

**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA  
HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR UTILIZANDO UN SISTEMA DE  
CONTROL - PG-20-1-06**



**LEONARDO ANDREY ARIAS HERNANDEZ**

CÓDIGO: 1510718

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1016096319

**IVÁN MATEO BOHÓRQUEZ PÉREZ**

CÓDIGO: 1610910

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1015475970

**JESSICA DANIELA PAEZ JIMENEZ**

CÓDIGO: 1510321

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1023966745

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
BOGOTÁ, D.C.**

**2021**

**ESTUDIO TECNICO PARA LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA  
HIBRIDO EOLICO-SOLAR UTILIZANDO UN SISTEMA DE CONTROL**

**LEONARDO ANDREY ARIAS HERNANDEZ**

CÓDIGO: 1510718

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1016096319

**IVÁN MATEO BOHÓRQUEZ PÉREZ**

CÓDIGO: 1610910

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1015475970

**JESSICA DANIELA PAEZ JIMENEZ**

CÓDIGO: 1510321

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1023966745

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO  
MECATRÓNICO DE LA UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA**

DIRECTORA:

**M.Sc. CAROLINA SANDOVAL MEJÍA**

M.Sc en Planeación de Sistemas Energéticos

Ing. en Energía

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**BOGOTÁ, D.C.**

**2021**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

Una vez realizada la revisión metodológica y técnica del documento final de proyecto de grado, doy constancia de que el (los) estudiante (s) ha cumplido a cabalidad con los objetivos propuestos, cumple a cabalidad con los Lineamientos de Opción de Grado vigentes del programa de Ingeniería Mecatrónica y con las leyes de derechos de autor de la República de Colombia, por tanto, se encuentra(n) preparado(s) para la defensa del mismo ante un jurado evaluador que considere idóneo el Comité de Investigaciones del Programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Piloto de Colombia.



---

Ing. M. Sc. Carolina Sandoval Mejía  
Director del Proyecto

## DEDICATORIA

---

*A mis padres Boris y Clara quienes con su apoyo me han motivado llegar donde estoy mediante sus consejos. A mi hermano Mateo por su cariño y respeto ya que me incentiva cada día ser un mejor ejemplo para él. A mis abuelitos y tíos quienes con su amor incondicional junto a sus oraciones me han dado fortaleza para afrontar y superar las adversidades.*

*Un inmenso agradecimiento a mi novio Mateo y mi amigo Leonardo ya que sin su paciencia y dedicación esto no hubiera sido posible, de igual manera, a la Ingeniera Carolina por haber compartido sus experiencias y conocimientos, además de habernos orientado de la mejor manera en todo este proceso. Por último, agradecer a todas las personas que nos brindaron su cariño y alzaron su voz de aliento para la culminación de este proyecto, con mucho cariño: - Jessica Daniela Páez Jiménez.*

*Quiero dedicar este proyecto a mis padres Soley Pérez e Iván Bohórquez que con mucho esfuerzo me concedieron la oportunidad de convertirme en profesional.*

*Además, quiero agradecer a mi novia Jessica Páez y a mi amigo Leonardo Arias, por permitirme trabajar en este proyecto tan maravilloso a lo largo de este año. Por último, agradecerle a la Profesora e Ingeniera Carolina Sandoval que con su asesoramiento y enseñanzas pudimos culminar este trabajo: - Iván Mateo Bohórquez Pérez*

*De manera especial dedico esta tesis a mis padres, Janet Hernandez Linares y José Rogelio Arias Chávez, por creer incondicionalmente en mí, por siempre estar a mi lado y darme las herramientas para alcanzar mis metas, a mi Hermano Anderson Julián Arias Hernandez por siempre motivarme y apoyar mis proyectos, gracias a ellos me estoy convirtiendo en la persona que quiero llegar a ser.*

*Agradezco profundamente a mis amigos Jessica Páez y Mateo Bohórquez por su paciencia y comprensión, por permitirme compartir con ellos la experiencia de crecer profesionalmente y como persona, de igual manera agradezco a la Universidad Piloto de Colombia, a mis compañeros y profesores de la facultad de Ingeniería Mecatrónica, principalmente a la M.Sc. Carolina Sandoval Mejía, tutora de nuestra tesis, por creer en nuestro proyecto, por compartir sus conocimientos con nosotros y por el compromiso que tiene con su profesión: - Leonardo Andrey Arias Hernandez.*

## AGRADECIMIENTOS

---

*Queremos agradecer a nuestros familiares, maestros, compañeros y amigos, gracias a que ustedes han contribuido de alguna manera a formar las personas que somos hoy. Les agradecemos su apoyo, enseñanzas, actos de amor, compañerismo y colaboración que nos han brindado a lo largo de estos años. Este trabajo es la huella que marca nuestro final como estudiantes de pregrado, e inicia la huella que dejaremos como profesionales en el camino de la vida. No lo hubiéramos logrado sin ustedes.*

## TABLA DE CONTENIDO

---

	Pág.
<b>NOTA DE ACEPTACIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>4</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>5</b>
<b>LISTA DE ANEXOS</b> .....	<b>10</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>11</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>12</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>13</b>
<b>1. GENERALIDADES</b> .....	<b>14</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
1.1.1. Antecedentes del Problema.....	15
1.1.2. Descripción del problema .....	16
1.1.3. Formulación del problema .....	16
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	17
1.3. OBJETIVOS.....	18
1.3.1. Objetivo General.....	18
1.3.2. Objetivos específicos.....	18
1.4. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO .....	18
1.4.1. Alcances y Limitaciones .....	18
1.5. MARCO REFERENCIAL .....	19
1.5.1. Estado del arte.....	19
1.5.2. Marco normativo .....	22
1.6. MARCO METODOLÓGICO.....	24
<b>2. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA EDIFICIO APR</b> .....	<b>25</b>
2.1. EVALUACIÓN CONSUMO DEL EDIFICIO APR.....	25
2.2. LÍNEA BASE .....	28
<b>3. IDENTIFICACIÓN DE LA OFERTA ENERGÉTICA RENOVABLE (EÓLICO-SOLAR)</b> <b>29</b>	
3.1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	29
3.1.1. Fuente de energía (Radiación) .....	29
3.1.2. Tecnologías de recolección de energía solar: .....	30
3.2. EÓLICA.....	33
3.2.1. Fuente de energía (Vel. Del viento):.....	34
3.2.2. Tecnologías de recolección de energía eólica: .....	35

3.3. SISTEMA HÍBRIDO (EÓLICO - SOLAR) .....	41
<b>4. DISEÑO DEL SISTEMA HÍBRIDO .....</b>	<b>44</b>
4.1. SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA HÍBRIDO.....	44
4.1.1. Cálculos generales .....	44
4.1.2. Cálculos y selección del sistema fotovoltaico.....	44
4.1.3. Cálculos y selección del sistema eólico .....	50
4.1.4. Selección de Inversores .....	52
4.1.5. Selección de Baterías.....	54
4.2. CONTROLADORES .....	55
4.2.1. Definición .....	55
4.2.2. Controlador PI (Proporcional - Integral).....	55
4.2.3. Controlador PD (Proporcional - Derivativo) .....	55
4.2.4. Controlador PID (Proporcional – Integral - Derivativo).....	55
4.2.5. Controlador PR (Proporcional - Resonante).....	56
4.2.6. Controlador MPPT (Seguidor de punto de máxima potencia).....	56
4.2.7. Controlador ON / OFF .....	57
4.2.8. Ventajas y desventajas de los controladores .....	57
4.3. DISEÑO DEL CONTROLADOR.....	58
4.3.1. Introducción .....	58
4.3.2. Diseño del hardware .....	59
4.3.3. Diseño del software .....	64
4.4. SISTEMA HÍBRIDO EOLICO – SOLAR.....	65
4.4.1. Introducción .....	65
4.4.2. Distribución del sistema eólico - solar .....	65
<b>5. SIMULACIÓN Y RESULTADOS .....</b>	<b>67</b>
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO 1. CÓDIGO CONTROLADOR MPPT DEL SISTEMA EÓLICO .....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXO 2. CÓDIGO SIMULACIÓN DEL AEROGENERADOR .....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXO 3. CÓDIGO CONTROLADOR MPPT DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO .....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXO 4. ESQUEMA DISTRIBUCION DEL SISTEMA HÍBRIDO .....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO 5. CÓDIGO CONTROLADOR ON/OFF .....</b>	<b>88</b>

## TABLA DE TABLAS

---

<b>Tabla 1</b> Estado del arte .....	19
<b>Tabla 2</b> Consumo del edificio APR.....	25
<b>Tabla 3</b> Consumo del edificio APR por categorías .....	26
<b>Tabla 4</b> Consumo de la zona ENEL en el año 2018.....	27
<b>Tabla 5</b> Tipos de tecnologías para la recolección de energía solar .....	30
<b>Tabla 6</b> Tipos de tecnologías de aerogeneradores.....	36
<b>Tabla 7</b> Características de paneles fotovoltaicos elegidos .....	47
<b>Tabla 8</b> Características de aerogeneradores elegidos.....	50
<b>Tabla 9</b> Resumen de los cálculos obtenidos en los tres escenarios.....	53
<b>Tabla 10</b> Características de convertor DC/AC elegido .....	53
<b>Tabla 11</b> Resultados teóricos de potencia subsistema .....	53
<b>Tabla 12</b> Características de la Batería elegida.....	54
<b>Tabla 13</b> Ventajas y desventajas de los controladores.....	57
<b>Tabla 14</b> Cotización de dispositivos.....	74



## TABLA DE ILUSTRACIONES

---

<i><b>Ilustración 1</b></i> Gráfica del Informe de Oferta y Generación de Julio del 2016.....	16
<i><b>Ilustración 2</b></i> Gráfica de Balance energético de 2020 .....	17
<i><b>Ilustración 3</b></i> Gráfica marco metodológico.....	24
<i><b>Ilustración 4</b></i> Gráfica del consumo del edificio APR por categorías .....	27
<i><b>Ilustración 5</b></i> Gráfica Línea Base.....	28
<i><b>Ilustración 6</b></i> Gráfica promedio de radiación solar mensual.....	29
<i><b>Ilustración 7</b></i> Tipos de conexionado en paneles solares.....	31
<i><b>Ilustración 8</b></i> Estructura general sistema fotovoltaico.....	32
<i><b>Ilustración 9</b></i> Gráfica de la velocidad promedio del viento mensual .....	34
<i><b>Ilustración 10</b></i> Rosa de los vientos de Bogotá .....	35
<i><b>Ilustración 11</b></i> Estructura general de un aerogenerador .....	36
<i><b>Ilustración 12</b></i> Aerogenerador Darrieus .....	36
<i><b>Ilustración 13</b></i> Aerogenerador Savonius .....	37
<i><b>Ilustración 14</b></i> Aerogenerador Windside.....	37
<i><b>Ilustración 15</b></i> Aerogenerador Tripala.....	37
<i><b>Ilustración 16</b></i> Aerogenerador Bipala .....	38
<i><b>Ilustración 17</b></i> Estructura aerogenerador con rotor en jaula de ardilla.....	39
<i><b>Ilustración 18</b></i> Estructura aerogenerador con rotor devanado con resistencia variables .....	39
<i><b>Ilustración 19</b></i> Estructura aerogenerador con rotor doblemente alimentado .....	40
<i><b>Ilustración 20</b></i> Estructura aerogenerador síncrono con excitación convencional.....	40
<i><b>Ilustración 21</b></i> Estructura aerogenerador síncrono con cámara multiplicadora.....	41
<i><b>Ilustración 22</b></i> Sistema híbrido eólico-solar conectado a la red eléctrica .....	41
<i><b>Ilustración 23</b></i> Sistema híbrido eólico-solar conectado a la red eléctrica y con banco de baterías .....	42
<i><b>Ilustración 24</b></i> Imagen satelital del edificio APR .....	44
<i><b>Ilustración 25</b></i> Distancia mínima de panel a panel .....	45
<i><b>Ilustración 26</b></i> Rango óptimo de orientación de paneles solares .....	46
<i><b>Ilustración 27</b></i> Representación gráfica del punto de máxima potencia MPP.....	57
<i><b>Ilustración 28</b></i> Representación gráfica del convertidor Booster. ....	59
<i><b>Ilustración 29</b></i> Diagrama de flujo Algoritmo de Perturbación y Observación. ....	64
<i><b>Ilustración 30</b></i> Sistema Híbrido Eólico Solar .....	65
<i><b>Ilustración 31</b></i> Simulación Control MPPT Sistema Fotovoltaico.....	67
<i><b>Ilustración 32</b></i> Señal de voltaje de salida del booster solar .....	68
<i><b>Ilustración 33</b></i> Comparación del voltaje de entrada con el voltaje de salida del booster solar .....	68
<i><b>Ilustración 34</b></i> Simulación MPPT Sistema Eólico .....	69
<i><b>Ilustración 35</b></i> Señal de voltaje de salida del booster eólico.....	69
<i><b>Ilustración 36</b></i> comparación del voltaje de entrada con el voltaje de salida del booster eólico .....	70
<i><b>Ilustración 37</b></i> simulación del sistema de control on/off.....	71
<i><b>Ilustración</b></i> Consumo diario de dispositivos.....	72
<i><b>Ilustración</b></i> Porcentaje de energía suplida.....	73

## LISTA DE ANEXOS

---

*ANEXO 1. Código controlador MPPT del sistema eólico.*

*ANEXO 2. Código simulación del aerogenerador*

*ANEXO 3. Código controlador MPPT del sistema fotovoltaico.*

*ANEXO 4. Esquema distribución del sistema híbrido.*

## INTRODUCCIÓN

---

Colombia presenta un alto índice de producción energética por parte de hidroeléctricas (69.3%) gracias a su posición geográfica, si bien este recurso no representa un impacto para la atmosfera, si influye negativamente en el ambiente, afectando la fauna y la flora de la zona [1]. Otra desventaja de depender de este recurso es que se puede ver reducida su generación debido a fenómenos del calentamiento global (El niño y La niña), haciendo al país dependiente de recursos no renovables como lo son los combustibles fósiles que afectan muy negativamente el entorno.

El país tiene todo lo necesario para aprovechar otras fuentes de energía renovable como lo son la eólica o la solar. Edificios con un alto índice de flujo de personas tales como hospitales, instituciones gubernamentales, escuelas o universidades, podrían invertir en estas fuentes reduciendo el costo en las facturas de luz y además promoviendo un medio ambiente sostenible.

Es por todos estos problemas que el lector en este documento podrá apreciar una posible solución planteada en forma de un diseño híbrido eólico solar para el edificio Alfonso Palacio Rivas de la Universidad Piloto de Colombia. Con este diseño se busca reducir parte del consumo eléctrico de la institución, trayendo a esta, aparte de beneficios medio ambientales y económicos, beneficios gubernamentales, ya que el gobierno colombiano promueve sistemas de generación energético-renovable.

## RESUMEN

---

Este documento abarca un estudio técnico sobre la viabilidad y futura implementación de un sistema energético renovable que apoya de manera parcial la red energética del edificio APR de la Universidad Piloto de Colombia. Dicho estudio, además de evaluar su viabilidad propone el diseño del sistema híbrido y se estructura en diferentes fases: la primera fase evalúa la demanda energética del edificio con los datos del año 2018 proporcionados por la universidad, determinando el consumo promedio de los dispositivos dentro del edificio, posteriormente, se determina el potencial energético de la fuente renovable de la zona haciendo uso de bases de datos de la NASA e informes nacionales. Con estos datos, se procede a modelar las etapas de generación, control e interconexión. Finalmente, se realiza la simulación del sistema en diferentes condiciones ambientales.

***Palabras Clave:*** Aerogenerador, Panel solar, Sistema híbrido, controlador MPPT, Circuito Elevador, Energía renovable.

## ABSTRACT

---

This document covers a technical study on the feasibility and future implementation of a renewable energy system that partially supports the energy network of the APR building of the Universidad Piloto de Colombia. Said study, in addition to assessing its feasibility proposes the design of the hybrid system and is structured in different phases: the first phase evaluates the energy demand of the building with 2018 data provided by the university determining the average consumption of the devices inside the building, subsequently, the energy potential of the renewable source of the area is determined making use of NASA databases and national reports. With this data, the generation, control and interconnection stages are modeled. Finally, the system is simulated under different environmental conditions.

**Keywords:** *Wind Turbine, Solar panel, Hibrid System, MPPT Controller, Booster, Renewable Energy.*

## 1. GENERALIDADES

---

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad la principal fuente de generación de energía proviene de fuentes hídricas presentes en el país, según los reportes de la Unidad de Planeación Minero-Energética de Colombia UPME. Del 100% de la energía eléctrica producida en el país el 69.3% es de fuentes hídricas [1], uno de los principales inconvenientes que tiene el uso de estas fuentes para la producción de energía eléctrica son, por ejemplo, la desaparición de la biodiversidad presente en la zona. Un estudio realizado en la Universidad Estatal de Santa Cruz y publicado en *Plos One* dice que los mega proyectos hidroeléctricos que están tomando cada vez más fuerza en América, África, Asia y Europa y a su vez imponiéndose como una forma de obtención de energía amigable con el ambiente en realidad no lo es, la investigación reveló que la construcción de estos mega proyectos representan un gran riesgo a la biodiversidad terrestre y de agua dulce, dentro de las poblaciones afectadas se encuentran gran cantidad de vertebrados terrestres (mamíferos, aves y tortugas) un sin número de fauna acuática y hábitad forestal [2]. Otros problemas relacionados con la construcción de represas para centrales hidroeléctricas son: los inconvenientes de generación de energía a causa de fenómenos climatológicos como el fenómeno del niño y de la niña, ya que estos generan abastecimiento y sobreabastecimiento en las mismas, la interrupción del flujo de nutrientes para zonas aledañas, la obstaculización de rutas migratorias de varias especies, dificultad en el sector pesquero y el aumento de gases de efecto invernadero, según un artículo publicado en la revista “*ACS Environmental Science and Technology*” en el cual realizaron un estudio relacionado con el impacto de los gases de efecto invernadero producido por las centrales hidroeléctricas, concluyó que este método para la generación de energía es el que produce la mayor cantidad de gases superando a la energía nuclear, solar y eólica, pero estos son los menos nocivos para el medio ambiente. Además, se menciona que Sur América abarca un 24% de la generación hidroeléctrica total y ocupa el cuarto lugar en la generación de gases [3].

