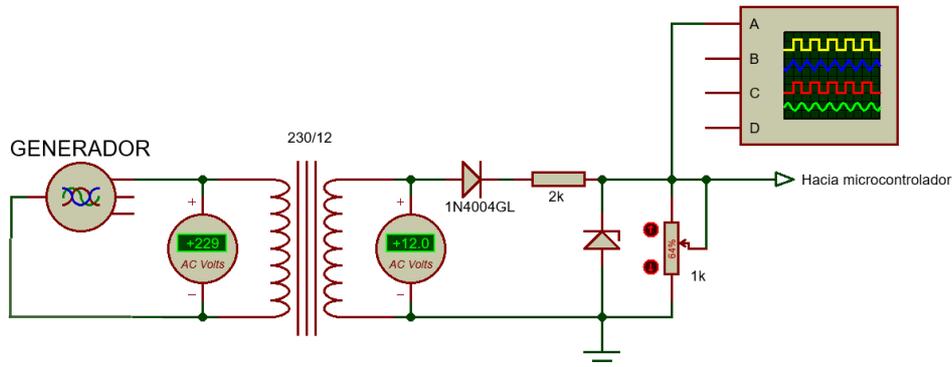


Figura 71. Circuito para determinar la fase, caso trifásico con una carga

El circuito, está compuesto a su entrada por un transformador 230/12 V, al cual le llega la tensión de fase del generador. Tras transformarse la tensión, se tiene un rectificador de media onda que elimina la parte negativa de la tensión alterna, convirtiéndola así en una tensión unidireccional, con la forma de la figura al no existir ningún filtro.

Para limitar la tensión que le llega al controlador, primero se tiene una resistencia de 2 kΩ y posteriormente un potenciómetro que debe ajustarse de forma que a su salida se obtengan 4 V en caso de que la tensión sea la nominal de 230 V.

En presente caso, el potenciómetro está posicionado de forma que su resistencia sea del 64% o de 0,64 kΩ. Al ser una simulación, estos valores podrían ser algo distintos en la realidad y deberían ajustarse. La onda obtenida en el osciloscopio a la salida de este circuito es la siguiente:

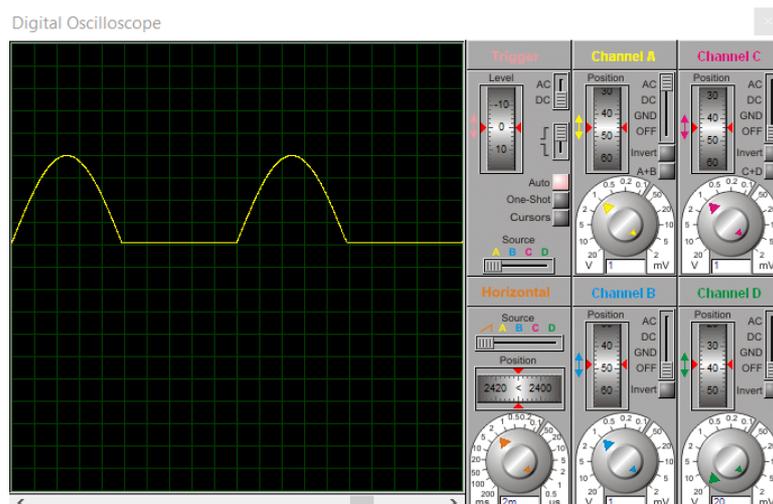


Figura 72. Tensión de salida circuito para determinar la fase

Como ya se ha explicado en los casos anteriores, el circuito se ha configurado de forma que 4 V a la salida equivalgan a 230 V, pudiendo medir valores de hasta 287,5 V cuando su valor

sea de 5 V en caso de subir la tensión. De esta forma existe un rango superior a 230 V para la medida y en caso de no corregirse del todo los valores de tensión, el circuito podrá funcionar de manera correcta.

Por último, existe un diodo zener utilizado para limitar la tensión en casos en los que esta pueda subir por encima de 287,5 V por una sobretensión. Las ondas obtenidas con los tres circuitos detectores de fase en conducción son las siguientes:

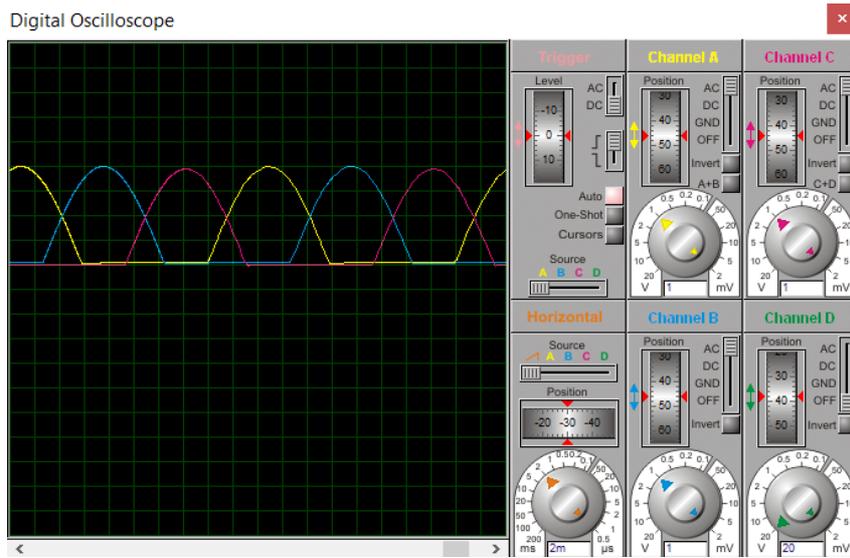


Figura 73. Tensión de salida circuito para determinar la fase, tres fases en funcionamiento

Los siguientes son los componentes utilizados en cada uno de los tres circuitos:

Tabla XIX. Componentes utilizados en el circuito para determinar la fase, caso trifásico única carga

Componente	Fabricante	Función	Cantidad
Transformador de PCB 44057	Myrra	Transformador 230/12	1
Diodo 1N4001	Vishai	Rectificador en puente	4
Resistor 2K MRS25	Fairchild	Ajuste de la tensión	1
Diodo Zener 1N5338B	On Semiconductor	Limitador de tensión	1
Potenciómetro RK11K1140A3L	Alps Electric	Ajuste fino de tensión	1

5.10.7 Diseño de la unidad de potencia

Esta unidad de potencia, será exactamente igual a la del caso monofásico, solo que a la entrada existirá un rectificador trifásico en vez de uno monofásico, siendo la resistencia exactamente igual en este caso.

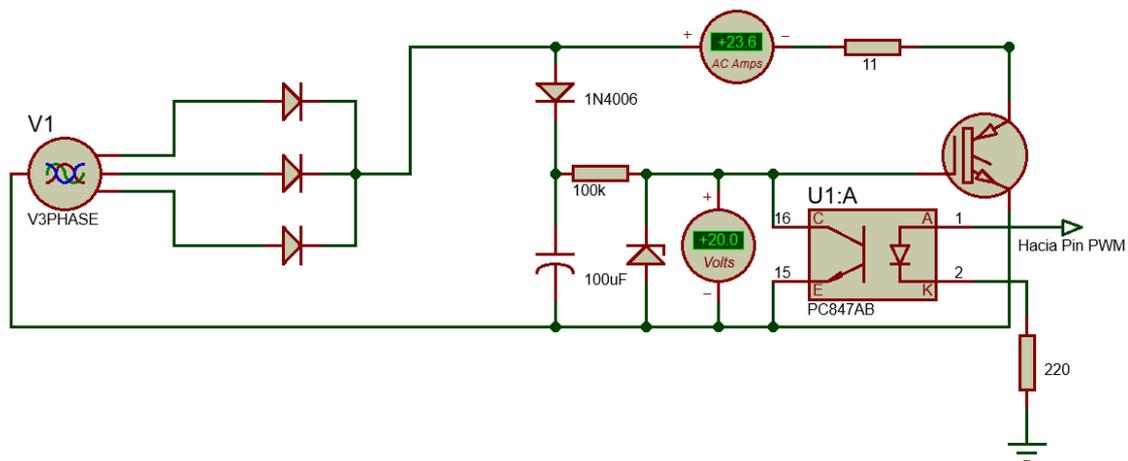


Figura 74. Circuito unidad de potencia caso trifásico con única carga por fase

Tabla XX. Componentes necesarios unidad de potencia ELC trifásico con única carga

Componente	Fabricante	Función	Cantidad
Diodo, VS-T40HFL100S05, Conmutación, 40A, 1000V	Vishai	Rectificador trifásico	3
Diodo 1N4006, 800 V 1 A	Vishai	Diodo	1
Condensador serie RS 100uF, 400 V	RS Pro	Filtro de condensador	1
Diodo zener 1N5357B, 20V	On semiconductor	Diodo estabilizador	1
Resistencia fija CFR100J100K	TE Connectivity	Resistencia estabilizadora	1
Optoacoplador LTV-814	Lite-On	Actuador del IGBT	1
Resistor CFR100 0,47 kΩ	TE connectivity	Resistencia fotodiodo	1
Módulo IGBT, IXGN320N60A3	IXYS	IGBT de conmutación	1
Resistencia en Panel 2,2 Ω 1 kW	TE Connectivity	Carga comunidad	5

5.10.8 Programa de control con Arduino

El siguiente programa de control no ha servido para realizar su función, como ya ha sido comentado anteriormente. Aun así, se podría tomar como base para realizar otro control similar con un microcontrolador más potente. Por lo tanto, aquí se explican sus diferencias con el caso trifásico con una carga por fase. La detección de las fases, basada en la tabla de la verdad antes expuesta, se expone en el siguiente diagrama de bloques:

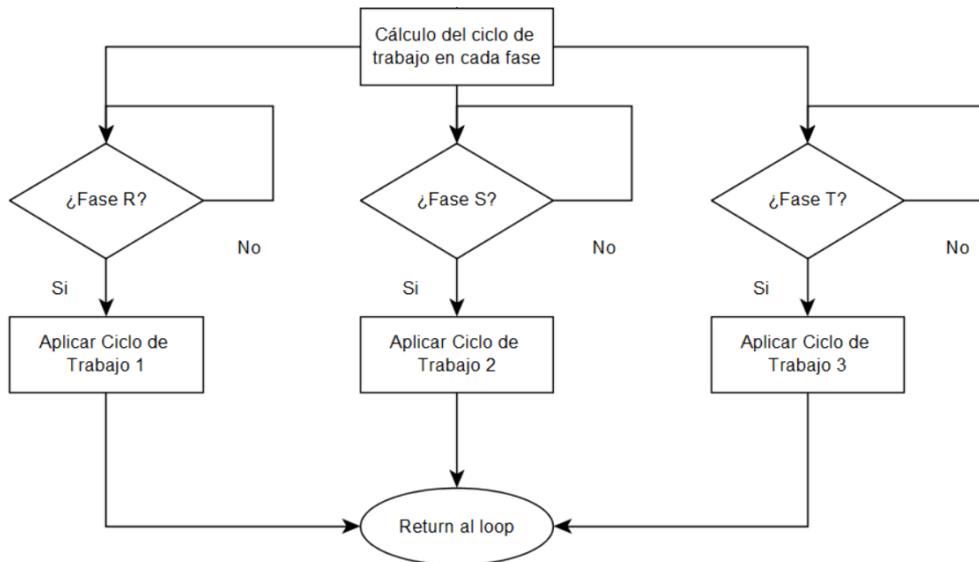


Figura 75. Diagrama de bloques cálculos de ciclo de trabajo, ELC trifásico con única carga

La muestra en el LCD de las variables en el loop principal es exactamente igual a la del caso trifásico, pero mostrando siempre V1m, V2m y V3m en el LCD, que son valores fijos de tensión de 230 V o más. Su control, añade toda la parte relativa a la detección de las fases para el control PWM. El código es el siguiente:

```

//***** VECTOR DE INTERRUPCIÓN CONTROLADO POR TIMER4*****

ISR(TIMER4_COMPA_vect) {

  cont_t ++; //Cuenta 1 cada vez que se activa la interrupción

  if (cont_t == 250) { //Cuenta 1 cada vez que se activa la interrupción
    f = TCNT5; //Cálculo de la frecuencia
    kf=(f/En); //Cálculo de kf

    TCNT5 = 0;
    cont_t = 0;

  }

  V1 = map(analogRead(Vr),0,1023,0,287.5);
  V1m = max(V1,230);
  V2 = map(analogRead(Vs),0,1023,0,287.5);
  V2m = max(V2,230);
  V3 = map(analogRead(Vt),0,1023,0,287.5); //Mapeo de la tensión
  V3m = max(V3,230); //Variable para mostrar tensión máxima siempre

  double Va =(analogRead(Ir)*5.0/1023);
  I1 = (Va-AcsOffset)/Sensibl;
  double Vb =(analogRead(Is)*5.0/1023);
  I2 = (Vb-AcsOffset)/Sensibl;
  double Vc =(analogRead(It)*5.0/1023); //Mapeo de la tensión del sensor de intensidad
  I3 = (Vc-AcsOffset)/Sensibl; //Conversión de tensión a intensidad

  W1 =(I1*V1m)/1000;
  W2 =(I2*V2m)/1000;
  W3 =(I3*V3m)/1000; //Cálculo de la potencia por fase
  W = W1+W2+W3; //Cálculo de la potencia total

  k1=((1-(I1/In))*200; //Cálculo de k1
  k2=((1-(I2/In))*200; //Cálculo de k2
  k3=((1-(I3/In))*200; //Cálculo de k3

//***** CONTROL DEL PWM POR FASE *****

if ((V1 > V2) && (V3 <= V1)) //Condiciones fase R
{

  OCR3A = k1*kf; //Cálculo del k1 e introducción en OCR3A
  constrain(OCR3A,0,200); //Limitación del duty cycle entre 0 y 200

}

if ((V2 > V3) && (V1 <= V2)) //Condiciones fase S
{

  constrain(OCR3A,0,200); //Cálculo de k2 introducción en OCR3A
  OCR3A= k2*kf; //Limitación del duty cycle entre 0 y 200

}

if ((V3 > V1) && (V2 <= V3)) //Condiciones fase T
{

  constrain(OCR3A,0,200); //Cálculo de k3 introducción en OCR3A
  OCR3A= k3*kf; //Limitación del duty cycle entre 0 y 200

}

}

```

Figura 76. Líneas de código de ISR ELC trifásico con única carga.

Básicamente en el código se realiza lo mismo que en el caso trifásico en la primera parte, pero se le añade una parte de control del PWM por fase.

La frecuencia es igual al valor de TCNT5 de nuevo porque con 250 interrupciones se cuentan 2000 ms, y en TCNT5 se mide 1 flanco de subida cada 20 ms (En el caso de ser la frecuencia de 50Hz). De esta forma, se miden 100 flancos de subida en 2000 ms y se sabe que:

$$TCNT5 = \frac{100 \cdot 1000 \text{ Hz}}{2000 \text{ ms} \cdot 1 \text{ ms}} = 50 \text{ Hz}$$

5.11 Cuarto de máquinas

El cuarto de máquinas de este proyecto, seguirá un diseño similar al de EMAS. En este se encontrará la turbina, el generador, el ELC y un cuadro eléctrico general. En este apartado se desarrollará principalmente los componentes eléctricos utilizados para la medida, sus protecciones y las características de la línea.

5.11.1 Obra Civil

La obra civil, al ser un generador de similares características a los utilizados por EMAS, será muy similar a la de sus proyectos. Medirá 3x4 y deberá de tener buena ventilación del aire y buen aislamiento térmico que sirva para evitar que la temperatura del generador y el resto de componentes eléctricos y electrónicos sufran sobrecalentamientos.

Un plano simplificado del cuarto de máquinas con los distintos elementos eléctricos que lo componen se muestra en el anexo II dentro de los planos de la comunidad rural.

5.11.2 Elementos de medida

Caso monofásico

Con el objetivo de controlar con mayor exactitud los distintos parámetros eléctricos a la salida del generador, en la comunidad y en la carga secundaria, se precisa de distintos elementos de medida complementarios a los del sistema electrónico.

Estos deben servir para poder detectar posibles errores y serán de panel, colocándose en el cuadro general del cuarto de máquinas. En caso de no precisar de excesivo presupuesto, algunos de estos elementos podrían no instalarse.

A la salida del generador, se colocará un voltímetro de panel en el cuadro eléctrico para conocer el valor de la tensión. Este instrumento de medida debe ser de hierro móvil, ya que la conexión es en corriente alterna y debe de tener la capacidad de medir hasta 300 V. Para esta función, se ha seleccionado un voltímetro analógico de la marca Sifam Tinsley, 300V, AC, -10°C a +55°C, Disyuntor 92 x 92 mm.

Para la medida de la intensidad a la salida del generador y en la carga secundaria, deberían instalarse dos amperímetros, cada uno con una función. Este instrumento de medida debe ser de hierro móvil, ya que la conexión es en corriente alterna y debe de tener la capacidad

de medir hasta al menos 25 A. Para ello se ha seleccionado un amperímetro de panel analógico Sifam Tinsley, 40A, AC, 96 x 96mm de Imán móvil.

En cuanto a la medida de la frecuencia, sería recomendable instalar un frecuencímetro que apoye las medidas obtenidas por el controlador ELC. El frecuencímetro seleccionado es de la marca Ditsen y su modelo es el DT-F96.

Caso trifásico

En el caso trifásico, se precisa de los mismos aparatos de medida. Es recomendable instalar tres amperímetros a la salida del generador y otros tres en la carga secundaria en el caso del control sin rectificador y un único amperímetro en el caso con rectificador.

Para el voltaje y la frecuencia, con instalarlos en una fase podría ser suficiente, ya que el AVR mantendrá la tensión con pocas variaciones y la frecuencia debe ser la misma en todas las fases.

