



Mondragon
Unibertsitatea

Goi Eskola Politeknikoa
Escuela Politécnica Superior

Colector solar térmico para ACS



Ander Hazas Berasategui

Jairo Madinabeitia Luna

Ander Merino Iriarte

Axier Zeberio Gereño

2 de junio de 2023

GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

Resumen

En este proyecto se ha construido un colector solar térmico para la producción de agua caliente sanitaria. Para lograr el calentamiento del agua mediante energía solar, se ha requerido una placa solar térmica. El montaje ha consistido en instalar esta placa en una posición óptima para recibir la máxima radiación solar.

Para controlar el calentamiento del agua, se empleará un sensor de temperatura ubicado en la placa solar. Cuando la temperatura alcanza los 40 grados, el sensor detecta este valor y envía una señal a un microprocesador. Este, al recibir la señal del sensor de temperatura, activa un circuito de control que pone en funcionamiento la bomba que se encarga de extraer el agua del estanque y llevarla a través de la placa, donde es calentada mediante la absorción de energía solar.

El microprocesador es el encargado de recibir las señales provenientes del sensor de temperatura y de otros sensores adicionales que estarán presentes en el sistema, como los sensores de temperatura de la salida del agua de la placa y de la temperatura del agua en el estanque. Una vez que el microprocesador recibe las señales de los sensores, procesa la información de acuerdo con el programa preestablecido y toma las decisiones correspondientes para controlar el sistema de calentamiento del agua, controlando el bombeo de agua desde el estanque hacia la placa solar. Cuando la temperatura alcanza los 40 grados, la bomba se activa gracias a la señal del microprocesador. A medida que el agua fluye a través de la placa solar, se calienta y puede ser utilizada para diversos fines.

Laburpena

Proiektu honetan eguzki-kolektore termiko bat eraiki da ur bero sanitarioa ekoizteko. Eguzki-energiaren bidez ura berotzea lortzeko, eguzki-plaka termiko bat behar izan da. Eguzki-erradiazio maximoa jasotzeko, plaka hori posizio ezin hobean instalatzea izan da muntaia.

Uraren berotzea kontrolatzeko, eguzki-plakan kokatutako tenperatura-sentsore bat erabiliko da. Tenperatura 40 gradura iristen denean, sentsoreak balio hori detektatzen du eta mikroprozesadore batera seinale bat bidaltzen du. Honek, tenperatura-sentsorearen seinalea jasotzean, kontrol-zirkuitu bat aktibatzen du, ura urmaeletik atera eta plakatik zehar eramateaz arduratzen den ponpa martxan jartzen duena, non eguzki energia xurgatuz berotzen den.

Mikroprozesadorea arduratzen da tenperatura-sentsoretik eta sisteman egongo diren beste sentsore gehigarri batzuetatik datozen seinaleak jasotzeaz, hala nola plakako uraren irteerako tenperatura-sentsoreetatik eta urmaeleko uraren tenperaturatik

datozenak. Mikroprozesadoreak sentsoeren seinaleak jasotzen dituenean, aurrez ezarritako programaren arabera prozesatzen du informazioa, eta ura berotzeko sistema kontrolatzeko erabakiak hartzen ditu, uraren ponpaketa urmaeletik eguzki-plakara kontrolatuz. Temperatura 40 gradura iristen denean, bonba mikroprozesadorearen seinaleari esker aktibatzen da. Ura eguzki-plakatik isurtzen den heinean, berotu egiten da eta hainbat helburutarako erabil daiteke.

Abstract

In this project, a solar thermal collector has been built to produce domestic hot water. To achieve water heating by means of solar energy, a solar thermal plate was required. The assembly consisted of installing this plate in an optimal position to receive the maximum solar radiation.

To control the water heating, a temperature sensor located on the solar panel will be used. When the temperature reaches 40 degrees, the sensor detects this value and sends a signal to a microprocessor. The microprocessor, upon receiving the signal from the temperature sensor, activates a control circuit that starts the pump that is responsible for extracting water from the pond and carrying it through the plate, where it is heated by absorbing solar energy.

The microprocessor receives the signals coming from the temperature sensor and other additional sensors that will be present in the system, such as the temperature sensors of the water outlet of the plate and the temperature of the water in the pond. Once the microprocessor receives the signals from the sensors, it processes the information according to the preset program and makes the corresponding decisions to control the water heating system, controlling the pumping of water from the pond to the solar panel. When the temperature reaches 40 degrees, the pump is activated by the microprocessor signal. As the water flows through the solar plate, it is heated and can be used for various purposes.

Índice

GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA	i
1 Introducción.....	1
1.1 Contexto	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Planificación	4
2 Diseño del prototipo.....	5
2.1 Sistema de tuberías	5
2.2 Chapa de la placa	6
2.3 Protector.....	6
2.4 Aislante	7
2.5 Base de la placa	8
3 Análisis estructural.....	9
3.1 Análisis de prototipo.....	9
3.1.1 Caso crítico.....	11
4 Análisis del sistema térmico	13
4.1 El modelo térmico	13
4.2 Cálculo de coeficiente de convección	14
4.3 La eficiencia y la temperatura del agua según la irradiancia	16
5 Medición de temperatura y luz solar.....	19
5.1 Medición de temperatura del agua en el tanque	19
5.2 Medición de temperatura del agua a la salida del colector.....	21
5.3 Medición de temperatura del colector.....	22
5.4 Medición de luz solar	23
6 Diseño del sistema de control y microcontrolador.....	25
6.1 Control.....	25
6.2 Microcontrolador.....	29
7 Diseño de componentes eléctricos.....	31
7.1 Topología de circuito	31
7.2 Características del MOSFET	33
7.2.1 Pérdidas de conducción en MOSFET	33

7.2.2	Pérdidas de conmutación en MOSFET	33
7.2.3	Pérdidas totales del MOSFET.....	33
7.3	Características del diodo	35
7.3.1	Pérdidas de conmutación en diodo	35
7.3.2	Pérdidas de conducción en diodo	35
7.3.3	Pérdidas totales del diodo.....	36
7.4	Eficiencias del circuito	37
7.5	Conmutación mediante señal PWM	37
7.6	Implementación de DC Chopper	38
8	Semiconductores NPN y PNP	40
9	Montaje del prototipo.....	43
10	ODS	45
11	Conclusiones y líneas futuras	47
12	Bibliografía	48

Lista de figuras

Figura 1 Esquema general	2
Figura 2 Estructura general	9
Figura 3 Esquema del prototipo	10
Figura 4 Esquema de fuerzas en el eje	10
Figura 5 Esquema de fuerzas en la viga	11
Figura 6 Esquema del caso crítico de prototipo comercial	12
Figura 7 Modelo térmico	14
Figura 8 Modelo térmico simplificado	16
Figura 9 Eficiencia del colector según la irradiancia	17
Figura 10 Circuito del PT100	19
Figura 11 Gráfico de diferencia de tensión	20
Figura 12 Gráfico de diferencia de tensión amplificada	21
Figura 13 Circuito del NTC	22
Figura 14 Voltaje de salida del NTC	23
Figura 15 Circuito de los LDR	24
Figura 16 Control P	25
Figura 17 Control PI	26
Figura 18 Simulación del colector solar térmico entero y sus mediciones	26
Figura 19 Calentamiento del agua según ΔT_{ref}	27
Figura 20 Control orientación solar	28
Figura 21 Circuito del sistema de relés	28
Figura 22 Circuito del DC Chopper	31
Figura 23 Cuadrantes del DC Chopper	32
Figura 24 Pérdidas totales de todos los MOSFETs en función del duty	34
Figura 25 Pérdidas de conducción	35
Figura 26 Pérdidas de potencia en diodos	36
Figura 27 Eficiencias del circuito	37
Figura 28 Tensión entre drenador y fuente sumidero del MOSFET	38
Figura 29 Voltaje y corriente de carga	38
Figura 30 Voltaje y corriente de diodo	39
Figura 31 Transistor NPN	41
Figura 32 Transistor PNP	42
Figura 33 Montaje final e implementación	44
Figura 34 Objetivo de desarrollo sostenible 6	45
Figura 35 Objetivo de desarrollo sostenible 7	46
Figura 36 Objetivo de desarrollo sostenible 7	46

Índice de tablas

Tabla 1 Planificación	4
Tabla 2 Materiales para el sistema de tuberías	5
Tabla 3 Materiales para chapa de la placa.....	6
Tabla 4 Materiales para el protector	7
Tabla 5 Materiales para el aislante	7
Tabla 6 Materiales para la base de la placa.....	8
Tabla 7 Características de bomba de agua y fuente de alimentación de 24V	32

1 Introducción

1.1 Contexto

La energía solar térmica se ha convertido en una opción popular y sostenible para la producción de agua caliente sanitaria en diversos contextos.

Hoy en día, muchos sistemas convencionales de producción de agua caliente dependen de combustibles fósiles, como gas natural o petróleo. Esto no solo implica una mayor emisión de gases de efecto invernadero y contribuye al cambio climático, sino que también crea una dependencia de recursos finitos y volátiles en términos de precios.

La instalación de una placa termo solar se presenta como una solución eficiente y respetuosa con el medio ambiente ya que, al depender de una fuente de energía renovable y abundante, las placas termo solares ofrecen una solución sostenible a largo plazo para la producción de agua caliente sanitaria. Esto contribuye a la seguridad energética y a la reducción de la dependencia de los recursos no renovables.

En este caso, se ha propuesto la utilización de un colector térmico solar conectado a un depósito de agua. El objetivo es aprovechar la radiación solar para transferir el calor al agua, calentando así el contenido del depósito. El flujo de agua a través de las tuberías es controlado por una bomba, cuyo caudal dependerá de la diferencia de temperatura establecida por el sistema de control. Para llevar a cabo esta tarea, se utiliza un microprocesador como herramienta principal de control.

El microprocesador recibe información de temperatura proveniente de diferentes sensores ubicados a lo largo del colector solar. Con base en esta información, el microprocesador ajusta la tensión suministrada a los componentes electrónicos, como el PWM (Modulación por Ancho de Pulso) y el DC Chopper (Regulador de Corriente Continua), con el fin de regular el caudal de la bomba, así como la temperatura del agua.

Además, para aprovechar al máximo la radiación solar, el colector cuenta con un actuador, un dispositivo que permite ajustar la orientación del colector. Esto asegura que el colector esté siempre alineado de manera óptima con la posición del sol, maximizando así la captación de energía solar y mejorando la eficiencia del sistema.

Durante este proyecto, se ha diseñado el prototipo comercial, pero para la validación de este último, se ha construido un prototipo con recursos y materiales reducidos, el cual está detallado en el apartado 9.

En la Figura 1, se muestra un esquema general de todo el sistema, siendo este un reflejo de todo el conjunto.

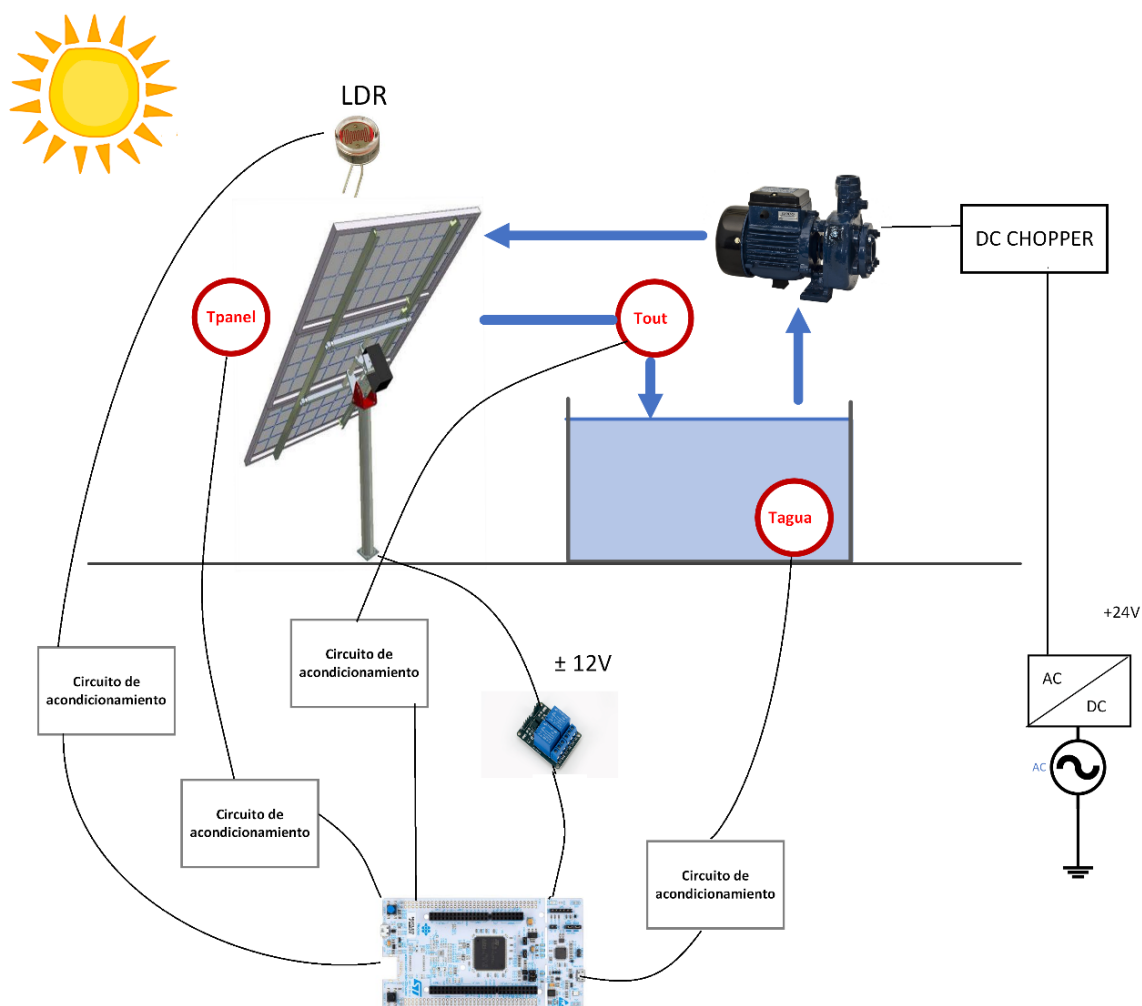


Figura 1 Esquema general

1.2 Objetivos

El objetivo principal del proyecto es **obtener agua caliente sanitaria utilizando la radiación solar como fuente de energía mediante un colector térmico solar que funcione sin líquido refrigerante y sin presión, incluyendo un sistema automático de seguimiento al sol controlado por un microprocesador**. Además del objetivo principal, se han definido varios subobjetivos:

- Controlar el caudal mediante el uso de una señal PWM de duty variable y controlar el seguidor solar para que la radiación incida en el colector perpendicularmente para obtener mayor energía solar.
- Elegir, diseñar e implementar los componentes electrónicos necesarios para la realización de los circuitos eléctricos como DC Chopper, relés o sensores de medición de temperatura. Obtener una eficiencia del 85% del DC chopper de la bomba de agua.
- Considerando las propiedades mecánicas y térmicas de cada componente, conseguir un prototipo que no pese más de 20 kg para que sea transportable.
- Elegir los materiales térmicamente más apropiados para que la eficiencia del circuito térmico sea por lo menos del 90%.
- Medir la temperatura del agua, la del colector solar y la de la salida del colector mediante sensores de temperatura y que el error máximo de medición sea 15%.
- Calentar el agua del depósito a una temperatura de 50°C en menos de 6 minutos.
- Analizar el impacto positivo o negativo que tendrá el proyecto en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

1.3 Planificación

Tabla 1 Planificación

BLOQUES FUNCIONALES	ACTIVIDADES	RESPONSABLE	MAYO																JUNIO															
			8	9	10	11	12	15	16	17	18	19	22	23	24	25	26	29	30	31	1	2	5	6	7	8	9	12	13	14	15	16		
Hitos	X	X																																
Gestión del proyecto	Definir los objetivos y planificación	Equipo																																
	Identificar los Objetivos de Desarrollo Sostenible	Equipo																																
	Defensa	Equipo																																
	Prueba del prototipo	Equipo																																
	Documentación	Equipo																																
	Póster	Equipo																																
Medidas de temperatura	Analizar y diseñar el circuito del sensor del colector	Ander H.																																
	Analizar y diseñar el circuito del sensor de la salida del colector	Ander H.																																
	Analizar y diseñar el circuito del sensor del agua	Ander H.																																
Análisis y diseño del sistema de bombeo de agua	Definir, simular e implementar el sistema de control del bombeo de agua	Ander M.																																
	Medir tensión y corriente del sistema de bombeo	Ander M.																																
	Desarrollo de control de lazo cerrado para el suministro de caudal	Ander M.																																
	Programar en en microprocesador código PWM para controlar Chopper mediante duty	Ander M.																																
	Seleccionar topología adecuada del DC chopper	Ander M.																																
	Desarrollar el cálculo analítico automático de pérdidas de potencia en DC chopper	Ander M.																																
	Comparar analíticamente los semiconductores para aplicación del DC chopper y selección final argumentada	Ander M.																																
	Explicar el funcionamiento de los transistores simples	Aster																																
	Analizar la posible implementación de Snubber en DC chopper	Aster																																
	Acondicionar la señal de referencia para PWM desde DSP	Jairo																																
	Integrar driver entre DSP y Chopper	Ander H.																																
Lectura y manipulación de las temperaturas	Obtener señal I2C de medida de temperatura	Jairo																																
	Programar el microprocesador para medir señales analógicas de temperatura y radiación solar mediante ADC	Jairo																																
Optimización de la orientación del colector	Identificar la orientación óptima del colector mediante sensores LDR	Jairo																																
	Modelar mediante simulación e implementar mecanismo bipolar 24V ±12V para seguidor solar	Jairo																																
Análisis termodinámico del colector solar	Modelar la transferencia de calor del panel solar térmico	Aster																																
	Analizar y simular la dinámica térmica de la placa en el régimen transitorio	Aster																																
Diseño y dimensionamiento de la estructura del colector solar	Selección de materiales para el producto real teniendo en cuenta la funcionalidad de cada componente	Aster																																
	Definir la geometría representativa de la celosía de la estructura soporte para el colector solar teniendo en cuenta el peso propio de la estructura y acciones del viento	Aster																																

2 Diseño del prototipo

El diseño del colector solar térmico comercial se ha realizado después de una investigación sobre las tecnologías y materiales más avanzados disponibles en el mercado. Se han evaluado las características de diferentes tipos de paneles solares, tuberías y aislamientos térmicos, seleccionando lo mejor para nuestro producto.

Después de analizar los modelos que se podían hacer, se ha elegido el tamaño y la forma para optimizar el colector. Junto a esto también se ha diseñado la posición del sistema de tubos y los paneles solares para maximizar la eficacia a la hora de absorber la energía solar.

Para finalizar, se ha tenido en cuenta la estética y la facilidad de instalación del prototipo, para poder instalarlo fácilmente y no causar problemas al cliente. El resultado ha sido un prototipo completo y funcional, listo para su aprovechamiento en cualquier empresa o domicilio.

2.1 Sistema de tuberías

El criterio principal para elegir los materiales del sistema de tuberías ha sido su capacidad de resistir las condiciones de alta temperatura y presión a las que serán expuestos. Por otra parte, deben tener una alta conductividad térmica para una buena transferencia de calor hacia el agua.

Además de la conductividad térmica, se ha considerado la vida útil del material y la resistencia a la corrosión, ya que el sistema estará en contacto con agua caliente. Por último, se le ha dado mucha importancia al coste de cada material para que el producto sea rentable. Los materiales para elegir están en Tabla 2:

Tabla 2 Materiales para el sistema de tuberías

Material	Punto de fusión (°C)	Conductividad térmica (W/m*K)	Precio (€/m)
Cobre	1085	390	8-10
Acero inoxidable	1400	15-30	5-7
Polipropileno	160	0.22	1-3
Polietileno reticulado	135	0.35	1-3

La elección final para el sistema de tuberías ha sido el cobre sabiendo que puede tener un precio más alto en comparación con otros materiales. Su conductividad térmica y durabilidad han sido razones suficientes para elegir este material. Además, gracias a su durabilidad y resistencia, a largo plazo va a ser un producto rentable.

2.2 Chapa de la placa

En este caso, los criterios utilizados para elegir los materiales para la chapa de la placa del colector solar han sido su capacidad de absorber y retener eficientemente la radiación solar. Se ha buscado un material que tenga una alta absorción de energía solar y una baja reflectividad.

Además de las propiedades de absorción, se ha tenido en cuenta las mismas propiedades del sistema de tuberías; que sea resistente y duradera con el tiempo porque estará expuesto al aire libre. Por último, se ha intentado que el material sea económicamente lo más rentable posible. Los materiales para elegir están en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

Tabla 3 Materiales para chapa de la placa

Material	Punto de fusión (°C)	Conductividad térmica (W/m*K)	Precio (€/kg)
Aluminio	660	205-250	2-4
Acero inoxidable	1400	15-30	5-7
Vidrio templado	600-650	1.05	5-8 (€/m²)
Polipropileno	160	0.18	2-4
Cobre	1085	390	8-10

Para un modelo comercial de colector solar térmico, la mejor elección sería el aluminio como material para la chapa de la placa. Se ha enfocado la elección de materiales en la conductividad térmica, lo cual el aluminio tiene las propiedades adecuadas. Por otra parte, el aluminio es ligero y tiene buena resistencia a la corrosión. A todo esto, hay que sumarle que económicamente es un material barato y accesible.

2.3 Protector

El criterio principal para elegir el material del protector del colector ha sido fundamentalmente la capacidad de resistencia ante un posible impacto que pueda sufrir al aire libre. Por otra parte, se ha tenido en cuenta que sea resistente a la radiación ultravioleta.

A todo esto, hay que sumarle la resistencia a la corrosión para que el producto tenga una larga vida útil, ya que el protector estará en contacto con la lluvia y la humedad. Como siempre mencionar la importancia del peso del material para poder instalarlo

después y su costo, buscando el equilibrio entre todas las propiedades. Los materiales para elegir están en Tabla 4:

Tabla 4 Materiales para el protector

Material	Punto de fusión (°C)	Conductividad térmica (W/m*K)	Precio (€/m²)
Acrílico (PMMA)	165	0.2-0.3	5-15
Vidrio templado	600-650	1.05	5-8

El vidrio templado ha sido la mejor opción como protector para el colector comercial. El vidrio templado ofrece una muy buena combinación de propiedades, resistencia y transparencia.

También mencionar su punto de fusión en comparación con el PMMA, es mucho mejor porque un día muy caluroso el acrílico se puede calentar mucho y derretir. Por último, el vidrio templado es ampliamente utilizado en la industria solar, por eso, es mucho más amplia su disponibilidad.

2.4 Aislante

Para elegir el material aislante la conductividad térmica del material es fundamental. Se ha buscado un aislante con una baja conductividad térmica para minimizar las pérdidas de calor y maximizar la eficiencia del colector.

Además, se ha considerado muy importante la resistencia a altas temperaturas. El aislante debe ser capaz de soportar las temperaturas del colector sin sufrir deformaciones ni deteriorarse con el tiempo.

También se ha tenido que valorar la resistencia a la humedad que tiene el aislante, ya que el colector solar estará expuesto a condiciones húmedas. Que decir de su precio. Los materiales para elegir están en Tabla 5:

Tabla 5 Materiales para el aislante

Material	Punto de fusión (°C)	Conductividad térmica (W/m*K)	Precio (€/m²)
PUR	Sin definir, altas temperaturas	0.022-0.035	15-30
XPS	75-105	0.028-0.038	10-20
Lana mineral	1000-1200	0.032-0.045	5-15

EPS	180-220	0.032-0.040	5-15
-----	---------	-------------	------

Considerando las características mencionadas, se ha decidido que la mejor elección sería la espuma de poliuretano (PUR), a pesar de su elevado precio. Esto se debe a su baja conductividad térmica, lo que permite un mejor aislamiento y una menor pérdida de calor.

Además, el PUR tiene una buena resistencia a la corrosión, lo que lo hace adecuado para soportar sus propiedades mecánicas y mantener su eficiencia a lo largo del tiempo.

2.5 Base de la placa

Para finalizar, al elegir los materiales para la base de un colector solar se han valorado estas propiedades. En primer lugar, la resistencia estructural. La base debe ser lo suficientemente robusta para soportar el peso del colector y resistir posibles cargas adicionales, como viento o nieve.

Además, la resistencia a la corrosión es esencial como es en otras partes de la estructura. También se ha valorado la durabilidad del material, buscando una base que sea capaz de resistir el paso del tiempo sin deteriorarse.

Otro criterio que se ha tenido en cuenta es el peso del material para que pueda ser instalado sin mucha dificultad. Los materiales para elegir están en Tabla 6:

Tabla 6 Materiales para la base de la placa

Material	Punto de fusión (°C)	Conductividad térmica (W/m*K)	Precio (€/kg)
Aluminio	660	205-250	2-4
Acero inoxidable	1400	15-30	5-7
Acero galvanizado	1500-1600	50-60	1-3
FRP	700-1200	0.3-0.4	5-15

Para la base de la placa se ha decidido utilizar el acero inoxidable como material para la base. El acero inoxidable ofrece una buena resistencia estructural, una conductividad térmica moderada y una alta resistencia a la corrosión, lo que lo hace adecuado para aplicación en el exterior y ambiente húmedo.

Además, el acero inoxidable tiene un punto de fusión alto, lo que garantiza su estabilidad a altas temperaturas.

Aunque el precio del acero inoxidable puede ser más alto en comparación con otros materiales, su durabilidad y resistencia a largo plazo pueden compensar esta diferencia de costo.

3 Análisis estructural

Para el diseño del prototipo se han realizado el análisis de lo que sería el prototipo comercial, es decir, el prototipo que sería construido con más recursos. Aun así, el prototipo construido difiere de esta versión y se ha hecho con recursos y materiales reducidos.

3.1 Análisis de prototipo

Para escoger el prototipo comercial, se ha analizado el mercado actual y sus diferentes variaciones en el sector de los colectores solares térmicos. Tras realizar un breve estudio de mercado, este es el modelo de estructura comercial que se ha escogido, Figura 2 [1]:

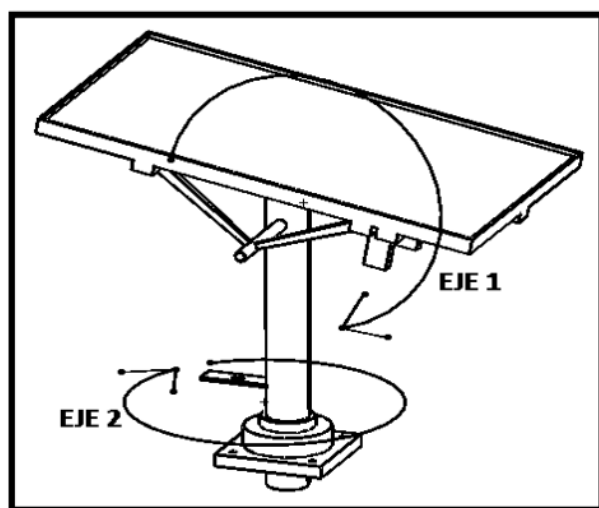


Figura 2 Estructura general

Tal y como se puede ver, es un modelo de dos ejes, el cual girará alrededor de su eje vertical en un ángulo al que se conoce como Azimut y elevará la inclinación del panel a la altitud respecto al Sol. Aunque optar por un modelo conlleve un mayor número de componentes necesarios, la placa podrá conseguir el ángulo óptimo para la transmisión de calor. En la Figura 3 se muestra el esquema general del prototipo.

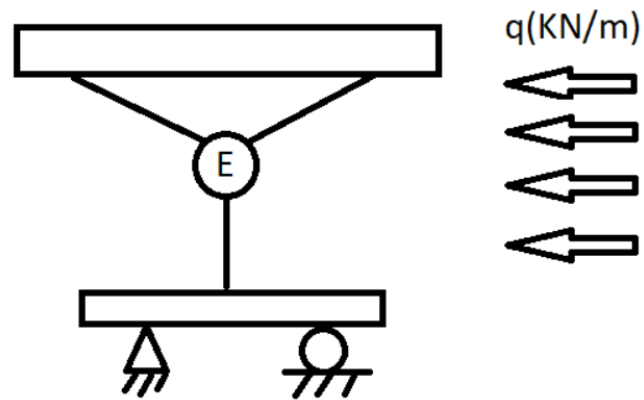


Figura 3 Esquema del prototipo

Además, en las Figura 4 y Figura 5 se ha analizado estáticamente la estructura en un caso típico, es decir, no crítico. Esta separación de la estructura se ha realizado para saber a qué tipo de esfuerzo se someterá la viga.