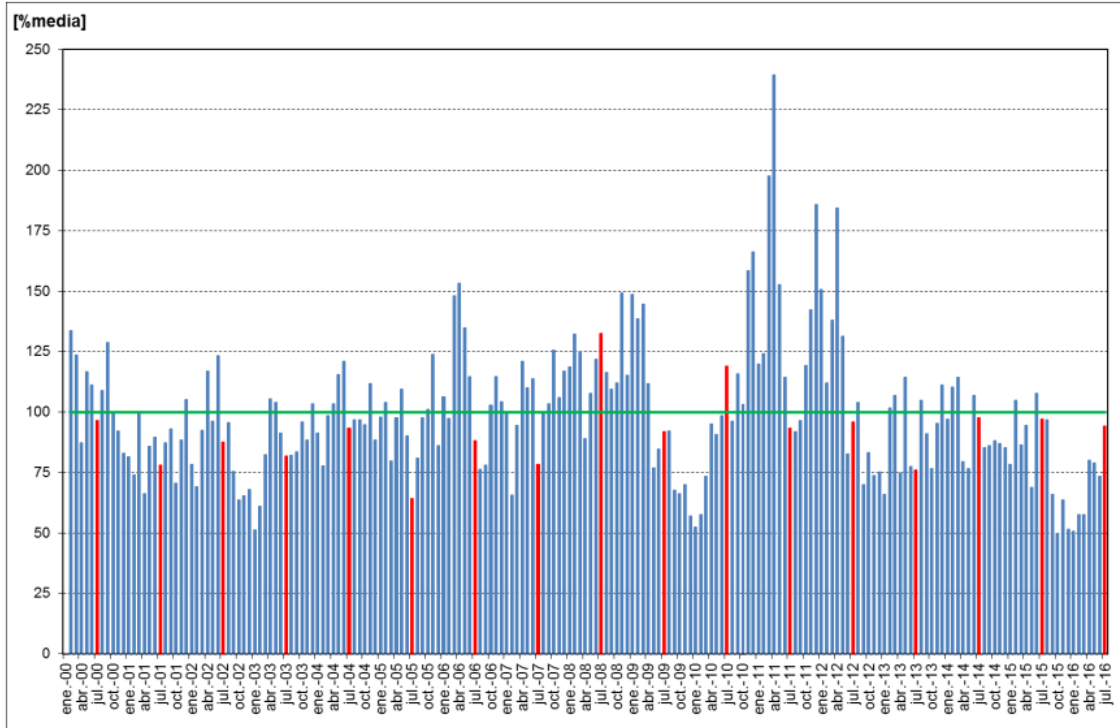
Según XM (Compañía de Expertos en Mercado), compañía gestora del Sistema Interconectado Nacional (SIN), las zonas con la mayor demanda y crecimiento energético del país son la zona centro y la costa atlántica, para el año 2018 se reportó una demanda energética de 16.837 y 16.665 GWh respectivamente, cabe resaltar que estas zonas contienen un gran porcentaje del sector industrial del país por lo que los métodos de obtención y abastecimiento energético de estos lugares juegan un papel importante en la planificación del desarrollo sustentable del país[4].

### 1.1.1. Antecedentes del Problema

Actualmente en Colombia se está utilizando muy poco la energía eólica como fuente de obtención de energía; sin embargo, existe el parque Jepirachi ubicado en Uribia, en el departamento de la Guajira, este parque consta de 15 aerogeneradores los cuales producen 19.5MW que equivale al 0.001% del total de generación eléctrica y solo el 0.3% de la energía producida proviene de fuentes solares [5] , Según el estudio ***Integración de energías renovables*** realizado por la UPME, revela que nuestro país tiene una capacidad para generar aproximadamente 30MW de energía por fuentes eólicas, y aproximadamente 30kW/m<sup>2</sup>/día de fuentes solares [6] . Como se mencionó anteriormente, la mayor parte de la energía eléctrica del país proviene de fuentes hídricas, sin embargo, debido a fenómenos climatológicos como “El niño” o “la niña”, se puede ver afectada la generación de la misma, como lo dice el IDEAM en el informe ***Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico (2014)*** en lo cual destaca la afectación de dichos fenómenos en todo el territorio del país, el estudio se hizo aproximadamente desde los años 1950 hasta el año 2012 en donde resalta los eventos importantes del fenómeno del Niño y la Niña ocurridos en el transcurso de esos años, evidenciando que conlleva problemas que van de la mano con la precipitación y el aumento o disminución de la temperatura, en algunos casos esto es causado por la radiación ultravioleta que llega directamente a la tierra (El niño), otro ejemplo es el debilitamiento o fortalecimiento de los vientos que provienen del este, estos tipos de vientos son comunes en la zona tropical colombiana y son ocasionados por la variación de la presión atmosférica en la región del Pacífico [7].

Así mismo, se registró otro evento del fenómeno del niño a finales del 2015 e inicios del año 2016, en donde se destaca una reducción de la precipitación y aumento de la evaporación, lo que conlleva a una afectación en las regiones hidrográficas, en consecuencia, se reduce la generación de energía eléctrica, como lo muestra la gráfica de los aportes hídricos al *SIN Sistema Interconectado Nacional* del ***Informe de oferta y generación de Julio del 2016*** de la compañía XM (***Ilustración 1*** Gráfica del *Informe de Oferta y Generación de Julio del 2016*). En cuanto al fenómeno de la niña, también se puede observar en el mismo informe un aumento en la producción eléctrica a finales del año 2010 hasta mediados del año 2011 correspondiente al registro más alto que tuvo la niña. En los años posteriores al 2016 se registraron leves intensidades por parte de ambos fenómenos [8].

**Ilustración 1** Gráfica del Informe de Oferta y Generación de Julio del 2016



Fuente: XM (2016)

### 1.1.2. Descripción del problema

Una gran parte del consumo eléctrico de la Universidad Piloto de Colombia proviene del edificio APR, ya que es uno de los edificios más utilizados por estudiantes de diferentes facultades. Esta demanda energética se suple en su totalidad por la red eléctrica colombiana, en donde la mayor parte de la energía entregada es generada por centrales hidroeléctricas, las cuales afectan la fauna y flora del medio ambiente al no permitir la circulación de nutrientes en el agua. La otra parte entregada por esta red es generada por fuentes no renovables de energía, aumentando la generación de gases de efecto invernadero, para evitar una total dependencia de dicha red, además de ayudar al medio ambiente evitando la generación de energía por fuentes no renovables, es necesario realizar la implementación de un sistema que le permita a la universidad auto sustentar parte de su demanda energética.

### 1.1.3. Formulación del problema

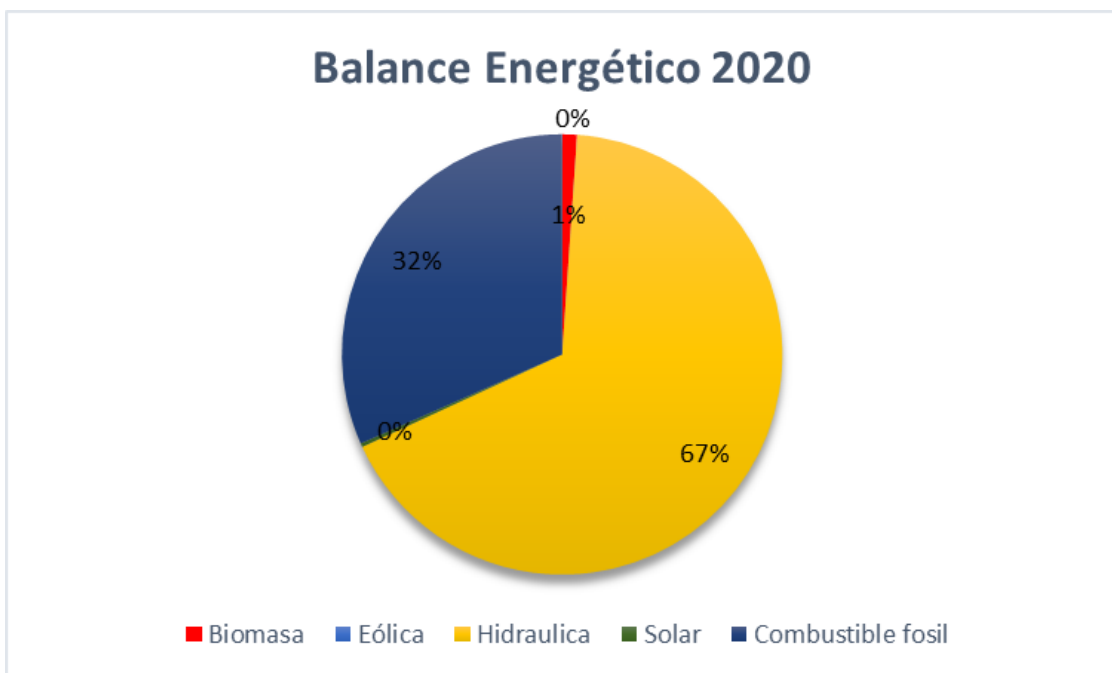
¿Cómo crear un sistema híbrido para suplir parte de la demanda energética del edificio A.P.R. de la Universidad Piloto de Colombia?



## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Según el estudio energético realizado por XM para la primera mitad del año 2020, se observa que la mayor parte de energía proviene de centrales hidroeléctricas, aproximadamente se producen 123.58 GWh-día correspondiente al 67.02%, seguido por los combustibles fósiles en los que se produce aproximadamente 58.31 GWh-día equivalente al 31,62% y la mínima parte restante 1,08% representa el uso de otras fuentes de energías renovables (Biomasa, Eólica, y Solar), en donde la eólica y solar son tan pequeñas que casi no se puede apreciar, esto evidencia el poco interés que tiene el país en invertir y utilizar en este tipo de energías a pesar de los beneficios que tienen el uso de estas [9].

**Ilustración 2** Gráfica de Balance energético de 2020



Fuente: Elaboración propia con base en los datos de XM (2020)

Analizando el contexto universitario, la red eléctrica de la universidad se encuentra dividida en dos zonas principales, la primera abarca los edificios: APR, G, U y S, dicha zona es regulada a nivel energético por la empresa ENEL, la segunda zona abarca los edificios: A, F, E, postgrados, entre otros, esta zona no es regulada a nivel energético y es manejada por la empresa EMGESA. Mediante las facturas de la universidad, se conoce que el edificio A.P.R. consume aproximadamente el 40,8% de la electricidad de la universidad, adicionalmente sabemos que el costo eléctrico en la zona regulada (zona donde se encuentra dicho edificio) es aproximadamente de \$13,030,384 COP por mes. Implementar una fuente de energía no convencional, traería consigo muchos beneficios, el primero es que parte de la electricidad no sería dependiente del sistema eléctrico nacional siendo un ejemplo viable de abastecimiento

energético para otros edificios en la ciudad, la segunda es que la universidad obtiene beneficios gubernamentales por el uso de FCNER, además de reducir los costos de este servicio para la universidad.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo General**

- Diseñar un sistema híbrido de energía eólica-solar teniendo como base un sistema de control para el edificio A.P.R. de la Universidad Piloto de Colombia.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar la demanda energética requerida en la zona de estudio con el fin de dimensionar el sistema híbrido eólico-solar.
- Caracterizar los tipos de sistemas de energías eólico-solar y teniendo en cuenta las condiciones ambientales.
- Diseñar un controlador que mantenga el nivel de energía suministrada por el sistema híbrido.
- Simular el sistema propuesto con el fin de evaluar el comportamiento del abastecimiento energético del edificio A.P.R.

### **1.4. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO**

#### **1.4.1. Alcances y Limitaciones**

##### ***a. Alcances***

- Cálculo teórico con la opción más viable para la implementación del sistema de generación de energía eléctrica a partir de paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas.
- Comparar los resultados teóricos con los resultados obtenidos mediante el software con el fin de conocer la mejora económica del consumo eléctrico.

##### ***b. Limitaciones***

- Debido a que la universidad no cuenta con un laboratorio para pruebas de paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas y tampoco hay convenios para la realización de prácticas de campo, solo se podrá realizar el estudio de manera teórica y se comprobará por medio de software de simulación.
- Por falta de disponibilidad económica no se podrá realizar la implementación del sistema híbrido eólico-solar.

## 1.5. MARCO REFERENCIAL

### 1.5.1. Estado del arte

Colombia se encuentra en una posición geográfica excelente para la generación de energía a partir de fuentes renovables, esto hace que sea uno de los diez países con mayor potencial en la obtención de esta, como se mencionó en la *World Economic Forum* del año 2017 en donde el país ocupó el octavo puesto. Sin embargo, en la actualidad este potencial no es aprovechado por el uso indiscriminado de fuentes fósiles y la falta de innovación e implementación de estas energías. Con base a lo anterior, se han realizado varios proyectos e investigaciones con el fin de mitigar las consecuencias ambientales a causa de estas fuentes de energía no renovables [10].

A nivel mundial y en zonas aledañas se han propuesto proyectos que involucran el desarrollo de sistemas híbridos para solventar dichas problemáticas ambientales y abastecimiento energético. En la Tabla 1, se muestran algunos de estos proyectos:

**Tabla 1** Estado del arte

DATOS	RESUMEN	METODOLOGÍA
Diseño de un sistema de energía híbrido (solar-eólico) para el soporte de las telecomunicaciones en el cerro girasoles del ejército nacional de Colombia. Luis Gabriel Amézquita Pardo Universidad Piloto de Colombia 2019 [11]	El documento muestra el diseño de un sistema híbrido eólico-solar, el cual tiene como propósito abastecer un repetidor militar ubicado en el cerro de girasoles en el sur del país, dicho repetidor se encuentra en una zona poco accesible, por lo que es necesario transportar combustible por medios aéreos para alimentarlo mensualmente.	Inicialmente se determinaron las condiciones ambientales de la ubicación con el fin de evaluar el potencial de generación eléctrica, más tarde se definieron los requerimientos técnicos de los equipos, con esto se diseñó y validó el sistema haciendo uso del software HOMER PRO y apreciando también la inversión costo-beneficio del sistema.
Diseño energético, eléctrico y de comunicaciones para un edificio inteligente residencial - caso de estudio. Jonathan Stiven Martínez Giraldo Universidad de la Salle 2018 [12]	Se presenta el diseño de múltiples sistemas para un edificio inteligente de estrato cuatro en la ciudad de Bogotá, dichos sistemas emplean energía solar como la fuente más viable.	Los estudiantes inician con la evaluación de diferentes alternativas energéticas dentro de la ciudad, más tarde evalúan los requerimientos eléctricos promedios y la debida infraestructura eléctrica que estos requieren, después se

		contextualizan los sistemas inteligentes para el edificio, entre los que se incluyen sistemas de seguridad e iluminación.
<p>Identificación de los factores críticos para la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en Colombia.          Jhordan Camilo Estévez Acuña          Jerson Fernando Ortiz Villarreal          Universidad Libre          2018 [13]</p>	<p>El documento presenta el resultado de los estudios de aproximadamente 25 autores sobre factores críticos a tener en cuenta en la implementación de sistemas fotovoltaicos.</p>	<p>Los ingenieros obtuvieron variables para tener en cuenta para la implementación de sistemas fotovoltaicos, algunas de esas son: Radiación solar, Brillo solar, Eficiencia, Voltaje, Temperatura, Vida útil y Potencia; Posteriormente analizaron los datos de los documentos en Microsoft Excel con su extensión de Megastat y obtuvieron: máximos, mínimos, promedios, desviaciones y las gráficas que describen el comportamiento de las variables.</p>
<p>Controlador robusto basado en la técnica DC-DC buck-boost como regulador de voltaje en generadores fotovoltaicos.          Rafael Augusto Núñez-Rodríguez          Omar Pinzón-Ardila          Universidad Pontificia Bolivariana          2017 [14]</p>	<p>Diseño de un controlador robusto mediante la teoría realimentación cualitativa QFT para un convertidor DC-DC que regula el voltaje suministrado de un generador fotovoltaico.</p>	<p>Se utiliza técnicas de diseño dentro del entorno de Simulink toolbox y Simscape para el modelamiento de sistemas físicos, la teoría QFT se modificó a partir de la estructura Predictor de Smith lo que muestra un comportamiento robusto ante cambios en la impedancia de carga y variación de operación en el convertidor.</p>
<p>Regulación de frecuencia en sistemas de potencia que integran fuentes de energías eólicas mediante un controlador pi e</p>	<p>Regulación de frecuencia en sistemas de potencias que integran fuentes de energías eólicas mediante</p>	<p>Se realizo un estudio de la respuesta dinámica del sistema ante perturbaciones y disturbios repentinos</p>