5.11.3 Cables y elementos de protección

Caso monofásico

Se precisará de un magnetotérmico de 1P+N a la salida del generador, otro para proteger la iluminación auxiliar del cuarto de máquinas y otro para proteger la carga secundaria. Además, se instalarán varios relés de protección. Los magnetotérmico y las líneas seleccionadas son los siguientes:

Tabla XXI. Cables y protecciones cuarto de máquinas caso monofásico

Esquemas	Polaridad	P Demandada (kW)	f.d.p	Longitud (m)	Componentes
Línea cuarto de maquinas	F+N	2.88	0.95	5.00	Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 16 A; Icu: 6 kA; Curva: C Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x10)
Carga secundaria	F+N	5.00	1	5.00	Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 20 A; Icu: 6 kA; Curva: C Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x10)
Iluminación auxiliar	F+N	0.01	0.95	5.00	Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1,5)

Los cables seleccionados son los H07Z1-K (AS), conductores flexibles de cobre, protegidos por poliolefina termoplástica libre de halógeno y soportando tensiones de hasta 750 V. Estos cables están

ligeramente sobredimensionados para la instalación aquí tratada, cumpliendo con su cometido con creces.

A su vez, los magnetotérmico se han dimensionado teniendo en cuenta todo lo explicado en la parte relativa al marco teórico. Dependiendo de los requerimientos se han ajustado sus valores nominales y se ha seleccionado la curva C debido a que las cargas no presentarán picos de tensión en su funcionamiento. Este análisis se ha realizado para el resto de los apartados de la distribución, con ayuda del programa CYPELEC-REBT.

Canalizaciones:

La ejecución de las canalizaciones y su tendido se harán de acuerdo con lo expresado en el pliego de condiciones adjuntado en los anexos.

Tabla XXII. Canalizaciones cuarto de máquinas caso monofásico

Esquemas	Tipo de instalación
Línea cuarto de maquinas	B1: Conductores aislados, pared de madera Temperatura: 40.00 °C Tubo 32 mm
Carga secundaria	B1: Conductores aislados, pared de madera Temperatura: 40.00 °C Tubo 32 mm
Iluminación auxiliar	B1: Conductores aislados, pared de madera Temperatura: 40.00 °C Tubo 16 mm

En cuanto a los relés de protección, se instalará un relé de subtensión y sobretensión y uno de sobrefrecuencia y subfrecuencia. El de subfrecuencia y sobrefrecuencia será el relé de supervisión GIC MI81BL y el de subtensión y sobretensión el relé de supervisión GIC MG73BH. Son ambos monofásicos de bajo coste y con una precisión más que suficiente para un sistema de microgeneración.

Estos actuarán sobre el magnetotérmico general a la salida del generador, haciendo que se abra en caso de existir valores de tensión un 20% inferiores o superiores al nominal o de intensidad un 20% inferiores o superiores.

Caso trifásico

Se precisará de un magnetotérmico de 3P+N a la salida del generador, otro 1P+N para proteger la iluminación auxiliar del cuarto de máquinas y otro 3P+N para proteger las cargas secundarias en el caso de una carga por fase. Además, se instalarán varios relés de protección. Los magnetotérmico y las líneas seleccionadas son los siguientes:

Tabla XXIII. Cables y protecciones cuarto de máquinas casos trifásicos

Esquemas	Polaridad	P Demandada (kW)	f.d.p	Longitud (m)	Componentes
Línea cuarto de maquinas	3F+N	2.88	0.95	5.00	Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 6 A; Icu: 4.5 kA; Curva: C Cable, H07Z1-K (AS) 5(1x6)
Caso carga secundaria con carga por fase	3F+N	5.00	1	5.00	Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 10 A; Icu: 6 kA; Curva: C Cable, H07Z1-K (AS) 5(1x10)
Iluminación auxiliar	F+N	0.01	0.95	5.00	Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1,5)

Canalizaciones:

Tabla XXIV. Canalizaciones cuarto de máquinas caso trifásico

Esquemas	Tipo de instalación
Línea cuarto de maquinas	B1: Conductores aislados, pared de madera Temperatura: 40.00 °C Tubo 32 mm
Carga secundaria	B1: Conductores aislados, pared de madera Temperatura: 40.00 °C Tubo 32 mm
Iluminación auxiliar	B1: Conductores aislados, pared de madera Temperatura: 40.00 °C Tubo 16 mm

En cuanto a los relés de protección, se instalará un relé de subtensión y sobretensión y uno de sobrefrecuencia y subfrecuencia. El de subfrecuencia y sobrefrecuencia será el relé de supervisión GIC MI91BL y el de subtensión y sobretensión el relé de supervisión GIC MG73BH. Son ambos trifásicos de bajo coste y con una precisión más que suficiente para un sistema de microgeneración.

5.11.4 Puesta a tierra

La instalación de puesta a tierra de la obra se efectuará de acuerdo con la reglamentación vigente, concretamente lo especificado en el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión en su Instrucción 18, quedando sujeta a la misma la toma de tierra y los conductores de protección.

La resistencia de un electrodo depende de sus dimensiones, de su forma y de la resistividad del terreno.

El tipo y profundidad de enterramiento de las tomas de tierra deben ser tales que la posible pérdida de humedad del suelo, la presencia de hielo u otros efectos climáticos, no aumenten la resistencia de la toma de tierra por encima del valor previsto. La profundidad nunca será inferior a 0.5 m.

Esquema de protección a tierra: La instalación está alimentada por una red de distribución según el esquema de conexión a tierra TT (neutro a tierra).

Resistencia de la puesta a tierra de las masas: Las características del terreno son las que se especifican a continuación.

- Constitución: Terraplenes cultivables poco fértiles
- Resistividad: 500.00 Ω

Resistencia de la puesta a tierra del neutro: Las características del terreno son las que se especifican a continuación:

- Constitución: Terraplenes cultivables poco fértiles
- Resistividad: 500.00 Ω

Toma de tierra

Red de toma de tierra de las masas de la instalación compuesta por conductor de cobre desnudo de 35 mm² de sección y 40.00 m de longitud, 4 pica vertical aislada con 2.00 m de longitud.

Red de toma de tierra del neutro compuesta por conductor de cobre desnudo de 35 mm² de sección y 40.00 m de longitud, 4 pica vertical aislada con 2.00 m de longitud.

Conductores de protección

Los conductores de protección discurrirán por la misma canalización sus correspondientes circuitos y presentarán las secciones exigidas por la Instrucción ITC-BT 18 del REBT.ç

5.12 Transporte y distribución de la energía

En este proyecto, para realizar el cálculo de las redes de distribución de la energía en la comunidad desde la microcentral hidroeléctrica, se ha utilizado el programa CYPELEC REBT. Debido a que está basado en el reglamento de baja tensión español y otras diversas normas, esta distribución podría variar bastante dependiendo del país de realización de uno de estos sistemas de microgeneración.

Debido a que esta parte está únicamente realizada con fines académicos, para realizar una parte más ligada con la ingeniería eléctrica y no para la búsqueda de una mejora en el sistema de generación, se ha utilizado el reglamento y la normativa que sigue este programa.

En cualquier caso, al ser un sistema de muy baja potencia para las normativas y reglamentos, existe la posibilidad de ajustar el sistema de generación a un caso como el que aquí se va a tratar. Por lo tanto, en cuanto a las distintas unidades de una distribución eléctrica, no seguirán todas las bases de una distribución en BT normal y se deberán ajustar a los planos de la comunidad que se han realizado.

En cuanto al cableado y las protecciones eléctricas, sí que han sido completamente dimensionadas para permitir al sistema de microgeneración funcionar con seguridad y

según la normativa. Se ha diseñado por lo tanto un sistema funcional, pero con una disposición no habitual para este tipo de proyectos. En este caso, se han analizado también las diferencias existentes entre un caso trifásico y uno monofásico.

En este se ha calculado el cableado precisado en la acometida aérea, las protecciones existentes en la caja general de protección, la línea general de alimentación y todas las derivaciones individuales que conforman las viviendas de la comunidad. También se ha instalado la centralización de contadores en la instalación, sirviendo estos en los proyectos de EMAS para que los usuarios paguen un pequeño coste por la energía, destinado al mantenimiento de la microcentral. Los planos de las distribuciones se adjuntan como anexos al proyecto.

Por último, cabe destacar la realización de un plano a modo de croquis de la distribución de las cargas en las viviendas, basadas en la tabla del apartado relativo a la demanda energética de la microcentral teórica. En el diseño se han tenido en cuenta a su vez todos los factores de simultaneidad de las cargas, los cuales aparecen también en esa tabla.

5.12.1 Acometida aérea

Caso monofásico

El origen de la instalación vendrá determinado por una intensidad de cortocircuito monofásica en cabecera de: 2.01 kA. La acometida es aérea a 40°C y sin canalizaciones, existiendo una distancia de 80 m hasta el cuadro general de protección.

Tabla XXV. Componentes acometida aérea caso monofásico

Esquemas	Polaridad	P Demandada (kW)	f.d.p	Longitud (m)	Componentes
Acometida	F+N	2.88	0.95	80.00	Cable, RZ1-K (AS) 3(1x6)

En esta ocasión, el cableado es RZ1-K (AS) 3(1x6) con polietileno reticulado como aislamiento, pudiendo soportar tensiones de hasta 1000 V. Debido a la normativa, la acometida debía de tener este cable como mínimo, pero en la realidad podría utilizar el anterior sin ningún problema.

Caso trifásico

El origen de la instalación vendrá determinado por una intensidad de cortocircuito monofásica en cabecera de: 4.00 kA. La acometida es aérea a 40°C y sin canalizaciones, existiendo una distancia de 80 m hasta el cuadro general de protección.

Tabla XXVI. Componentes acometida aérea caso trifásico

Esquemas	Polaridad	P Demandada (kW)	f.d.p	Longitud (m)	Componentes
Acometida	F+N	2.88	0.95	80.00	Cable, RZ1-K (AS) 5(1x6)

5.12.2 Línea general de alimentación (LGA) y caja general de protección (CGP)

Tras la acometida aérea, se llega a la caja general de protección, donde se protege la instalación eléctrica general. Entre esta y la salida de las líneas de enlace, existirá una línea general de alimentación.

Caso monofásico

Tabla XXVII. Componentes LGA y CGP caso monofásico

Esquemas	Polaridad	P Demandada (kW)	f.d.p	Longitud (m)	Componentes
LGA	F+N	2.88	0.95	5.00	Fusible, Tipo gL/gG; In: 20 A; Icu: 20 kA Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x6) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 16 A; Icu: 6 kA; Curva: C

Por normativa, en la caja general de protección debe posicionarse un fusible, que en este caso es de 20 A y 20 kA, estando de nuevo sobredimensionado.

Canalizaciones:

La ejecución de las canalizaciones y su tendido se harán de acuerdo con lo expresado en el pliego de condiciones adjuntado en los anexos. Esto ocurre en las siguientes canalizaciones también.

Tabla XXVIII. Canalización LGA caso monofásico

Esquemas	Tipo de instalación
LGA	B1: Conductores aislados, pared de madera Temperatura: 40.00 °C Tubo 32 mm

Caso trifásico

Tabla XXIX. Componentes LGA y CGP caso trifásico

Esquemas	Polaridad	P Demandada (kW)	f.d.p	Longitud (m)	Componentes
LGA	F+N	2.88	0.95	5.00	Fusible, Tipo gL/gG; In: 8 A; Icu: 20 kA Cable, H07Z1-K (AS) 5(1x6) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 6 A; Icu: 4.5 kA; Curva: C Interruptor general de maniobra

Canalizaciones:

Tabla XXX. Canalización LGA caso trifásico

Esquemas	Tipo de instalación
LGA	B1: Conductores aislados, pared de madera Temperatura: 40.00 °C Tubo 32 mm

5.12.3 Líneas de enlace e iluminación auxiliar

A partir de esta línea, la distribución es común para el caso monofásico y el trifásico, desdoblándose por fases en este último.

En ambos casos el circuito se desdobra en tres zonas diferenciadas, distribuyendo la energía en el caso trifásico cada una con una de las fases. La línea oeste está en la fase R, la línea centro en la S y la línea este en T.

Además, se tiene en cuenta una iluminación auxiliar que existe en la caseta donde está contenido el cuadro general de protección, la cual estará en la fase S en el caso trifásico.

Tabla XXXI. Componentes líneas de enlace e iluminación auxiliar

Esquemas	Polaridad	P Demandada (kW)	f.d.p	Longitud (m)	Componentes
Línea de enlace oeste	F+N	0.98	0.93	35.00	Cable, RZ1-K (AS) 3(1x6) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 6 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C
Línea de enlace centro	F+N	0.92	0.99	20.00	Cable, RZ1-K (AS) 3(1x6) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 6 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C

Esquemas	Polaridad	P Demandada (kW)	f.d.p	Longitud (m)	Componentes
Línea de enlace este	F+N	0.97	0.93	35.00	Cable, RZ1-K (AS) 3(1x6) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 6 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C
Iluminación auxiliar	F+N	0.01	0.95	5.00	Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x6) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C

En esta ocasión, al ser la canalización de tipo D1 y enterrada, la normativa exigía que el cable fuera mínimo RZ1-K (AS). En un caso real, se podría utilizar uno de menor categoría que cumpliera.

Canalizaciones

Tabla XXXII. Canalizaciones líneas de enlace e iluminación auxiliar

Esquemas	Tipo de instalación
Líneas de enlace (este, oeste y centro)	D1: Cable unipolar/multipolar en conductos en el suelo Temperatura: 25.00 °C
Iluminación auxiliar	B1: Conductores aislados, pared de madera Temperatura: 40.00 °C Tubo 16 mm

5.12.4 Derivaciones individuales

Línea de enlace oeste

Esta línea de enlace alimenta 6 viviendas, 1 taller y el motor en ese último. En el caso trifásico estará unida a la fase R. Aunque no se presente aquí, el cableado de la electrificación de las cargas de cada uno de los lugares se incluyó en el cálculo y por ello aparece en el presupuesto presentado más adelante.

Tabla XXXIII. Componentes de las derivaciones individuales en la línea de enlace oeste

Esquemas	Polaridad	P Demandada (kW)	f.d.p	Longitud (m)	Componentes
Vivienda 1	F+N	0.10	0.98	14.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Vivienda 2	F+N	0.10	0.98	19.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Vivienda 3	F+N	0.10	0.98	24.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Vivienda 4	F+N	0.10	0.98	29.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Vivienda 5	F+N	0.10	0.98	34.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Vivienda 6	F+N	0.10	0.98	39.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Taller 1	F+N	0.14	0.97	50.00	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC

Esquemas	Polaridad	P Demandada (kW)	f.d.p	Longitud (m)	Componentes
Linea motor 1	F+N	0.53	0.80	45.00	Fusible, Tipo gL/gG; In: 6 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 4 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC

Cada una de las derivaciones individuales tiene un contador, ya que los proyectos de EMAS los instalan para medir el consumo y que los habitantes paguen un pequeño coste para el mantenimiento del sistema.

Canalizaciones

Tabla XXXIV. Canalizaciones de las derivaciones individuales en la línea de enlace este

Esquemas	Tipo de instalación
Vivienda 1-7 Taller 1 y motor 1	B1: Conductores aislados, pared de madera Temperatura: 40.00 °C Tubo 16 mm

Línea de enlace centro

Esta línea de enlace alimenta 7 viviendas, una de ellas con comercio y la casa comunal. En el caso trifásico estará unida a la fase S.

Tabla XXXV. Componentes de las derivaciones individuales en la línea de enlace centro

Esquemas	Polaridad	P Demandada (kW)	f.d.p	Longitud (m)	Componentes
Vivienda 7	F+N	0.10	0.98	14.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Vivienda 8	F+N	0.10	0.98	19.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC

Esquemas	Polaridad	P Demandada (kW)	f.d.p	Longitud (m)	Componentes
Vivienda 9	F+N	0.10	0.98	24.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Vivienda 10	F+N	0.10	0.98	29.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Vivienda 11	F+N	0.10	0.98	34.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Vivienda 12	F+N	0.10	0.98	39.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Vivienda 13 (Con comercio)	F+N	0.18	0.99	56.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, RZ1-K (AS) 3(1x6) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Casa comunal	F+N	0.17	0.98	64.00	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, RZ1-K (AS) 3(1x6) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC

Canalizaciones

Tabla XXXVI. Canalizaciones de las derivaciones individuales en la línea de enlace centro

Esquemas	Tipo de instalación
Vivienda 7-12	B1: Conductores aislados, pared de madera Temperatura: 40.00 °C Tubo 16 mm
Vivienda 13 (Con comercio)	D1: Cable unipolar/multipolar en conductos en el suelo Temperatura: 25.00 °C

Esquemas	Tipo de instalación
Casa comunal	D1: Cable unipolar/multipolar en conductos en el suelo Temperatura: 25.00 °C

Las canalizaciones D1 están porque la casa comunal y la vivienda con comercio están algo alejadas del resto de viviendas y por ello se ha decidido realizar el transporte en conductos en el suelo. Por normativa, se ha seleccionado el cable RZ1-K (AS) en estos casos.

Línea de enlace este

Esta línea de enlace alimenta 5 viviendas, una de ellas con comercio, 1 taller y el motor que existe en este. En el caso trifásico estará unida a la fase T.

Tabla XXXVII. Componentes de las derivaciones individuales en la línea de enlace este

Esquemas	Polaridad	P Demandada (kW)	f.d.p	Longitud (m)	Componentes
Vivienda 14	F+N	0.10	0.98	14.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Vivienda 15	F+N	0.10	0.98	19.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Vivienda 16	F+N	0.10	0.98	24.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Vivienda 17	F+N	0.10	0.98	29.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC

Esquemas	Polaridad	P Demandada (kW)	f.d.p	Longitud (m)	Componentes
Vivienda 18 (Con comercio)	F+N	0.18	0.99	37.50	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Taller 2	F+N	0.14	0.97	45.00	Fusible, Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA Contador Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC
Línea motor 2	F+N	0.53	0.80	40.00	Fusible, Tipo gL/gG; In: 6 A; Icu: 20 kA Contador secundario (VE) Cable, H07Z1-K (AS) 3(1x1.5) Magnetotérmico, Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 4 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C Diferencial, Instantáneo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC

Canalizaciones

Tabla XXXVIII. Canalizaciones de las derivaciones individuales en la línea de enlace oeste

Esquemas	Tipo de instalación
Vivienda 14-18	B1: Conductores aislados, pared de madera
Taller 2	Temperatura: 40.00 °C
Línea motor 2	Tubo 16 mm

5.13 Diseño de la Maqueta demostrativa

5.13.1 Explicación básica de la maqueta

Por medio de esta maqueta demostrativa, se pretende realizar a escala una demostración del funcionamiento de la microcentral, centrada en la potencia que genera una pequeña turbina banki impresa en una impresora 3D.