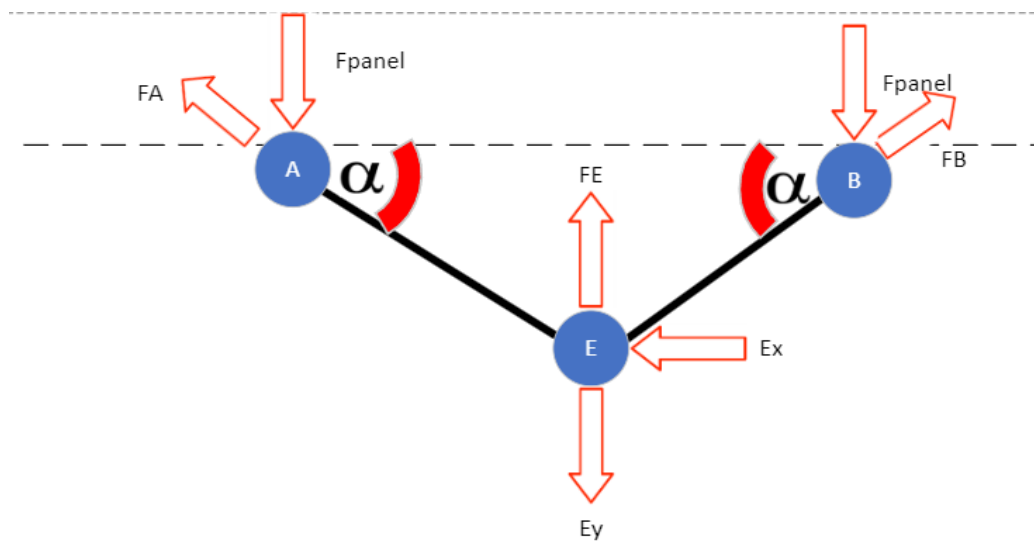


Figura 4 Esquema de fuerzas en el eje

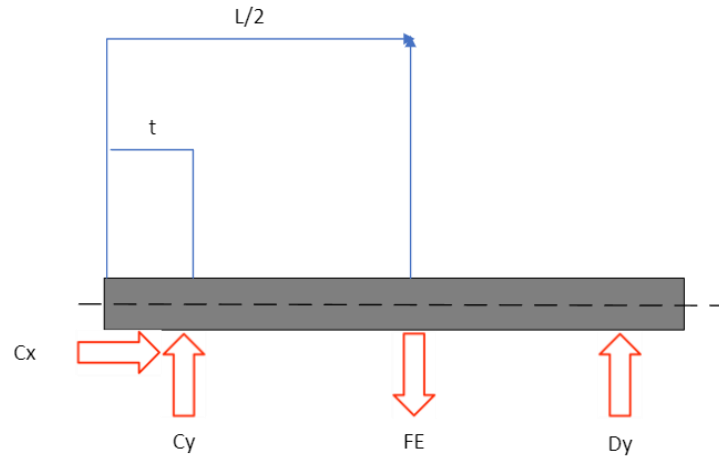


Figura 5 Esquema de fuerzas en la viga

Finalmente, utilizando las fórmulas (1) (2) (3) se ha hecho el análisis final de la viga. Tras este análisis se ha concluido que la viga estará sometida a flexión en este caso.

$$\sum F_y = C_y + D_y - F_E = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_x = 0 \quad (2)$$

$$\sum M_C = -F_E \left(\frac{L}{2} - t \right) + D_y (L - 2t) = 0 \quad (3)$$

3.1.1 Caso crítico

Analizando la situación más crítica a la que se podrá someter la estructura, se ha llegado a la siguiente conclusión. Tal y como se puede apreciar en la imagen, se observa la posición crítica con la que se pone a prueba el diseño, posición elevación ubicado a 0° en la cual todo el peso recae hacia el punto de color amarillo, también se ve afectada por ataque frontal de viento ya que choca una superficie plana lo cual puede provocar problemas de estabilidad y pérdida de rigidez, las fechas de color rojo representan las

fuerzas que interactúan en la estructura. Esta información ha sido obtenida mediante [1].

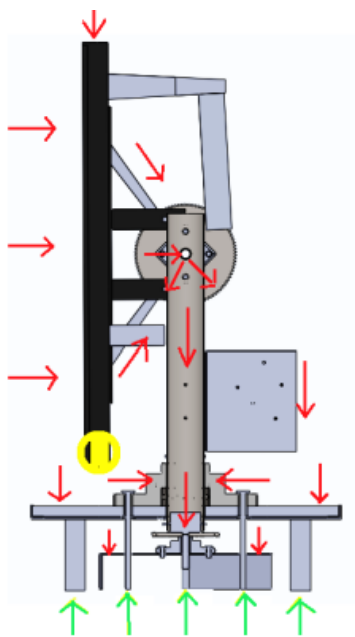


Figura 6 Esquema del caso crítico de prototipo comercial

4 Análisis del sistema térmico

Para llevar a cabo un análisis del sistema térmico se ha realizado un estudio del circuito térmico presente en el colector solar. Este análisis permite determinar de manera precisa la cantidad de calor que se perderá a través del colector y la cantidad que será transferida al agua, siendo este último valor el de principal interés en el sistema. El objetivo fundamental es lograr una eficiencia máxima en la transferencia de calor desde la radiación solar hacia el agua.

4.1 El modelo térmico

El modelo térmico del colector solar consta de varios componentes que participan en la transferencia y absorción de calor. Uno de los elementos fundamentales es el panel solar, que es lo que absorbe la radiación solar. Esto será lo que calentará al final el agua. Por otro lado, están los materiales y la geometría del panel. Con estos se evalúa su capacidad para capturar y convertir la energía solar en calor utilizable.

Estos factores son los que influyen en la pérdida de calor a través del colector. Esto incluye los mecanismos de conducción, convección y radiación térmica presentes en el sistema. Así se calculará de manera precisa la cantidad de energía térmica que se pierde durante la transferencia.

Para simplificar la resolución del modelo térmico, se ha representado el sistema como su circuito eléctrico equivalente, donde la temperatura es la tensión, el calor equivale a la corriente y la resistencia térmica equivale a una resistencia eléctrica.

$$V = I \cdot R \quad (4)$$

$$T = Q \cdot R \quad (5)$$

El circuito diseñado tiene tres partes, la primera será la temperatura que habrá en la placa con la irradiación del sol, la segunda parte será lo que equivale a nuestra placa, con todas sus capas y materiales, y la otra sería lo que equivale al circuito de tuberías.

El calor que saldrá de la placa será la que se habrá perdido, y el calor que sale del circuito del agua, será lo que utilizaremos nosotros después para el agua sanitaria.

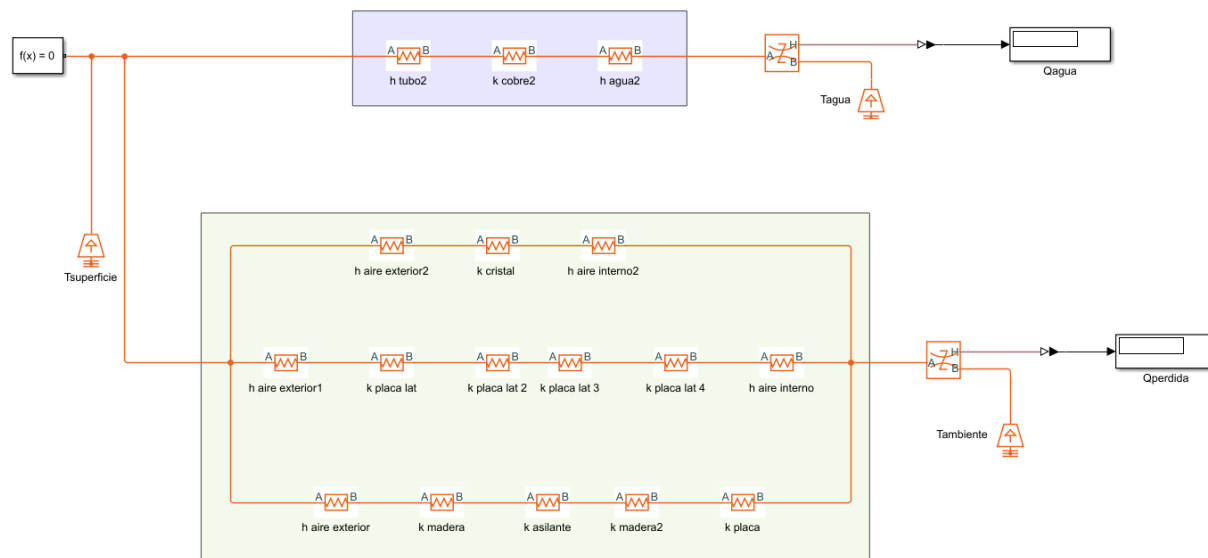


Figura 7 Modelo térmico

Para calcular las resistencias de nuestro colector solar, primero se han analizado todas las capas que tiene uno por uno. Las resistencias que pueden causar diferentes materiales como por ejemplo los soportes de madera, la placa de aluminio o el aislante. La resistencia es diferente si la transmisión de calor es por conducción o convección. [2]

$$R_{cond} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (6)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (7)$$

4.2 Cálculo de coeficiente de convección

Para cálculo de las resistencias térmicas, es necesario determinar el valor del coeficiente de convección. Este coeficiente juega un papel fundamental en la transferencia de calor por convección y se calcula a partir de parámetros como el número de Nusselt, la conductividad térmica y la longitud característica del flujo. [3]

$$h = \frac{Nu \cdot L}{k} \quad (8)$$

En nuestro caso hemos calculado tres diferentes valores para el coeficiente de convección (h), la convección del aire de fuera, convección del aire de dentro y la convección que tiene el agua.

Este valor h cambiara según el fluido si es forzada o natural: En la convección natural, el movimiento del fluido es impulsado por fuerzas naturales como la gravedad y las

diferencias de densidad. El fluido se calienta, se vuelve menos denso y asciende, mientras que el fluido frío desciende para ocupar su lugar. Este ciclo crea un flujo natural de convección. En la convección forzada, el fluido se mueve a través de la aplicación de una fuerza externa, como un ventilador, una bomba o el mismo viento. Esto permite un control más preciso del flujo y la velocidad del fluido.

El número de Nusselt (Nu), es una medida adimensional que relaciona la transferencia de calor por convección con la transferencia de calor por conducción. Su cálculo se basa en la geometría y las propiedades del fluido en contacto con la superficie sólida. Para su cálculo es necesario saber los valores de los números adimensionales de Reynolds (9), Grashof (10), Prandtl (11).

$$Re = \frac{c \cdot L}{v} \quad (9)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (\Delta T) \cdot L^3}{v^2} \quad (10)$$

$$Pr = \frac{v \cdot Cp \cdot \rho}{k} \quad (11)$$

Para empezar a calcular el valor de Nusselt hay que saber si la convección es natural o forzada, para ello se aplica esta condición; si la siguiente ecuación es mayor que 1, a convección es natural. Si es menor que 1, la convección será forzada.

$$\frac{Gr}{Re^2} > 1 \quad (12)$$

$$\frac{Gr}{Re^2} < 1 \quad (13)$$

En el caso de convección forzada, se ha diferenciado si el flujo es externo o interno. Para lo convección del aire, el flujo es externo. Después de esto es diferenciar si el flujo es laminar ($Re < 5 \cdot 10^5$ y $Pr > 0.6$) o turbulento ($10^7 > Re > 5 \cdot 10^5$ y $Pr < 0.6$) y aplicar la fórmula que le corresponde de Nusselt.

En el caso de la convección del agua el flujo será interno y junto a esto se puede decir sin necesidad de ningún calculo que el flujo es forzado por el hecho de que ha sido empujado por la bomba. Sabiendo esto se aplican las condiciones para saber si es flujo

laminar ($Re < 2300$) o turbulento ($Re > 10000$ y $0.7 < Pr < 160$) y otra vez se aplica la fórmula que le corresponde. Si es laminar sabemos que el valor de Nusselt es 4.36 porque suponemos que el calor es constante.

Para el caso de convección se tiene que calcular otro número para poder hacer las condiciones, el número de Rayleigh ($Ra = Gr \cdot Pr$). Por otro lado, hay que elegir el tipo de superficie, que en nuestro caso ha sido el plano vertical.

Una vez calculado todo se aplican las condiciones; si el número de Rayleigh esta entre 10^4 y 10^9 se aplica una formula y si esta entre 10^9 y 10^{13} .

En resumen, se aplican diferentes fórmulas para calcular el coeficiente de transferencia de calor (h) según las condiciones específicas de los números de Reynolds, Prandtl y Rayleigh. Dependiendo de los rangos en los que se encuentren estos valores, se utilizan diferentes ecuaciones.

4.3 La eficiencia y la temperatura del agua según la irradiancia

Una vez calculadas todas las resistencias se puede resumir todo en la siguiente foto donde R_{agua} será el equivalente a todas las resistencias en serie que hay en el sistema de tuberías. La otra resistencia es el prototipo, por donde se perderá una parte de la irradiación que viene del sol.

Cuanto más grande sea la resistencia que tenga la placa termo solar, menos calor se perderá por ella, ayudando significativamente en el proceso de calentamiento.