<p>imitación de inercial. Nelson Gómez Molina Sergio Raúl Rivera Rodríguez Universidad Nacional de Colombia 2017 [15]</p>	<p>un controlador PI e imitación de Inercial.</p>	<p>cómo por ejemplo el cambio de frecuencia, a partir de eso se implementó un bloque de control en la parte de potencia adicional que tiene el sistema para emular la imitación inercial, de tal manera se contrarresta la rapidez del sistema, es decir ralentizar la señal. Se diseñó el algoritmo para la optimización mediante teoría heurística para minimizar el error de la señal, se hizo mediante un controlador PI.</p>
<p>Sistema hibrido eólico solar para abastecimiento de energía eléctrica en el sector rural. Rojas Chalan Brayant Xavier Universidad Tecnológica Equinoccial 2017 [16]</p>	<p>Sistema hibrido para producir energía abajo costo en una zona rural del Ecuador.</p>	<p>Se realizo un estudio para determinar la demanda energética de una vivienda, posteriormente se seleccionaron los componentes y partiendo del diseño eléctrico de la vivienda se realizó la integración mediante un controlador que distribuye la energía para el consumo que tiene autonomía de un día y medio.</p>
<p>Diseño e implementación de un sistema solar fotovoltaico para la generación de energía eléctrica con potencia activa de 1kW. Angelica María Peña Gallo Diego Alberto Gutiérrez Hernandez Frank Giovanni Caldas Lujan Universidad</p>	<p>Se presenta el diseño y la implementación de un sistema de generación fotovoltaica para la alimentación del alumbrado externo del área de los laboratorios de la Universidad cooperativa de Colombia sede Villavicencio, el sistema debe generar al</p>	<p>El proyecto está realizado en forma de investigación interactiva y se divide en cuatro fases: 1. Diseño de planta. 2. Cálculo del sistema energético. 3. Puesta en funcionamiento. 4. Evaluación del sistema.</p>

cooperativa de Colombia 2017 [17]	menos 1kW de potencia como mínimo.	
Gestión para el desarrollo y diseño de un sistema energético híbrido eólico-solar para aplicaciones en zona no interconectada (ZNI) de Colombia. Nicolás Gómez Garcés. Universidad de los Andes 2016 [18]	Se diseñó un sistema híbrido eólico-solar con capacidad de almacenar y regular energía, abasteciendo las necesidades básicas de una casa en una zona rural, se tuvieron en cuenta costos de producción, asesoría a las comunidades en la zona y se planteó un plan a futuro para aumentar la producción energética	Iniciaron recopilando información sobre el uso de energías renovables, también de los sistemas existentes eólicos, solares y sistemas que involucran las dos maneras de obtención de energía, posteriormente realizaron el diseño y un plan de financiamiento al igual que un cronograma de actividades.
Estudio de Sistemas Híbridos De Energía Renovable (solar – gasificación de biomasa) como alternativa para satisfacer necesidades energéticas en Zonas no Interconectadas del Departamento del Chocó. Deybi Brayan Asprilla Mosquera Universidad Nacional de Colombia 2016 [19]	El trabajo muestra el proceso de diseño, análisis y resultados de un sistema híbrido fotovoltaico y de biomasa el cual consta de un arreglo de paneles solares, un motor de combustión y un sistema de almacenamiento energético, construido para ser usado en el departamento del choco.	Para el diseño del dispositivo se inició evaluando la demanda energética del lugar al igual que el potencial de obtención de energía a partir del recurso solar y la biomasa; el punto a destacar es la sincronización del sistema híbrido el cual lo logro haciendo uso de un sistema de control que sincroniza inversores que direccionan y permiten el flujo de energía.

*Fuente: Elaboración propia*

### **1.5.2. Marco normativo**

Actualmente en Colombia existen normas para la regulación de sistemas que empleen fuentes no convencionales de energía. A continuación, se describe la ley 1715 de 2014 como: “*Regulación de la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional*”, la norma 50001 “*Sistemas de gestión de la energía - Requisitos con orientación para su uso*”, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas y la Norma Técnica Colombiana que deben ser tenidas en cuenta para la realización de este proyecto.

- **LEY 1715 DE 2014**

En esta ley se establece las normativas que se deben llevar a cabo para la implementación e integración de las fuentes de energías no renovables, cuyo objetivo es promover el desarrollo de dichas fuentes, además la autorregulación tanto para personas jurídicas como personas naturales incluyendo exenciones de pagos de derechos arancelarios de importación de maquinaria y otros equipos para la inversión de dichas fuentes. Si una persona natural o jurídica desea implementar estas fuentes debe contar con un medidor bidireccional que acumula la diferencia entre los pulsos de entrada y salida, así como aportar con los excedentes de energía a la red eléctrica, es decir, energía sobrante luego de utilizar la necesaria para el consumo [20].

- **NORMA 50001 DE 2011**

Por la cual se establece la estructura que debe poseer un sistema de gestión energética, además de la reestructuración que debe sufrir la organización, institución o edificio, para la creación y el mantenimiento de este. El mantenimiento de este sistema se realiza mediante políticas energéticas, y personal especializado, ya sea interno o externo para la verificación, análisis y mejoría en el consumo energético dentro del edificio. Esta norma menciona las responsabilidades que debe tener cada uno de estos mecanismos desde los altos mandos, hasta los responsables a cargo del sistema de gestión energética [21].

- **REGLAMIENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS**

El reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE) habla sobre la importancia de seguir los criterios de seguridad descritos en el Norma Técnica Colombiana (NTC) 2050, y los requisitos de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) 60529, 60695-2-11, 60695-2-5, 61439-1, 62208, 62262 para los tableros en montajes eléctricos, dichos tableros pueden ser de distribución, potencia, para instalaciones temporales y para redes de distribución pública. Las principales características para tener en cuenta en estas normas son los criterios de protección a esfuerzos mecánicos, eléctricos y térmicos; también habla sobre la distribución de componentes, así como las conexiones en el tablero, de lo anterior se menciona que las conexiones o componentes peligrosos no deben ser de fácil acceso, las conexiones accesibles deben tener un nivel de peligro lo más bajo posible. Para celdas de media tensión se debe remitir a las normas IEC 62271-1, IEC 62271-200, IEC 60695-11-10 de carácter internacional. [22]

- **NORMA TECNICA COLOMBIANA 2050**

En la sección 690 de la NTC 2050 se establecen los criterios que se deben aplicar a sistemas de generación de energía eléctrica, dicha norma tiene en cuenta: paneles solares, circuitos eléctricos y dispositivos de regulación y

control como inversores o transformadores. También habla sobre los requisitos del sistema según el alcance del montaje, protecciones contra sobre corriente estipuladas en el artículo 450-3, métodos necesarios para la desconexión de conductores, equipos fotovoltaicos, fusibles e interruptores del sistema. Otra mención importante en la norma es sobre los métodos de conexión del sistema con otras fuentes de energía (sección 705) como por ejemplo sistemas de reserva, generación o aprovisionamiento de energía. [23]

## 1.6. MARCO METODOLÓGICO

Para poder desarrollar este proyecto, se establece como primer paso realizar la caracterización del edificio la cual consta de: el área disponible para la implementación de dispositivos y la demanda energética. Más tarde se utiliza datos del IDEAM sobre el recurso energético de Bogotá. Posteriormente, se determinan los dispositivos (aerogeneradores y paneles solares) que se ajustan mejor a las necesidades del edificio y a los recursos disponibles, partiendo de esta información, se desarrolla el montaje híbrido el cual corresponde a la distribución de estos dispositivos en el techo. A continuación, se diseña el controlador el cual se va a encargar de regular la distribución de energía del sistema. Por último, se corrobora el funcionamiento de este, bajo diferentes condiciones mediante simulaciones en software especializados. De presentarse algún problema se retornará a la etapa de diseño. Finalmente se relacionan los diferentes componentes, dando como resultado el producto final.

**Ilustración 3** Gráfica marco metodológico



Fuente: Elaboración propia



## 2. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA EDIFICIO APR

### 2.1. EVALUACIÓN CONSUMO DEL EDIFICIO APR.

En este apartado se aprecian los datos tomados de los diferentes dispositivos encontrados dentro del edificio. Cabe recalcar que estos datos son de principios del año 2020, esto debido que a principios del mismo año se desato la pandemia producto del COVID-19, por lo que la universidad cerró sus puertas de manera presencial a los estudiantes y no se han podido actualizar los datos.

**Tabla 2** *Consumo del edificio APR*

Dispositivo	Cantidad	Consumo Individual (Watts)	Potencia de Consumo (Watts)	Horas de uso por día	Energía total consumida por día (Watts hora)
Bombillo led dicroico	345	1	345	16	5520
Bombillo tubular de sulfato	86	36	3096	16	49536
Reflectores	2	20	40	3	120
Sensor de humo	113	3	339	24	8136
Sensores de movimiento	5	0,5	2,5	24	60
Detector de tarjetas	4	30	120	16	1920
Cámara de seguridad	13	340	4420	24	106080
Computador	3	440	1320	1,07	1408
Impresora	1	10	10	1,4	14
Módems	8	9	72	24	1728
Televisores	4	140	560	12	6720
Video Beam	33	500	16500	7,78	128400
Altavoces	8	800	6400	1	6400
Caja registradora	4	100	400	12	4800

<b>Secador de manos</b>	16	420	6720	10	67200
<b>Máquina distribuidora de comida</b>	1	1224	1224	10	12240
<b>Extractores</b>	16	100	1600	10	16000
<b>Ascensor</b>	1	4300	4300	10	43000

*Fuente: Elaboración propia*

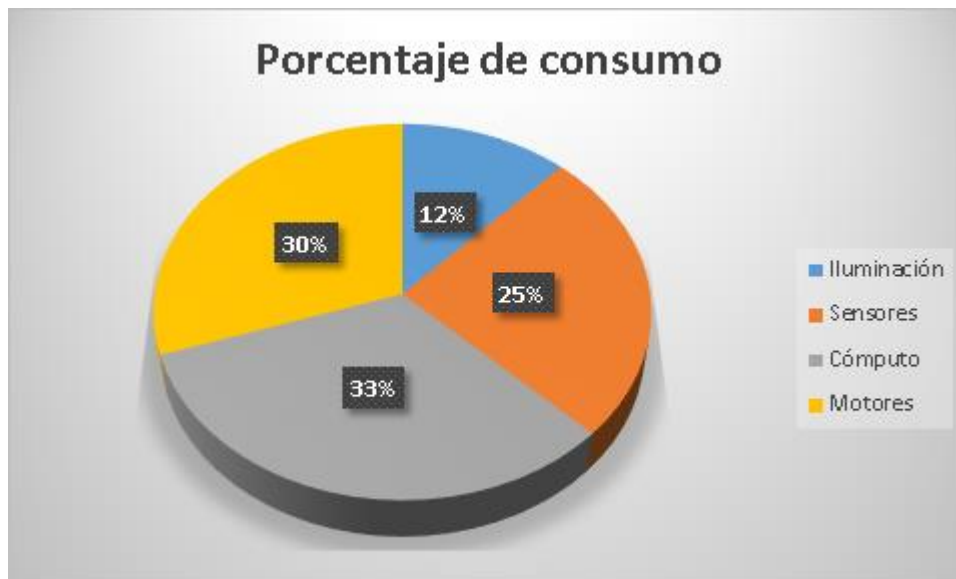
Para entender mejor los consumos y poder realizar una mejor comparativa, se utilizan estos datos y se calculan los valores consumidos por día y mes, pero clasificados por cada categoría. Cabe resaltar que los datos usados tanto en la Tabla 2 Consumo del edificio APR como en la Tabla 3 Consumo del edificio APR por categorías y Tabla 4 Consumo de la zona ENEL en el año 2018 muestran una aproximación de los elementos fijos y no se toma en cuenta la energía consumida por dispositivos conectados que traen los estudiantes. Además, el valor teórico también es una aproximación ya que la cuenta de consumo esta mezclada con otros edificios de la universidad.

**Tabla 3** *Consumo del edificio APR por categorías*

<b>Categoría</b>	<b>Consumo kWh por día</b>	<b>Consumo kWh por mes</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Iluminación</b>	55,17	1655,28	12,01
<b>Sensores</b>	116,19	3485,88	25,29
<b>Cómputo</b>	149,47	4484,1	32,54
<b>Motores</b>	138,44	4153,2	30,14
<b>Total</b>	459,28	13778,46	100

*Fuente: Elaboración propia*

**Ilustración 4** Gráfica del consumo del edificio APR por categorías



Fuente: Elaboración propia

Para verificar que nuestros datos están bien calculados, se realizó una comparativa entre los datos obtenidos teóricamente y las facturas de consumo de la zona de ENEL. La siguiente tabla demuestra dicha comparativa:

**Tabla 4** Consumo de la zona ENEL en el año 2018

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA			
KR 9 NO 45 A - 25			
NÚMERO DE CLIENTE		3969466-0	
MES	VALOR A PAGAR	kWh	PRECIO kWh
ene-18	\$ 7.418.200	18687,5864	\$ 396,9587
feb-18	\$ 10.863.710	27367,3558	\$ 396,9587
mar-18	\$ 13.417.380	29947,9848	\$ 448,0228
abr-18	\$ 14.241.980	31788,5161	\$ 448,0228
may-18	\$ 14.537.620	32770,8109	\$ 443,6149
jun-18	\$ 13.579.620	31650,3559	\$ 429,0511
jul-18	\$ 11.005.510	24821,9858	\$ 443,3775

ago-18	\$ 11.997.010	27058,2292	\$ 443,3775
sep-18	\$ 16.001.650	33900,1346	\$ 472,0232
oct-18	\$ 15.687.340	33234,2563	\$ 472,0232
nov-18	\$ 14.584.200	30788,1459	\$ 473,6953
Promedio	\$ 13.030.383,64	29274,1238	\$ 442,4660

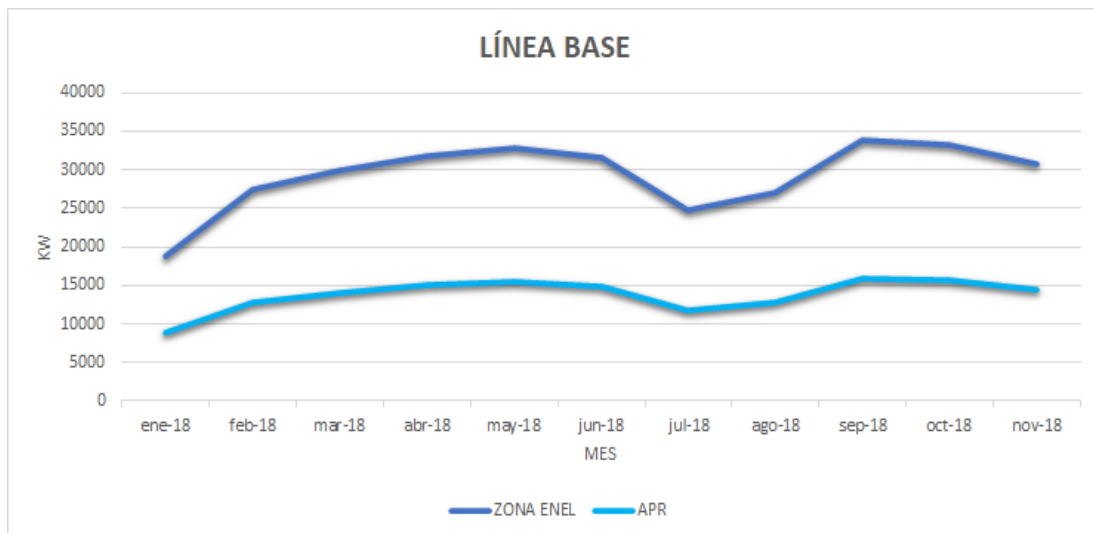
*Fuente: Elaboración propia con datos de los recibos proporcionados por la Universidad Piloto de Colombia*

Como se puede apreciar el consumo promedio del edificio APR es de 13778,46 kWh por mes en nuestros datos estimados, mientras que en los datos prácticos de la universidad dicho consumo es de 11943,84 kWh por mes aproximadamente. Calculando la desviación estándar se encontró que es de 13.3152%, esto se debe a que se asume el uso de los equipos de cómputo (video proyectores) en todas las clases, lo cual eleva el consumo promedio del edificio.

## 2.2. LÍNEA BASE

Se entiende por línea base de acuerdo con la ISO 50001 a la referencia cuantitativa que se realiza durante un periodo de tiempo para poder apreciar y comparar el desempeño energético de un lugar específico. Para la línea base se usaron los datos obtenidos en el transcurso de un año y se compararon con el consumo total de la zona de Enel, como se muestra en la siguiente gráfica:

**Ilustración 5** *Gráfica Línea Base*



*Fuente: Elaboración propia con datos de los recibos proporcionados por la Universidad Piloto de Colombia.*

### 3. IDENTIFICACIÓN DE LA OFERTA ENERGÉTICA RENOVABLE (EÓLICO-SOLAR)

---

#### 3.1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

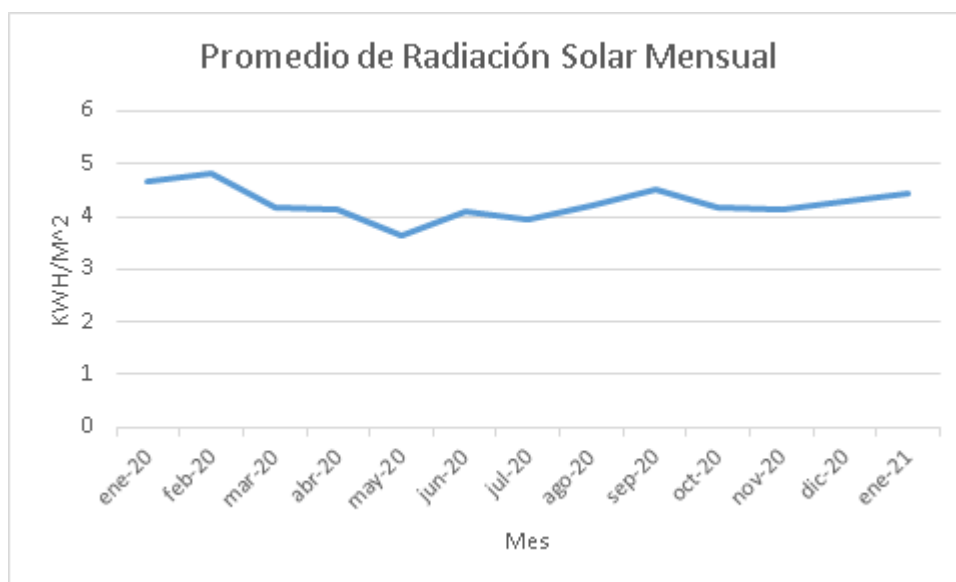
La energía solar fotovoltaica es un recurso renovable en donde se emplea la radiación proveniente del sol. En la siguiente sección se apreciará cuanto de este recurso podemos aprovechar y sus diferentes tecnologías de generación.