Adecuándose a los medios disponibles, se ha pretendido realizar una asimilación en muy pequeña escala a un proyecto real. Aún con ese objetivo, los resultados han sido limitados, sobretudo en los apartados más eléctricos/electrónicos, los cuales difieren en gran medida del caso teórico anteriormente planteado.

Dado que los recursos para fabricar el modelo no son muy elevados se ha aprovechado un banco de ensayos utilizado en prácticas de laboratorio en la Escuela de Ingeniería de Bilbao II. Dicho banco dispone de una bomba que será la encargada de inyectar el agua en la turbina, el escalado del modelo se ha realizado en función de la bomba y teniendo en cuenta que la impresora 3d que debe de fabricar el rodete no puede fabricar piezas mayores de 18cm.

Además se dispone de un motor asíncrono para usarlo como generador, pero para ello será necesario que la velocidad que le llegue al generador sea mayor que su velocidad con el deslizamiento, pretendiendo realizarlo con 1500r.p.m. y necesitando una transmisión de potencia al igual que el montaje real. También se usará un variador de frecuencia para regular la velocidad del generador y unos resistores para disipar la energía producida.

En las partes más mecánicas, mi única colaboración fue ayudar en el montaje, no existiendo ningún elemento diseñado por mí aparte de la selección del generador asíncrono y el variador de frecuencia.

5.13.2 Turbina escogida y montaje

La turbina banki escogida, ha sido diseñada por Unai Ayude (Ayude Prieto, 2018) y después impresa en impresora 3D en tres partes que después se juntaron. Para fabricar el rodete, se utilizaron las leyes de semejanza en turbomáquinas. De esta forma, se pudo realizar una maqueta a pequeña escala de la del caso teórico antes planteado:

Tabla XXXIX. Características generales maqueta

Diámetro exterior	160mm
Diámetro interior	112.96mm
Número de álabes	32
Radio de los álabes	21,53mm
Espesor de los álabes	2mm
Sector de los álabes	82°
Paso angular	11,25°
Ángulo 1	90°
Ángulo 2	21,27°
Caudal	0.01m/s
Altura	15m
Velocidad de giro del generador	1500r.p.m.
Velocidad de giro del rodete	860r.p.m.
Potencia	250W

Para la fabricación del modelo ha sido necesaria la ayuda de una impresora 3D la cual ha permitido realizar un rodete y varios inyectores por un coste muy bajo. Mi aporte en la maqueta fue ayudando a realizar su montaje y seleccionando y ensayando los motores usados como generadores.



Figura 77. Parte del rodete de la turbina banki para la maqueta



Figura 78. Maqueta vista de la turbina, la caja de protección y el distribuidor

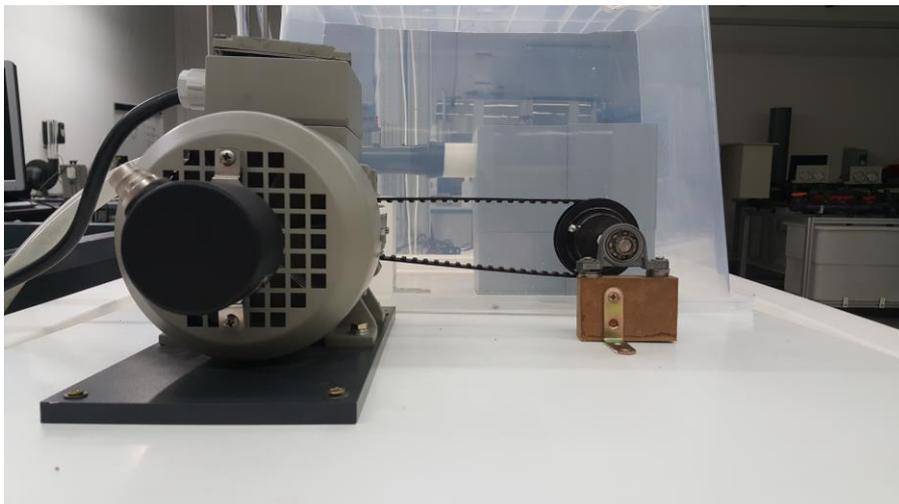


Figura 79. Vista de la maqueta, generador y transmisión de potencia

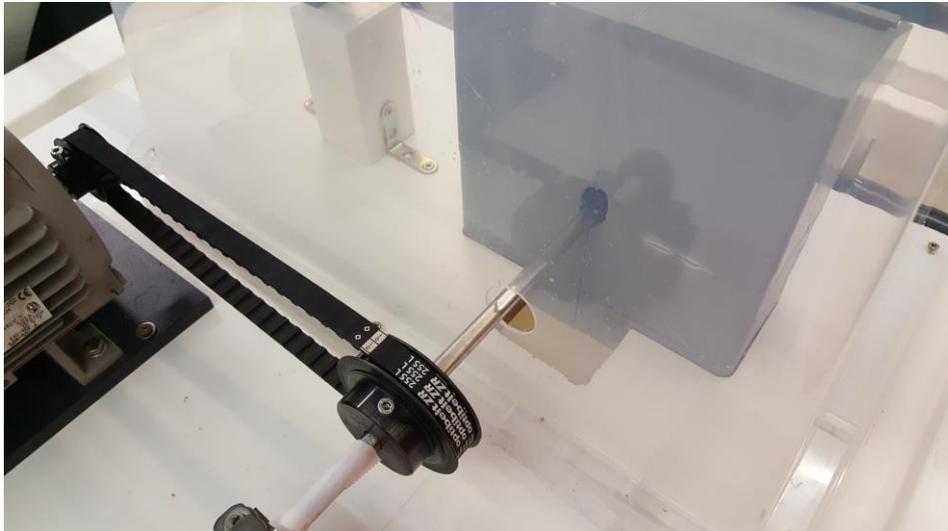


Figura 80. Vista de la maqueta, transmisión de potencia

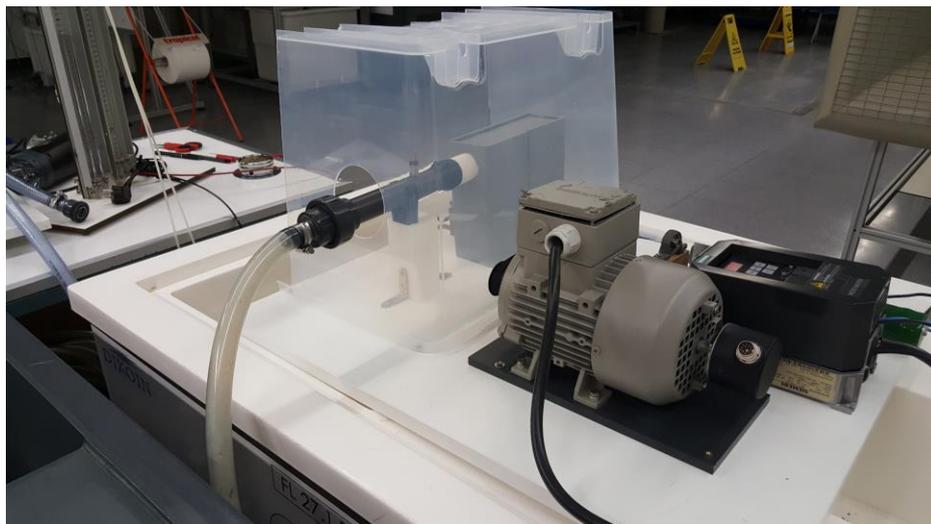


Figura 81. Vista general de la maqueta con el varador de frecuencia y la carga de frenado

Para llegar a transmitir potencia se ha realizado un dimensionamiento de una correa sincronizante cuyos datos son los siguientes:

Tabla XL. Características transmisión de potencia

Relación de transmisión i	1,75
Diámetro de la polea en el eje	63,7mm
Diámetro de la polea en el generador	36,5mm

5.13.4 Bomba

Se utiliza una bomba de 600 W de potencia que se pretende hacer trabajar con una altura de 15 m y un caudal de 100 l/min. A continuación se presenta la curva característica de la bomba y su punto de funcionamiento.

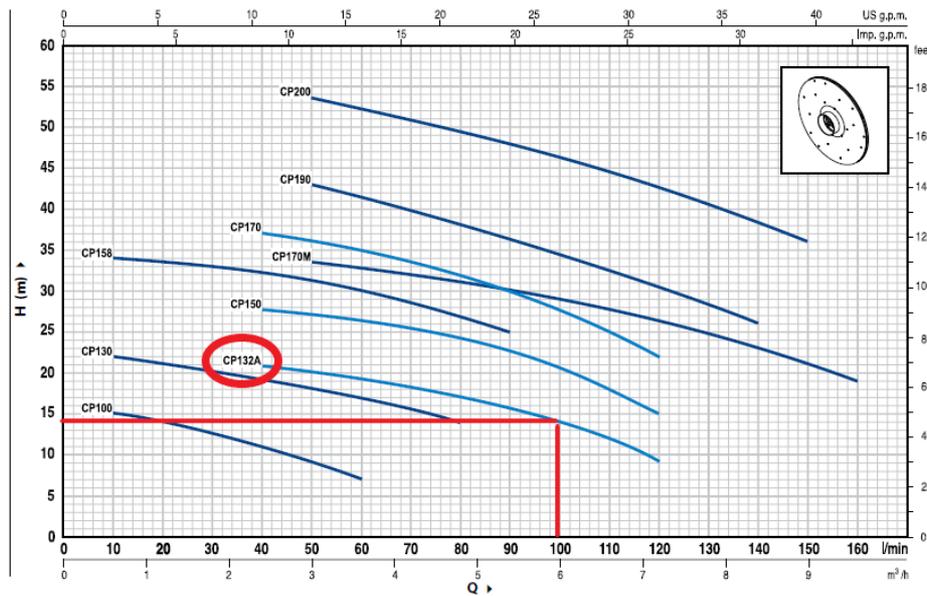


Figura 82. Curva característica de la bomba y punto de funcionamiento.

5.13.5 Generador y variador de frecuencia

Para este proyecto, debido a que se dispone de red eléctrica y que además las máquinas más accesibles en la universidad son asíncronas, se utilizara para la maqueta demostrativa una de estas máquinas como generador.

El objetivo principal es utilizarlo a la potencia máxima que pueda generar la turbina, disipando su energía en una resistencia de frenado conectada al variador. De esta forma, controlando las variables que influyen en la generación de energía, se pretende calcular la potencia eléctrica generada y descontando pérdidas obtener la potencia mecánica de la turbina.

El modelo escogido, por estas disponible en el laboratorio, es la maquina asíncrona 1LA70702AA10, de la marca Siemens. Las principales características eléctricas y constructivas se presentan en las siguientes tablas, extraídas de su hoja de características. La máquina asíncrona es la que se puede observar en las imágenes del apartado 5.13.3.

Referencia	Potencia (Kw)	Frame	Velocidad (RPM)	Rendimiento	Factor de potencia	Corriente a 400 V
1LA70602AA10	0,18	63M	2820	63	0,82	0,51
1LA70632AA10	0,25	63M	2830	65	0,82	0,68
1LA70702AA10	0,37	71M	2740	66	0,82	1
1LA70732AA10	0,55	71M	2800	71	0,82	1,36
1LA70802AA10	0,75	80M	2855	73	0,86	1,73

Se puede observar en estas que su potencia es de 0,37 kW, siendo esta superior a la entregada por la turbina. Por otra parte, su rendimiento teórico es bastante reducido, por lo que para obtener mediante ensayos la potencia de la turbina, habrá que tenerlo en cuenta. Por otro lado, su factor de potencia es del 0,82 p.u, pero al ser ensayado con una resistencia pura, tomara el de la carga que es la unidad. El motor está conectado en triángulo.

En cuanto al variador de frecuencia, se seleccionó un variador Micro Master 440. Este estaba conectado a la maquina asíncrona y a un resistor de carga, el cual en caso de que el motor generase debería quemar toda la energía generada. El resistor era de 300W, pudiendo por tanto quemar más energía que la máxima teóricamente generada por la turbina. Estas se pueden observar en la siguiente figura:



Figura 83. Variador de frecuencia Micromaster 440 y reóstato de frenado

Tabla XLI. Parámetros del micromaster reseñables para este ensayo

Parámetro	Función	Selección	Descripción
P001	Selección de valor a visualizar	0-7	Segun necesidades
P009	Parametros protegidos	3	Todos editables
P070	Ciclo de trabajo reóstato de freno	4	100% (Disipación total)
P081	Frecuencia nominal (Hz)	50	Ajustado en función del motor
P082	Velocidad nominal (rpm)	1370	
P083	Corriente nominal (A)	1,03	
P084	Tension nominal (V)	400	
P085	Potencia nominal (kW)	0,37	

El parámetro 70 configura el IGBT de la siguiente figura para que conduzca en todo momento (duty cycle 100%) cuando se genere energía y así la disipe en el reóstato de frenado instalado. El reostato se conecta en B+ y B- de la figura.

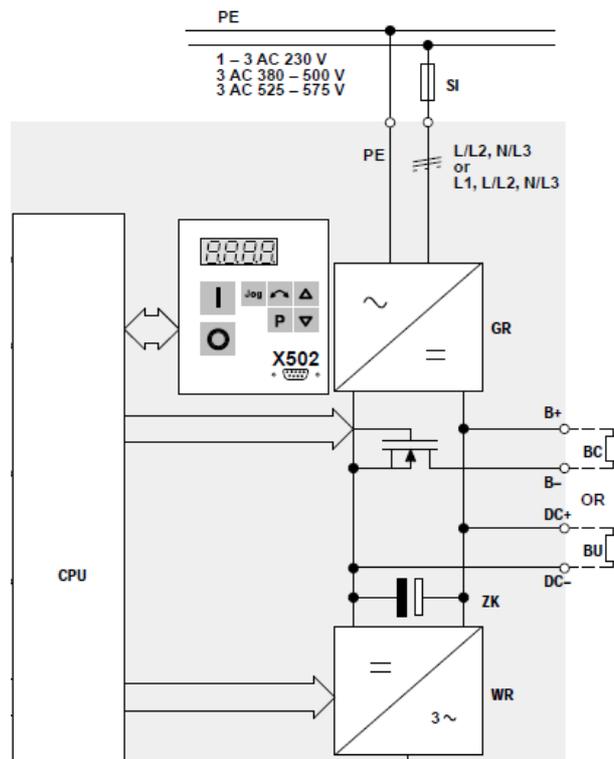


Figura 84. IGBT y reóstato de frenado en Micromaster

6 Resultados

6.1 Descripción de resultados

En este apartado se exponen los resultados obtenidos en los apartados por medio de ensayos y por ello no se expone la distribución eléctrica, de la cual se han obtenido planos que se presentan en el anexo II.

6.1.1 Simulación ELC caso monofásico

Simulación en Proteus

A partir de los circuitos diseñados en proteus, se han intentado ensayar los circuitos diseñados, existiendo problemas de CPU en el programa debido a la cantidad de componentes usados y al control de arduino. Por ese motivo, no has sido posible conseguir simular el IGBT y la carga y aunque están montados en el programa, se han suprimido de la simulación para conseguir los resultados del PWM que controla su disparo.

Se ha observado la medida de la intensidad a la entrada del sensor, el voltaje obtenido a la salida del sensor y después se ha comparado con el que marcaba el arduino, para distintas potencias, las cuales se han controlado modificando el valor de la carga que simula la comunidad y así modificando la corriente que le llega a esta. Además se ha comprobado el valor de la frecuencia, ensayándola para casos de 50Hz y de 55Hz. Al ser el generador de potencia infinita y frecuencia fijada, no es posible simularlo al 100% como si fuera un generador, pero modificando la carga se consiguen distintos valores de potencia.

Tabla XLII. Resultados simulación Proteus caso monofásico

Ireal (A)	Va (V)	I1 (A)	f(Hz)	D	PWM (Hz)	Preal	Pteórica
21,7	4,3	21,7	50	199,0	4975	4991	4991
21,7	4,3	21,7	55	181,0	4524	4991	4991
10,2	3,1	9,9	50	91,7	2294	2346	2300
10,2	3,1	9,9	55	83,4	2085	2346	2300
3,6	2,53	3	50	27,5	688	828	690
3,6	2,53	3	55	25,0	625	828	690
0	0	0	50	0	0	0	0

Se puede observar como conforme la intensidad disminuye, existe una mayor diferencia entre la intensidad en el circuito y la intensidad que se obtiene en el LCD. Por tanto, existe un ligero error en esos casos, que en la realidad se solventaría al aumentar la frecuencia por el desequilibrio, de forma que la intensidad se regularía aún más.

Los resultados obtenidos y el PWM que aparece en la simulación debido al control se adjuntan a continuación.