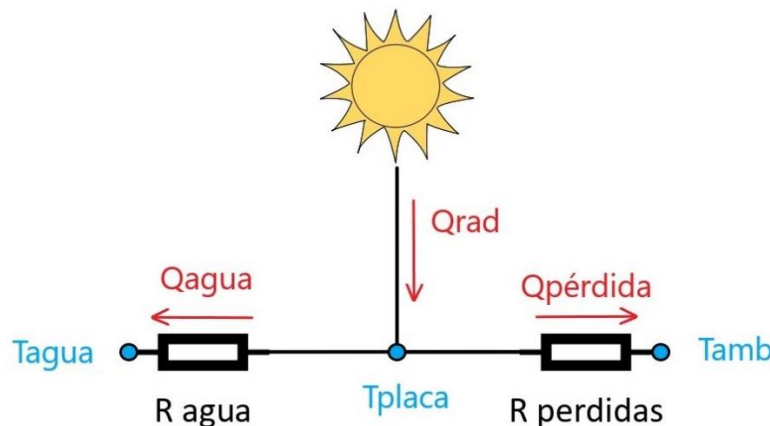


Figura 8 Modelo térmico simplificado

Como podemos observar, en nuestro modelo eléctrico se cumple la ley de Kirchhoff que dice así: En un lazo cerrado, la suma de todas las caídas de tensión es igual a la tensión total suministrada.

Teniendo el dato de la irradiancia, y calculando el calor que se perderá en la placa, calculado gracias a la diferencia de la temperatura que habrá y la resistencia de esta. Podemos calcular el calor que llegará al agua. Se resume en estas dos ecuaciones:

$$Q_{agua} = Q_{rad} - Q_{pérdida} \quad (14)$$

$$Q_{pérdida} = \frac{T_{placa} - T_{amb}}{R_{pérdida}} \quad (15)$$

Con estos datos podemos calcular que rendimiento tendrá nuestro colector a la hora de calentar el agua, y la temperatura a la que llegará. Para ello tendremos que despejar de la ecuación.

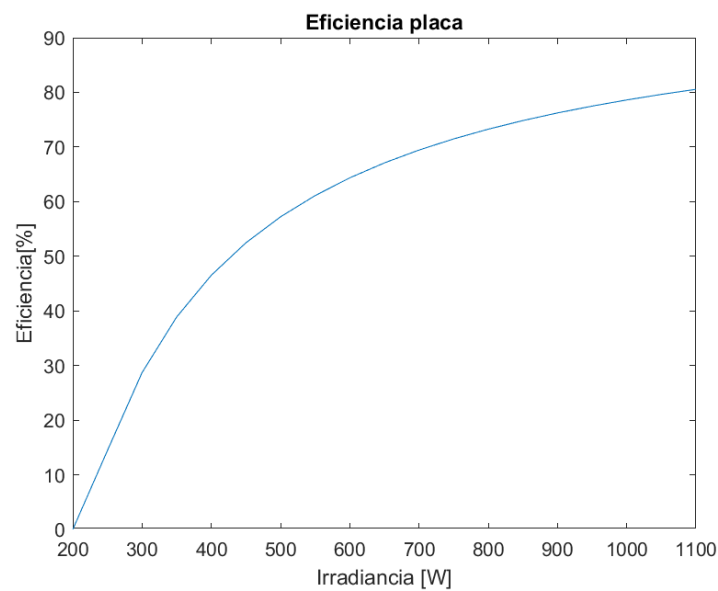


Figura 9 Eficiencia del colector según la irradiancia

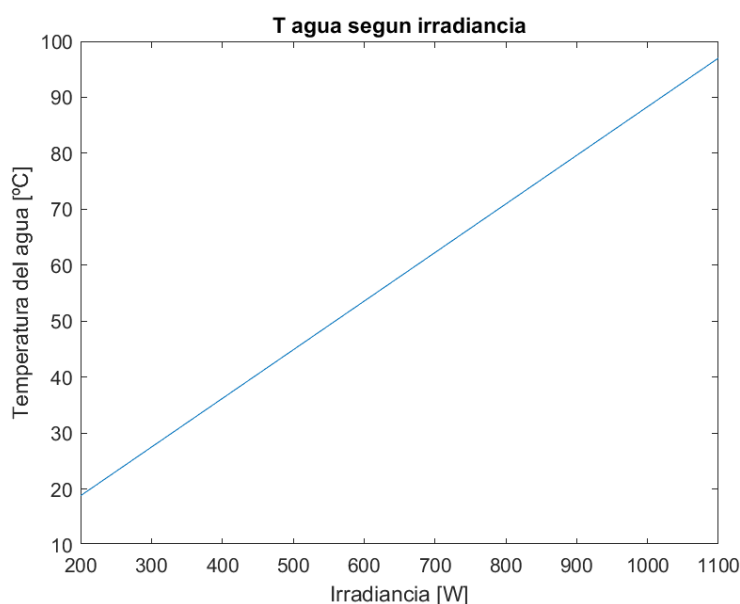
$$\eta = \frac{Q_{agua}}{Q_{rad}} \quad (16)$$

$$Q_{agua} = \frac{T_{placa} - T_{agua}}{R_{agua}} \quad (17)$$

Con los datos del rendimiento y la temperatura del agua, se han hecho dos graficas para ver la evolución de cada una según la irradiación.

A medida que la radiación se incrementa, se puede observar un crecimiento exponencial de la eficiencia, llegando a un límite superior del 80%. La relación entre la radiación y la eficiencia demuestra la importancia de maximizar el rendimiento en función de la cantidad de energía recibida.

A medida que aumenta la irradiancia, se observa un incremento lineal en la temperatura del agua, alcanzando un límite de 97°C cuando se alcanza una irradiancia máxima de 1100W. El aumento gradual de la temperatura del agua es un indicador de la absorción y acumulación de energía térmica a medida que la irradiancia aumenta.



5 Medición de temperatura y luz solar

Se han medido diferentes temperaturas y la luz solar que incide sobre el prototipo para llevar a cabo un control automático del colector térmico solar explicado en el apartado 6 Control y microprocesador. Para estas mediciones, es indispensable implementar varios sensores de temperatura y luz solar. Se medirán tres temperaturas, siendo estas, la del agua del tanque, la del colector y la del agua a la salida del colector, y también la luz solar. Las mediciones mandarán una señal en forma de tensión a la entrada de un microcontrolador el cual llevará a cabo el control.

5.1 Medición de temperatura del agua en el tanque

El agua que este dentro del tanque para su futuro uso como agua caliente sanitaria (ACS) se medirá con una resistencia PT100 (Positive Temperature). Esta resistencia aumenta gradualmente a la vez que la temperatura se calcula con la ecuación (18).

$$R_{PT100} = R_0 \cdot (AT + BT^2 + CT^3) \quad (18)$$

Siendo $A = 3,9803 \cdot 10^{-3}$, $B = -5,775 \cdot 10^{-7}$, $C = -4,183 \cdot 10^{-12}$ y $T = \text{temperatura } [^{\circ}\text{C}]$.

Gracias a ese cambio de resistencia podemos medir la diferencia de tensión en función de la temperatura haciendo un divisor de tensión mediante un puente de Wheatstone para después adaptarla a la entrada del microcontrolador con un amplificador diferencial tal y como se muestra en la siguiente imagen.

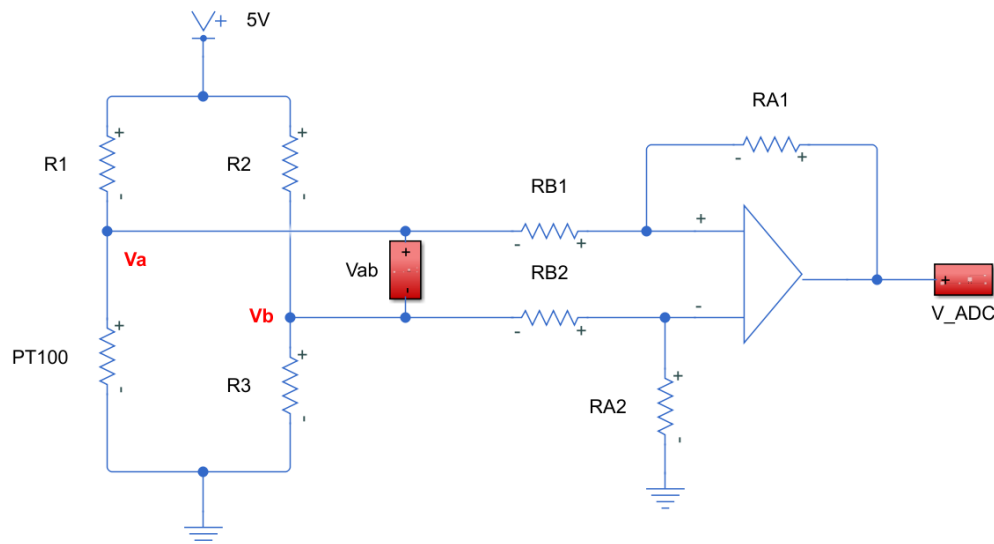


Figura 10 Circuito del PT100

Las resistencias R_1 , R_2 y R_3 tienen un valor de 100Ω , mientras que $RA_1 = RA_2 = 51\text{ k}\Omega$ y $RB_1 = RB_2 = 6.8\text{ k}\Omega$. Con este valor de las resistencias R_2 Y R_3 se obtiene un V_B de 2.5 V dando lugar a la diferencia de tensión entre V_A y V_B que resultara ser $V_{AB} = V_A - V_B$. Esta diferencia de tensión se introducirá al amplificador diferencial que constará de una amplificación de 7.5 para que V_{AB} tenga un rango adecuado (0-3.3 V) para su entrada al microcontrolador.

El circuito completo se ha simulado en Matlab, y después se han hecho dos validaciones experimentales. La primera se ha llevado a cabo simulando el PT100 con un potenciómetro y la segunda cogiendo 10 tensiones en 10 temperaturas diferentes con el PT100 real. A continuación, se compara la simulación con las dos validaciones y los resultados son los siguientes:

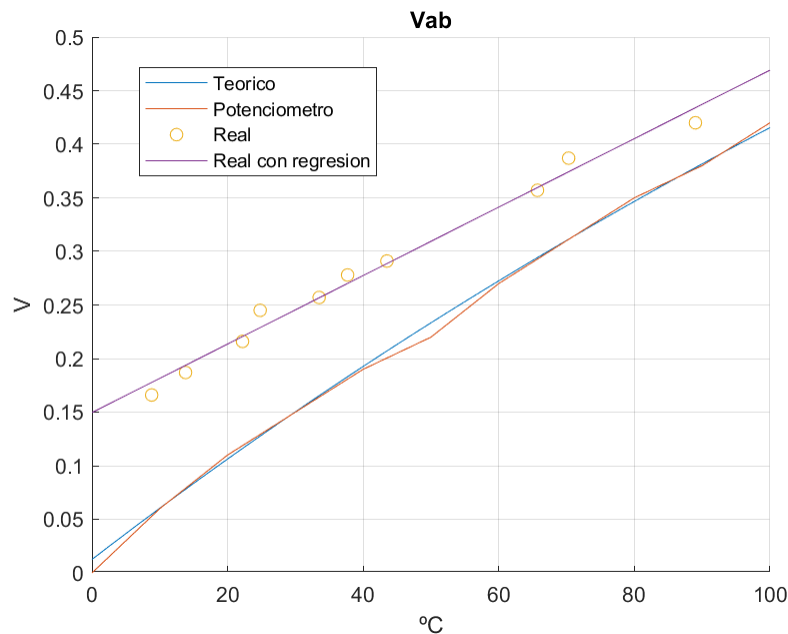


Figura 11 Gráfico de diferencia de tensión

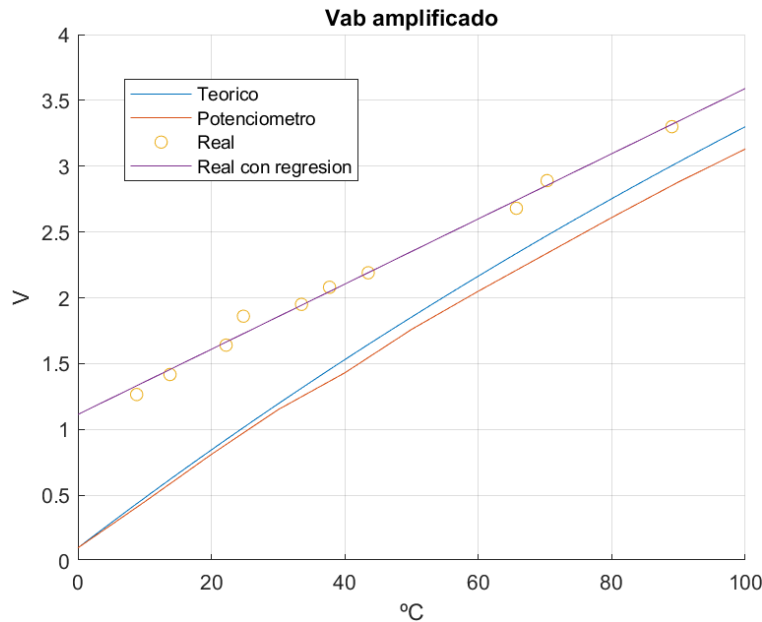


Figura 12 Gráfico de diferencia de tensión amplificada

Como podemos llegar a observar, el caso de la simulación del PT100 con el potenciómetro es muy similar al obtenido teóricamente. Sin embargo, el real, muestra un offset total muy elevado, exactamente de 1.113V. Esto es debido a la alta intensidad que hay en el puente de Wheatstone por la elección de unas resistencias R1, R2 y R3 relativamente bajas, dando lugar al fenómeno conocido como self-heating que afecta al PT. El self-heating que sufre el PT 100 hace que la resistencia de este se autocalienta dando valores más elevados de los que se esperan, traduciéndolo a temperaturas más elevadas de las que se somete el PT. Por otro lado, se encuentra el offset causado por el amplificador, pero este es mucho menor en comparación con el provocado por el self-heating.

5.2 Medición de temperatura del agua a la salida del colector

Medir la temperatura del agua a la salida del colector será importante para saber que diferencia hay entre la temperatura del tanque y esta última (ΔT). La temperatura se medirá con un termopar de tipo K que consiste en la unión de dos metales diferentes en un extremo, llamado la unión de medición o unión caliente, y se conecta a un circuito de medición en el otro extremo, conocido como la unión de referencia o unión fría.

La principal característica de un termopar es que genera una pequeña diferencia de voltaje, conocida como fuerza electromotriz (FEM), cuando se somete a una diferencia de temperatura entre la unión caliente y la unión fría. Esta FEM es proporcional a la diferencia de temperatura y puede ser medida y utilizada para determinar la temperatura del agua. Después, la señal del termopar será enviada al microprocesador mediante un protocolo de comunicación I2C.