##### 3.1.1. Fuente de energía (Radiación)

Según el IDEAM la radiación solar es energía en forma de ondas electromagnéticas que provienen del sol, dicha energía es liberada del mismo en su superficie, pero se genera por la fusión nuclear del hidrogeno. Esta radiación se presenta en dos tipos de onda, la primera de onda corta se caracteriza por que al momento de llegar a la tierra sufre difusión y reflexión en la atmosfera, para al final llegar a la superficie terrestre para ser absorbida o reflejada por la misma; cuando la superficie terrestre refleja la radiación esta es desviada a la atmosfera en forma de radiación de onda larga (segundo tipo de radiación), la cual calienta la atmosfera [24].

Para determinar la cantidad de radiación solar que llega al edificio APR se utilizó la herramienta virtual Power Data Access View por de la Nasa, la cual puede brindar información de la radiación solar en un lugar específico, dicha radiación es medida en kWh/m<sup>2</sup> por día; sin embargo, como se requiere tener una amplia visión sobre la misma, se creó un gráfica a partir de los datos diarios, por ello, se decidió mostrar la radiación como el promedio mensual del edificio en el transcurso de un año (2020-2021) [25].

**Ilustración 6** Gráfica promedio de radiación solar mensual



Fuente: Elaboración propia con base en datos proporcionados por la herramienta Power Data Access View de la NASA

### 3.1.2. Tecnologías de recolección de energía solar:

#### Definición y funcionamiento

Para obtener energía a partir de la radiación solar se usa un material fabricado artificialmente llamado célula solar compuesto de silicio dopado, esto quiere decir que dicho material consta de dos regiones, una considerada con carga positiva (P) y conocida como región de huecos y otra considerada con carga negativa (N) y conocida como región con exceso de electrones, tras unir estas dos regiones y exponerlas a radiación solar se obtiene un flujo de electrones entre regiones, al conectar una carga a la célula solar se tiene como resultado una corriente continua; Los paneles solares se fabrican con un número variable de células solares (entre 31 y 36 dependiendo del fabricante) conectadas en serie, esto influye en la carga del banco de baterías [26].

#### Tipos de Tecnologías

**Tabla 5** *Tipos de tecnologías para la recolección de energía solar*

Tipo de Panel solar	Eficiencia	Características
<b>Panel monocristalino</b>	20 - 24%	Precio medio alto, es el más usado por ser el de mayor eficiencia para el coste que tiene.
<b>Panel policristalino</b>	12 -14%	A diferencia del monocristalino este panel se fabrica de forma cuadrada y se usa menos Silicio.
<b>Panel amorfo</b>	Menos del 10%	Su principal característica es su flexibilidad (maleabilidad), usualmente se instala sobre las cubiertas de edificios.

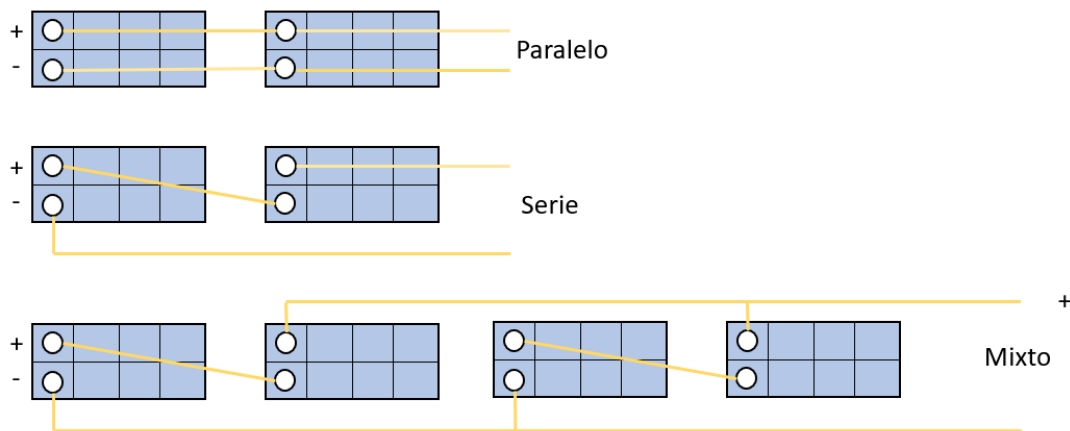
<b>Panel de sulfuro de cadmio y sulfuro de cobre</b>	Menos del 10%	Su proceso de fabricación es más fácil ya que se usa menos material, pero su vida útil es menor, bajo coste
<b>Panel de arsénico de galio</b>	27 - 28%	Es el panel con mayor rendimiento, pero la materia prima es escasa, lo que eleva considerablemente su costo
<b>Panel de diseleniuro de cobre en indio</b>	9 - 17%	Son de los paneles con rendimiento más variable en el mercado.
<b>Panel de telurio de cadmio</b>	8 -16%	

*Nota: Elaboración propia con base a Tobajas, Energía Solar Fotovoltaica, Pág. 6*

### Instalaciones

Según Tobajas existen tres tipos de conexionado, Paralelo, Serie y Mixto, aconsejan no conectar entre si paneles que no sean del mismo fabricante o tipo, la siguiente imagen muestra gráficamente los tipos de conexión.[26]

**Ilustración 7** *Tipos de conexionado en paneles solares*



Fuente: Elaboración propia basándose en Tobajas, Energía Solar Fotovoltaica, Pág. 11

Algunas características de las configuraciones son:

- El voltaje total de los paneles conectados en paralelo es el mismo que el de un solo panel.
- La corriente total de los paneles conectados en paralelo es la suma de la corriente de cada panel.
- El voltaje total de los paneles conectados en serie es la suma de los voltajes de cada panel.
- La corriente total de paneles conectados en serie es la misma que el de un solo panel.

Por lo general las instalaciones solares constan de: Panel solar, Regulador de voltaje, Estación de almacenamiento de energía (Acumulador o Batería), Convertidor o inversor y la carga que consume la energía suministrada, la siguiente imagen muestra la composición del sistema de manera simplificada [26].

**Ilustración 8** Estructura general sistema fotovoltaico



Fuente: Elaboración propia basándose en Tobajas, Energía Solar Fotovoltaica, Pág. 3

### **Regulador**

El objetivo principal del regulador en el sistema de obtención de energía solar es evitar las sobrecargas y descargas en el área de almacenamiento de energía o directamente en el convertidor, de esta manera se mantiene el funcionamiento óptimo del sistema, las ventajas de usar el regulador es que se reduce el tiempo de mantenimiento ya que la probabilidad de daños disminuye, en cuanto al tipo de reguladores se pueden encontrar de dos formas principalmente: Regulador en paralelo y Regulador en serie, la principal diferencia entre estas dos configuraciones radica en el tipo de instalación en la que se está trabajando ya que el regulador en paralelo se usa comúnmente en instalaciones pequeñas y el regulador en serie en instalaciones grandes por su capacidad de trabajar con intensidades elevadas, también se pueden encontrar otras variantes de configuración las cuales son:



- **Regulador de doble circuito:** En caso de sobrecargas este regulador es capaz de redireccionar la energía a otro circuito para evitar que se malgaste y aumentar la eficiencia del sistema.
- **Regulador con dos niveles de carga:** Este tipo de reguladores está dotado de microcontroladores para gestionar la energía de una manera inteligentes, es capaz de gestionar y visualizar datos del sistema.
- **Reguladores de multietapa:** En montajes grandes este tipo de reguladores se ocupan de gestionar la energía para suministrarla por etapas.

Al momento de escoger el regulador para un sistema de energía solar se debe tener en cuenta el número de paneles solares y en caso de usar un sistema de almacenamiento de energía se requiere saber el tamaño de estas, el cálculo esta dado por la siguiente ecuación.

$$I_R = N_p \times I_m \quad (1)$$

En donde  $I_R$  es la corriente del regulador,  $N_p$  es el número de paneles y  $I_m$  es la corriente de los paneles [26].

### Convertidores

El convertidor se encarga de transformar la energía que recibe al tipo de energía que la carga solicita, para estos casos se tiene de corriente continua a corriente continua o de corriente continua a corriente alterna.

- **Convertidor de corriente continua a corriente continua:** Se usa para aumentar la eficiencia del sistema, disminuyendo las perdidas por fluctuaciones en el generador y obteniendo un voltaje de salida estable para la carga, el funcionamiento básico es convertir la corriente continua de entrada en corriente alterna, luego gestionarla (aumentarla o disminuirla) y convertirla en corriente continua de nuevo, pero ya con los parámetros requeridos.
- **Convertidor de corriente continua a corriente alterna:** Se usa en casos donde la carga trabaje con corriente alterna por lo que se requiere de un inversor, las principales características son: Tratar el voltaje para mantenerlos dentro de los parámetros establecidos, ajustar el voltaje de salida para evitar sobrecargas en la carga [26].

## 3.2. EÓLICA

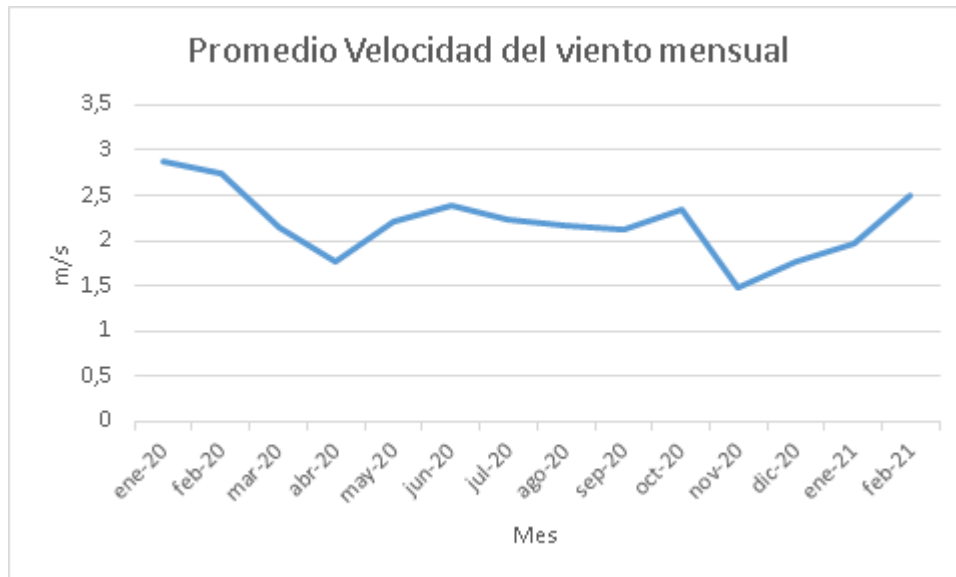
Por otro lado, la energía eólica es un recurso renovable en donde se emplea la fuerza motriz producida por corrientes de viento. En la siguiente sección se mostrará cuanto de este recurso podemos aprovechar y sus diferentes tecnologías de generación.

### 3.2.1. Fuente de energía (Vel. Del viento):

La velocidad del viento es la variable horizontal resultante del desplazamiento del aire a causa de la diferencia de presión entre dos puntos en la atmosfera, esto debido a la variación de temperatura del aire, el instrumento usado para medir velocidad del viento se conoce como anemómetro y la unidad en la que se expresa es metro por segundo (m/s), de manera estandarizada por la Organización meteorológica Mundial (OMM) se mide a más de 10 metros del suelo [27][28].

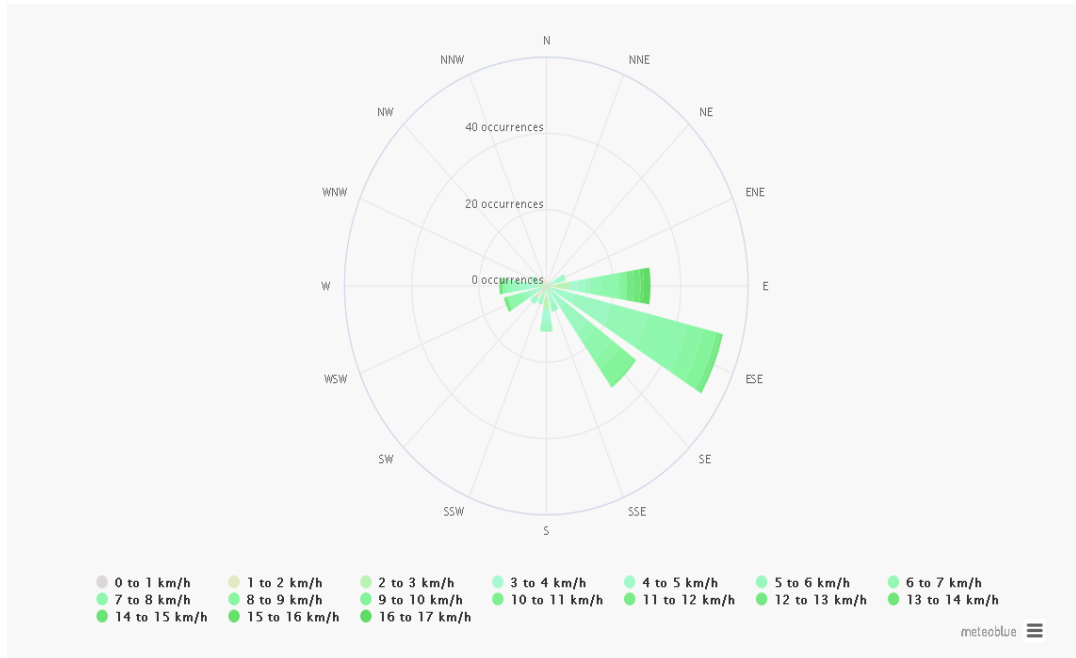
Al igual que con la radiación solar, la herramienta que se utilizó para obtener los datos de la velocidad del viento en las cercanías del edificio APR fue *virtual Power Data Access View by Nasa* y con los datos proporcionados por el software se construyó una gráfica que muestra el promedio de la velocidad del viento durante un periodo de un año (2020-2021).[25]

**Ilustración 9** Gráfica de la velocidad promedio del viento mensual



Fuente: Elaboración propia con base en datos proporcionados por la herramienta Power Data Access View de la NASA

### Ilustración 10 Rosa de los vientos de Bogotá



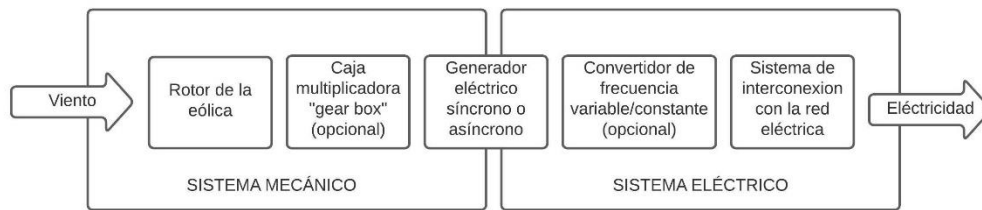
Fuente: Meteoblue

### 3.2.2. Tecnologías de recolección de energía eólica:

#### Definición y funcionamiento

La energía eólica es un tipo de energía renovable la cual se obtiene mediante el movimiento que genera una corriente de viento, este se adquiere a través de unas aspas que se mueven con el flujo de viento en forma de círculos produciendo energía cinética, dicha energía se transfiere a un generador que la convierte en energía eléctrica. Los dispositivos que se usa para obtener esta energía se llaman aerogeneradores y suelen ser torres entre los 20m y hasta 100m, ya que en grandes alturas se puede aprovechar de la mejor manera las corrientes de viento. Para poder posicionar correctamente el aerogenerador según la velocidad del viento se utiliza un sistema de orientación, además, posee un rotor, una caja multiplicadora y un generador eléctrico que convierte energía cinética en mecánica, posteriormente esta energía se transmite a un transformador para que se pueda transmitir por una red eléctrica.