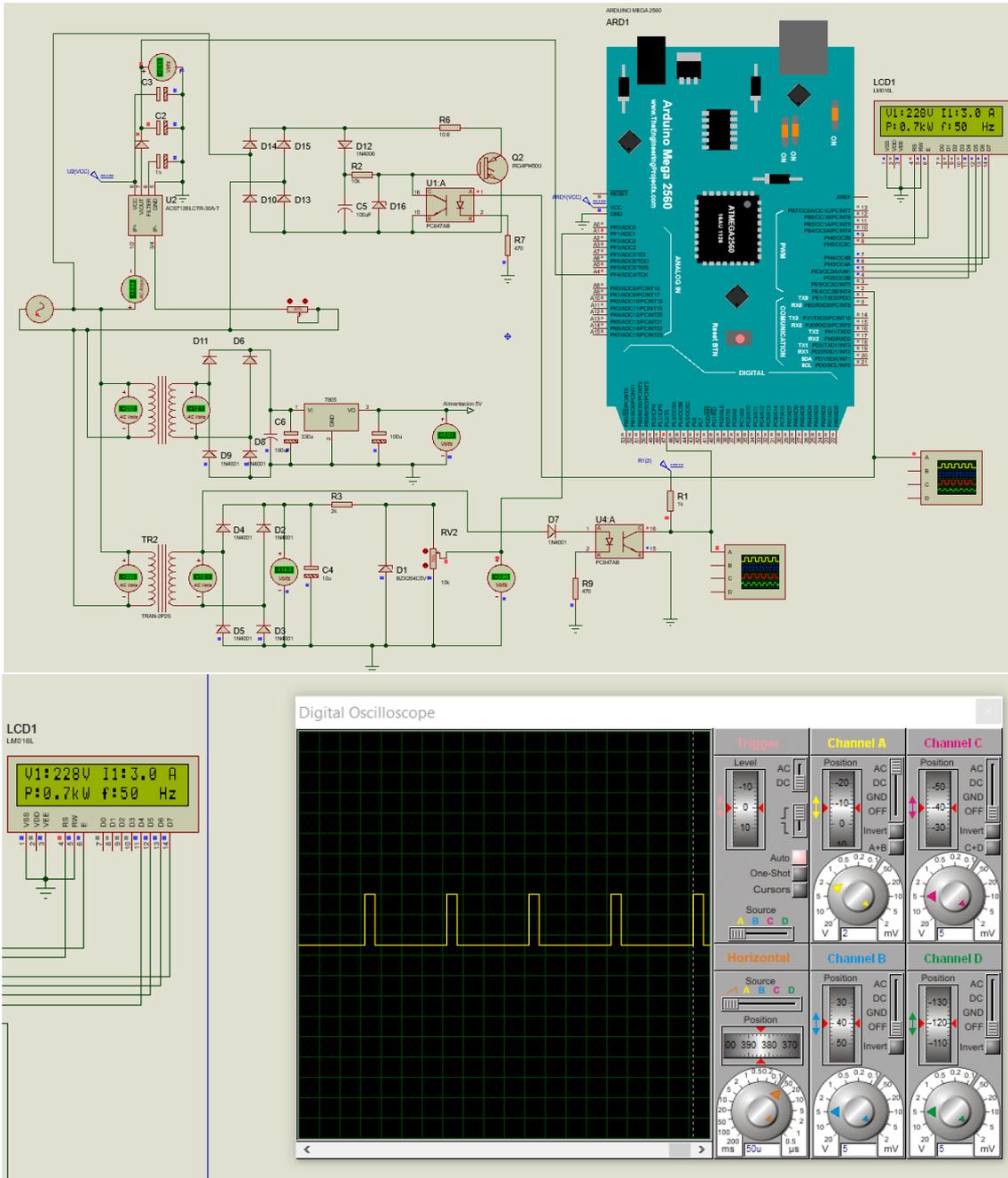


Figura 85. Simulación 3 A y 50 Hz

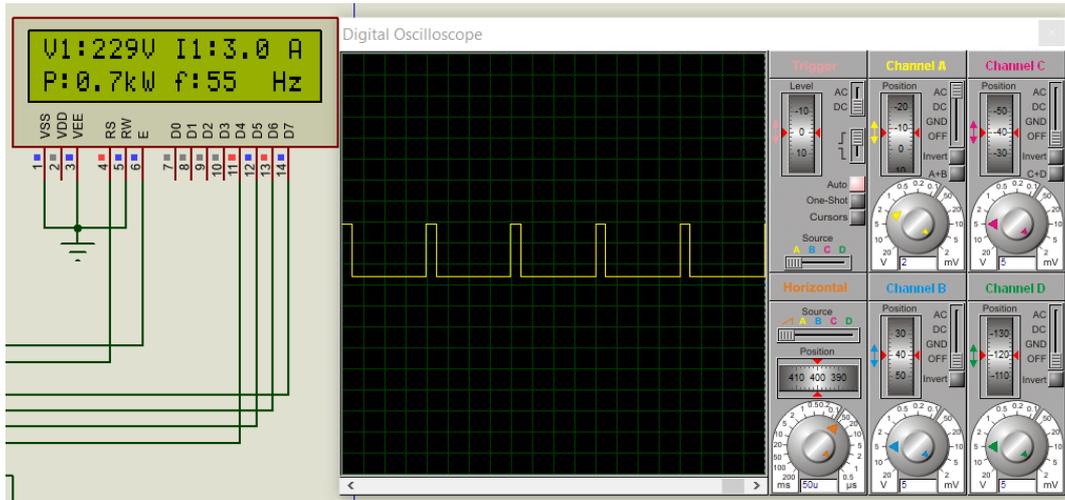


Figura 86. Simulación 3 A y 55 Hz

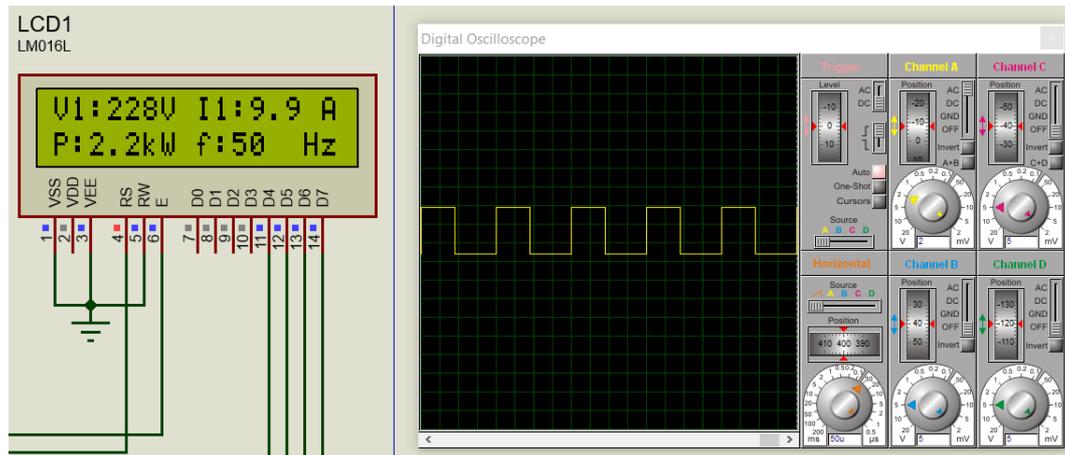


Figura 87. Simulación 10 A y 50 Hz

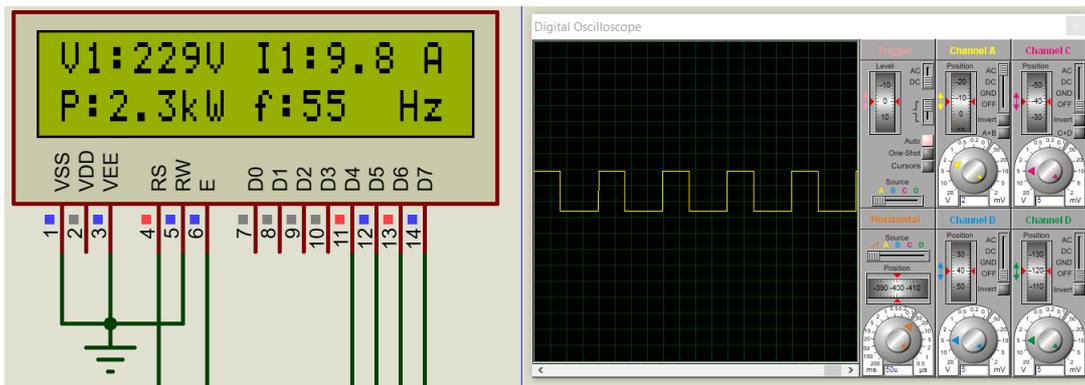


Figura 88. Simulación 10 A y 55 Hz

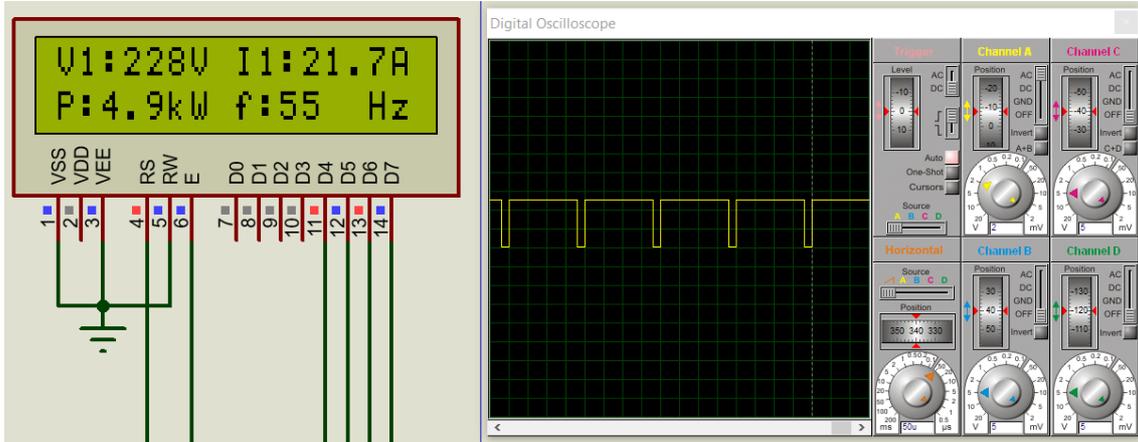


Figura 89. Simulación 21,7 A y 50 Hz

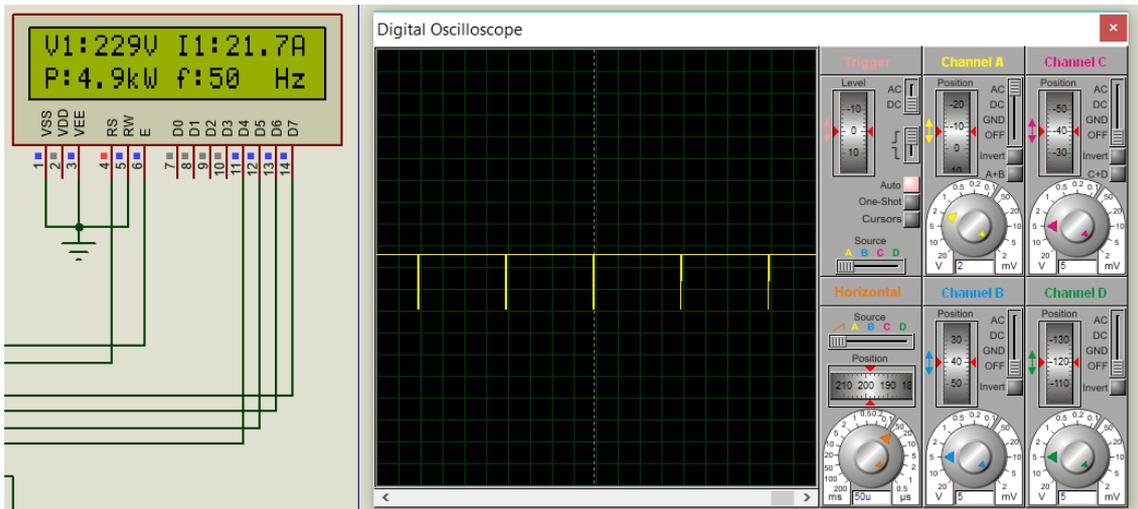


Figura 90. Simulación 21,7 A y 55 Hz

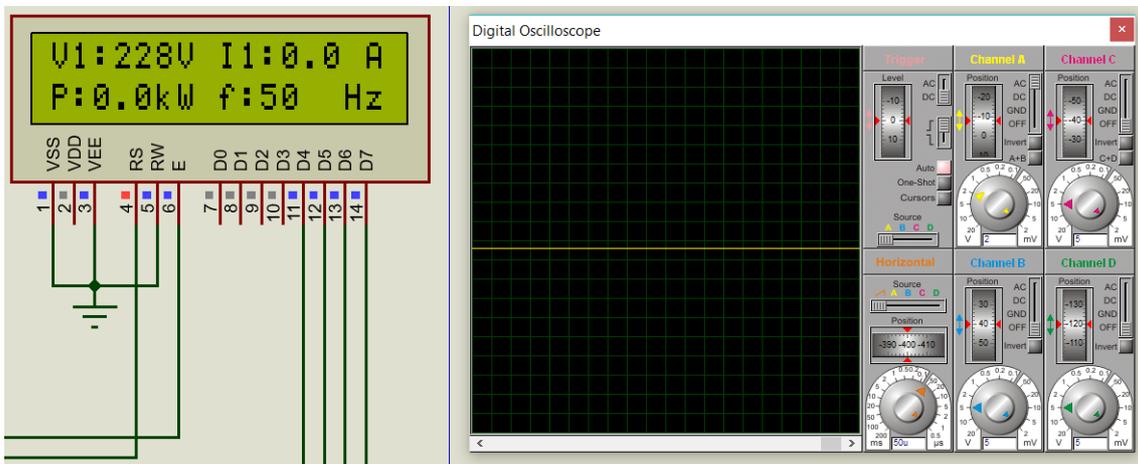


Figura 91. Simulación 0 A y 50 Hz

Se observa por medio de este control que al ser mayor la intensidad que le llega a la comunidad, si la frecuencia aumenta la potencia se disipa más rápidamente que cuando en la comunidad existe menos potencia. Este resultado es muy positivo, debido a que si la intensidad cae, el control actuará más rápidamente si existe más carga en la comunidad y así se ajusta mejor la potencia generada a la consumida en momentos más críticos.

En la siguiente gráfica, obtenida de los datos de la tabla, se puede observar este comportamiento y se presenta además la pequeña diferencia encontrada entre la intensidad real y la simulada.



Figura 92. Diferencia entre el duty cycle con 50 (azul) y 55 (verde) Hz



Figura 93. Diferencia corriente real simulación (Roja) y corriente obtenida (Azul).

Para simular el IGBT, debido a los problemas existentes en la simulación para manejar todos los componentes a la vez, se realizó una pequeña prueba para demostrar su correcto funcionamiento. En esta se le impuso un duty cycle de 0,5 (100) y a partir de un osciloscopio se observó su comportamiento, viendo que era correcto.

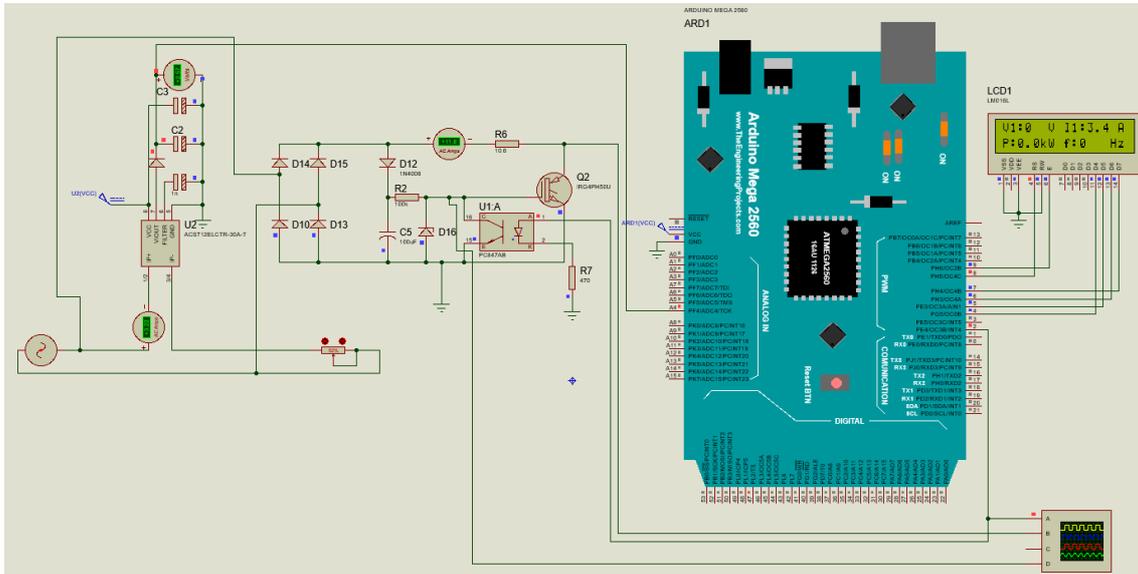


Figura 94. Simulación Circuito de potencia

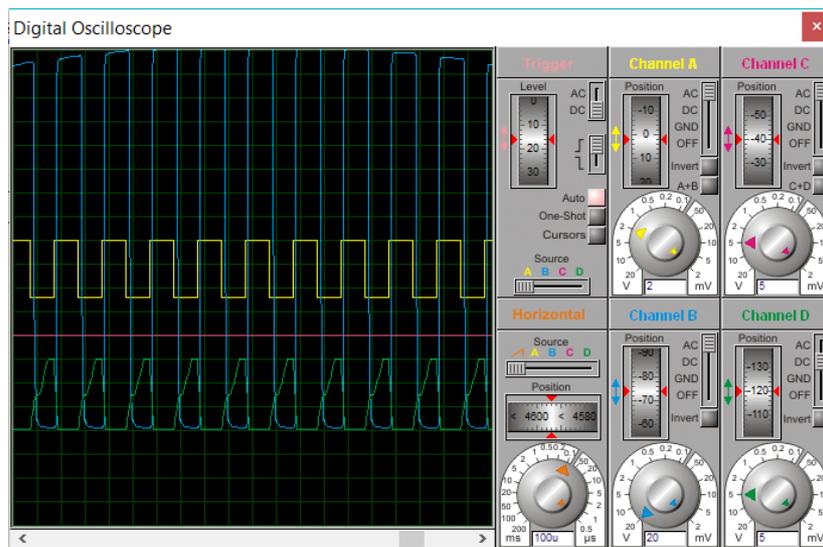


Figura 95. Gráficas simulación de unidad de potencia

Se puede observar en la gráfica obtenida del osciloscopio como la onda que le llega a la puerta del IGBT se va chopeando con el PWM que se le ha impuesto, el cual es de 0,5. Como ya se había explicado, conforme al optoacoplador le llega un flanco de subida del IGBT (onda amarilla), El circuito del zener se desactiva (Onda verde) y el IGBT se activa en un flanco positivo, haciendo que toda la tensión caiga en la carga (La onda azul en 0 significa que la carga cae).