Una vez obtenida la ΔT , esta se utilizará para compararla con ΔT_{ref} en el sistema de control que será un parámetro que se calcula previamente y será explicado más adelante en el apartado de control.

5.3 Medición de temperatura del colector

La temperatura de dentro del colector se medirá para que cuando llegue a los 40 °C el flujo de agua empiece a fluir por todo el sistema y que se caliente para su uso como ACS. Esta vez la temperatura se medirá con un NTC (Negative Temperature Coefficient) que es un dispositivo que muestra una resistencia eléctrica que disminuye a medida que aumenta la temperatura. Es decir, su resistencia disminuye de manera inversamente proporcional al aumento de temperatura. La resistencia del NTC se calcula con la ecuación (19) , siendo $R_0 = 10000$, $B = 3428$ $T = temperatura [K]$ y $T_0 = 298$. El circuito creado es una tensión divisoria con $R = 10\text{ k}\Omega$ y alimentado a +3.3 V.

(19)

$$R_{NTC} = R_0 e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$$

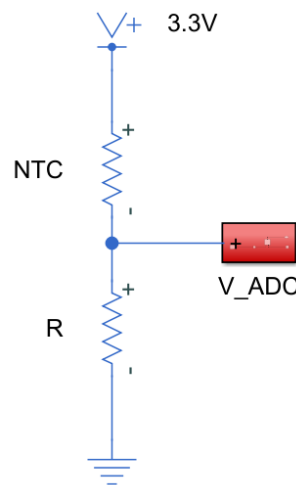


Figura 13 Circuito del NTC

El voltaje que salga del divisor de tensión será proporcionalmente inverso al cambio de temperatura como ya se ha mencionado antes, y tendrá la siguiente forma.

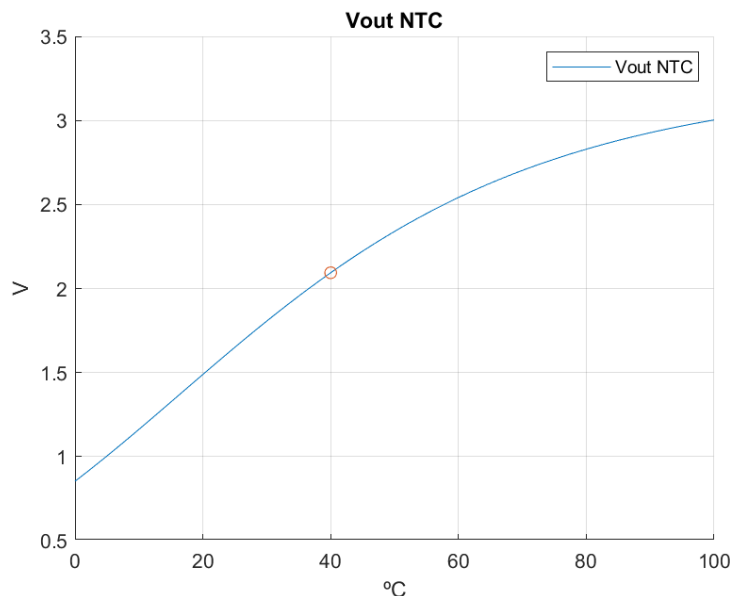


Figura 14 Voltaje de salida del NTC

La tensión irá directamente al microcontrolador y cuando esta llegue a 2.1 V el sistema de control de la bomba de agua empezará a funcionar y el agua a fluir por todo el circuito.

5.4 Medición de luz solar

Uno de los subobjetivos de este proyecto consta en controlar el seguidor solar para que la radiación incida en el colector perpendicularmente para obtener mayor energía solar. Para ello, se han implementado dos sensores LDR (Resistencia Dependiente de la Luz) con el fin de optimizar el rendimiento del panel termosolar a través de la captación de la irradiación solar.

Los sensores LDR son dispositivos electrónicos que varían su resistencia eléctrica en función de la intensidad de luz que reciben, permitiendo así medir los niveles de irradiación solar.

Se han ubicado los sensores estratégicamente en el panel termosolar, asegurándonos de que estén expuestos a la luz solar directa. Cada uno de ellos registra la intensidad de la luz en su ubicación particular y transmite esta información a un ADC que permite convertir un valor digital en un valor binario para que pueda trabajar el microprocesador. En este micro, se ha desarrollado un código para calcular la posición óptima del panel termosolar en tiempo real y este programa toma en cuenta la información de ambos sensores y ajusta la orientación del panel para obtener el mayor rendimiento posible en términos de captación de irradiación solar.

La implementación de este sistema de control automatizado permite que el panel termosolar se ajuste continuamente a lo largo del día, siguiendo la trayectoria del sol y

optimizando su exposición a los rayos solares en todo momento. Esto resulta un aumento significativo en la eficiencia del panel termosolar y, por lo tanto, en la cantidad de energía térmica generada.

El circuito electrónico implementado para los sensores LDR es el siguiente:

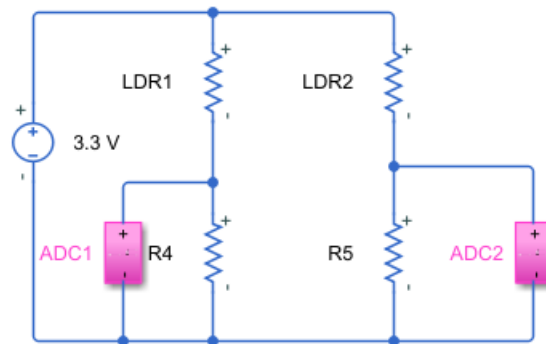


Figura 15 Circuito de los LDR

Donde, R_4 y R_5 son dos resistencias de $10\text{ k}\Omega$ y las caídas de tensión que se generan en R_4 y R_5 son las tensiones que van a recibir los dos ADC. Por lo tanto, dependiendo la tensión que reciba cada ADC, el panel se ajustara a una u otra posición, es decir, se ajustara a la trayectoria del sol.

6 Diseño del sistema de control y microcontrolador

Con la intención de llevar el control del sistema de bombeo de agua y la orientación del colector para que incida más luz solar sobre él, se ha utilizado el modelo que aparece en la Figura 16 para el primero y el de la Figura 17 para el segundo. Por otra parte, se ha empleado un microprocesador para llevar a cabo el control y leer las temperaturas del agua en el tanque (T_{tanque}) y a la salida del colector solar (T_{out}), la del interior del colector (T_{placa}) y también medir la luz solar. Aparte de la medición de temperaturas y luz solar, se ha creado una señal PWM (pulse width modulation) a la salida del micro para el sistema DC chopper y tres salidas digitales para la activación de los relés para el brazo mecánico que moverá la placa para orientarla hacia el sol.

6.1 Control

Por un lado, el control del sistema de bombeo que se ha implementado sirve para regular el caudal del bombeo de agua según la diferencia entre ΔT y ΔT_{ref} siendo $\Delta T = T_{out} - T_{tanque}$ y $\Delta T_{ref} = 10$ que su cálculo se explicará más adelante en este mismo apartado. La bomba de agua bombeará más o menos según el duty cycle (δ) que se le aplique al PWM y por consiguiente al sistema DC chopper al que ira integrada la bomba. Es decir, cuanto más δ más rápido o más caudal se bombeará, y cuantos menos δ lo contrario.

Se han diseñado dos tipos de control, el primero ha sido un control proporcional (P) mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, siendo este el más simple porque se ajusta un único parámetro ($K_p = -10$) y el valor controlado no oscila y convergencia a un valor. El segundo, ha sido un control proporcional integral (PI) mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que suprime el error estático producido en el control P y se le suma un parámetro nuevo ($K_i = 0.045$).

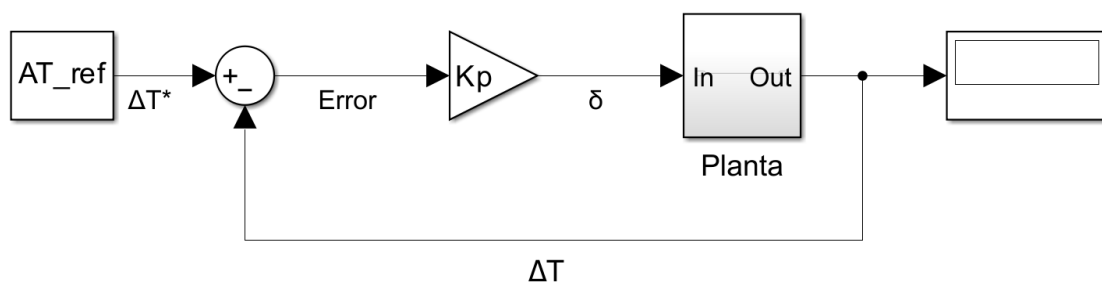


Figura 16 Control P

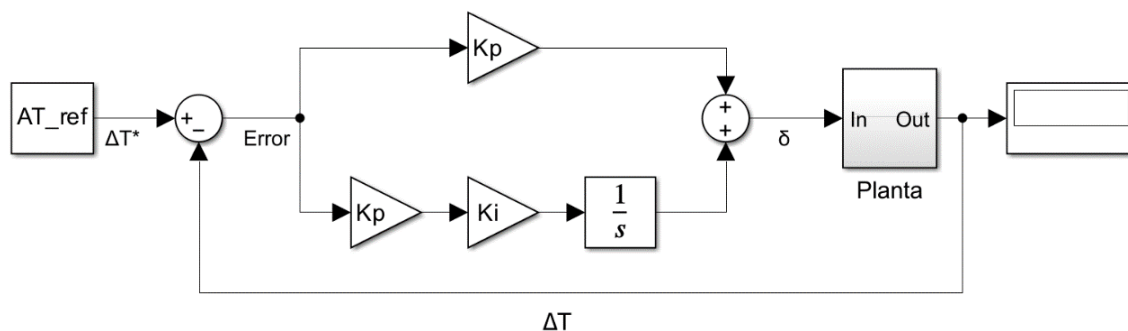


Figura 17 Control PI

Como previamente se ha comentado, se ha calculado un valor ΔT_{ref} óptimo para la comparación de este con ΔT en el sistema de control de la bomba de agua. Lo que se muestra en la Figura 18 es una simulación del colector solar térmico entero y sus mediciones.

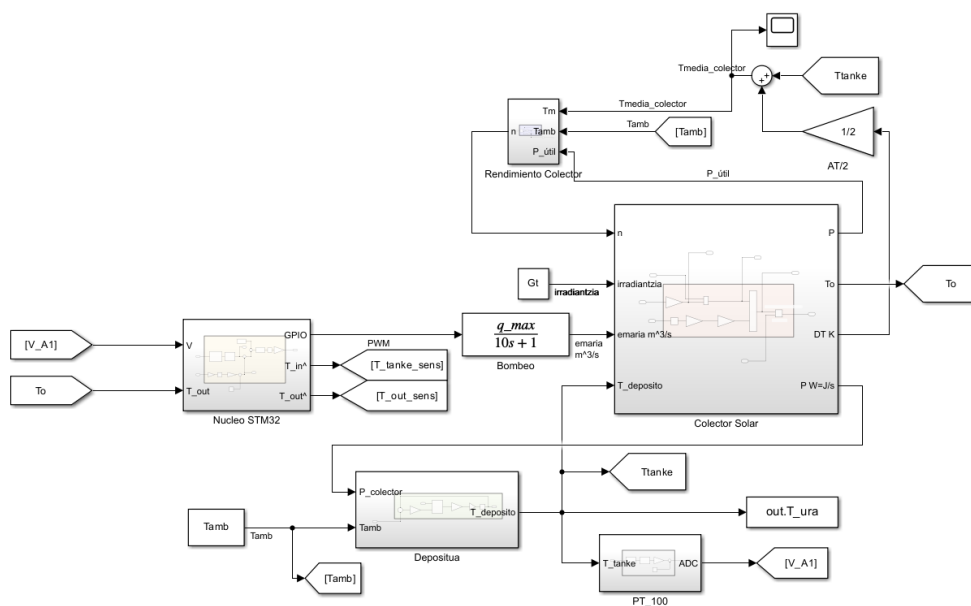


Figura 18 Simulación del colector solar térmico entero y sus mediciones

Con ella se ha calculado que cuanto más irradiancia y un ΔT_{ref} más bajo, la temperatura a la que llega el agua del tanque llegaría a ser más alta. Para poder hacer este cálculo se ha tenido que utilizar una simulación del sistema de control de donde se sacan los valores de las temperaturas del tanque y de la salida de agua.

Se ha calculado que el agua del tanque puede llegar hasta los 60°C con un ΔT de 10°C y una irradiancia de 800 W/m². Por lo tanto, el ΔT_{ref} va a ser de 10°C se va a comparar con el ΔT que haya en cada momento a través de una simulación del sistema de control. En el gráfico de la siguiente figura se puede observar la evolución de la temperatura del tanque en función del tiempo, utilizando diferentes ΔT .

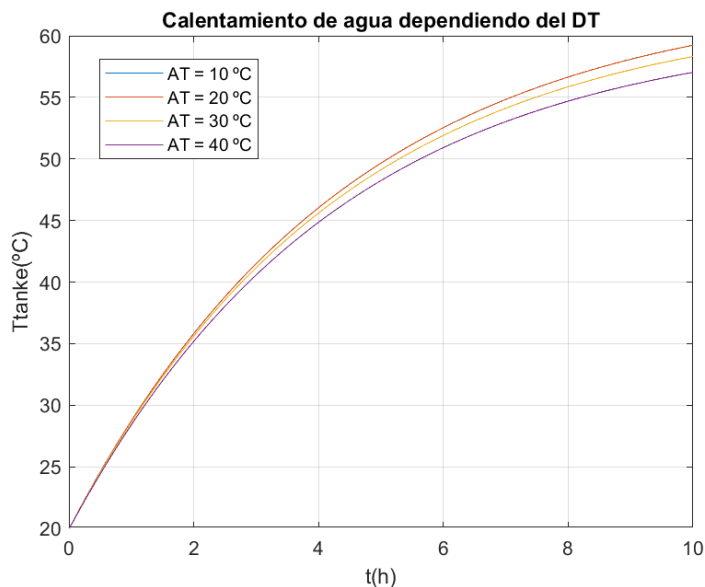


Figura 19 Calentamiento del agua según ΔT_{ref}

Por otro lado, se ha añadido un control para que el colector se oriente al sol y le pegue los rayos de luz de una manera equitativa por toda la superficie de la placa, y así obtener más irradiancia. Para ello, se han instalado 2 sensores de luz LDR en el extremo superior de la placa en línea con el eje que soporte a esta. Estos deberán estar separados por un cartón para que haga sombra en un sensor y así poder aplicar el control y que el colector se mueva orientándose al sol.