**Ilustración 11 Estructura general de un aerogenerador**







Fuente: Extraído de Villarrubia López, *Ingeniería de la energía eólica*, pág. 160


**Tipos de tecnologías**

Los aerogeneradores se dividen en dos grandes grupos: Verticales y horizontales. Esta clasificación se hace dependiendo de la posición del eje de rotor, los aerogeneradores verticales tienen la característica que son muchísimo más pequeños que los aerogeneradores horizontales, se suelen usar en tejados y son muy comunes en la ciudades, debido a esto no necesitan de un dispositivo que mida la posición del viento ya que no importa en qué posición se encuentra este siempre girarán, este tipo de aerogeneradores son más asequibles en comparación al horizontal pero poseen una gran desventaja y es que no generan tanta electricidad como los horizontales, puesto que el tamaño de sus aspas son más pequeñas, además no se encuentran en lugares donde la velocidad del viento no es muy alta, en comparación a los lugares donde se ubican los aerogeneradores horizontales. [29]

**Tabla 6** Tipos de tecnologías de aerogeneradores

TIPO	CARÁCTERÍSTICA	POTENCIA	ILUSTRACIÓN
Darrieus	Se patentó por G.J.M. Darrieus en el año 1931, consiste en un eje vertical asentado sobre el rotor, además consta con dos palas unidas en los extremos superiores e inferiores del eje, son completamente simétricas y se asemejan a las alas de un avión, esto evita diseños complejos de aerodinámica a comparación de los aerogeneradores horizontales, pero necesita de un arranque extremo.	4 MW	<p><b>Ilustración 12</b> Aerogenerador Darrieus</p>  <p>Fuente: opex-energy.com</p>

Savonius	Fue creado por S.J. Savonius, consiste en semicírculos que se encuentran desplazados respecto a su eje, ofrece una parte convexa que lo ayuda a reducir la resistencia de giro, se caracteriza por tener un sistema de autoarranque, pero posee inconvenientes en su velocidad de giro además de un bajo rendimiento.	5kW	<p><b>Ilustración 13</b> Aerogenerador Savonius</p>  <p>Fuente: <a href="http://noticias.usm.cl">noticias.usm.cl</a></p>
Windside	Es similar a los aerogeneradores Savonius, se diferencia en la estructura de sus aspas, este en vez de tener aspas semicirculares posee un perfil en forma alabeado con torsión que asciende a lo largo del eje, se caracteriza por aprovechar el concepto aerodinámico y se acerca a las eficiencias de los aerogeneradores horizontales.	50 kW	<p><b>Ilustración 14</b> Aerogenerador Windside</p>  <p>Fuente: <a href="http://opex-energy.com">opex-energy.com</a></p>
Tripala	Son los más usados actualmente, se caracterizan por tener tres aspas de 20 m de longitud totalmente aerodinámicas, formando un ángulo de 120 de grados entre ellas.	0.1MW - 1MW	<p><b>Ilustración 15</b> Aerogenerador Tripala</p>  <p>Fuente: Diseño de un aerogenerador para uso particular</p>

Bipala	Se caracterizan por ser menos pesados y más baratos respecto a los aerogeneradores tripala, pero requieren mayor velocidad de giro para producir la misma energía que ellos, también necesitan un diseño más complejo para evitar el efecto desestabilizador y evitar así el choque de las palas con la torre.	1kW	<p><b>Ilustración 16</b> Aerogenerador Bipala</p>  <p>Fuente: Diseño de un aerogenerador para uso particular</p>
--------	--	-----	---

*Nota: Elaboración propia con base en Diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius para electrificación rural.*

### **Instalaciones**

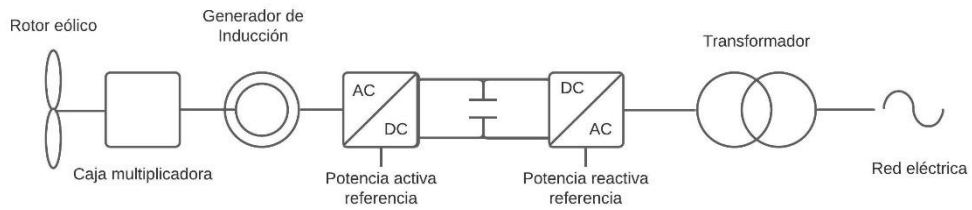
La instalación de un aerogenerador varía de acuerdo con la aplicación y al tipo de aerogenerador, si es de uso para generación de alta potencia esta involucra una logística de maquinaria pesada donde se realiza una perforación de tal modo que queda fija la torre que sujeta las aspas, una vez esté lista, se procede a ser instalada la misma que puede ser un conjunto de cilindros cuyo diámetro debe encajar en la base, así mismo, se instalaran las aspas junto con el rotor y sus demás componentes. Si el aerogenerador es de aplicación domestica algunos fabricantes pueden no incluir la torre o también llamado mástil, este deberá implementarlo el cliente, al ser un aerogenerador mucho más pequeño se surgiere acoplar el sistema de cableado junto al mástil, para así armar la parte del aerogenerador junto con las aspas y probar si efectivamente gira, luego se procede a realizar las respectivas conexiones entre las aspas y el mástil , por último se levanta verticalmente el aerogenerador, la distancia de elevación entre la casa y la torre varía dependiendo del fabricante, al igual si se realiza en un edificio.

En cuanto a sus configuraciones eléctricas, estas cambian según el tipo de generador que posee el dispositivo, si es asíncrono; se pueden encontrar: rotor en jaula de ardilla, rotor devanado con resistencias variables y rotor devanado doblemente alimentado. Cuando el generador es síncrono existen: síncronos con excitación, con electroimanes y síncronos con excitación de imanes permanentes. [29]

### **Rotor en jaula de ardilla**

Se caracteriza por ser de bajo coste, robusto y simple, pero presenta problemas en la regulación de la tensión, en cuanto a la frecuencia necesita energía reactiva del exterior con la ayuda de un pitch se puede mejorar dicha falla.

**Ilustración 17** Estructura aerogenerador con rotor en jaula de ardilla

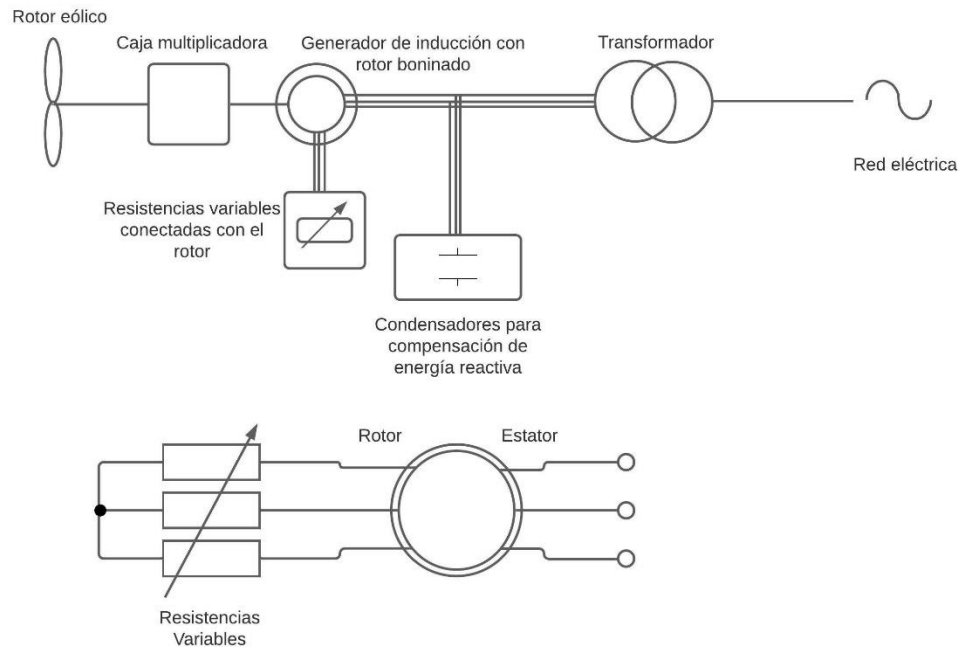


Fuente: Extraído de Villarrubia López, Ingeniería de la energía eólica, pág. 175

**Rotor devanado con resistencias variables**

Se caracteriza por tener rotor bobinado de velocidad variable, además de un rotor eólico de velocidad variable con regulación activa, posee un intervalo de velocidades entre el 2% al 5%.

**Ilustración 18** Estructura aerogenerador con rotor devanado con resistencia variables

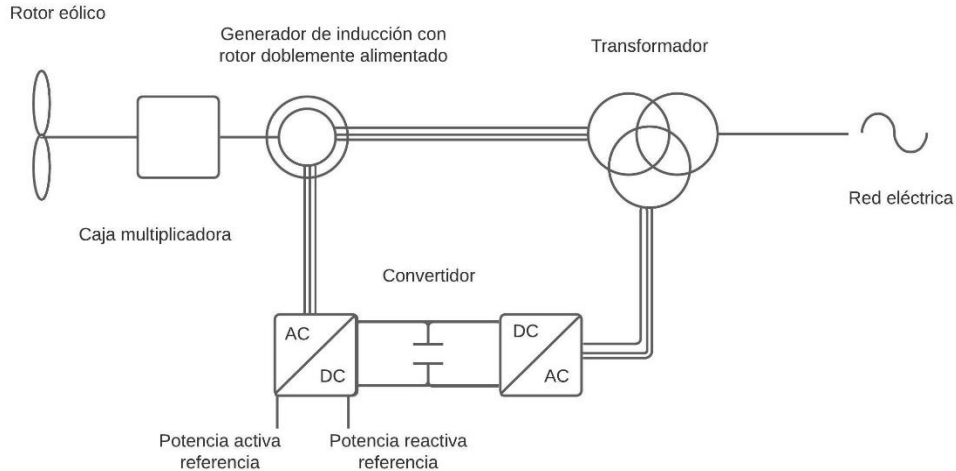


Fuente: Extraído de Villarrubia López, Ingeniería de la energía eólica, pág. 177

**Rotor doblemente alimentado**

Se caracteriza por insertar corrientes trifásicas de fases variables y frecuencia al rotor, mientras tanto el estator se conecta la red eléctrica para el envío de energía eléctrica

**Ilustración 19** Estructura aerogenerador con rotor doblemente alimentado

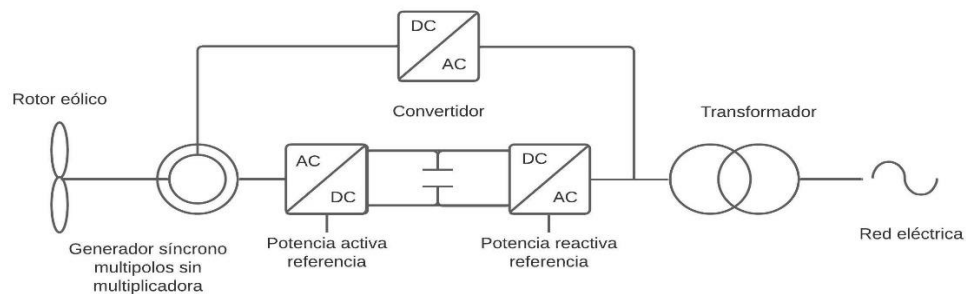


Fuente: Extraído de Villarrubia López, Ingeniería de la energía eólica, pág. 178

### Síncronos con excitación convencional

Se caracteriza por tener un sistema de excitación, el cual se alimenta por DC de un rectificador y por un estator inducido, este genera la corriente eléctrica que posteriormente se lleva hacia la red.

**Ilustración 20** Estructura aerogenerador síncrono con excitación convencional



Fuente: Extraído de Villarrubia López, Ingeniería de la energía eólica, pág. 179

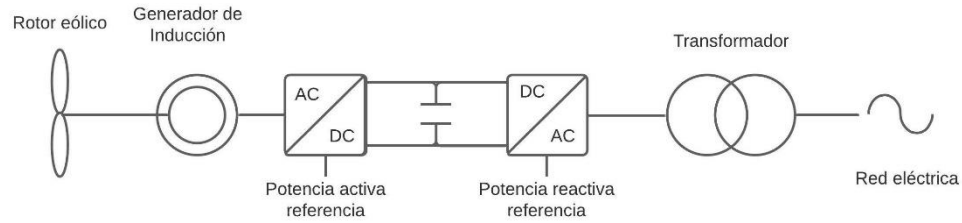
### Síncronos con caja multiplicadora

Se caracteriza porque está formado por imanes fijos, no tiene escobillas, posee un convertidor para la totalidad de la potencia del generador, no tiene regulación activa,



por ende, se necesita un diseño específico para tal fin, por ende, suelen ser más costosos.

**Ilustración 21** Estructura aerogenerador síncrono con cámara multiplicadora

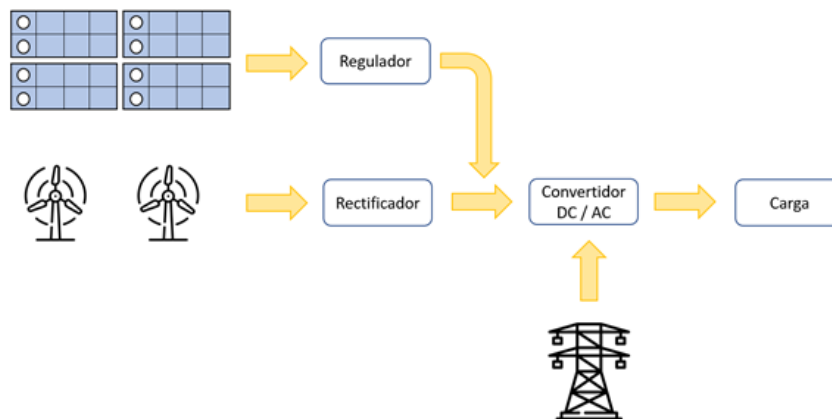


Fuente: Extraído de Villarrubia López, Ingeniería de la energía eólica, pág. 180

### 3.3. SISTEMA HÍBRIDO (EÓLICO - SOLAR)

Un Sistema Híbrido es la combinación de múltiples sistemas que se comunican para cumplir una necesidad particular. En términos de energías renovables, un sistema híbrido abarca dos o más tecnologías de recolección de energía y las mezcla para abastecer la demanda energética de un espacio. La eficiencia de algunas de estas tecnologías viene dada por múltiples factores, entre los que se incluyen: ubicación geográfica (macro localización y micro localización) y clima (velocidad del viento y radiación solar), es por esta razón que se agrupan múltiples tecnologías para mejorar la capacidad de abastecimiento, con el fin de que, si alguna falla o no produce una cantidad aceptable de energía, la otra tecnología supla o complemente el aprovisionamiento de energía. A continuación, se muestra una posible conexión básica de un sistema híbrido eólico-solar

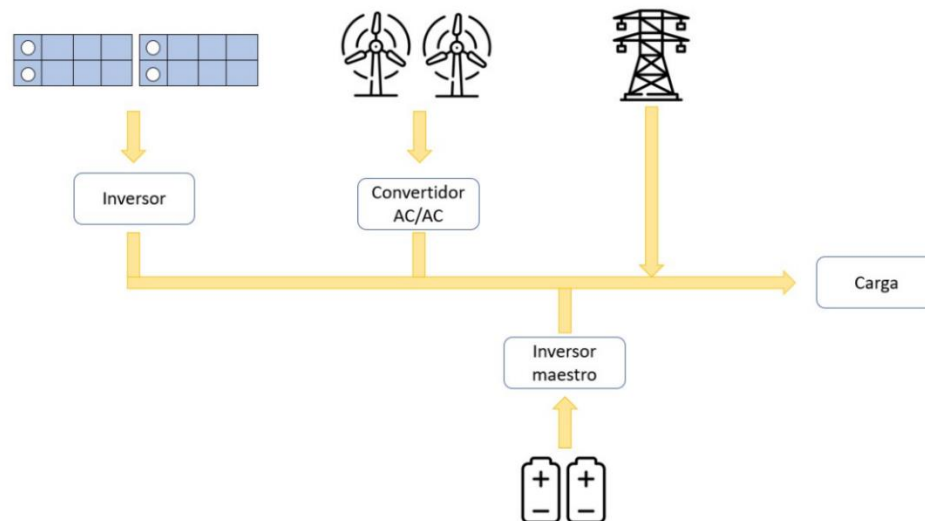
**Ilustración 22** Sistema híbrido eólico-solar conectado a la red eléctrica



Fuente: Fuente: Elaboración propia basándose en Rojas, Sistema híbrido eólico fotovoltaico para autoabastecimiento de energía eléctrica en el sector rural, pág.3

Esta configuración muestra como la energía proveniente de los paneles solares y de las turbinas eólicas pasa por un regulador de voltaje DC/DC y un rectificador AC/DC respectivamente para posteriormente introducirse a la red eléctrica en el convertidor DC/AC con el fin de ser suministrada la carga.

**Ilustración 23** Sistema híbrido eólico-solar conectado a la red eléctrica y con banco de baterías



Fuente: Elaboración propia basándose en Garcés, Gestión para el desarrollo y diseño de un sistema energético híbrido eólico-solar para aplicaciones en zona no interconectada (ZNI) de Colombia, pág. 16

Esta configuración muestra como la energía proveniente de los paneles solares y de las turbinas eólicas se unifican antes de entrar al inversor, con el fin de aumentar las horas de trabajo, en el caso que alguno de los sistemas de energía renovable decretezca en su producción, el sistema de baterías suple este déficit con la energía almacenada.

A lo largo del capítulo se expusieron las principales características de los sistemas eólicos y fotovoltaicos. Para las tecnologías solares se debe tener en cuenta que la radiación solar presente en el lugar a implementar es la principal variable, ya que de esta depende la eficiencia proveniente de las celdas, otra característica importante es el material con el cual están hechas las mismas, este también influye en la eficiencia del sistema, además se mencionan brevemente los tipos de instalaciones y de configuraciones que pueden optar los sistemas fotovoltaicos.

En las tecnologías eólicas la principal variable a tener en cuenta es la velocidad del viento en el lugar de la implementación, se mencionan los diferentes tipos de aerogenerador de acuerdo a su rotor con sus respectivas configuraciones, características e instalaciones, finalizando el capítulo, se encuentran los tipos de sistemas híbridos eólicos-solares diseñados en los últimos años, destacando los más

comunes con sus características, las cuales se tendrán en cuenta en el siguiente capítulo a la hora de desarrollar el sistema híbrido eólico-solar para el edificio.