Ensayo en circuito equivalente

Para darle más entidad a los ensayos, se han llevado a cabo ensayos en un circuito equivalente real, en los cuales se buscaba contrastar el PWM obtenido con el del ensayo y comprobar el correcto funcionamiento del control de la frecuencia. Los siguientes equipos se han utilizado para este fin:

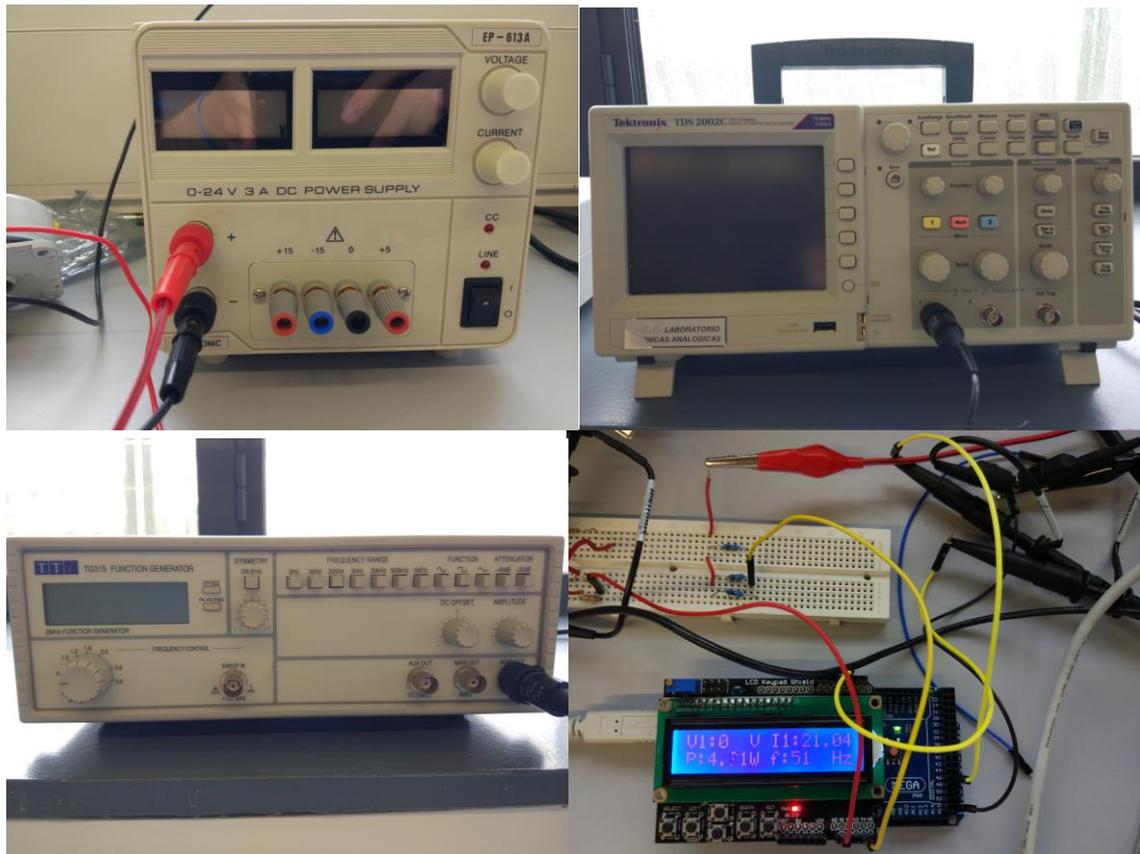


Figura 96. Equipos usados en ensayos reales ELC monofásico

Se ha utilizado una fuente de voltaje EP-613A para simular la tensión a la salida del sensor de intensidad, un osciloscopio Tektronix TDS2002C para observar el duty cycle y un generador de funciones TG315 para simular la frecuencia.

El circuito consta de tres resistencias de 10k a las que les llega la tensión de la fuente, de las cuales en este caso solo se une una al arduino, el pin 47 está unido al generador de funciones, el LCD a sus pines por medio de una placa integrada y la salida del PWM al osciloscopio. Los resultados con los mismos valores definidos en la simulación son los siguientes:



Figura 97. Resultados duty cycle ensayo real monofásico 21,7 A. 50 Hz (Izda) y 55 Hz (Dcha)

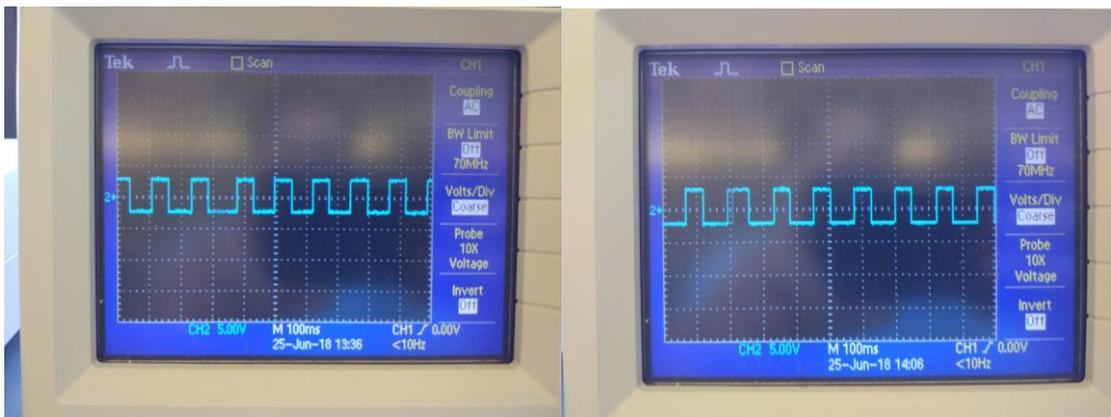


Figura 98. Resultados duty cycle ensayo real monofásico 10 A. 50 Hz (Izda) y 55 Hz (Dcha)

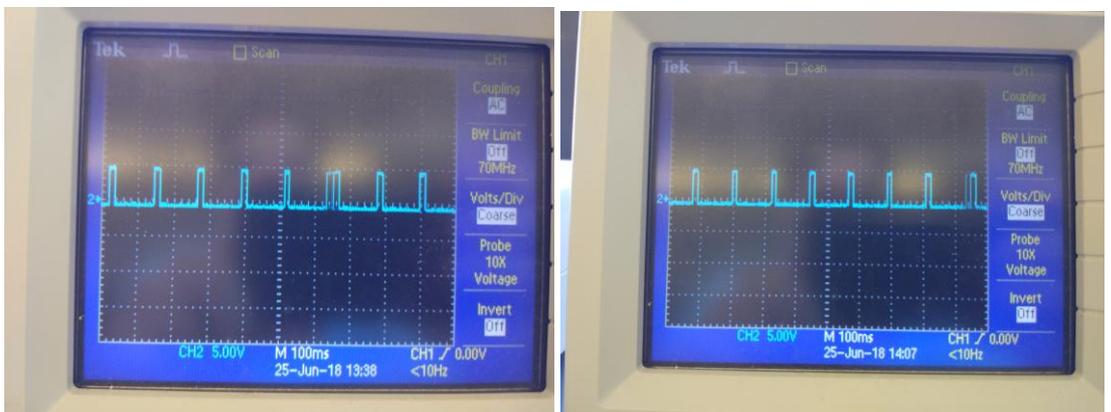


Figura 99. Resultados duty cycle ensayo real monofásico 3 A. 50 Hz (Izda) y 55 Hz (Dcha)

Los resultados son muy similares a los de la simulación, pero se observan de manera menos evidente.

6.1.2 Simulación ELC caso trifásico sin rectificador

En este caso, no ha sido posible realizar una simulación correcta, debido al mal funcionamiento del CPU en un programa con tantos elementos. Al ser un control muy similar al caso monofásico, se ha realizado un ensayo real en un circuito equivalente, en el cual se han obtenido resultados notables. Estos resultados se asemejan tanto a los del monofásico que no son objeto de análisis en este apartado y por tanto no se van a explicar.

En la simulación, aun precisando de demasiado tiempo para actuar, se presenta la siguiente figura en la cual se observa como el duty cycle varía en los distintos pines del Arduino de manera independiente, con distintos valores de intensidad:

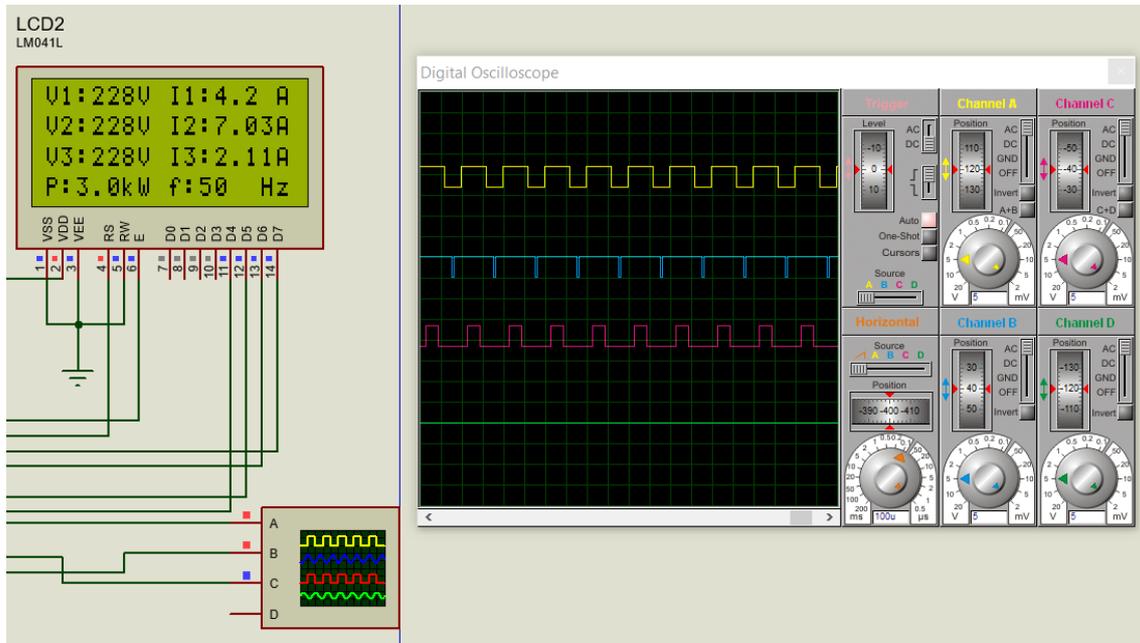


Figura 100. Simulación caso trifásico con carga por fase

Tabla XLIII. Resultados simulación caso trifásico con carga por fase

Fase	Ireal (A)	Va (V)	I1 (A)	f(Hz)	D	PWM (Hz)
R	4,31	2,81	4,2	50	123,3	3082
S	7,08	3,17	7,03	50	198,6	4965
T	2,32	2,54	2,11	50	58,6	1465

6.1.3 Simulación ELC caso trifásico con rectificador

Como ya ha sido explicado anteriormente, no fue posible realizar el control a las velocidades requeridas por no tener el Arduino seleccionado una velocidad de CPU lo suficientemente rápida. En cualquier caso, se ha podido obtener el resultado del duty cycle en el cual se ve como el seguimiento de las fases a 8 ms no es suficiente para controlarlas.

Esta simulación, debido a sobrecargas en el CPU, no puede ser capaz de funcionar si se le añade el IGBT y por tanto el resultado siguiente se ha obtenido sin este conectado. Se observa como no es posible realizar el seguimiento de las fases con una interrupción cada 8 ms.

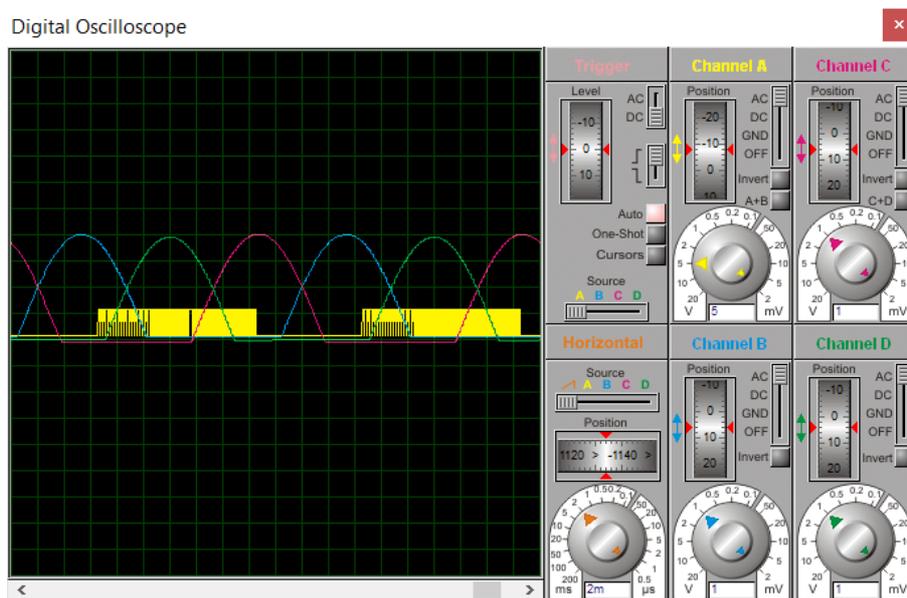


Figura 101. Duty cycle y seguimiento de tensiones simulación caso trifásico con una carga.



Figura 102. LCD simulación caso trifásico con una carga.

En el caso real, simulando la tensión trifásica con un taladro y un pequeño motor síncrono movido con este y con un circuito compuesto por un zener en serie con una resistencia de 1k por fase.

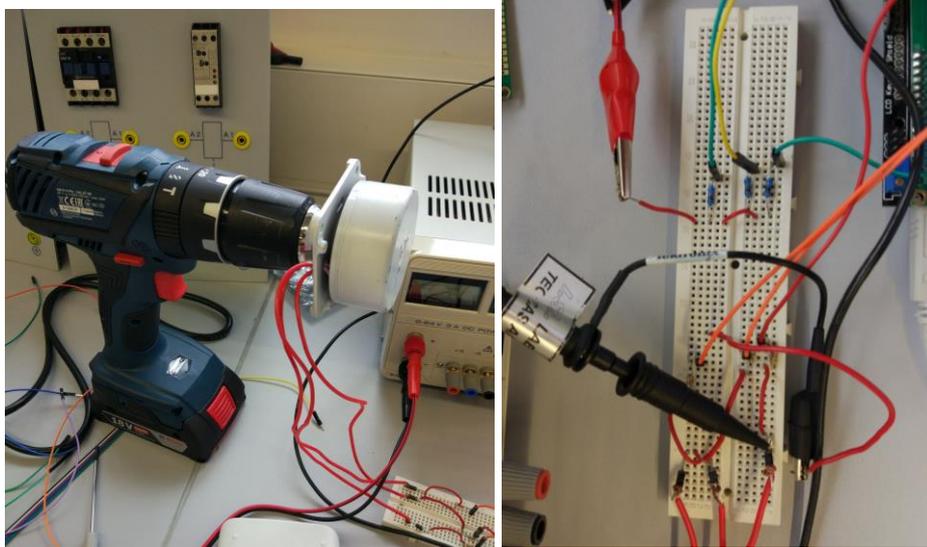


Figura 103. Taladro con generador y circuito ensayo caso trifásico con única carga.

El resultado obtenido es muy similar al de la simulación, habiéndose obtenido la siguiente gráfica imponiendo un duty cycle de 0, 100 y 200 y midiéndose la onda del caso con 0:

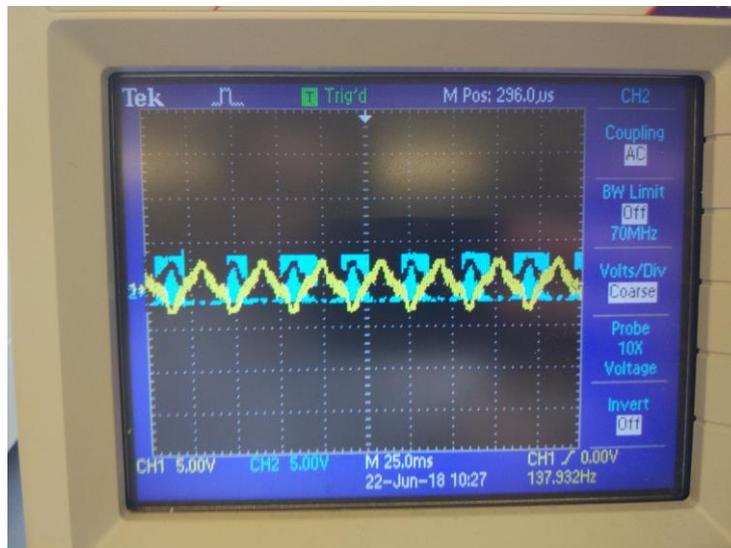


Figura 104. Resultado ensayo real caso trifásico con única carga

6.1.4 Maqueta demostrativa

Con la realización de la maqueta demostrativa, se ha conseguido obtener la velocidad de giro de la microturbina con la que debería generar y por tanto se ha conseguido generar algo con la máquina asíncrona. Lamentablemente, no ha sido posible comprobar este hecho por razones desconocidas, ya que no se ha conseguido medir esta energía teóricamente generada.

Se supone que el hecho de no haberse podido medir se debe a que el variador de frecuencia tenía la capacidad de quemar toda la energía generada y por tanto no le llegaba nada al reóstato de frenado.

Ante la imposibilidad de obtener cálculos con el montaje anterior se decide modificar. Se dispone de un motor de corriente continua de 270W el cual se acopla directamente al eje. En el montaje anterior era necesario un variador de frecuencia y conectar el motor a la red debido a que el motor se trataba de un motor asíncrono. Así resultó el nuevo montaje:



Figura 105. Ensayo de la maqueta con máquina de cc

Con dicho montaje ha sido posible medir la potencia eléctrica, velocidad de giro y par. Además se presentará los rendimientos obtenidos.

Tabla XLIV. Resultados ensayo maqueta con generador cc

(rpm)	H(m.c.a.)	Q(m ³ /s)	T(Nm)	Pot _n (W)	Pot _{mec} (W)	Pot _{elec} (W)
740	10,3	0,0014	0,32	141,46	25	12

Tabla XLV. Rendimientos obtenidos maqueta con generador de cc

$\eta_{obtenido}$	η_{elec}	η_{total}	$\eta_m \cdot \eta_v$
17,67%	48%	8,47%	23,18%

El rendimiento obtenido mucho menor al de la simulación de Unai Ayude, existen varias razones por las que ha sucedido este hecho.

La primera es que no se ha logrado que la bomba sea capaz de trabajar en el punto de diseño, por lo tanto el rodete no está correctamente dimensionado para las condiciones hidráulicas.