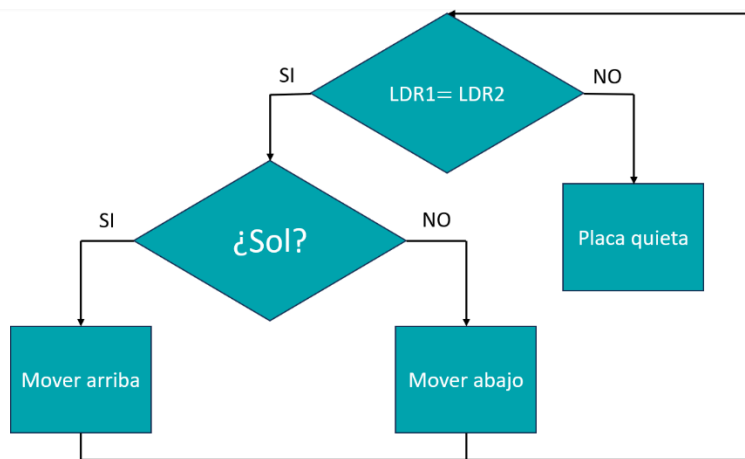


Figura 20 Control orientación solar

El colector se moverá con un brazo mecánico que será accionado por un mecanismo bipolar accionado por tres relés. Para ello, se utilizará una fuente de alimentación de 0V-12V.

Como ya se ha mencionado antes, el microprocesador recibirá las señales de los sensores LDR y las procesará para determinar la orientación óptima de la placa solar. La programación del microprocesador tomará en cuenta las diferencias de intensidad detectadas por los sensores y calculará la dirección hacia la cual se debe orientar la placa para maximizar la captación de la radiación solar.

Una vez que el microprocesador haya procesado las señales de los sensores LDR, enviará una señal de control a tres relés del circuito. El microprocesador activará o desactivará los relés según la orientación deseada para la placa solar.

El funcionamiento del circuito de relés se puede encontrar en "relés_circuito.slx".

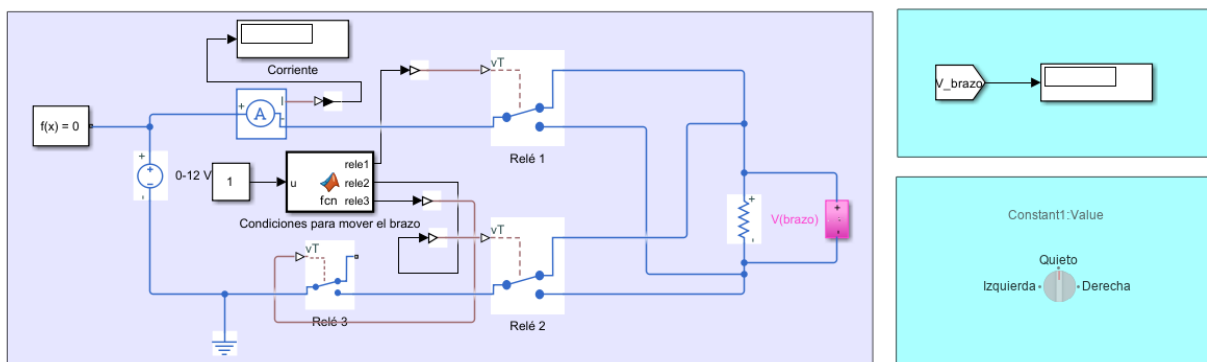


Figura 21 Circuito del sistema de relés

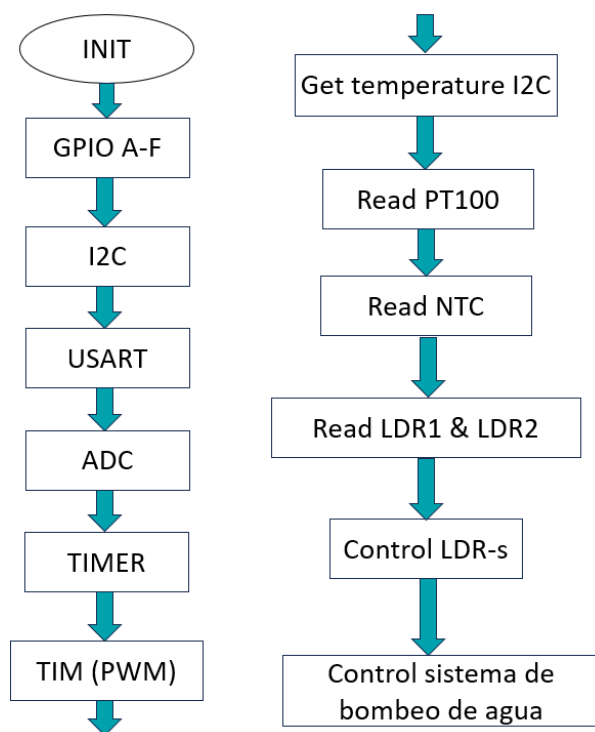
6.2 Microcontrolador

Todo el control y la medición de temperaturas no tendría sentido sin un microcontrolador que es el que lee las temperaturas y ejecuta el control. El microcontrolador que se ha utilizado es un STM32F446ZE. Un microcontrolador incluye un microprocesador, memoria y varios periféricos, y los periféricos que se usan son los siguientes con sus respectivos pines:

- ADC (Analog to Digital Converter): Es un componente electrónico utilizado para convertir señales analógicas en señales digitales y permite que el microprocesador pueda leer y procesar señales analógicas provenientes de los sensores de temperatura y luz solar.
 - PT100→ PA3
 - NTC→ PC0
 - LDR1→ PC3
 - LDR2→ PC2
- I2C (Inter Integrated Circuit): Es un protocolo de comunicación serie síncrono que permite la comunicación entre diferentes componentes electrónicos (microcontrolador y termopar). El bus I2C utiliza dos líneas de comunicación: una línea de datos (SDA) y una línea de reloj (SCL). Estas líneas están conectadas a todos los dispositivos I2C en el bus, y cada dispositivo tiene una dirección única que se utiliza para identificarlo durante la comunicación.
 - SDA→PF0
 - SCL→PF1
- USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter): Es un tipo de periférico de comunicación utilizado transmitir y recibir datos de manera síncrona o asíncrona. Se usa el USART3.
- GPIO (General Purpose Input/Output): Es un que permite la comunicación con dispositivos y componentes externos. Los pines GPIO se pueden configurar como entradas o salidas digitales para recibir o enviar señales eléctricas, respectivamente. Se usan todos los GPIO del A al F.
- TIMER: Son circuitos electrónicos digitales y secuenciales. Es decir que funcionan en flancos de una señal de reloj que oscila a una frecuencia determinada. Su función principal es la de contar eventos. Se usa el TIM6.
- TIMER (PWM): Es un timer especial porque se puede configurar como señal PWM con un duty cycle específico que puede variar. Se usa el TIM1.

[4]

En cuanto al código que se ha programado, se podrá encontrar en los anexos a esta documentación. Sin embargo, para hacerse una idea de lo que hace el programa se ha hecho el siguiente diagrama de flujo.



7 Diseño de componentes eléctricos

7.1 Topología de circuito

Con el fin de usar el duty proveniente del microprocesador para controlar el caudal de la bomba, se implementará un DC Chopper. El DC Chopper es un convertidor DC-DC que convierte una determinada tensión continua en otra tensión continua con bajo rizado. Para el diseño del circuito se ha optado por un low-side DC Chopper, principalmente por su simplicidad en el montaje. Este circuito low-side DC Chopper consiste en conectar el MOSFET en la parte baja del circuito mientras que la carga irá encima de este. La composición del circuito es tal y como se muestra en la Figura 22. La principal ventaja de realizar el circuito de esta manera es que el MOSFET se podrá alimentar de una manera más sencilla ya que no requerirá fuente aislada y, por ende, necesitará menos componentes. Además, dado que la conmutación se realizará en el lado de baja tensión de la carga, las pérdidas de conmutación serán menores y la eficiencia mayor.

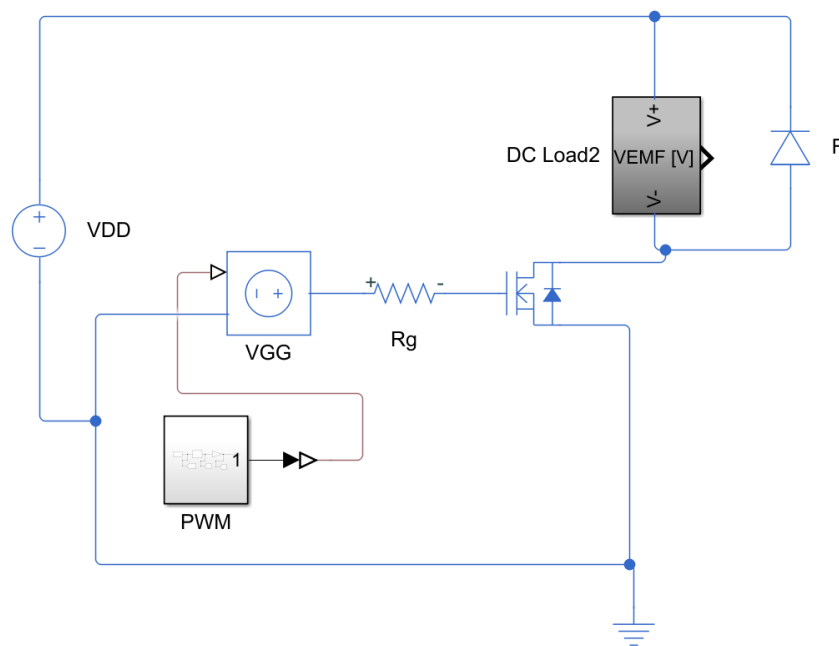


Figura 22 Circuito del DC Chopper

Dado que se menciona que la bomba solo trabajará para bombear agua y no generará energía, podemos considerar un DC Chopper de un cuadrante, ya que el agua solo irá en una dirección. Para que pueda realizar esta función, trabajará en el primer cuadrante, Figura 23. De este modo, el DC Chopper enviará una tensión e intensidad positivas a la carga, para que esta trabaje como motor girando en la dirección opuesta a las agujas del reloj. Teniendo en cuenta las características ofrecidas en la Tabla 7, se ha realizado una toma de decisiones sobre las principales características del DC Chopper. [5]

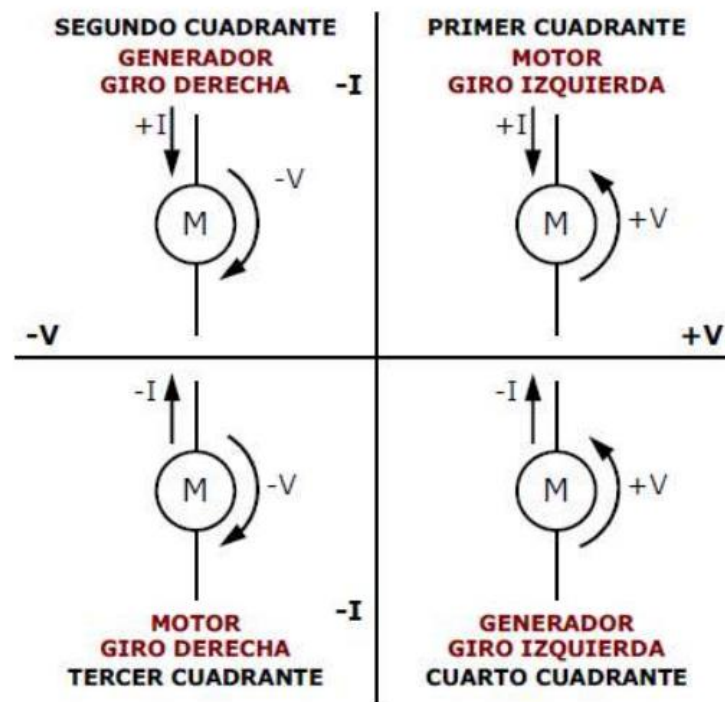


Figura 23 Cuadrantes del DC Chopper

Tabla 7 Características de bomba de agua y fuente de alimentación de 24V

Singflo DP-160B	LRS-100-24
$V = 0 \dots 24 \text{ V}_{DC}$	$V_{DD} = 24 \text{ V}$
$I = 0 \dots 4.2 \text{ A}$	$I = 0 \dots 4.5 \text{ A}$
$P = 100 \text{ W}$	$P = 108 \text{ W}$
$L_a = 2.4 \text{ mH}$	
$R_a = 0.59 \Omega$	
$V_{EMF} \approx 0.90 \cdot V_{ave}$	

7.2 Características del MOSFET

Para la elección de MOSFET se han sido ofrecidos 4 diferentes MOSFETs: **NPX PSMN034**, **VISHAY IRL530**, **IPP180N10N3GXX3SA** y **STP24NF10**. Además de esto, habiendo utilizado la empresa distribuidora de componentes eléctricos RS, se ha elegido un nuevo MOSFET **TK72E12N1** de la marca TOSHIBA.

En primer lugar, se encuentran las pérdidas por conducción, las cuales se calculan mediante la fórmula (20). Asimismo, se encuentran las pérdidas que produce el MOSFET en estado de conmutación, calculadas mediante las fórmulas (21) (22) y (23). Para el cálculo de estas se ha elegido un diodo al azar y utilizado el mismo para todos los MOSFETs.