## 4. DISEÑO DEL SISTEMA HÍBRIDO

### 4.1. SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA HÍBRIDO

Para seleccionar los diferentes componentes de generación, almacenamiento y conversión es necesario realizar una serie de cálculos. En este apartado, se muestran dichos cálculos, los diferentes elementos seleccionados y su razón de selección.

#### 4.1.1. Cálculos generales

Previo al diseño del sistema híbrido eólico solar se debe tener en cuenta algunas variables preliminares, como los son el área donde este se va a implementar, así como, las potencias energéticas teóricas que provienen de los paneles solares y los aerogeneradores.

##### Área del techo:

El techo del edificio tiene un área de aproximadamente de  $268.48m^2$ , debido a la problemática de la pandemia fue imposible tomar medidas exactas en el lugar a implementar, por tal motivo, se utilizó la herramienta de medición de la plataforma Google Earth, las imágenes que se muestran a continuación muestran dicha medición [23]

**Ilustración 24** Imagen satelital del edificio APR



*Fuente: Elaboración propia haciendo uso de Google Earth*

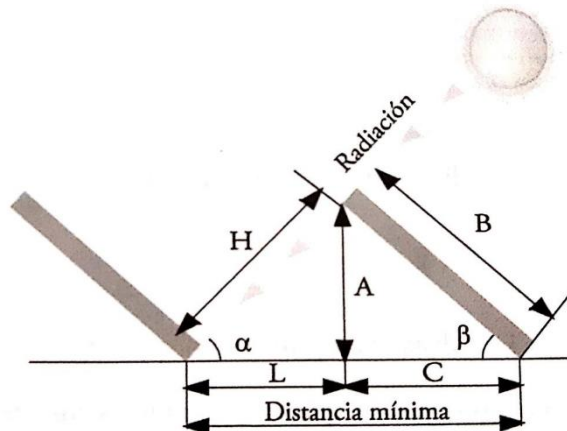
#### 4.1.2. Cálculos y selección del sistema fotovoltaico

##### Paneles Solares:

Una de las variables más importantes para tener en cuenta a la hora de diseñar una instalación fotovoltaica es la distancia mínima ( $D_m$ ) que debe existir entre los

paneles para que no se proyecten sombras entre ellos y disminuya la eficiencia, la siguiente imagen muestra las variables que se deben tener en cuenta para calcular la distancia mínima de panel a panel.

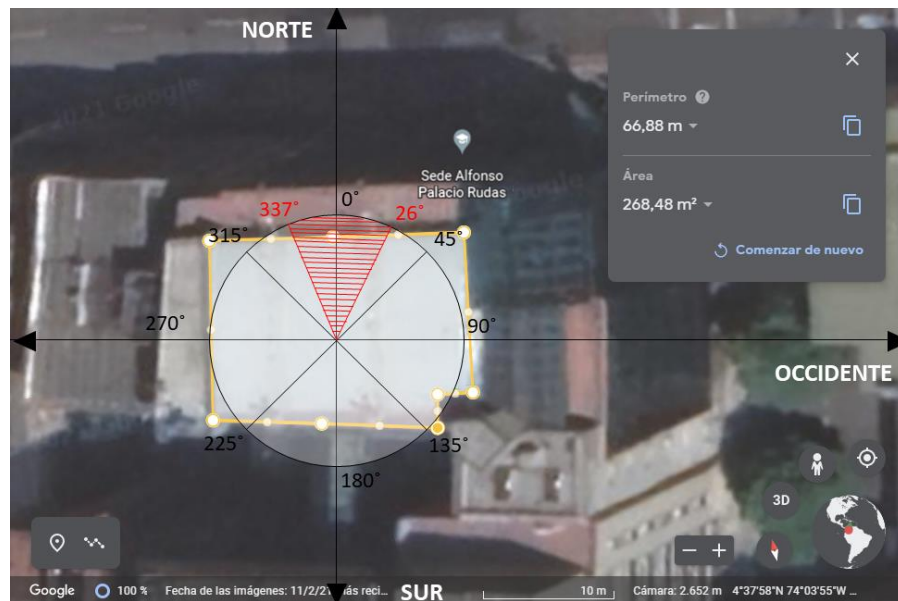
**Ilustración 25** *Distancia mínima de panel a panel*



Fuente: Extraído de Tobajas, Energía Solar Fotovoltaica, Pág. 43

Se uso el *software de gestión de energías limpias* RETScreen para obtener el rango de valores que puede tomar el ángulo  $\alpha$  (Acimut), dicho ángulo define la orientación de los paneles solares con respecto a la posición del sol, se usa para lograr la máxima eficiencia posible y depende de la posición geográfica del lugar en donde se realiza el estudio, los valores que se obtuvieron se encuentran entre  $337^\circ$  y  $26^\circ$ , la siguiente imagen se basa en el gráfico de la rosa de los vientos, dicho grafico muestra los puntos cardinales y los rumbos laterales dentro de una circunferencia en donde el norte corresponde a  $0^\circ$ . [30]

## Ilustración 26 Rango óptimo de orientación de paneles solares


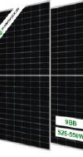



Fuente: Elaboración propia haciendo uso de Google Earth.

En la imagen anterior se tiene el rango de valores que puede tomar el ángulo  $\alpha$  con respecto a la orientación del edificio, por fines prácticos se toma el valor  $0^\circ$  como la orientación de los paneles, es decir en dirección norte, esto debido a que el valor está dentro del intervalo de mayor eficiencia y facilita la ubicación y distribución de los paneles solares.

En la siguiente tabla se muestran algunas versiones de paneles solares monocristalinos con las potencias y eficiencias más altas que se pueden encontrar en el mercado, se optó por panel monocristalino ya que según la literatura este tipo de panel logra la mayor eficiencia a lo largo de la vida útil del dispositivo, el valor de eficiencia promedio se encuentra entre el 20 y 24% en frente del 12 y 14% por parte de los paneles policristalinos, algunas desventajas que tiene el escoger un panel monocristalino sobre un policristalino son; el costo de los paneles, ya que los monocristalinos tienden a costar más, también es más sencillo definir la distribución de los paneles con la versión policristalina debido a su forma, por tal razón se puede optimizar un poco más el espacio que ocupan; sin embargo, para este diseño se priorizo la eficiencia y la potencia máxima, con el fin de suplir el porcentaje más grande posible del edificio. Con lo dicho anteriormente se considera que el panel SW550W-144 posee las características más acordes a las necesidades del diseño.

**Tabla 7** Características de paneles fotovoltaicos elegidos

Item	Imagen	Línea	Tipo	Potencia máximo	Voltaje máximo	Eficiencia	Dimensiones (Cm)
DE19							
1		Vertex	Monocristalino	550W	31,8V	21,20%	238,4 x 109,6
SW550W-144							
2		Sunway Solar	Monocristalino	550W	41,6V	21,50%	225,6 x 113,3
340W 24V Policristalino ERA							
3		ERA solar	Policristalino	340W	38,5V	17,50%	195,6 x 99,2

*Nota: Elaboración propia con base de datasheet provenientes de fabricantes Vertex, Sunway Solar y ERA solar.*

Ahora se procede a calcular la distancia mínima de panel a panel, esto con el fin de que la proyección de las sombras entre los paneles no afecte la eficiencia del sistema al obstruir la superficie de estos.

#### **Declinación:**

$$\delta(^{\circ}) = -23,45 \times \sin\left(360 \times \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2)$$

$$\delta(^{\circ}) = -23,45 \times \sin\left(360 \times \frac{284 + 356}{365}\right) = 23,44^{\circ}$$

Siendo  $\delta(^{\circ})$  el ángulo resultante entre el eje del ecuador terrestre con los rayos de sol (Declinación) y  $n$  el número del día del año, se calcula para el día 356 debido a que corresponde al día con el mayor número de horas de sol, se conoce como solsticio de invierno y sucede cuando el eje de tierra alcanza su máxima inclinación con respecto al sol.

#### **Altura solar mínima:**

$$\alpha_{min} = (90^{\circ} - l_l) - \delta(^{\circ}) \quad (3)$$

$$\alpha_{min} = (90^{\circ} - 4.632917^{\circ}) - 23,44^{\circ} = 61,92^{\circ}$$

Siendo  $\alpha_{min}$  la altura solar mínima,  $l_l$  la latitud del lugar y  $\delta(^{\circ})$  la declinación.

**Distancia mínima:**

$$Dm = B \times \cos \beta + \frac{B \times \sin \beta}{\tan \alpha_{min}} \quad (4)$$

$$Dm = 2,256m \times \cos 20^\circ + \frac{2,256 \times \sin 20^\circ}{\tan 61,92^\circ} = 2,5315m$$

Siendo ***Dm***: La distancia mínima entre paneles, ***β*** es el ángulo de inclinación del panel con respecto al suelo, ***tan α<sub>min</sub>*** distancia mínima para que no haya sombra entre los paneles, ***B*** la longitud del panel.

**Número de paneles:**

Se estableció un área de 10.77m por 19m para la instalación fotovoltaica, considerando que el espacio mínimo entre paneles es de 2.5315m, se selecciona una distancia de 3.5315m como espacio entre panel y panel, con el fin de facilitar el tránsito y el mantenimiento dentro de la instalación, en base a lo anterior se procede a hacer los cálculos de producción de energía.

Teniendo un área útil de 19m por 10.77m se tiene que:

$$\text{Número filas} = \frac{\text{Ancho área paneles} - \text{Borde seguridad}}{\text{Distancia minima}} \quad (5)$$

$$\text{Número filas} = \frac{10,77m - 2m}{2,5315m} = 3,46 \approx 3$$

$$\text{Número columnas} = \frac{\text{Largo área paneles} - \text{Borde seguridad}}{\text{Ancho de los paneles}} \quad (6)$$

$$\text{Número columnas} = \frac{19m - 2m}{1,133m} = 15,004 \approx 15$$

$$\begin{aligned} \text{Numero de paneles} &= \text{Número columnas} * \text{Números de filas} \\ &= 3 \times 15 = 45 \end{aligned} \quad (7)$$

**Cálculos de producción:**

Para conocer las capacidades de producción del sistema híbrido y la energía que deberá manejar el controlador se plantean tres escenarios con diferentes condiciones.

A continuación.



$$HORA SOLAR PICO (HSP) = \frac{Irradiación\ global}{1000 \frac{W}{m^2}} \quad (8)$$

$$Energía\ Generada = W_{panel} \times HSP \times \text{Número de paneles} \quad (9)$$

$$\text{Porcentaje de energía cubierto} = \frac{Energía\ producida}{Energía\ consumida} \quad (10)$$

Teniendo las condiciones promedio para la Radicación solar con un valor de  $4.24 \frac{kwh}{m^2}$  usando las ecuaciones (8), (9) y (10):

$$HSP = \frac{4.24 \frac{kwh}{m^2}}{1000 \frac{W}{m^2}} = 4.24\ h$$

$$Energía\ Generada = 550w \times 4.24\ h \times 45 = 104.94kwh$$

$$\text{Porcentaje de energía cubierto} = \frac{104.94kwh}{459.28kwh} = 22.84\%$$

Teniendo las condiciones más ideales (solsticio de verano), usando las ecuaciones (8), (9) y (10):

$$Rad.\ Solar = 7.05 \frac{kwh}{m^2}, \text{ Horas de luz} = 12.3\ h \quad (11)$$

$$SP = \frac{7.05 \frac{kwh}{m^2}}{1000 \frac{W}{m^2}} = 7.05\ h$$

$$Energía\ Generada = 550w \times 7.05\ h \times 45 = 174.48\ kWh$$

$$\text{Porcentaje de energía cubierto} = \frac{174.48kwh}{459.28kwh} = 37.96\%$$

Teniendo condiciones no ideales (solsticio de invierno), usando las ecuaciones (8), (9) y (10):

$$Rad.\ Solar = 1.67 \frac{kwh}{m^2}, \text{ Horas de luz} = 11.7\ h \quad (12)$$

$$HSP = \frac{1.67 \frac{kwh}{m^2}}{1000 \frac{W}{m^2}} = 1.67\ h$$

$$Energía\ Generada = 550w \times 1.67\ h \times 45 = 41.33kwh$$




$$\text{Porcentaje de energía cubierto} = \frac{41.33\text{kwh}}{459.28\text{kwh}} = 8.9\%$$

### 4.1.3. Cálculos y selección del sistema eólico

#### Aerogeneradores:

Para la selección de los aerogeneradores se optó por consultar varios del tipo vertical, esto debido a que son más empleados en la ciudad por su baja potencia y porque no dependen de una dirección específica para aprovechar el flujo de viento. La siguiente tabla muestra los aerogeneradores que más se adecuan a las condiciones del edificio.

**Tabla 8** Características de aerogeneradores elegidos

ítem	Imagen	Marca	Potencia Max	Voltaje Salida	Altura	Diámetro	Vel. Min	Vel. Estabilización
WS-WT400W								
1		Wellsee	400w	12/24V	1, 1m	0,385m	1,5 m/s	12 m/s
LST100W								
2		Lectstyle	130w	12/24V	1,1m	1,12m	1,5 m/s	11 m/s
NE-100SV								
3		Naier	100w	12/24V	0,93m	0,47m	1,5 m/s	11 m/s

*Nota: Elaboración propia con base de los fabricantes: Wellsee, Lectstyle y Naier.*

Al final se decidió utilizar el primer aerogenerador por su alta capacidad de potencia, su velocidad de arranque baja y su posibilidad de estabilizarse a una velocidad no tan considerable.

$$\text{Área disponible} = 14\text{m} \times 4\text{m} = 56\text{m}^2 \quad (13)$$

Teniendo el área disponible distribuida en forma de rectángulo se dejó libre un marco de seguridad con el borde de 0,5m a cada lado. Además de un metro entre columnas por motivo de mantenimiento. A cada aerogenerador se le asignó un radio perimetral

de 0, 25m con el fin de que el viento fluya a través de estos. A partir de lo anterior, se calcula el número de aerogeneradores:

**Calcular el número de aerogeneradores:**

La ecuación (14) muestra el diámetro total perimetral que corresponde al área asignada de separación entre los aerogeneradores.

$$\sigma_{Total\ perimetral} = \sigma_{Diametro\ aerogenerador} + \sigma_{Diametro\ perimetral} \quad (14)$$

$$\sigma_{Total\ perimetral} = 0,385m + 0,5m = 0,885m$$

$$Número\ de\ columnas = \frac{(A - B) - S}{\sigma_{Total\ perimetral}} \quad (15)$$

$$Número\ de\ columnas = \frac{(4m - 1m) - 1m}{0,885m} = 2,25 \approx 2$$

Teniendo en cuenta el diámetro total perimetral junto a el área disponible para el sistema se haya el número de columnas (15) para la ubicación de los aerogeneradores, en donde A indica el ancho del área, B el borde de seguridad y S separación media entre aerogeneradores.

Para el cálculo del número de filas corresponde a la ecuación (16), en donde L es el largo del área y B el borde de seguridad.

$$Número\ de\ filas = \frac{L - B}{\sigma_{Total\ perimetral}} \quad (16)$$

$$Número\ de\ filas = \frac{14m - 1m}{0,885m} = 14,68 \approx 14$$

Por lo tanto, el número total de aerogeneradores corresponde a la ecuación (17)

$$\begin{aligned} Número\ de\ aerogeneradores &= Número\ de\ filas \times Número\ de\ columnas \\ &= 14 \times 2 = 28 \end{aligned} \quad (17)$$

**Generación eléctrica:**

Para conocer cuanto consumo cubriría el diseño eólico, se plantearon tres escenarios similares a los expuestos para el diseño solar. En estos escenarios no se toman en cuenta las variables aerodinámicas presentes al juntar varios aerogeneradores en área muy concentrada, por lo que son casos ideales.