Otra razón son las pérdidas volumétricas que se producen en el primer golpe, se ha podido observar que en dicho golpe el chorro se agranda y noto esa agua llega a hacer un segundo bloque. Este hecho se solucionaría con un distribuidor comercial de este tipo de turbinas, sin embargo en las zonas donde se pretende implementar la fabricación del este distribuidor es muy complicada.

Además existen rozamientos entre los componentes mecánicos, por lo que el rendimiento mecánico será inferior a uno.

6.2 Conclusiones

6.2.1 Obra civil y turbina

Debido a que no era el objeto de este proyecto, la obra civil no sirve más que para tener unas pequeñas nociones de los aspectos a analizar en su diseño, sin entrar en mucho detalle. En cuanto a la turbina teórica, ha sido desarrollada ampliamente por Unai Ayude en su proyecto, realizando simulaciones con esta de las cuales se obtuvieron resultados de rendimiento cercanos al 80%.

En conclusión, este apartado no ha sido ampliamente desarrollado debido a que no era un objeto importante de ese proyecto, pero aporta conocimientos sobre el diseño de este tipo de microcentrales en países en vías de desarrollo.

6.2.2 ELC y Generador

Por medio de este proyecto, se ha conseguido teóricamente un control de la microcentral hidroeléctrica de mejores características que el propuesto por EMAS en cuanto a precisión,

una complejidad moderada y un coste superior al del control rudimentario utilizado, pero no tan elevado como otros sistemas de control mecánicos.

Este control se ha planteado para un caso monofásico y otro trifásico que han resultado funcionales, pero el control para el caso trifásico de menor coste no ha sido posible llevarlo a cabo y por tanto en este punto no es válido y habría que realizar una revisión de este con un microcontrolador de mayor velocidad de CPU.

En cuanto al presupuesto obtenido, se observa como en caso de poder desarrollar este último sistema de control, existiría un ahorro del 20% respecto al caso monofásico con tres cargas por fase. En estos controladores, el coste mayoritario se encuentra en la unidad de potencia y sobretodo en las resistencias de carga. Por ese motivo, aprovechar las resistencias instalando resistencias sumergibles que calienten agua debería ser una opción muy a tener en cuenta.

En conclusión, se ha cumplido teóricamente el objeto más importante de este trabajo, conseguir una mejora en el control de una microcentral hidroeléctrica con las características de las instaladas por EMAS, con filosofía open source y con enfoque a la cooperación al desarrollo. Aun así, sería preciso probarlo en condiciones de ensayo real y se podrían añadir mejoras en el control con un estudio de mayor profundidad.

6.2.3 Distribución eléctrica

Visto el presupuesto obtenido y su elevado valor, se puede concluir comentando que un sistema de distribución eléctrica para una comunidad de estas características, no se puede realizar con la normativa y los reglamentos vigentes en España.

Al manejar potencias tan reducidas, existen algunas protecciones que podrían reducirse, protegiendo solamente la distribución por cada una de las zonas de la comunidad y no por vivienda. Sobretodo se debería ajustar el cableado de forma que cumpla los requisitos mínimos, en vez de utilizarse cable sobredimensionado que cumpla la normativa y el reglamento.

En cualquier caso, la distribución aquí planteada es totalmente funcional y requeriría de una ampliación en la cual se añadiera toda la obra civil, con postes, cuadros dimensionados y demás componentes no analizados en la realización del proyecto.

Dicho esto, se puede dar el objetivo como parcialmente cumplido, al haber realizado una distribución eléctrica aplicando reglamentos y normativas y ajustándolo ligeramente al caso particular pero con un coste muy elevado. Por tanto, en este último aspecto se podría realizar una notable mejora.

6.2.4 Maqueta demostrativa

Aun no habiendo podido obtener la potencia del generador por medio del motor asíncrono, se ha podido aprender una valiosa lección de cómo lo teórico en muchas ocasiones no es como se espera en la realidad. Por otra parte, se ha conseguido generar potencia eléctrica con la velocidad óptima por medio del asíncrono, sin haberse podido medir su valor, lo cual es en conclusión un buen resultado.

La potencia, mucho más reducida que la teórica, se ha podido medir en el segundo ensayo con el generador de corriente continua, en el cual la regulación de la velocidad no fue la correcta pero al menos se pudo observar cómo se generaba algo. Concluyendo, el objetivo de obtener la potencia generada con la maqueta se ha podido cumplir, pero de una forma no programada y con unos valores mucho más reducidos que los teóricos.

6.2.5 Conclusión final

En definitiva, este trabajo de fin de carrera ha sido muy enriquecedor en cuanto a conocimientos sobre microcentrales hidroeléctricas, sobretudo en aspectos sobre su control y la generación aislada de energía eléctrica.

Se ha tratado un proyecto multidisciplinar en colaboración con otro alumno y se han obtenido resultados positivos pero no óptimos en la mayoría de los apartados que se tratan. Se ha obtenido conocimiento sobre proyectos de cooperación al desarrollo, sobre programación en sistemas open source y sobre electrónica analógica y se han puesto en práctica conocimientos sobre distribución de energía eléctrica.

6.3 Líneas de desarrollo futuras

Una posible línea de desarrollo sería ensayar el montaje del ELC monofásico o trifásico funcionales en montaje real como algo experimental para comprobar de primera mano su funcionamiento. Mejorar el control con PI añadido. En caso de servir llevar a cabo un proyecto de cooperación al desarrollo en el que se monte una microcentral similar a la teórica.

Previamente, se debería de realizar el diseño de obra civil, captación y tuberías de presión según se explica en el manual de microcentrales y basándose en los requisitos de EMAS Y también habría que ajustar previamente la distribución eléctrica para que cumpla sus objetivos pero con un coste más asequible.

El ELC Trifásico con una carga a su vez, podría desarrollarse añadiéndole un microcontrolador de mayor velocidad de CPU o simplificando el sistema de control con medidas digitales y después ensayarlo para poder ser aplicado. Añadiendo algunas mejoras al sistema de control, se podría diseñar un ELC comercial compacto y de bajo coste para microcentrales hidroeléctricas aisladas, como alguno ya existente.

Por último, en cuanto a la maqueta, se podría realizar una de mejores características en base a los conocimientos adquiridos en este proyecto y en el de Unai Ayude y añadirle elementos demostrativos que sirvan para mostrar el funcionamiento de una de estas microcentrales. Esta podría incluso servir para ensayar los controles ELC en una escala mas reducida.

7 Cálculos

7.1 Cálculos ELC

En este apartado se muestran los cálculos realizados para la selección de los distintos componentes del circuito ELC.

7.1.1 Caso monofásico

Fuente de alimentación

Puente rectificador y filtro por condensador: El cálculo del puente rectificador, al ser los diodos comerciales de al menos 50 V y 1 A, no es preciso realizarlo al ser más que suficientes para soportar los de tensión y corriente valores en el circuito ($12\sqrt{2}$ V y 0,2 A como máximo). Por otra parte, el cálculo del condensador que debe conseguir que al menos le lleguen 7 V al regulador es una parte crítica del circuito y se ha calculado de la siguiente manera:

$$V_r = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_{LC} * t_d}{C} = \frac{I_{LC} \cdot T/2}{C} = \frac{I_{LC}}{2fC}$$

Donde:

V_r = Diferencia entre el valor de entrada máximo de tensión y el mínimo para que funcione el regulador. Este regulador funciona con 7 V mínimos y se calcula con 10 V para dejar un margen de seguridad. La red aportará $12\sqrt{2}$ V.

ΔQ = Diferencia de carga en el condensador.

I_{LC} = Corriente media en la carga. Estimada de 0,2 A como máximo.

t_d = Tiempo de descarga. En el caso actual $T/2$ y por tanto $1/2f$. Siendo $f=50$ Hz.

C = Capacitancia del condensador.

$$12\sqrt{2} - 10 = \frac{100}{2 \cdot 50 \cdot C} \rightarrow C = \frac{0,1}{2 \cdot 50 \cdot (12\sqrt{2} - 10)} = 143 \mu F$$

Por lo tanto, se va a seleccionar un condensador de 180 μF , ajustándolo así a un valor comercial existente y aumentando el margen de seguridad.

Además de este filtro por condensador, se añadirán dos condensadores recomendados por el fabricante. Uno a la entrada y otro a la salida del regulador. EL primero de 330 μF y el segundo de 100 μF .

Potencia transformador: Por último, la potencia mínima del transformador debe ser capaz de soportar la intensidad y el voltaje que existe en el circuito. Suponiendo 0,1 A:

$$S_{min} = 12 \cdot 0,1 = 1,2 VA$$

Por tanto se seleccionará uno de 1,5 VA para dejar un pequeño margen.

Circuito medidor de tensión

Filtro por condensador: Al igual que en el anterior, es redundante realizar el cálculo de los diodos. En cambio, para limitar el rizado y conseguir que el zener pueda funcionar en todo momento, es necesario obtener el valor del condensador por medio de los mismos cálculos:

$$V_r = \frac{I_{LC}}{2fC} \rightarrow C = \frac{I_{LC}}{2fV_r}$$

$$C = \frac{0,0065}{2 \cdot 50 \cdot (12\sqrt{2} - 12)} = 8,1 \mu F$$

Se ha calculado con 12 V para en el siguiente supuesto tener una tensión mínima con la que realizar los cálculos del zener. EL condensador comercial seleccionado será de 10 μF .

Circuito estabilizador con zener: Por otro lado, es preciso calcular el circuito estabilizador del zener. Para ello hay que conseguir mantener los valores de tensión a la entrada de este de forma que no se supere su I_{zmax} , pero se alcance la I_{zmin} . Por tanto, la resistencia a instalar debe cumplir lo siguientes:

$$\frac{V_{min} - 5,1}{R} > I_{zmin}$$

$$\frac{V_{max} - 5,1}{R} < I_{zmax}$$

La V_{max} a la entrada se supondrá de 15 V (aunque nunca se alcanzará ese valor debido al control) y la mínima de 12 V. La I_{zmin} tiene un valor de 1 mA (I_{zk} en su datasheet) y la máxima de 930 mA (I_{zM}). Por tanto la resistencia precisada deberá de estar entre los siguientes límites:

$$\frac{12 - 5,1}{R} > 1 \rightarrow R_{max} = 6,9 \text{ k}\Omega$$

$$\frac{15 - 5,1}{R} < 930 \rightarrow R_{min} = 0,01 \text{ k}\Omega$$

Por lo tanto, se va a seleccionar una resistencia de aproximadamente 2 k Ω y 1 W. Para enviar la señal al arduino, se utilizará un potenciómetro de 10 k Ω que sirve para ajustar el valor de tensión a la salida a 4 V. Su potencia también será de 1 W.

Potencia transformador: Por último, la potencia mínima del transformador debe ser capaz de soportar la intensidad y el voltaje que existe en el circuito. Con 2 k Ω en el circuito estabilizador y hasta 10 k Ω , se obtenía una intensidad aproximada de 6,5mA y por tanto la potencia será:

$$S_{min} = 12 \cdot 0,0065 = 0,078 \text{ VA}$$

Por tanto, al requerir una potencia tan reducida, se ha decidido usar un único transformador que alimentará este circuito junto con el de frecuencia.

Calibración del sensor de intensidad

EL rectificador monofásico, como en los casos anteriores, será suficiente para soportar la tensión de entrada máxima de 5 V y 50 mA. Los filtros se han realizado según lo recomendado por el propio fabricante.

Teóricamente, el sensor utilizado tiene unos rangos de intensidad y una sensibilidad predefinida. Estos pueden variar, manteniendo su linealidad, debido a que pueden existir errores al no ser los valores del fabricante exactos. Al ser lineal la relación, se pueden obtener dos puntos de funcionamiento del componente. Para ello, se precisa de un multímetro de buena precisión.

El primero punto que se debe medir es para una corriente de 0 A. En el circuito que se desea simular, el valor de voltaje obtenido fue de 2,27 V en vez de 2,5 V. Por tanto, el punto uno será P1 (2,27; 0).

Para obtener la segunda medida, es preciso buscar un valor que no sea excesivamente cercano al anterior. Una carga cuya corriente sea superior a 1 A podría ser suficiente en este caso. En la simulación, al disponer de la carga deseada, se ha realizado con una de 21,7 A, obteniéndose aproximadamente 4,04 V. Por tanto el segundo punto será P2 (4,19; 21,7).

Conociendo estos valores, para calcular su sensibilidad bastará con calcular la pendiente entre ambos puntos de la siguiente manera:

$$\text{sensibilidad} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} = \frac{4,19 - 2,27}{21,7 - 0} = 0,088 \text{ V/A}$$

Debido a que el presente proyecto es teórico y parte de una simulación, en un caso real sería preciso recalibrarlo sin tener en cuenta los valores de la simulación, ya que podrían variar notablemente. En conclusión, hay que tener en cuenta de que cada sensor tendrá su característica y que es preciso calibrarlo siempre. El valor de tensión del P1 en el programa, se introduce en la variable AcsOffset y el de sensibilidad en Sensibl.

Circuito medidor de frecuencia

Al igual que en los casos anteriores, el diodo a la entrada será de 50 V y 1 A y por tanto no es necesario realizar ningún cálculo.

Resistencia del fotodiodo: Para el optoacoplador, se debe realizar el cálculo del valor de la resistencia del fotodiodo:

$$R_1 = \frac{V_{out} - V_f}{I_f}$$

Donde:

V_{out} = Tensión tras el transformador = 12 V

V_f = Tension forward fotodiodo = 1,4 V

I_f = Corrientes forward fotodiodo = 25 mA (Máx 50 mA)

$$R_1 = \frac{12\text{ V} - 1,4\text{ V}}{25\text{ mA}} \cong 0,424\text{ k}\Omega$$

Si $R_1 = 0,47\text{ k}\Omega$ (Valor comercial):

$$I_f = \frac{12\text{ V} - 1,4\text{ V}}{0,47\text{ k}\Omega} = 22,5\text{ mA}$$

Potencia transformador: Por último, la potencia mínima del transformador debe ser capaz de soportar 22,5 mA a 12V. Su potencia será la siguiente:

$$S_{min} = 12 \cdot 0,0225 = 0,27\text{ VA}$$

El transformador será de 1 VA, al ser los más económicos de pequeña potencia y estará compartido con el de frecuencia.

Rectificador del IGBT

El rectificador en puente monofásico del circuito del IGBT, es una de las partes más importantes de este circuito y por tanto hay que dimensionarlo correctamente. La tensión inversa de pico que le llega a los diodos es de $230\sqrt{2}\text{ V}$ y la corriente máxima será de 21,7 A. Para asegurar el correcto funcionamiento del circuito, se definen los siguientes factores de seguridad:

$$I_{FAV} = 1,5 \cdot I_{DC} = 1,5 \cdot 21,7 = 32,55\text{ A}$$

$$U_{RRM} = 2 \cdot PIV = 2 \cdot 230\sqrt{2} = 650\text{ V}$$

Por lo tanto, se han seleccionado cuatro diodos de 800 V y 36 A, ya que comercialmente son los más cercanos a los valores que se han encontrado que sean de panel.

IGBT

El IGBT, debe de soportar los mismos valores de tensión y corriente que su rectificador y además debe de poder conmutar a 5 kHz, para que se pueda cumplir lo definido en el control con arduino.

Por tanto, se ha seleccionado un IGBT de 600 V y 320 A al no haberse encontrado IGBT de otros valores con esa velocidad de conmutación que fuesen de panel como la resistencia de carga. EL IGBT seleccionado puede conmutar en un rango de 5 kHz y por tanto es óptimo para su funcionamiento.

Circuito de disparo IGBT

Filtro por condensador: Para limitar el rizado es necesario obtener el valor del condensador por medio de los siguientes:

$$V_r = \frac{I_{LC}}{2fC} \rightarrow C = \frac{I_{LC}}{2fV_r}$$

$$C = \frac{2,3}{2 \cdot 50 \cdot (230\sqrt{2} - 30)} = 77 \mu F$$

Por tanto, se ha seleccionado un condensador de 100 μ F

Circuito estabilizador con zener: Por otro lado, es preciso calcular el circuito estabilizador del zener. Para ello hay que conseguir mantener los valores de tensión a la entrada de este de forma que no se supere su I_{zmax} , pero se alcance la I_{zmin} . Por tanto, la resistencia a instalar debe cumplir lo siguientes:

$$\frac{V_{min} - 5,1}{R} > I_{zmin}$$

$$\frac{V_{max} - 5,1}{R} < I_{zmax}$$

La V_{max} a la entrada se supondrá de 15 V (aunque nunca se alcanzará ese valor debido al control) y la mínima de 12 V. La I_{zmin} tiene un valor de 1 mA (I_{zk} en su datasheet) y la máxima de 930 mA (I_{zM}). Por tanto la resistencia precisada deberá de estar entre los siguientes límites:

$$\frac{230 - 20}{R} > 1 \rightarrow R_{max} = 210 \text{ k}\Omega$$

$$\frac{230 - 20}{R} < 930 \rightarrow R_{min} = 0,22 \text{ k}\Omega$$

Por lo tanto, se va a seleccionar una resistencia de aproximadamente 100 k Ω y 1 W.

El optoacoplador seleccionado es exactamente igual al del circuito de frecuencia y por tanto sus cálculos son válidos para este caso.

Carga

Al no existir cargas de 5 kW de potencia, ha sido necesario obtener una carga de 5 kW disponiendo 5 cargas de 2,2 Ω y 1 kW en serie de forma que se consigue una carga equivalente de 11 $\Omega \pm 5\%$.

7.1.2 Caso trifásico sin rectificador

Todos los circuitos que son iguales a los del caso monofásico no se han tratado aquí, ya que los cálculos son los mismos.

Fuente de alimentación

Puente rectificador y filtro por condensador: El cálculo del puente rectificador, al ser los diodos comerciales de al menos 50 V y 1 A, no es preciso realizarlo al ser más que suficientes para soportar los de tensión y corriente valores en el circuito ($12\sqrt{2}$ V y 0,2 A como máximo). Por otra parte, el cálculo del condensador que debe conseguir que al menos le lleguen 7 V al regulador es una parte crítica del circuito y se ha calculado de la siguiente manera:

$$C = \frac{I_{LC}}{2fV_r}$$

$$C = \frac{0,2}{2 \cdot 50 \cdot (12\sqrt{2} - 10)} = 287 \mu F$$

Se seleccionará por tanto un condensador de 330 μF .