7.2.1 Pérdidas de conducción en MOSFET

$$P_{D,cond,ave} = R_{DS(ON)} I_{D,rms}^2 \quad (20)$$

7.2.2 Pérdidas de conmutación en MOSFET

$$P_{D,on,ideal,ave} = V_{DD} I_{D,on} \frac{t_{on}}{2} f_{sw} \quad (21)$$

$$P_{D,on,rr,ave} = Q_{F,rr} V_{DD} f_{sw} \quad (22)$$

$$P_{D,off,ave} = V_{DD} I_{D,off} \frac{t_{off}}{2} f_{sw} \quad (23)$$

7.2.3 Pérdidas totales del MOSFET

$$P_{D,total,ave} = P_{D,on,ideal,ave} + P_{D,off,ave} + P_{D,on,rr,ave} + P_{D,cond,ave} \quad (24)$$

Finalmente, mediante la ecuación (24) se han calculado las pérdidas totales. Tras obtener los resultados se han evaluado mediante un script de Matlab y graficado tal y como muestra la Figura 24. Para este gráfico se han hecho cálculos en función a un duty variable. La frecuencia de conmutación elegida es de 10kHz, la cual se fijará en el NUCLEO F446ZE. Para la elección de esta frecuencia se ha intentado buscar el equilibrio teniendo en cuenta que una frecuencia de conmutación alta supone más pérdidas, pero una frecuencia baja supone mayor corriente de rizado, siendo esto inconveniente para el motor. Dada esta comparación, el MOSFET elegido para la utilización es el **TK72E12N**. Para un análisis más específico revisar el 'T5 S4 Elección de semiconductores.pdf' en los anexos.

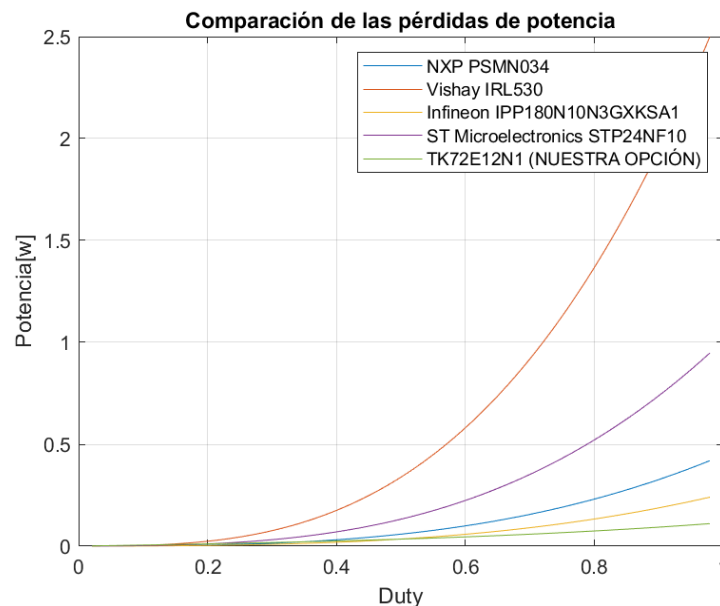


Figura 24 Pérdidas totales de todos los MOSFETs en función del duty

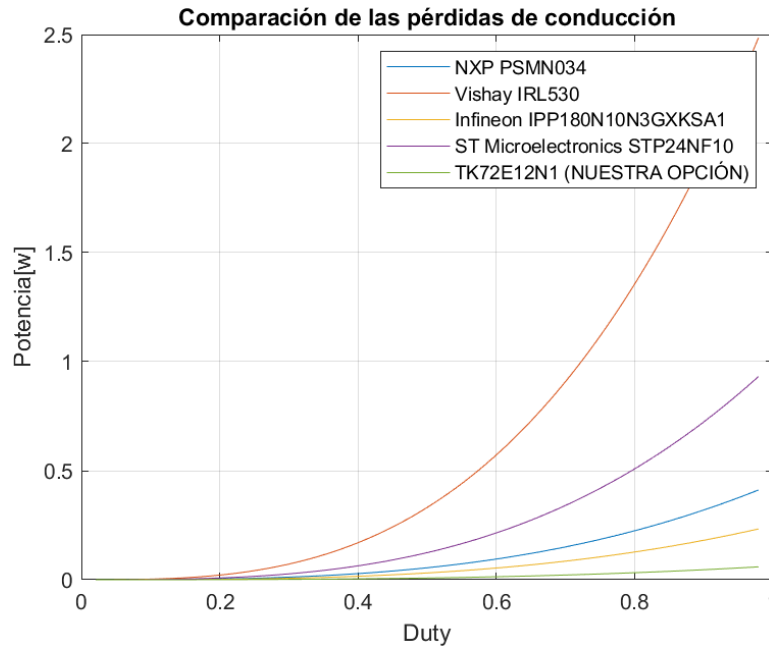


Figura 25 Pérdidas de conducción

7.3 Características del diodo

Para la elección de diodo se nos han sido ofrecidos 4 diferentes diodos: **SR5100**, **SF63G**, y **6A10G**. Además de esto, habiendo utilizado la empresa distribuidora de componentes eléctricos RS, se ha elegido un nuevo diodo **P600D**. Haciendo una búsqueda en las fichas de datos de cada opción, se ha realizado el cálculo de las pérdidas. Por un lado, se encuentran las pérdidas de conmutación, las cuales han sido calculadas mediante la ecuación (25). También están las de conducción, calculadas con la ecuación (26). Finalmente, se ha hecho el cálculo de las pérdidas totales del diodo con la ecuación (27).

7.3.1 Pérdidas de conmutación en diodo

$$P_{F,off,ave} = V_{DD} Q_{F,rr} \frac{1}{4} f_{sw} \quad (25)$$

7.3.2 Pérdidas de conducción en diodo

$$P_{F,cond,ave} = V_{F,th} \bar{I}_F \frac{t_{off}}{2} + R_F I_{F,rms}^2 \quad (26)$$

7.3.3 Pérdidas totales del diodo

$$P_{F,total,ave} = P_{F,off,ave} + P_{F,cond,ave} \quad (27)$$

Tras obtener todos los resultados, se han graficado los mismos mediante un script de Matlab. El cálculo se ha hecho de la misma manera que en el MOSFET, utilizando un duty variable. Tal y como muestra la Figura 26 es el diodo P600D el que menos potencia va a consumir. Por este mismo motivo, este ha sido el diodo elegido para el proceso. Para un análisis más específico revisar el anexo

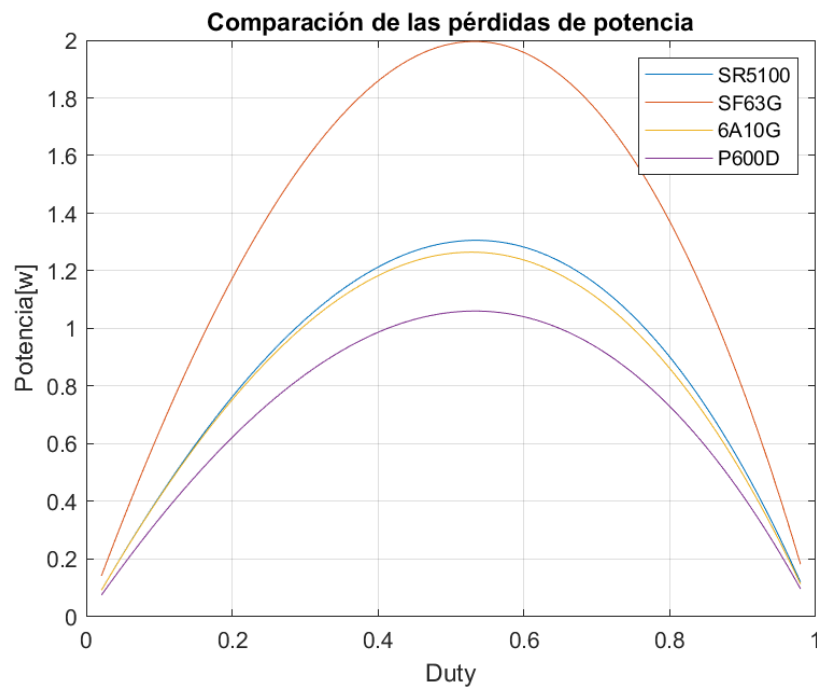


Figura 26 Pérdidas de potencia en diodos

7.4 Eficiencias del circuito

Tras realizar la elección de los semiconductores, se han calculado las potencias y las eficiencias del circuito, concluyendo en la Figura 27. En el gráfico, se puede apreciar cómo el incremento de la eficiencia a medida que aumenta el duty, con la excepción de la eficiencia de la carga. Por ello, el circuito va a tener un mejor funcionamiento trabajando con duty alto.

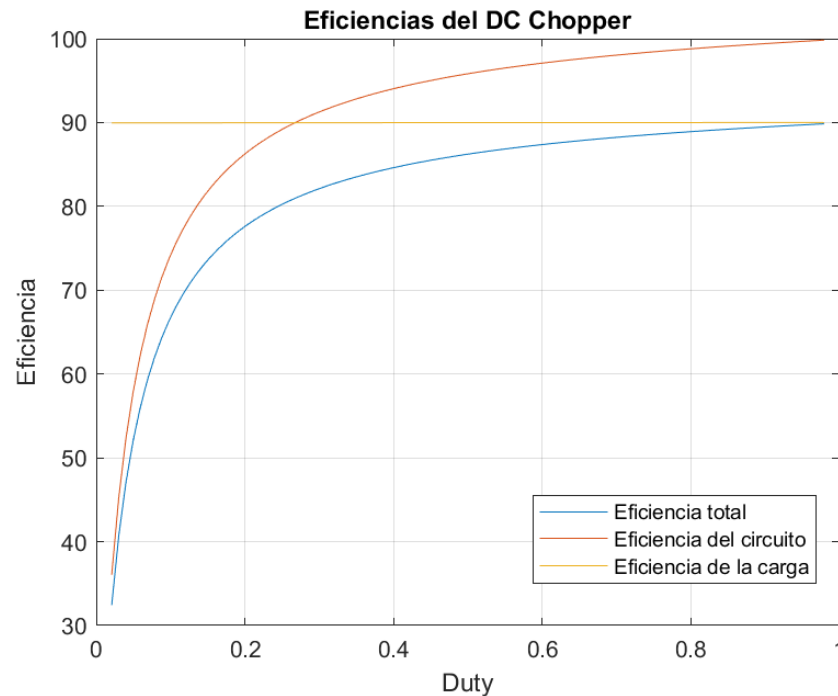


Figura 27 Eficiencias del circuito

7.5 Conmutación mediante señal PWM

Como se ha comentado en el apartado 6, para la conmutación del DC Chopper se utilizará una señal PWM proveniente del NUCLEO- F446ZE. Esta señal está ajustada en un voltaje de 5V, una frecuencia de 10kHz y un duty que variará según el sistema de control. Para que la conmutación del MOSFET se lleve a cabo, se ha implementado un controlador TC4427CPA. A este se le conectará la señal PWM y V_{GG} , este último es el voltaje del MOSFET y está fijado en 15V_{DC}. El controlador comparará estas dos tensiones y acondicionará la tensión para que el MOSFET conmute en función del duty que reciba.

7.6 Implementación de DC Chopper

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de bombeo se ha analizado el circuito entero con un duty de 60 %. Para esto se ha conectado la señal PWM proveniente del microprocesador al DC Chopper por la entrada (gate) del MOSFET además de medir las tensiones e intensidades necesarias.

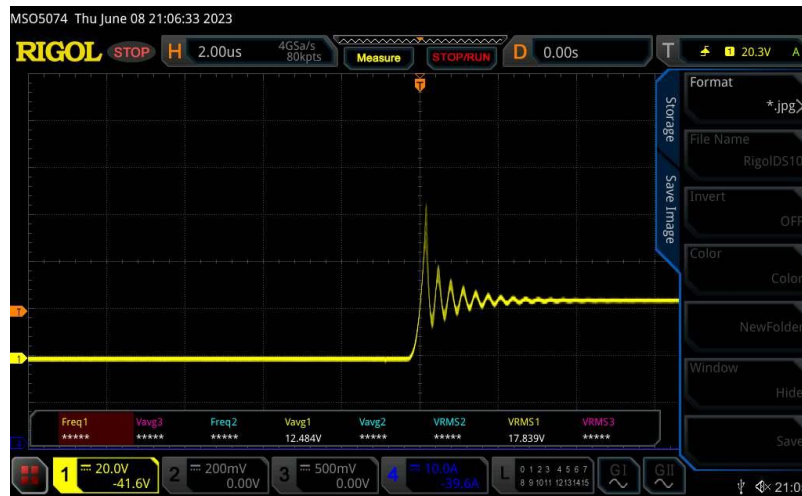


Figura 28 Tensión entre drenador y fuente sumidero del MOSFET

En primera estancia, tal y como se muestra en la Figura 28, se ha analizado la tensión de pico que soportará el MOSFET para justificar el no uso de snubber. Como el MOSFET aguanta un voltaje de 120 V y cae una tensión de aproximadamente 60 V de pico, hay un margen considerable.



Figura 29 Voltaje y corriente de carga

Se ha obtenido también la Figura 29, la cual muestra la corriente y tensión que llegará a la carga. Como se ha mencionado previamente el duty es de 60%, mostrándose en la figura que el T_{ON} predomina sobre el T_{OFF} . Durante el T_{ON} , la carga recibirá 24 V y una intensidad que irá desde $I_{L,min}$ e $I_{L,max}$. Durante el T_{OFF} en cambio, la tensión que recibirá la carga será prácticamente 0 V (el diodo consumirá una pequeña tensión).

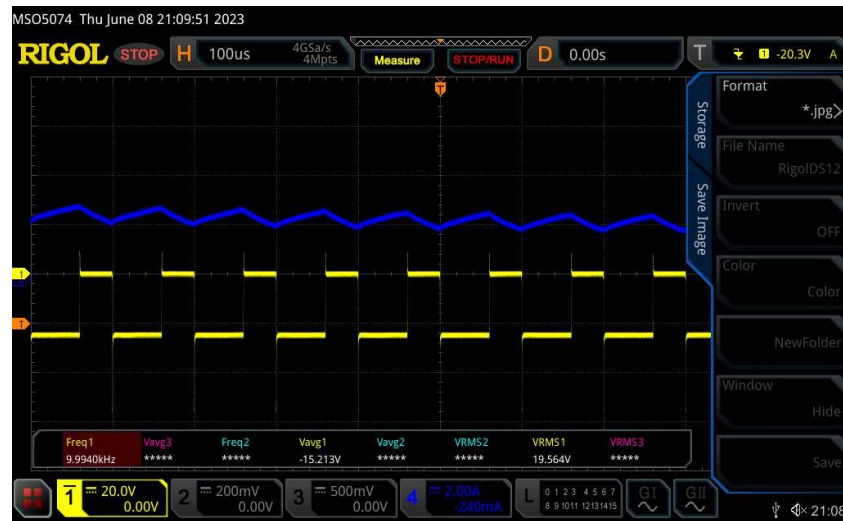


Figura 30 Voltaje y corriente de diodo

Finalmente, se ha medido también la corriente y tensión del diodo, mostrándose en la Figura. Como se ha mostrado antes, el diodo está conectado en paralelo a la carga, teniendo la tensión de la carga en negativo en T_{ON} y 0 V en T_{OFF} .