**Generación mínima:**

En este escenario la generación eólica es nula ya que la velocidad del viento (recurso eólico) no es el suficiente para mover el aerogenerador. Por lo tanto, la potencia mínima es igual a 0W.

$$\text{Energía aerogenerador} = \text{Potencia aerogenerador} * \text{Horas activo} \quad (18)$$

$$\text{Energía aerogenerador} = 0w \times 24h = 0wh$$

$$\text{Energía total} = \text{Energía aerogenerador} \times \text{Número aerogeneradores} \quad (19)$$

$$\text{Energía total} = 0wh \times 28 = 0wh$$

$$\text{Porcentaje energía cubierto} = \frac{\text{Energía producida}}{\text{Energía consumida}} \quad (20)$$

$$\text{Porcentaje energía cubierto} = \frac{0wh}{459,28wh} = 0 \approx 0\%$$

#### **Generación Promedio:**

Este escenario será el más probable, el aerogenerador alcanza a producir energía, pero no llega a su máxima capacidad, con una potencia del aerogenerador promedio de 8,95W, utilizando las ecuaciones (18), (19) y (20).

$$\text{Energía aerogenerador} = 8,95w \times 24h = 214,8wh$$

$$\text{Energía total} = 214,8wh \times 28 = 6.014KWh$$

$$\text{Porcentaje energía cubierto} = \frac{6,014kwh}{459,28kwh} = 0,013 \approx 1,3\%$$

#### **Generación Máxima:**

En este escenario se sobrepasa la energía que se quiere abastecer, llegando a una posible sobrecarga de la red eléctrica, con una potencia del aerogenerador máxima de 109,4W y utilizando las ecuaciones (18), (19) y (20).

$$\text{Energía por aerogenerador} = 109,4w \times 24h = 2625,6Wh$$

$$\text{Energía total} = 2625,6wh \times 28 = 73.516KWh$$

$$\text{Porcentaje energía cubierto} = \frac{73,51kwh}{459,28kwh} = 0,16 \approx 16\%$$

#### **4.1.4. Selección de Inversores**


Teniendo en cuenta que el consumo del edificio es de 459,28kWh y basándose en los cálculos de los sistemas eólico-solar, se puede afirmar que:

**Tabla 9** Resumen de los cálculos obtenidos en los tres escenarios.

Sistema	Energía Mínima Generada	Energía Promedio Generada	Energía Máxima Generada
Solar	41.33kWh (8.90%)	104.94kWh (22.84%)	174.48kWh (37.94%)
Eólico	0 kWh (0%)	6.01kWh (1,3%)	73.51kWh (16%)
<b>Total</b>	41.33kWh (8.90%)	110.86kWh (24.14%)	247.80kWh (53.94%)

Con base a la energía de cada uno de los subsistemas, se seleccionó un inversor adecuado. La tabla mostrada a continuación muestra dicho inversor con sus respectivas características:

**Tabla 10** Características de convertor DC/AC elegido

Ítem	Imagen	Modelo	Entrada DC	Potencia (W)	Salida AC	Eficiencia	Frecuencia
1		BZP-20KW	220-240V	20000	120V	93%	50-60

*Nota: Elaboración propia con base a los datos que proveen los fabricantes: Bangzhao And OM*

Con estas características se determina cuanta potencia recibe el controlador, dicha potencia se usa como punto de referencia para el umbral de sobrecarga que tolera el mismo y también como márgenes de la señal a controlar. Teniendo en cuenta que el primer inversor se emplea para el sistema eólico y el segundo para el fotovoltaico, se empleó la fórmula (21) en donde  $P_s$  es potencia subsistemas,  $P_c$  potencia componte,  $N_c$  número de componentes.

$$P_s = P_c \times N_c \quad (21)$$

**Tabla 11** Resultados teóricos de potencia subsistema

Sistema	Potencia Máxima Generada
Solar	24750W
Eólico	3063.2W
<b>Total</b>	27813.2W

#### 4.1.5. Selección de Baterías

De acuerdo con las características del inversor (Tabla 10) y suponiendo un abastecimiento de 5 horas para el mismo, se realiza la selección de baterías que sean compatibles con el respectivo voltaje, para determinar sus respectivas características se realizaron los siguientes cálculos:

$$\begin{aligned} \text{Generación booster total} \\ = \text{Generación booster solar} + \text{Generación booster eólico} \end{aligned}$$

$$\text{Corriente generada} = \frac{\text{Generación booster total}}{\text{Voltaje inversor}}$$

$$\text{Capacidad en amperios} = \text{Corriente generada} * \text{horas de uso}$$

$$\text{Capacidad de la batería} = \frac{\text{Capacidad en amperios}}{0,5}$$

$$\text{Generación booster total} = 14000W + 3000W = 17000W$$


$$\text{Corriente generada} = \frac{17000W}{220V} = 77.27A$$

$$\text{Capacidad en amperios} = 77.27A * 5h = 386.36Ah$$

$$\text{Capacidad de la batería} = \frac{386.36Ah}{0,5} = 772.72Ah$$

En la capacidad de la batería se realiza una división del 50 por ciento con el fin de duplicar la capacidad de la batería, esta al descargarse solo la mitad, aumenta considerablemente su vida útil.

**Tabla 12** Características de la Batería elegida

Ítem	Imagen	Modelo	Entrada DC	Capacidad (Ah)
1		BAE C100	24 V	788

Nota: Elaboración propia con base a los datos que proveen los fabricantes: AutoSolar.

## 4.2. CONTROLADORES

### 4.2.1. Definición

Un controlador es un dispositivo o algoritmo que se caracteriza por evaluar y corregir la señal de entrada de un sistema dinámico basándose en una señal de referencia, es decir, el controlador se encarga de modificar la señal del sistema haciéndola muy similar a la señal de referencia, este tipo de control se realiza en sistemas de lazo cerrado, pero también existen sistemas de lazo abierto los cuales poseen un solo coeficiente para modificar la señal, por lo que no ocurre retroalimentación y no hay comparación entre dos señales. Para un adecuado diseño de un controlador se necesita realizar modelamientos matemáticos del sistema. [31]

### 4.2.2. Controlador PI (Proporcional - Integral)

El controlador PI combina las funciones de un controlador proporcional y un controlador integral. En un controlador proporcional se multiplica la señal de control por un coeficiente  $k_p$ , haciendo que la diferencia entre estas disminuya. En un controlador integral se integra la señal de error con el fin de restarla a la señal de control, causando así que los errores sean nulos. Al combinar estas dos formas de control se tiene que el error proporcional es nulo y se garantiza el tiempo de estabilización, sin embargo, se puede presentar un aumento en los sobre picos. [31]

$$C(s) = \frac{k_p s + k_i}{s} \quad (22)$$

### 4.2.3. Controlador PD (Proporcional - Derivativo)

Este controlador contiene una constante proporcional y una derivativa, las cuales se suman y como resultado se obtiene la etapa de control, en efectos prácticos la acción derivativa permite que se adelante la velocidad a la constante proporcional haciendo que haya reducción de sobre picos, tiempo de estabilización y oscilaciones, pero tiende a ser un controlador sensible a los cambios bruscos ya que amplifica el ruido. [31]

$$C(s) = \frac{(k_p + k_d)s + p k_p}{s + p} \quad (23)$$

### 4.2.4. Controlador PID (Proporcional – Integral - Derivativo)

Este controlador integra todas las acciones ya mencionadas, este es el controlador más robusto debido a que al integrar todas las acciones garantiza un error proporcional nulo,

reduce los sobre picos y el tiempo de estabilización, es ideal para todo tipo de sistema. [31]

$$C(s) = \frac{kds^2 + kps + ki}{s} \quad (24)$$

#### **4.2.5. Controlador PR (Proporcional - Resonante)**

El controlador proporcional resonante es una evolución del controlador PI tradicional, ya que presenta mejoras en cuanto a que su diseño reduce el error en estado estacionario para referencias sinusoidales. [31]

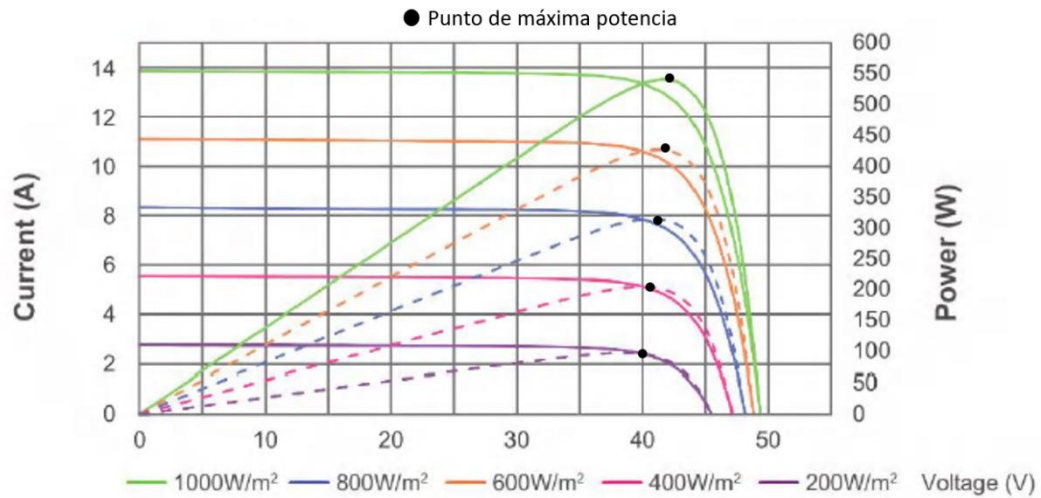
$$C(s) = \frac{kis}{s^2 + s\omega_a + \omega_0^2} \quad (25)$$

#### **4.2.6. Controlador MPPT (Seguidor de punto de máxima potencia)**

Un controlador MPPT (Maximum power point Tracker) es una técnica usada en montajes de generación de energía renovable, generalmente en sistemas fotovoltaicos (también se ven aplicaciones de aerogeneradores), ya que la energía generada por el sistema fotovoltaico depende de factores como la irradiancia y la temperatura en los paneles, debido a esto, el punto de máxima potencia MPP no es constante y siempre varía a lo largo del día, la siguiente gráfica proporcionada por el fabricante muestra el comportamiento de la energía dependiendo de las variables mencionadas anteriormente.



**Ilustración 27** Representación gráfica del punto de máxima potencia MPP



Fuente: SUNWAY SOLAR.

#### 4.2.7. Controlador ON / OFF

El controlador ON/OFF es uno de los controladores más simples que se pueden implementar en un sistema, consiste en establecer uno o varios valores de referencia (setpoint) en el procesamiento de la señal de entrada, con esto se logra alternar la variable de control entre dos estados, siendo dichos estados: totalmente encendido (ON) o totalmente apagado (OFF).

#### 4.2.8. Ventajas y desventajas de los controladores

Para poder apreciar mejor las diferencias entre los controladores y poder tomar una decisión, se realizó la siguiente tabla comparativa:

**Tabla 13** Ventajas y desventajas de los controladores

Controlador	Ventajas	Desventajas
PI	El error en estado estacionario es nulo. Se garantiza el tiempo de estabilización.	La amplitud del sobre pico puede ser más alta de lo esperado.
PD	Reducir el tiempo de estabilización.	El error en estado estacionario nunca será nulo.

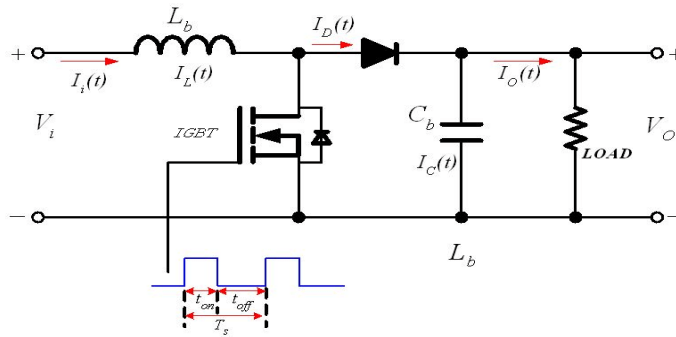
	Disminuir el error en estado estacionario. Reducir la amplitud de los sobre picos.	Disminuye un poco la velocidad del sistema.
PID	El error proporcional es nulo. Reducir la amplitud de los sobre picos. Disminuir el tiempo de estabilización.	Es más propenso a oscilar. La configuración de sus parámetros suele ser muy compleja.
PR	El error de estado estacionario es nulo para señales sinusoidales. Se garantiza el tiempo de estabilización en señales sinusoidales.	Sobre picos más alto de lo esperado en señales sinusoidales.
MPPT	Entrega la máxima potencia de un circuito, lo cual es más eficiente en comparación a los controladores clásicos.	Depende de un PI o PID para estabilizarse más rápido

### 4.3. DISEÑO DEL CONTROLADOR

#### 4.3.1. Introducción

De acuerdo con los controladores vistos en la comparación anterior, se seleccionó el MPPT por su capacidad para entregar la máxima potencia posible, además que por su campo de aplicación es el apropiado para controlar el sistema híbrido, para llevar a cabo este tipo de control, se implementó un diseño de un convertidor Booster, lo cual se encarga de elevar el voltaje de entrada, posee dos estados, el primero sucede cuando el transistor conmuta de tal manera que carga la bobina, en el segundo estado el transistor deja de conmutar de modo que se transmite la carga de la bobina hacia el diodo, condensador y la carga. Cabe destacar que para que se repita estos dos modos de carga se utiliza un PWM para que dentro de un ciclo infinito sature el transistor, es decir, habilita y deshabilita la corriente del Booster.[36 pág. 191] Para términos prácticos se controló dicho PWM con un controlador PI (en el capítulo 5 se muestra el detalle del circuito).

**Ilustración 28** Representación gráfica del convertidor Booster.  
Representación gráfica del convertidor Booster



Fuente: *High Amperage Boost Converter Design - Power supply & electronic component design - Eng-Tips*

A continuación, se presenta el diseño de los conversores y controladores PI con sus respectivos cálculos, posteriormente se presenta el algoritmo del MPPT.

#### 4.3.2. Diseño del hardware

##### Cálculos del Booster Solar:

Teniendo los datos de los paneles fotovoltaicos (Ver imagen pág. 46), los voltajes calculados en el capítulo 3 para el sistema fotovoltaico y una resistencia de carga de 2 Ohm. Se realizan los cálculos del circuito booster Solar:

$$V_{input} = 120.24V - 170V \quad (26)$$

$$V_{output} = 192V \quad (27)$$

$$Rated\ power = 14Kw \quad (28)$$

$$f_{sw} = 5Khz \quad (29)$$

$$Current\ ripple, \Delta I = 5\% \quad (30)$$

$$Voltage\ ripple, \Delta V = 1\% \quad (31)$$

Los datos mostrados anteriormente son parámetros de diseño del booster, con base en la ecuación (6) y (28), se halla la ecuación (32).

$$Input\ current = \frac{Rated\ Power}{V_{input}} = \frac{14Kw}{120.24} = 116.43\ A \quad (32)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (30) y (31):

$$\Delta_I = 116.43A \times 5\% = 5.82A$$

$$\Delta_V = 192V \times 1\% = 1.92V$$

Así mismo con base en las ecuaciones (27) y (28), se halla la ecuación (33).

$$\text{Output current, } I_o = \frac{14Kw}{192V} = 72.91A \quad (33)$$

Para calcular el inductor y el capacitor se emplearon las ecuaciones (34) y (35):

$$L = \frac{V_i(V_o - V_i)}{f_{sw} \times \Delta_I \times V_o} = \frac{170V(192V - 170V)}{5Khz \times 5.82A \times 192V} = 669.38\mu H \quad (34)$$

$$C = \frac{I_o (V_o - V_i)}{f_{sw} \times \Delta_V \times V_o} = \frac{72.91A(192V - 170V)}{5Khz \times 1.92V \times 192V} = 870.23\mu F \quad (35)$$

### Calculo control PI Solar:

Sabiendo que el Booster posee dos estados (conducción y corte) se emplean dos ecuaciones resultantes de su modelo, las cuales son:

$$G_1(s) = \frac{v_o(s)}{u(s)} = \frac{-V_o}{(1-U)RC} \times \frac{s - \frac{R(1-U)^2}{L}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{(1-U)^2}{LC}} \quad (36)$$

$$G_1(s) = \frac{v_o(s)}{u(s)} = \frac{-V_o s + V_o \left( \frac{R(1-U)^2}{L} \right)}{(1-U)RCs^2 + (1-U)s + (1-U)RC \left( \frac{(1-U)^2}{LC} \right)} \quad (37)$$

$$G_2(s) = \frac{v_o(s)}{v_s(s)} = (1-U) \times \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{(1-U)^2}{LC}} \quad (38)$$

$$G_2(s) = \frac{v_o(s)}{v_s(s)} = \frac{\frac{(1-U)}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{(1-U)^2}{LC}} \quad (39)$$

Reemplazando los valores del booster y ciclo de trabajo (U) en la ecuación (37) y (39) quedaría:

$$G_1(s) = \frac{v_o(s)}{u(s)} = \frac{-192s + 550948.04}{1.7056 \times 10^{-3}s^2 + 0.98s + 2812.13}$$

$$G_2(s) = \frac{v_o(s)}{u(s)} = \frac{1682361.38}{s^2 + 574.56s + 1648714.16}$$

Para el diseño del controlador PI (22) se tomó únicamente la ecuación (37) ya que esta ecuación relaciona el voltaje de salida con el ciclo de trabajo, por lo tanto, el T(s) es de:

$$T(s) = \frac{C(s) \times G(s)}{1 + C(s) \times G(s)} \quad (40)$$

$$T(s) = \frac{-192k_p s^2 + (550948.04k_p - 192k_i)s + 550948.04k_i}{1.7056 \times 10^{-3}s^3 + (0.98 - 192k_p)s^2 + (550948.04k_p - 192k_i + 2812.13)s + 550948.04k_i}$$

Se calcula el factor de amortiguamiento con un sobre pico del 0.85.

$$\varepsilon = \frac{|l_n(s_p)|}{\sqrt{\pi^2 + l_n^2(s_p)}} \quad (41)$$

$$\varepsilon = \frac{|l_n(0.8586)|}{\sqrt{\pi^2 + l_n^2(0.8586)}} = 0.04844312072$$