Calibración del sensor de corriente

Este sensor, al igual que el otro, precisa de calibración antes de ser instalado. El primero punto que se debe medir es para una corriente de 0 A. En el circuito que se desea simular, el valor de voltaje obtenido fue de 2,29 V en vez de 2,5 V. Por tanto, el punto uno será P1 (2,29; 0).

Para obtener la segunda medida, es preciso buscar un valor que no sea excesivamente cercano al anterior. Una carga cuya corriente sea superior a 1 A podría ser suficiente en este caso. En la simulación, al disponer de la carga deseada, se ha realizado con una de 7,12 A, obteniéndose aproximadamente 3,2 V. Por tanto el segundo punto será P2 (3,2; 7,12).

Conociendo estos valores, para calcular su sensibilidad bastará con calcular la pendiente entre ambos puntos de la siguiente manera:

$$\text{sensibilidad} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} = \frac{3,2 - 2,27}{7,12 - 0} = 0,129 \text{ V/A}$$

Debido a que el presente proyecto es teórico y parte de una simulación, en un caso real sería preciso recalibrarlo sin tener en cuenta los valores de la simulación, ya que podrían variar notablemente. En conclusión, hay que tener en cuenta de que cada sensor tendrá su característica y que es preciso calibrarlo siempre y posteriormente cambiar los valores de AcsOffset y Sensibl en el programa de arduino.

Rectificador IGBT

El rectificador en puente monofásico del circuito del IGBT, es una de las partes más importantes de este circuito y por tanto hay que dimensionarlo correctamente. La tensión inversa de pico que le llega a los diodos es de $230\sqrt{2}$ V y la corriente máxima será de 7,2 A. Para asegurar el correcto funcionamiento del circuito, se definen los siguientes factores de seguridad:

$$I_{FAV} = 1,5 \cdot I_{DC} = 1,5 \cdot 7,2 = 10,8 \text{ A}$$

$$U_{RRM} = 2 \cdot PIV = 2 \cdot 230\sqrt{2} = 650 \text{ V}$$

Se ha seleccionado en este caso los mismos diodos que en el monofásico, debido a que eran los de menores características disponibles para montaje en panel.

IGBT

El IGBT es de nuevo en mismo que el monofásico por los motivos anteriormente mencionados.

Carga

Al no existir cargas de 1,66 kW de potencia, ha sido necesario obtener tres cargas de 2 kW, disponiendo en cada una de una carga de 100Ω y 1 kW en paralelo con otra de 47Ω y 1 kW de forma que se consigue una carga equivalente de $32 \Omega \pm 5\%$.

7.1.3 Caso trifásico con rectificador

Circuito detector de fases

EN este circuito se ha utilizado la misma resistencia que en los anteriores y el mismo potenciómetro y se ha eliminado el condensador para que la tensión sea continua y así se puedan comparar las distintas fases.

Rectificador trifásico IGBT

Dentro del IGBT, es preciso calcular su rectificador trifásico y la carga que se va a precisar para disipar la potencia que le llegue a la carga. El diseño de la carga secundaria está basado en el requerimiento de que, si todas las cargas principales están desconectadas, esta carga debe de ser capaz de consumir toda la potencia generada. En estas condiciones, el IGBT debe estar totalmente en conducción, con un duty cycle del 100%.

Para el actual proyecto, al utilizar una única carga que absorbe la potencia de las tres fases, transformándola antes en una corriente prácticamente continua por medio de un rectificador trifásico de media onda, es preciso calcular la tensión media en la carga en la anterior condición. Se supondrá un rectificador sin pérdidas, debido a que será la máxima tensión que le puede llegar. La expresión utilizada para ello es la siguiente:

$$V_{LC} = \frac{3\sqrt{3}V_0}{2\pi}$$

Donde:

V_{LC} = Tensión media en la carga (V).

V_0 = Valor de la tensión a la entrada (V).

Sabiendo que $V_0 = 230\sqrt{2}$ V:

$$V_{LC} = \frac{3\sqrt{3} \cdot 230\sqrt{2}}{2\pi} = 269 \text{ V}$$

Calculada la tensión y asumiendo que la potencia máxima generada es de 5000 W, se seleccionará una $R_L = 11 \Omega$ disponible en el mercado para calcular después la intensidad máxima que recorre al circuito:

$$I_{LC} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi \cdot R_L} \cdot V_0 = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi \cdot 11} \cdot 230\sqrt{2} = 24 \text{ A}$$

En cuanto los diodos a instalar, se debe seguir el mismo procedimiento que en los casos monofásicos, calculando la intensidad que les va a recorrer y la tensión inversa de pico y aplicando un factor de seguridad:

$$I_{FAV} = 1,5 \cdot I_{DC} = 1,5 \cdot \frac{24}{3} = 12 \text{ A}$$

$$U_{RRM} = \sqrt{3} \cdot PIV = \sqrt{3} \cdot 230\sqrt{2} = 563,38 \text{ V}$$

Para este caso, se han seleccionado tres diodos monofásicos de 40 A y 1000 V al ser los encontrados para panel con las anteriores características.

IGBT y carga

El IGBT y la carga serán exactamente iguales a la del caso monofásico, por motivos de disponibilidad de componentes en el mercado.

7.2 Cálculos cuarto de máquinas y red de distribución eléctrica

Estos cálculos los realiza el programa CYPELEC y sus resultados se incluyen en las memorias adjuntas, tanto en el caso monofásico como en el trifásico. Por otro lado, los del cuarto de máquinas no se han realizado, por elegir componentes y cableado similares a los de la salida de la acometida y la caja general de protección que cumplirán por tanto también la normativa.

8 Metodología seguida

8.1 Fases y tareas

En la realización de este proyecto, se han ido siguiendo unas fases en ocasiones diferenciadas y otras veces varias fases al mismo tiempo. Un resumen ordenado por las distintas tareas realizadas en el proyecto es el siguiente:

Microcentral

1. Recopilación de información y consultas a Wolfgang (EMAS) en torno a sus proyectos de microcentrales hidroeléctricas.
 - a. Análisis del control propuesto con EMAS en Simulink.
 - b. Análisis de requisitos básicos de una microcentral EMAS.
2. Planteamiento de realización de un caso teórico con control electrónico que busca una mejora respecto el de EMAS.
3. Redacción de fundamentos relacionados con el diseño de microcentrales hidroeléctricas.
 - a. Fundamentos básicos y elementos mecánicos.
 - b. Generadores eléctricos más usados.
 - c. Tipos de controles electrónicos.
 - d. Elementos de control y protección.
 - e. Distribuciones eléctricas.
4. Elección de generadores para el caso teórico y para la maqueta.
5. Simulación en MATLAB del generador sin control para observar su funcionamiento.
6. Realización de planos de la comunidad y determinación de la demanda eléctrica.
7. Explicación de la obra civil hidráulica con pautas básicas a seguir en su diseño.
8. Realización de la distribución eléctrica en CYPELEC.
 - a. Distribución en caso trifásico y monofásico.
 - b. Cálculo de toma de tierras.
9. Elección y diseño de los elementos eléctricos del cuarto de máquinas y la distribución.
 - a. Elementos de medida.
 - b. Elementos de protección.
 - c. Línea eléctrica.
10. Presupuesto cuarto de máquinas y distribución eléctrica en caso monofásico y trifásico.
11. Resultados y conclusiones.
12. Preparación de planos y memorias como anexos.

ELC

1. Búsqueda de información y artículos sobre controladores electrónicos de carga.
2. Elección de ELC continuo para el control a partir de los artículos analizados.
3. Elección de programa para simular el control electrónico.
 - a. Primera aproximación con MATLAB. Problemas al no conocer ciertos parámetros de modelación del generador eléctrico.
 - b. Segunda aproximación en Proteus.
 - c. Elección de proteus por disponer de simulaciones de Arduino más exactas y mayor facilidad de diseño de circuitos electrónicos.
4. Aprendizaje para programar con arduino y diseñar con Proteus con la ayuda del tutor.
5. Realización del ELC trifásico con rectificador.
 - a. Programación en arduino y diseño de circuitos en Proteus.
 - b. Simulaciones en Proteus. Mal funcionamiento por saturación en CPU.
 - c. Prueba real en circuito equivalente. Imposibilidad de realizar el control con microprocesador, velocidad de operación insuficiente.
6. Realización del ELC monofásico y trifásico sin rectificador.
 - a. Programación en arduino y diseño de circuitos en Proteus.
 - b. Simulaciones en Proteus. Mal funcionamiento por saturación en CPU.
 - i. Resultados validos en el caso monofásico.
 - ii. Imposibilidad en trifásico, CPU incapaz.
 - c. Prueba real en circuito equivalente. Funcionamiento correcto.
7. Elección de componentes reales y cálculos requeridos para esta elección.
8. Presupuesto de los distintos diseños de ELC y comparativa.

Maqueta

1. Planteamiento de realización de una maqueta demostrativa de una microcentral hidroeléctrica.
2. Elección de generadores para el caso teórico y para la maqueta.
3. Pruebas como motor del motor asíncrono con el variador de frecuencia.
4. Pruebas como generador con la maqueta conectada y la resistencia de frenado.
 - a. Medición correcta de la velocidad.
 - b. Imposibilidad de medir la potencia generada.
5. Planteamiento de alternativas con un motor de cc.

8.2 Procedimientos

En la realización de este proyecto, en las partes del diseño del ELC y el programa de control con arduino, se ha seguido un procedimiento basado en los siguientes pilares:

1. Búsqueda de información
2. Asimilación de la información y aprendizaje con el tutor.
3. Simulaciones en Proteus.
4. Revisión de problemas en las simulaciones y el arduino con el tutor.
5. Solución de problemas y revisión de la simulación.
6. Simulación funcional, determinación de componentes reales.

En cuanto a la distribución eléctrica y la realización de planos, se ha seguido el siguiente procedimiento:

1. Búsqueda de información sobre microcentrales y microcentrales EMAS.
2. Análisis de la información y planteamiento de caso teórico.
3. Elección de generador caso teórico según datos de EMAS.
4. Realización de planos según necesidades energéticas ideadas, basado en datos de EMAS.
5. Revisión de planos realizados.
6. Realización de la distribución eléctrica con los datos extraídos de los planos.
7. Análisis de la memoria obtenida desde CYPELEC y elección de la información más importante para el proyecto.

Por último, para la maqueta se han seguido los siguientes procedimientos:

1. Diseños realizados por Unai Ayude.
2. Impresión de partes y búsqueda de elementos de diseño por Unai ayude.
3. Apoyo en el montaje de la maqueta.
4. Ensayos del motor asíncrono.
5. Ensayos con como generador asíncrono.
6. Ensayo con máquina de corriente continua.

En este proyecto, se han realizado reuniones de 1-2 h semanales con el tutor para revisar dudas y problemas, realizándose más de una las últimas semanas del trabajo.

8.3 Equipos y programas

Programas

En la realización de este proyecto, se han utilizado los siguientes programas de software:

- Proteus 8 Professional: Diseño y simulación del circuito electrónico.
- Matlab 2016: Simulación simplificada generador síncrono.
- CYPE 2018: Versión de prueba. → Diseño de distribución eléctrica.
- Arduino CC: Programación del código de control del ELC.
- AutoCAD: Diseño de comunidad rural teorica.
- Microsoft Project: Realización del diagrama de Gant.

Equipos

En la realización de los ensayos en el laboratorio, se han utilizado los siguientes equipos:

- Osciloscopio digital de dos canales TDS 2002C de Tektronic: Observacion de duty cycle y tensiones ELC.
- Generador de funciones TG315: Generacion de onda cuadrada para simular medida de frecuencia.
- Fuentes de potencia EP-613A: Fuente para alimentar
- Taladro y pequeño generador: Simulación de tensión trifásica en el ensayo.

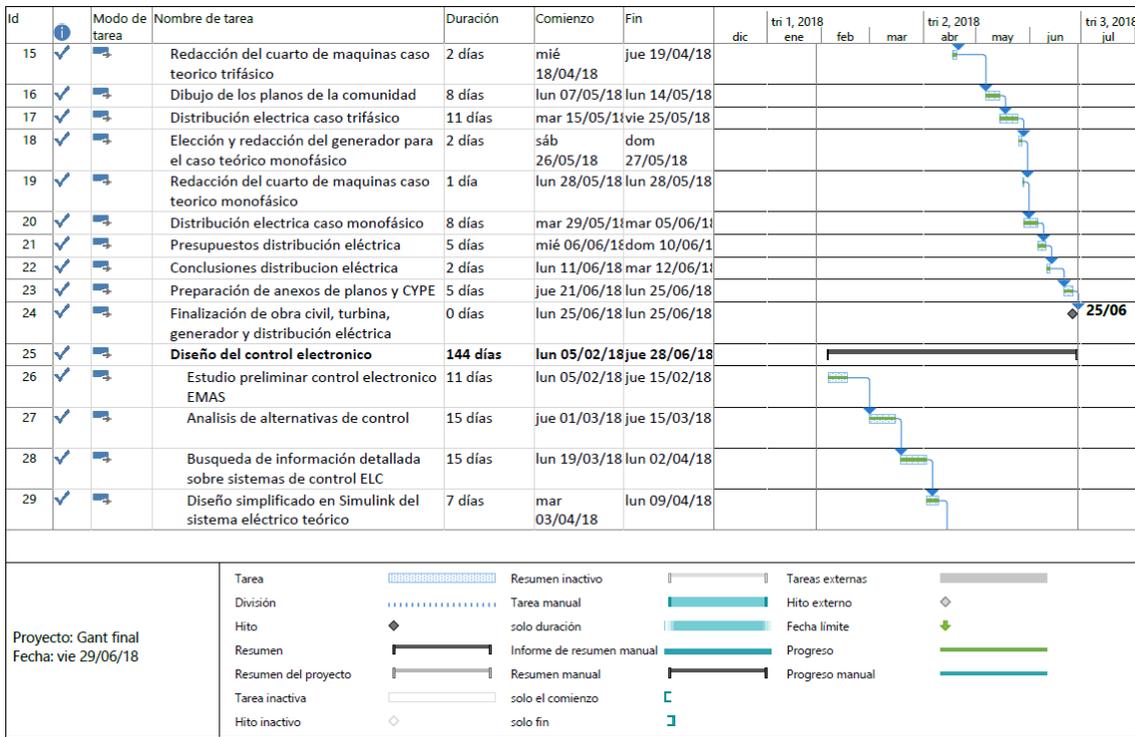


Figura 108. Diagrama de Gantt 2

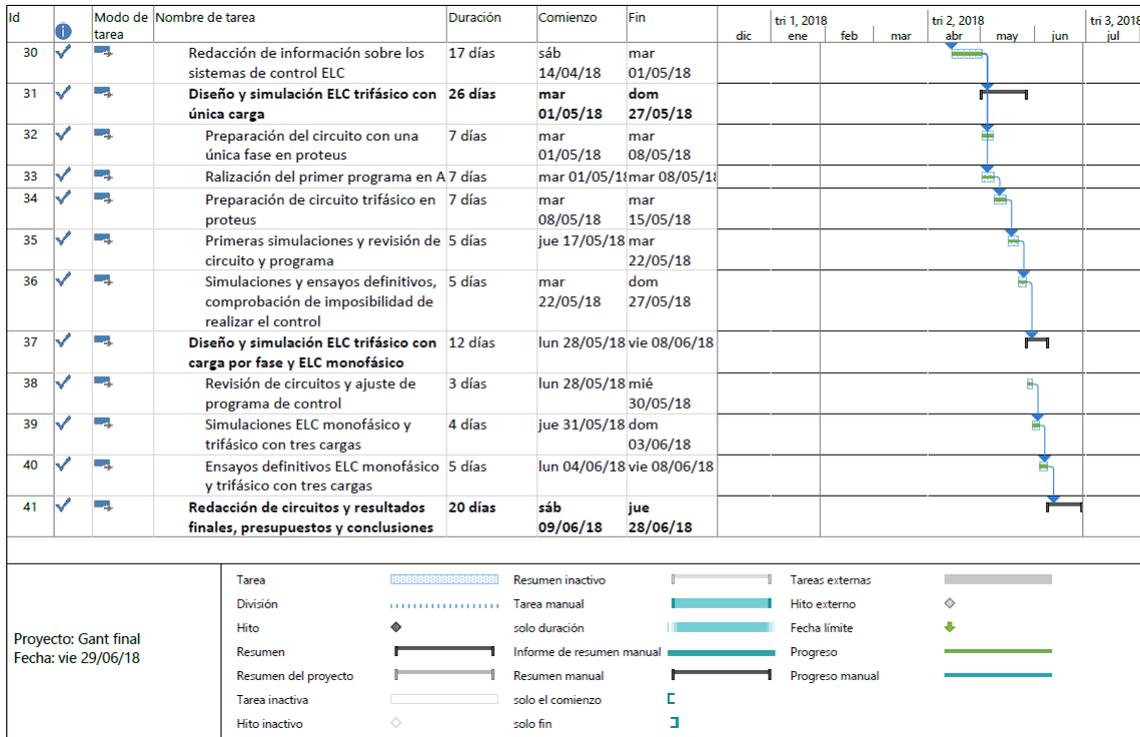


Figura 107. Diagrama de Gantt 3

9 Presupuesto

9.1 Presupuesto ELC

Monofásico

Tabla XLVI. Presupuesto ELC caso monofásico

Presupuesto ELC monofásico				
Descripción	Coste unitario (€/ud)	Pedido mínimo	Ud	Coste total (€)
Arduino Mega 2560	35	1	1	35
LCD DEM 16216 SVH-LY	14	1	1	14
Transformador de PCB 44328	4,9	1	1	4,9
Diodo 1N4001	0,145	10	20	2,9
Condensador electrolítico de aluminio 860010675017 de 180 μ F	0,465	10	1	3,88
Condensador electrolítico de aluminio 860010672003 de 330 nF	0,105	50	1	5,25
LM7805	0,524	10	1	5,24
Condensador electrolítico de aluminio 860010672001 de 100 nF	0,097	50	2	4,84
Transformador de PCB 44057	4,8	1	1	4,8
Condensador electrolítico de aluminio 860160672009 10 μ F	0,112	50	1	5,63
Resistor 2K MRS25	0,108	1	2	0,216
Diodo Zener 1N5338B	0,427	10	1	4,27
Potenciómetro RK11K1140A3L	1,28	1	2	2,56
Modulo sensor de corriente ACS712ELCTR-30A-T	11,9	1	1	11,9
Condensador 1 nF PFR5102J63J11L4BULK	0,75	5	1	3,75
Optoacoplador LTV-814	0,25	10	2	2,5
Resistor CFR100 0,47 k Ω	0,05	10	2	0,5
Resistor CFR50 1 k Ω	0,12	10	1	1,2
2 x Módulo 2 diodos MDD26-08N1B, 36A, 800V	21,07	1	2	42,14
Diodo 1N4006, 800 V 1 A	0,191	10	1	1,91
Condensador serie RS 100uF, 400 V	0,7	2	1	1,4
Diodo zener 1N5357B, 20V	0,27	5	1	1,35
Resistencia fija CFR100J100K	0,089	10	1	0,89
Módulo IGBT, IXGN320N60A3	31	1	1	31