8 Semiconductores NPN y PNP

Los circuitos utilizados en este sistema se basan en dispositivos semiconductores como los transistores. Estos semiconductores actúan como amplificadores o interruptores y constan de tres terminales o cables que desempeñan funciones específicas:

- Emisor (E): es por donde ingresa el flujo eléctrico al interior del encapsulado del transistor.
- Base (B): modula el flujo entre el emisor y el colector.
- Colector (C): es hacia donde fluye la corriente una vez que ha sido modulada por la base. En cuanto a su estructura, estos semiconductores son extrínsecos, lo que significa que están formados por cristales de materiales semiconductores (como el silicio) que están dopados con elementos de grupos adyacentes (IIIA y VA) para obtener materiales más conductores. Como resultado, se distinguen dos tipos de capas: tipo N y tipo P.

En el caso de la capa tipo N, el material se dopa con elementos del grupo VA, como el fósforo, que tiene un electrón adicional. Cuatro de los electrones del fósforo se enlazan con los electrones del silicio y un electrón queda débilmente enlazado (en un estado donante). Por lo tanto, con un poco de energía, ese electrón de cada átomo dopado se libera (la energía térmica a temperatura ambiente es suficiente para permitir el salto a la banda de conducción). De esta manera, el semiconductor puede conducir electricidad.

En cambio, en las capas tipo P, el material se dopa con elementos del grupo IIIA, como el boro, que tiene un electrón menos. En este caso, los tres electrones del boro se enlazan con los del silicio y, al faltar una carga negativa, se forma un hueco (una carga positiva). De manera similar al caso anterior, con un poco de energía, un electrón vecino puede saltar y ocupar ese hueco (quedando en un estado aceptador). Así, se genera un movimiento del hueco (movimiento de electrones en la banda de valencia), creando un material conductor.

En resumen, se utilizan dos tipos de materiales en los semiconductores: la capa tipo N, que contiene un electrón adicional, y la capa tipo P, que tiene un hueco o carga positiva adicional. Estos materiales se combinan para crear diferentes tipos de semiconductores, como los diodos y los transistores. Al unir una capa tipo N con una capa tipo P, se forma una zona de agotamiento en el centro, donde los electrones y los huecos se recombinan, creando una diferencia de tensión. Sin embargo, para que haya conducción de corriente, se requiere una fuente externa. Dependiendo de cómo se conecte esta fuente, el diodo puede estar en polarización directa (conducción) o en polarización inversa (no conducción). En la polarización directa, el polo positivo se conecta a la capa tipo P, lo que provoca que los electrones y los huecos se muevan hacia la unión y se genere una corriente. En la polarización inversa, al conectar el polo

positivo a la capa tipo N, se dificulta el flujo de electrones, lo que resulta en una corriente de fuga mínima. Los transistores, por su parte, están compuestos por dos diodos conectados en configuración directa e inversa, utilizando ambos tipos de capas. Para su funcionamiento correcto, se requieren dos fuentes externas, lo que da lugar a dos circuitos: el circuito de control (base y emisor) y el circuito de potencia (colector y emisor). Cuando no hay corriente en el circuito de control, se dice que el transistor está sin polarizar. Sin embargo, cuando fluye corriente a través de la base, el transistor se polariza y se amplifica la corriente en el circuito de potencia, lo que permite la amplificación de señales. Dependiendo de la combinación de las capas, los transistores pueden ser de tipo NPN o PNP.

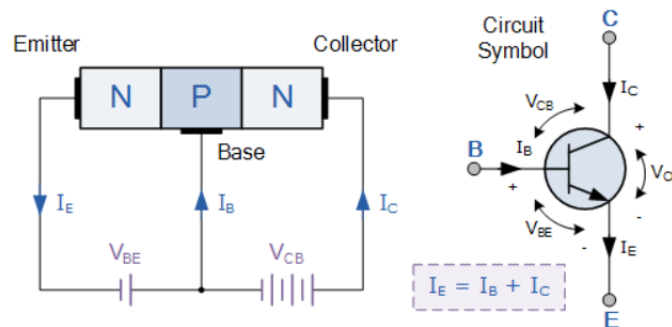


Figura 31 Transistor NPN

Los transistores NPN están compuestos por tres capas de materiales semiconductores: N (emisor), P (base) y N (colector). Al conectar los terminales negativos de las fuentes a los dos extremos del emisor y el terminal positivo de la segunda fuente a la base, la combinación de las capas del emisor y la base se comporta como un diodo en polarización directa. Esto significa que los electrones y los huecos son atraídos hacia la unión, lo que reduce la región de agotamiento. Como resultado, algunas de estas partículas se recombinan y fluyen a través de la capa P hacia la segunda fuente externa. Sin embargo, la capa P está diseñada para ser más estrecha y menos dopada que las capas N, lo que significa que la mayoría de los electrones no tiene huecos disponibles para recombinarse y se quedan en la capa P.

Por otro lado, el terminal positivo de la fuente principal está conectado al colector, lo que hace que la segunda mitad del transistor funcione como un diodo en polarización inversa. En esta configuración, los huecos y los electrones son atraídos hacia sus respectivos polos, pero en este caso, los electrones restantes de la capa P también son atraídos hacia el terminal positivo. Como resultado, los electrones cruzan la capa N y

fluyen hacia el terminal positivo de la fuente, generando una corriente. En resumen, la corriente que fluye a través del emisor es la suma de las corrientes de la base y el colector.

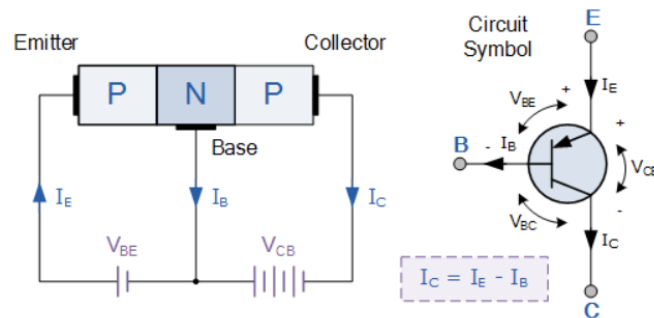


Figura 32 Transistor PNP

El transistor PNP está constituido por tres capas de materiales semiconductores: P (emisor), N (base) y P (colector). A diferencia del transistor NPN, en el transistor PNP se requiere una polarización inversa en las fuentes externas. El funcionamiento es similar al transistor NPN, con la diferencia de que en este caso la corriente se genera por el desplazamiento de huecos en lugar de electrones. Debido a esta diferencia, los transistores bipolares NPN tienden a ser más rápidos que los transistores PNP, ya que la movilidad de los electrones es mayor que la movilidad de los huecos en todos los materiales semiconductores. [6] [7]

9 Montaje del prototipo

Durante el proceso de montaje, se han realizado diversas tareas en cada componente del colector. Después de analizar las diferentes opciones disponibles, se han tomado las medidas y se han cortado los materiales correspondientes para comenzar con el ensamblaje. Una vez que todos los elementos han sido correctamente ajustados, se ha procedido con el montaje propiamente dicho.

En primer lugar, se han soldado los tubos de cobre utilizando estaño y se han sellado las juntas con silicona para evitar fugas de agua. A continuación, se ha construido la base que rodea el sistema de tuberías. Esta base está compuesta por una lámina de aluminio, una capa de aislante térmico y dos capas de madera, que aumentan el aislamiento y la rigidez del colector. Las capas de madera se han adherido entre sí utilizando cola blanca. Por otro lado, los laterales se han construido con madera y se ha aplicado silicona en todas las juntas para minimizar las pérdidas de calor.

Además, se ha fabricado un soporte que se encarga de sujetar y permitir el movimiento del colector. Este soporte consiste en una plancha de madera como base y dos tablones en los laterales que sostienen el colector en el aire. Además, se ha añadido otro tubo de cobre en la parte posterior del colector, que se une a los dos tablones sin interferir en su rotación adecuada y funciona como eje de giro.

Para completar la estructura del colector, se ha fijado un cristal protector en la parte frontal utilizando cola termofusible, y se ha aplicado silicona al igual que en los laterales, para reducir las pérdidas de calor.

Para permitir la rotación del colector, se ha instalado un brazo mecánico que está conectado en un extremo a la parte inferior del colector y en el otro extremo a la parte superior de la base de madera. Finalmente, se ha pintado todo el colector de color negro para aumentar la absorción de calor y para proteger mejor la madera contra las condiciones climáticas adversas, obteniendo así un colector totalmente ensamblado.



Figura 33 Montaje final e implementación

10 ODS

A lo largo de este proyecto hemos trabajado diferentes temas que tienen un impacto en el ecosistema, el cual puede ser tanto positivo como negativo. El impacto que producen es estudiado mediante los 17 objetivos de desarrollo sostenible. De entre todos estos, se han escogido 3, en los cuales el proyecto impactaría en caso de ser implementado.

Dado que el objetivo principal del proyecto es garantizar el suministro de agua caliente sanitaria, cumpliría con este objetivo, Figura 34. Este proyecto ofrece una nueva manera de acceder a agua limpia y sanitaria. En todo el mundo, una de cada tres personas no tiene acceso a agua potable salubre y dos de cada cinco personas no disponen de una instalación básica destinada a lavarse las manos con agua y jabón. [8]. Asimismo, innovar en este sector contribuiría con facilitar el acceso a agua sanitaria a un público más amplio.



Figura 34 Objetivo de desarrollo sostenible 6

El segundo objetivo (Figura 35) con impacto positivo está relacionado con la energía que se utiliza para el calentamiento de agua. Aunque el producto requiera conexión a la red, la principal energía utilizada calentar el agua es la energía solar. De esta manera, el proyecto promueve la eficiencia energética y renovable.



Figura 35 Objetivo de desarrollo sostenible 7

Finalmente, se ha concluido que el proyecto tiene un impacto negativo en el objetivo 15 de la agenda 2030, Figura 36. En un caso hipotético en el que se quisiera implementar el sistema en viviendas o en el sector industrial, sería necesario modificar e incluso destruir diversos ecosistemas terrestres. Tanto para obtener el acceso a red o para instalar el colector solar, es inevitable poner en peligro tanto a ecosistemas como a especies terrestres. Por esto mismo, en este aspecto el proyecto fomentaría la pérdida de diversidad y la degradación de las tierras.



Figura 36 Objetivo de desarrollo sostenible 15

11 Conclusiones y líneas futuras

Al terminar este proyecto después de 6 semanas y al analizar teórica y experimentalmente los resultados obtenidos, se han comparado los resultados con los objetivos establecidos al principio del proyecto. Se puede decir que se ha logrado construir un colector solar que funcione correctamente controlando el caudal y la radiación solar para la captación de energía solar, el cual era el objetivo principal.

En cuanto a los subobjetivos, se han realizado mediciones de temperatura con un margen de error máximo que no llegan al 15% (el error máximo ha sido de un 10%). Aun así, es importante tener en cuenta que el margen de error del 10% puede influir en la precisión general del sistema. En cuanto al diseño de los circuitos electrónicos se ha superado la eficiencia propuesta del sistema DC Chopper llegando al 90%. En cambio, no se ha podido llegar a la eficiencia del circuito térmico que habíamos propuesto, pero tampoco ha sido un resultado negativo ya que se ha logrado una eficiencia del 82%.

Por último, en cuanto a desarrollar un prototipo transportable de menos de 20 kg, tampoco se ha podido alcanzar este objetivo, pero se ha podido lograr un prototipo robusto y fácil de mover sin necesidad de un gran esfuerzo.

Además, tras terminar el proyecto, se han considerado tres aspectos a mejorar en una futura proyecto, los cuales se muestran a continuación.

- Aplicar mejores materiales para tener mejor resistencia ante situaciones climáticas adversas. En lugar de utilizar materiales convencionales, como el acero o el aluminio, se podrían emplear materiales más resistentes a condiciones climáticas extremas.
- Implementar otro eje para mejorar la orientación al sol. Esto permitiría un seguimiento más preciso del sol durante el día, lo que aumentaría la eficiencia de los sistemas solares y reduciría la dependencia de la red eléctrica convencional.
- Implementar circuitos impresos en vez de circuitos separados. En lugar de utilizar circuitos tradicionales con componentes electrónicos individuales, se podrían emplear circuitos impresos. Los circuitos impresos permiten integrar múltiples componentes en una sola placa, lo que reduce el espacio necesario y simplifica el circuito. Esto permitiría la fabricación de dispositivos más compactos y eficientes. Además, al reducir la cantidad de conexiones y cables, se minimizarían los problemas de interferencia electromagnética.

12 Bibliografía

- [1] E. J. H. O. Jair Ariel Cárdenas Martínez, «Diseño e implementación de un seguidor solar empleando un controlador PID con modo deslizante,» Universidad de La Salle, Bogotá, 2014.
- [2] [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad_t%C3%A9rmica.
- [3] M. González, 13 Julio 2011. [En línea]. Available: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-nusselt-definicion/>.
- [4] D. R. E-Marmolejo, «hetpro-store,» 2017. [En línea]. Available: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/microcontrolador/>.
- [5] D. D. Ortuño, «CONTROL DE VELOCIDAD EN CUATRO,» Orts Grau, Salvador, 2017.
- [6] A. Hernandez, «Taller electronica,» [En línea]. Available: <https://tallerelectronica.com/transistor-bjt/>.
- [7] «ElectronicsTutorials,» 2022. [En línea]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_2.html.
- [8] 15 octubre 2020. [En línea]. Available: <https://www.unicef.org/lac/press-releases/falta-instalaciones-para-lavarse-las-manos-con-jabon-expone-millones-de-personas>.