5 x Resistencia en Panel 2,2 Ω 1 kW	225,35	1	1	225,35
Cables, placas, radiadores etc.	20	1	1	20
Coste total ELC monofásico				437,38

Trifásico con carga por fase

Tabla XLVII. Presupuesto ELC caso trifásico con carga por fase

Presupuesto ELC trifásico con carga por fase				
Descripción	Coste unitario (€/ud)	Pedido mínimo	Ud	Coste total (€)
Arduino Mega 2560	35	1	1	35
LCD DEM 16216 SYH-LY	14	1	1	14
Transformador de PCB 44328	4,9	1	1	4,9
Diodo 1N4001	0,145	10	20	2,9
Condensador electrolítico de aluminio 860010675017 de 180 μ F	0,465	10	1	3,88
Condensador electrolítico de aluminio 860010672003 de 330 nF	0,105	50	1	5,25
LM7805	0,524	10	1	5,24
Condensador electrolítico de aluminio 860010672001 de 100 nF	0,097	50	2	4,84
Transformador de PCB 44057	4,8	1	1	4,8
Condensador electrolítico de aluminio 860160672009 10 μ F	0,112	50	1	5,63
Resistor 2K MRS25	0,108	1	2	0,216
Diodo Zener 1N5338B	0,427	10	1	4,27
Potenciómetro RK11K1140A3L	1,28	1	2	2,56
Modulo sensor de corriente ACS712ELCTR-30A-T	11,9	1	1	11,9
Condensador 1 nF PFR5102J63J11L4BULK	0,75	10	1	3,75
Optoacoplador LTV-814	0,25	10	1	2,5
Resistor CFR100 0,47 k Ω	0,05	10	1	0,5
Resistor CFR50 1 k Ω	0,12	10	1	1,2
2 x Módulo 2 diodos MDD26-08N1B, 36A, 800V	21,07	1	6	126,42
Diodo 1N4006, 800 V 1 A	0,191	10	3	1,91
Condensador serie RS 100uF, 400 V	0,7	2	3	2,1
Diodo zener 1N5357B, 20V	0,27	5	3	1,35
Resistencia fija CFR100J100K	0,089	10	3	0,89
Módulo IGBT, IXGN320N60A3	31	1	3	93

Resistencia 47 Ω 1 kW	47,9	1	3	143,7
Resistencia 100 Ω 1 kW	47,9	1	3	143,7
Cables, placas, radiadores etc.	60	1	1	60
Coste total ELC trifásico con carga por fase				686,4

Trifásico con única carga

Tabla XLVIII. Presupuesto ELC caso trifásico con única carga

Presupuesto ELC trifásico única carga				
Descripción	Coste unitario (€/ud)	Pedido mínimo	Ud	Coste total (€)
Microcontrolador de más bits que Arduino Mega2560	60	1	1	60
LCD DEM 16216 SYH-LY	14	1	1	14
Transformador de PCB 44328	4,9	1	1	4,9
Diodo 1N4001	0,145	10	20	2,9
Condensador electrolítico de aluminio 860010675017 de 180 μ F	0,465	10	1	3,88
Condensador electrolítico de aluminio 860010672003 de 330 nF	0,105	50	1	5,25
LM7805	0,524	10	1	5,24
Condensador electrolítico de aluminio 860010672001 de 100 nF	0,097	50	2	4,84
Transformador de PCB 44057	4,8	1	1	4,8
Condensador electrolítico de aluminio 860160672009 10 μ F	0,112	50	1	5,63
Resistor 2K MRS25	0,108	1	2	0,216
Diodo Zener 1N5338B	0,427	10	1	4,27
Potenciómetro RK11K1140A3L	1,28	1	2	2,56
Modulo sensor de corriente ACS712ELCTR-30A-T	11,9	1	1	11,9
Condensador 1 nF PFR5102J63J11L4BULK	0,75	5	1	3,75
Optoacoplador LTV-814	0,25	10	1	2,5
Resistor CFR100 0,47 k Ω	0,05	10	1	0,5
Resistor CFR50 1 k Ω	0,12	10	1	1,2
Diodo T40HFL, 40 A, 1000V	29	1	3	87
Diodo 1N4006, 800 V 1 A	0,191	10	1	1,91
Condensador serie RS 100uF, 400 V	0,7	2	1	1,4
Diodo zener 1N5357B, 20V	0,27	5	1	0,135

Resistencia fija CFR100J100K	0,089	10	1	0,89
Módulo IGBT, IXGN320N60A3	31	1	1	31
5 x Resistencia en Panel 2,2 Ω 1 kW	225,35	1	1	225,35
Cables, placas, radiadores etc.	40	1	1	40
Coste total ELC trifásico con única carga				526,00

9. 2 Presupuesto componentes del cuarto de maquinas

Caso monofásico

Tabla XLIX. Presupuesto cuarto de máquinas caso monofásico

Presupuesto componentes cuarto de máquinas monofásico			
Descripción	Coste unitario (€/ud)	Ud	Coste total (€)
Generador Mindong ST 5 kW	250	1	250
Amperímetro analógico Sifam Tinsley 40 A 96 x 96mm	15,46	2	30,92
Voltímetro analógico Sifam Tinsley 300V 92 x 92 mm	18,91	1	18,91
Frecuencímetro Dizsen DT-F96	5	1	5
Relé de supervisión GIC MI81BL	45,28	1	45,28
Relé de supervisión GIC MG73BH	52,94	1	52,94
Magnetotérmico Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 16 A; Icu: 6 kA; Curva: C. 1P+N	6,52	1	6,52
Magnetotérmico Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 20 A; Icu: 6 kA; Curva: C. 1P+N	6,52	1	6,52
Magnetotérmico Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 6 kA; Curva: C. 1P+N	8,51	1	8,51
Cable H07Z1-K (AS) 450/750 V Cobre, 10 mm ² . Unipolar	0,93	10,00 m	9,3
Cable H07Z1-K (AS) 450/750 V Cobre, 1,5 mm ² . Unipolar	0,21	5,00 m	1,05
Tubo 32 mm	1,86	10,00 m	18,6
Tubo 16 mm	0,7	5,00 m	3,5
Coste total componentes cuarto de máquinas caso monofásico			457,05

Caso trifásico con carga por fase

Tabla L. Presupuesto cuarto de máquinas caso trifásico con carga por fase

Presupuesto cuarto de máquinas trifásico			
Descripción	Coste unitario	Ud	Coste total
Generador Mindong STC 6,3 kVA	250	1	250
Amperímetro analógico Sifam Tinsley 40 A 96 x 96mm	15,46	6	92,76
Voltímetro analógico Sifam Tinsley 300V 92 x 92 mm	18,91	1	18,91
Frecuencímetro Dizsen DT-F96	5	1	5
Relé de supervisión GIC MI91BL	45,28	1	45,28
Relé de supervisión GIC MG73BH	52,94	1	52,94
Magnetotérmico Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 10 A; Icu: 6 kA; Curva: C. 3P+N	7,32	2	14,64
Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 6 kA; Curva: C. 1P+N	8,51	1	8,51
Cable H07Z1-K (AS) 450/750 V Cobre, 6 mm ² . Unipolar	1,12	10,00 m	11,12
Cable H07Z1-K (AS) 450/750 V Cobre, 1,5 mm ² . Unipolar	0,21	5,00 m	1,05
Tubo 32 mm	1,86	10,00 m	18,6
Tubo 16 mm	0,7	5,00 m	3,5
Coste total componentes cuarto de máquinas caso trifásico			522,31

9.3 Presupuesto componentes de la red de distribución eléctrica

Caso monofásico

Tabla LI. Presupuesto de componentes red de distribución eléctrica monofásica

Presupuesto de componentes red de distribución eléctrica monofásica			
Magnetotérmicos			
Descripción	Coste unitario (€/ud)	Ud	Coste total (€)
Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 16 A; Icu: 6 kA; Curva: C. 1P+N	6,52	1	6,52
Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 6 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C. 1P+N	8,51	3	25,53
Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C. 1P+N	8,51	22	187,22

Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 4 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C. 1P+N	8,51	2	17,02
Fusibles			
Descripción	Coste unitario	Ud	Coste total
Tipo gL/gG; In: 8 A; Icu: 20 kA	3,1	2	6,20
Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA	3,1	42	130,20
Tipo gL/gG; In: 6 A; Icu: 20 kA	3,1	4	6,20
Diferenciales			
Descripción	Coste unitario	Ud	Coste total
Selectivo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 100 mA; Clase: AC. 2P	36,04	3	108,12
Instantáneo; In: 40.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC. 2P	15,55	24	388,75
Cables			
Descripción	Coste unitario	Ud (m)	Coste total
RZ1-K (AS) 3 x (0,6/1 kV) Cobre, Poliolefina termoplástica (Z1), 10 mm ² . Unipolar	5,03	80.00	402,40
H07Z1-K (AS) 450/750 V Cobre, 6 mm ² . Unipolar	0,75	25.00	18,75
RZ1-K (AS) 3 x (0,6/1 kV) Cobre, Poliolefina termoplástica (Z1), 6 mm ² . Unipolar	2,94	95.00	276,45
H07Z1-K (AS) 450/750 V Cobre, 1.5 mm ² . Unipolar	0,21	4693.00	985,53
Canalizaciones			
Descripción	Coste unitario	Ud (m)	Coste total
Tubo 32 mm	1,86	10.00	18,6
Tubo 16 mm	0,7	1335.50	934,50
Otros			
Descripción	Coste unitario	Ud	Coste total
Contador. 1P+N	38,5	23.00	885,50
Caja de derivación	1,15	43.00	49,450
Coste total distribución eléctrica monofásica			
Coste total	4505 €		

Caso trifásico

Tabla LII. Presupuesto de componentes red de distribución eléctrica trifásica

Presupuesto de componentes red de distribución eléctrica trifásica			
Magnetotérmicos			
Descripción	Coste unitario (€/ud)	Ud	Coste total (€)
Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 6 A; Icu: 4.5 kA; Curva: C. 3P+N	13,09	1	13,09
Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 6 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C. 1P+N	8,51	3	25,53
Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 1 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C. 1P+N	8,51	22	187,22
Doméstico o análogo (IEC 60898); In: 4 A; Icu: 1.5 kA; Curva: C. 1P+N	8,51	2	17,02
Fusibles			
Descripción	Coste unitario	Ud	Coste total
Tipo gL/gG; In: 8 A; Icu: 20 kA	3,1	2	6,20
Tipo gL/gG; In: 2 A; Icu: 20 kA	3,1	42	130,20
Tipo gL/gG; In: 6 A; Icu: 20 kA	3,1	4	6,20
Diferenciales			
Descripción	Coste unitario	Ud	Coste total
Selectivo; In: 25.00 A; Sensibilidad: 100 mA; Clase: AC. 2P	36,04	3	108,12
Instantáneo; In: 40.00 A; Sensibilidad: 30 mA; Clase: AC. 2P	15,55	24	388,75
Cables			
Descripción	Coste unitario	Ud (m)	Coste total
RZ1-K (AS) 5 x (0,6/1 kV) Cobre, Poliolefina termoplástica (Z1), 10 mm ² . Unipolar	7,23	80.00	578,40
H07Z1-K (AS) 450/750 V Cobre, 6 mm ² . Unipolar	0,75	25.00	18,75
RZ1-K (AS) 3 x (0,6/1 kV) Cobre, Poliolefina termoplástica (Z1), 6 mm ² . Unipolar	2,94	95.00	276,45
H07Z1-K (AS) 450/750 V Cobre, 1.5 mm ² . Unipolar	0,21	4693.00	985,53
Canalizaciones			
Descripción	Coste unitario	Ud (m)	Coste total
Tubo 32 mm	1,86	10.00	18,60
Tubo 16 mm	0,7	1335.50	934,50



Otros			
Descripción	Coste unitario	Ud	Coste total
Contador. 1P+N	38,5	23.00	885,50
Caja de derivación	1,15	43.00	49,450
Coste total distribución eléctrica trifásica			
Coste total		4681 €	

10 Referencias

- Agüero, J. (1992). *Mecánica de Fluidos incompresibles y Turbomáquinas Hidráulicas*. Madrid: Ciencias.
- Austegard, A. (Abril de 2015). www.remotehydrolight.com. Obtenido de <http://www.remotehydrolight.com/DigitalELC.pdf>
- Ayude Prieto, U. (28 de Junio de 2018). Desarrollo de Turbina de Flujo Cruzado para Aplicación en Comunidades en Vías de Desarrollo. Bilbao, España.
- Buchner, W. E. (2005). *Selección de Tecnologías apropiadas EMAS*. La Paz: Escuela Móvil Aguas y Saneamiento Básico EMAS.
- Díaz, N. L. (21 de Junio de 2018). [cubasolar.cu](http://www.cubasolar.cu). Obtenido de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia54/HTML/Articulo04.htm>
- Federico Coz, T. S. (1995). *Manual de mini y micro centrales hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos*. Lima: Intermediate Technology Development Group.
- Harvey, A. (1993). *MICRO-HYDRO DESIGN MANUAL A guide to small-scale water power schemes*. Londres: Intermediate Technology Publications.
- Ingeniería sin fronteras. (s.f.). Curso de introducción: Proyectos de abastecimiento de energía en zonas rurales.
- Kristian Lendng, Y. S. (s.f.). *An Electronic Load Controller for Micro-Hydro Power Plants in the Philippines*.
- Mora, F. (2015). *Máquinas Eléctricas*. Madrid: Garceta Grupo Editorial.
- Nan Win Aung, A. Z. (2015). Microcontroller Based Electrical Parameter Monitoring System of Electronic Load Controller Used in Micro Hydro Power Plant. *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 3, No. 5, pp. 97-109.
- Rojan Bhattarai, R. A. (2013). Improved Electronic Load Controller for Three Phase Isolated Micro-Hydro Generator. *Fifth International Conference on Power and Energy Systems*. Katmandu: ResearchGate.
- Santicar. (21 de Junio de 2018). [Slideshare.net](https://es.slideshare.net/SanTicar/eolica-generadores). Obtenido de <https://es.slideshare.net/SanTicar/eolica-generadores>
- TADEH/EMAS. (17 de 06 de 2018). Obtenido de tadeh.org: <http://tadeh.org/>
- Teodoro Sanchez, Rafael Escobar. (2012). *Microcentrales hidroeléctricas: Cartilla informativa para la generación de energía eléctrica*. Lima: Soluciones prácticas.
- Trasancos, J. G. (2016). *Instalaciones eléctricas en media y baja tensión*. Paraninfo.
- W.Hart, D. (1993). *Electrónica de Potencia*. Prentice Hall.

11 Bibliografía

- Agüero, J. (1992). Mecánica de Fluidos incompresibles y Turbomáquinas Hidráulicas. Madrid: Ciencias.
- Austegard, A. (Abril de 2015). www.remotehydrolight.com. Obtenido de <http://www.remotehydrolight.com/DigitalELC.pdf>
- Ayude Prieto, U. (28 de Junio de 2018). Desarrollo de Turbina de Flujo Cruzado para Aplicación en Comunidades en Vías de Desarrollo. Bilbao, España.
- Buchner, W. E. (2005). Selección de Tecnologías apropiadas EMAS. La Paz: Escuela Móvil Aguas y Saneamiento Básico EMAS.
- Díaz, N. L. (21 de Junio de 2018). [cubasolar.cu](http://www.cubasolar.cu). Obtenido de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia54/HTML/Articulo04.htm>
- Federico Coz, T. S. (1995). Manual de mini y micro centrales hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos. Lima: Intermediate Technology Development Group.
- Harvey, A. (1993). MICRO-HYDRO DESIGN MANUAL A guide to small-scale water power schemes. Londres: Intermediate Technology Publications.
- Ingeniería sin fronteras. (s.f.). Curso de introducción: Proyectos de abastecimiento de energía en zonas rurales.
- Kristian Lendng, Y. S. (s.f.). An Electronic Load Controller for Micro-Hydro Power Plants in the Philippines.
- Mora, F. (2015). Máquinas Eléctricas. Madrid: Garceta Grupo Editorial.
- Nan Win Aung, A. Z. (2015). Microcontroler Based Electrical Parameter Monitoring System of Electronic Load Controler Used in Micro Hydro Power Plant. Journal of Electrical and Electronic Engineering, Vol. 3, No. 5, pp. 97-109.
- Rojan Bhattarai, R. A. (2013). Improved Electronic Load Controller for Three Phase Isolated Micro.Hydro Generator. Fifth International CONference on Power and Energy Systems. Katmandu: ResearchGate.
- Santicar. (21 de Junio de 2018). [Slideshare.net](https://es.slideshare.net/SanTicar/eolica-generadores). Obtenido de <https://es.slideshare.net/SanTicar/eolica-generadores>
- TADEH/EMAS. (17 de 06 de 2018). Obtenido de tadeh.org: <http://tadeh.org/>
- Teodoro Sanchez, Rafael Escobar. (2012). Microcentrales hidroeléctricas: Cartilla informativa para la generación de energía eléctrica. Lima: Soluciones prácticas.
- Trasancos, J. G. (2016). Instalaciones eléctricas en media y baja tensión. Paraninfo.
- W.Hart, D. (1993). Electrónica de Potencia. Prentice Hall.