Posteriormente se calcula la frecuencia natural  $[w_n]$  con un tiempo de estabilización de 32.78

$$\omega_n = \frac{4.5}{\varepsilon \times T_s} = \frac{4.5}{(0.04844312072)(32.785179)} = 2.833367068 \quad (42)$$

$$DT(s) = s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + 0.2743s + 8.0309 \quad (43)$$

$$\overline{DT(s)} = DT(s) \times (s + b) \quad (44)$$

$$DT(s):S_{1,2} = -\varepsilon\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \varepsilon^2} \quad (45)$$

$$b \geq 5\varepsilon\omega_n = 0.6862857145$$

$$\overline{DT(s)} = (s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2)(s + 5\varepsilon\omega_n)$$

$$\overline{DT(s)} = (s^2 + 0.2745142858s + 8.027968942)(s + 0.6862857145)$$

$$\overline{DT(s)} = s^3 + 0.9608s^2 + 8.21636s + 5.5$$

Igualando los denominadores:

$$550948.04k_i = 5.50948$$

$$0.98 - 192k_p = 0.9608$$

$$k_i = 1 \times 10^{-5}$$

$$k_p = 1 \times 10^{-4}$$

### Cálculos Booster Converter Eólico:

$$V_{input} = 12V \quad (46)$$

$$V_{output} = 14V \quad (47)$$

$$Rated\ power = 3Kw \quad (48)$$

Con base a las ecuaciones (29), (30), (31), (32) y las fórmulas mostradas anteriormente el booster es:

$$Input\ current = \frac{3Kw}{12V} = 250\ A$$

$$Current\ ripple = 250 \times 5\% = 12.5A$$

$$Voltage\ ripple = 14V \times 1\% = 0.14V$$

$$Output\ current = \frac{3Kw}{14V} = 214.28A$$

Por último, para calcular el inductor y el capacitor, con base a las fórmulas (31) y (32)

$$L = \frac{12V(14V - 12V)}{200Khz \times 12.5A \times 14V} = 685.71nH$$

$$C = \frac{214.28A(14V - 12V)}{200Khz \times 0.14V \times 14V} = 1.093mF$$

### Calculo control PI Eólico:

Con base del diseño de booster mencionando anteriormente, una resistencia de 78 Ohm y utilizando las ecuaciones (37) y (39) se tiene:

$$G_1(s) = \frac{v_o(s)}{u(s)} = \frac{-14s + 1.457008 \times 10^{12}}{85.5 \times 10^{-3}s^2 + s + 113750710.9}$$

$$G_2(s) = \frac{v_o(s)}{u(s)} = \frac{1334256585.52}{s^2 + 11.72s + 1334256585.52}$$

Seleccionando un control PI y utilizando a la ecuación (40):

$$T(s) = \frac{-14k_p s^2 + (1.457008 \times 10^{12} k_p - 14k_i)s + 1.457008 \times 10^{12} k_i}{85.5 \times 10^{-3} s^3 + (1 - 14k_p)s^2 + (1.457008 \times 10^{12} k_p - 14k_i + 113750710.9)s + 1.457008 \times 10^{12} k_i}$$

Con un sobre pico de 0.1 y utilizando las ecuaciones (41), (42), (43), (44) y (45)

$$\varepsilon = \frac{|l_n(1.00003)|}{\sqrt{\pi^2 + l_n^2(1.00003)}} = 0.5911$$

$$\omega_n = \frac{4.5}{\varepsilon \times T_s} = \frac{4.5}{(9.79314 \times 10^{-6})(31.9472)} = 14383.23342$$

$$DT(s) = s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + 0.2817142858s + 206877403.6$$

$$b \geq 5\varepsilon\omega_n = 0.7042857145$$

$$\overline{DT(s)} = (s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2)(s + 5\varepsilon\omega_n)$$

$$\overline{DT(s)} = (s^2 + 0.2817142858s + 206877403.6)(s + 0.7042857145)$$

$$\overline{DT(s)} = s^3 + 0.986s^2 + 206877403.8s + 145700800$$

Igualando los denominadores:

$$1.457008 \times 10^{12} k_i = 145700800$$

$$1 - 14k_p = 0.986$$

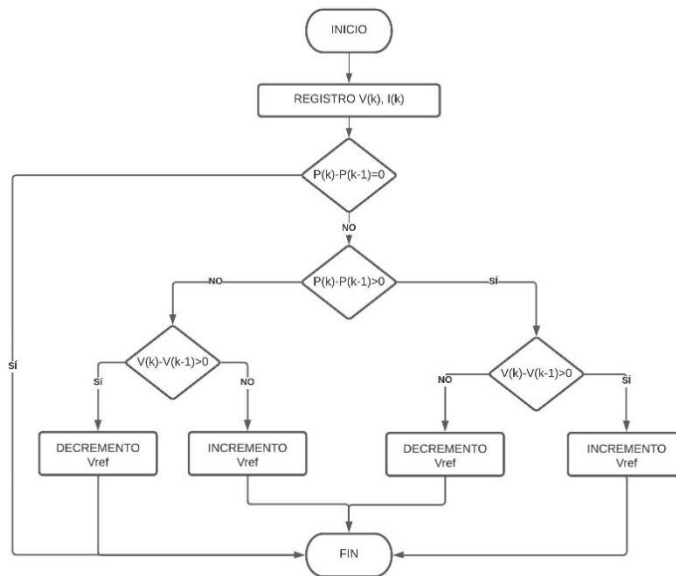
$$k_i = 1 \times 10^{-4}$$

$$k_p = 1 \times 10^{-3}$$

### 4.3.3. Diseño del software

Los métodos más usados para detectar la energía máxima, empleando un controlador MPPT son: Algoritmo de perturbación y Observación (P&O), Conductancia incremental y lógica difusa, también existen dispositivos que le permiten al sistema mantener  $90^\circ$  de incidencia solar el mayor tiempo posible, aumentando así la eficiencia de este. Para este trabajo se optó por usar el algoritmo P&O ya que, según los documentos recopilados para esta investigación, es el método con mayor rendimiento [32]; El principio del algoritmo es perturbar el voltaje de funcionamiento para mantener la potencia máxima, el siguiente diagrama de flujo muestra el funcionamiento del algoritmo [32]

*Ilustración 29* Diagrama de flujo Algoritmo de Perturbación y Observación.



Fuente: Determinación del punto máxima potencia en sistemas de bombeo solar fotovoltaico utilizando el algoritmo perturbación observación P&O, pág. 14.

En el diagrama de flujo tomado de [32] explica el proceso que sigue el algoritmo para mantener el MPP; Si el voltaje de operación del sistema se perturba y la energía solicitada por la carga aumenta, significa que el punto de operación está más cerca del MPP, por esta razón el voltaje de operación deberá de ajustarse en la misma dirección de perturbación que la energía solicitada por la carga, en caso contrario, si la energía solicitada por la carga disminuye el punto de operación se movería en dirección contraria al MPP, esto quiere decir que el voltaje de operación deberá de ser perturbado en la dirección opuesta a la que se tenía [33].



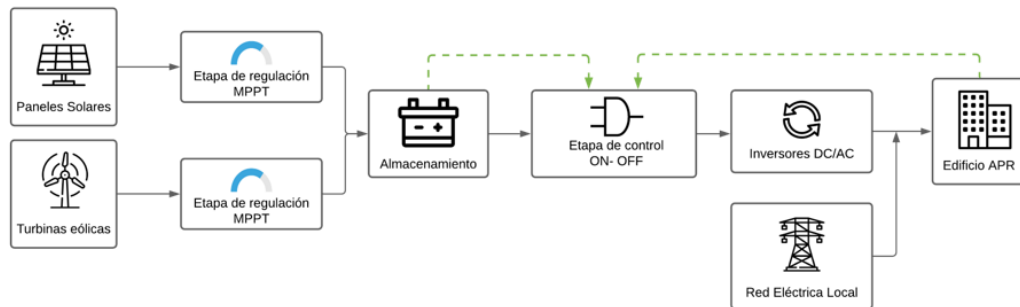
## 4.4. SISTEMA HÍBRIDO EOLICO – SOLAR

### 4.4.1. Introducción

En esta sección se expondrán de manera resumida los subsistemas que componen el proceso de abastecimiento eléctrico propuesto para el edificio APR, la ilustración 28 de la sección 4.4.2 está basado en la ilustración 23, en este modelo se reemplaza la etapa de control compuesta de reguladores y rectificadores por una etapa de control que priorice la eficiencia y la estabilidad, una vez finalizada la etapa de control, pasa a una etapa de inversión de DC a AC. Esta energía se manipula de manera paralela con la energía de la red eléctrica del edificio APR.

### 4.4.2. Distribución del sistema eólico - solar

**Ilustración 30** Sistema Híbrido Eólico Solar



Fuente: Elaboración propia

Para la etapa de recolección de energía solar (sección 1 de la ilustración 28), se propone un arreglo de 45 paneles solares de 550W y 41.6V, el principal parámetro que se toma en cuenta para establecer el número de paneles en serie es el voltaje de entrada en el *Booster converter* en la etapa de control MPPT, dicho valor esta alrededor del 180V. Siguiendo los criterios expuestos en la sección 3.1.2, se deduce que los paneles conectados en serie son 3; Para definir el numero de paneles en paralelo, se uso como parametro principal el área de ocupación, el valor del area es  $204.53 m^2$ , usando los valores dimensionales de los dispositivos (Tabla 7), la distancia de panel a panel, con un valor de  $3.256 m$  y ocupando un metro de distancia entre los paneles y los bordes del área para transito en instalación y mantenimiento, se tiene que caben 15 grupos conectados en paralelo.

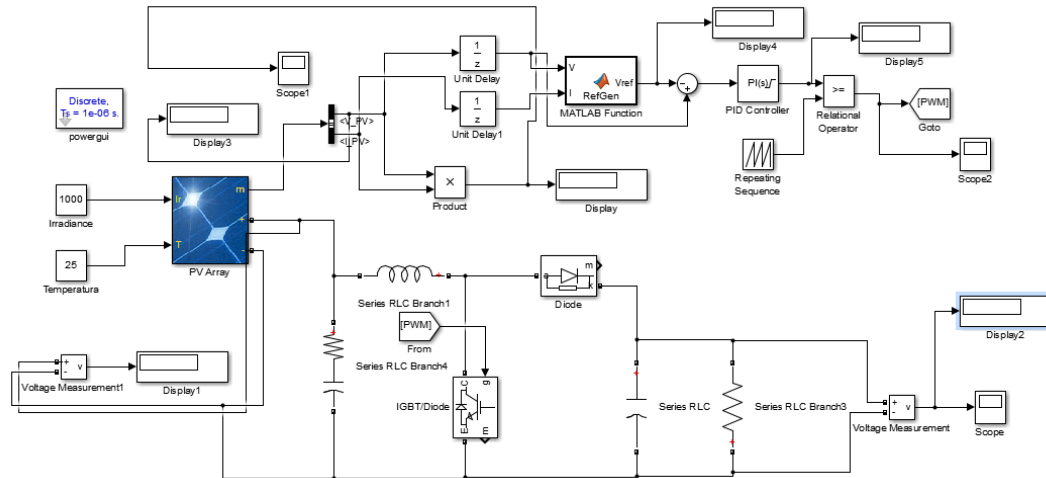
Los parámetros a tener en cuenta en el montaje de aerogeneradores son: el área designada para la instalación, las dimensiones del dispositivo que se seleccionó (Tabla 8) y el área de separación entre estos; El área destinada a turbinas es de  $39 m^2$ , dicha área es mucho menor que la designada a paneles solares porque según el estudio del recurso eólico y solar en la zona, este último representa un mayor potencial de energía

para el edificio, por esta razón se priorizo un área más grande a los dispositivos fotovoltaicos; En cuanto al área de separación se estableció un radio perimetral de  $0.4425\text{ m}$  con el fin de minimizar la perturbación del flujo del aire entre los aerogeneradores, además de eso también se ocupó un metro de distancia entre los aerogeneradores sin incluir el radio perimetral para instalación y mantenimiento de equipos, tomando en cuenta los requerimientos descritos anteriormente se calculan 28 turbinas en el sistema; en cuanto a la conexión de los dispositivos se estableció la salida de  $12\text{V}$  como la adecuada para el sistema, con eso en mente, se conectan las turbinas eólicas en paralelo.

## 5. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Para simular el algoritmo de control MPPT, el controlador on/off y los subsistemas (eólico y solar) del sistema híbrido se empleó la herramienta Simulink de MATLAB 2015a. Se utilizaron varios elementos electrónicos de la librería Simscape™, algunos de estos son: PV Array, Controlled Current Source, Controlled Voltage Source, etc.

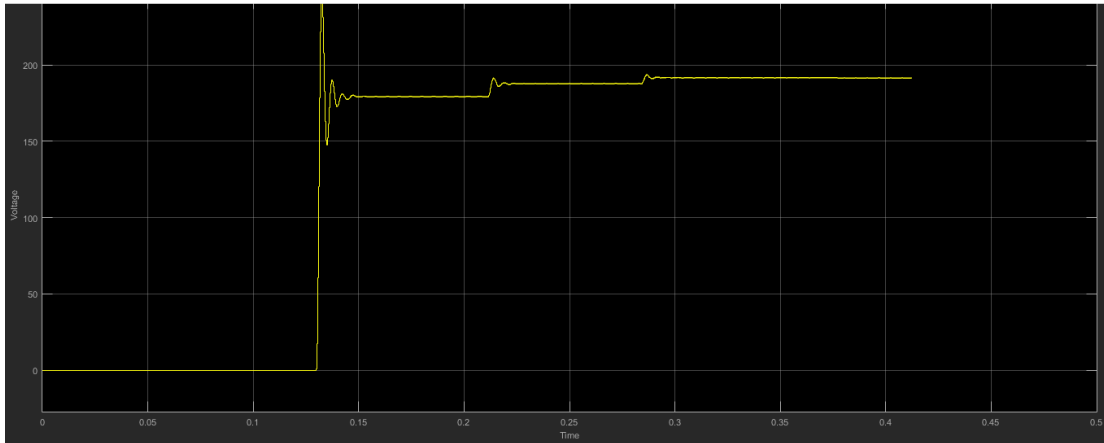
**Ilustración 31** Simulación Control MPPT Sistema Fotovoltaico



El bloque “PV Array” simula el panel fotovoltaico, dentro de este se configuran las propiedades del SW550W-144. Las mediciones de este se transfieren a dos bloques “Unit Delay” con el fin de evitar un bug que en ocasiones genera Matlab al procesar la señal por lo que al atrasarla un microsegundo se solventa. Esta señal atrasada entra a el algoritmo MPPT representado por un “MATLAB Function” y sale un voltaje de referencia el cual se diferencia con el voltaje de entrada al algoritmo para conocer el diferencial de tensión. Este diferencial pasa por el “PI Controller” para ser traducido en el ciclo de trabajo que al compararse con la secuencia de pulsos se transforma en el PWM que controla el IGBT.

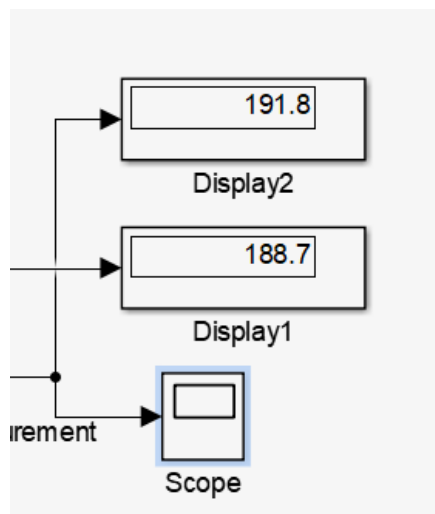
En la parte inferior se puede apreciar el circuito elevador, este en la entrada tiene un capacitor y una resistencia en serie, los cuales se usan para prevenir cortos y posteriormente errores en la simulación. Para el funcionamiento correcto de estos componentes se debe colocar y configurar un bloque llamado “powergui”, el cual se encarga de controlar la forma en cómo se simulan estos.

**Ilustración 32** Señal de voltaje de salida del booster solar  
*Señal de salida de voltaje del booster solar*



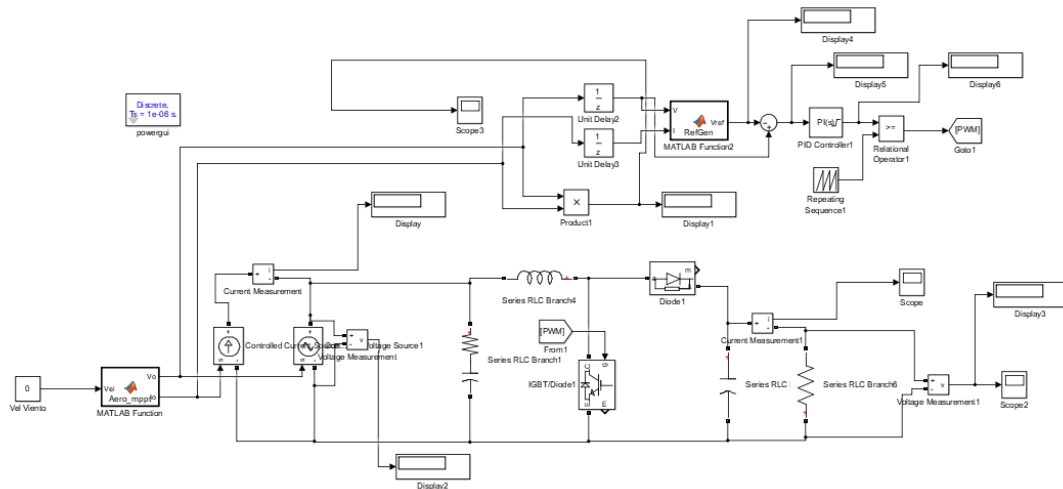
En la ilustración 31 se puede apreciar la señal del voltaje de salida del circuito elevador del subsistema solar. Esta señal se produce en diferentes cambios, el primer cambio se hace al pasar la radiación solar de 0 a  $100\text{w/m}^2$ , tarda aproximadamente 0.0375s y no presenta sobre picos en la señal; el segundo cambio se produce al pasar de 100 a  $1000\text{w/m}^2$ , el tiempo de estabilización para este se estima en 0.04s y presenta un pico considerablemente alto; la tercera situación se presenta al cambiar de 1000 a  $4240\text{w/m}^2$  (radiación promedio en el APR), su estabilización se realiza al cabo de aproximadamente 0.016s, y su sobre pico no es considerablemente grande; finalmente la situación ocurrida al pasar de 4240 a  $7050\text{w/m}^2$  (radiación máxima en el APR), la señal pasa a nivelarse al cabo de 0.025s y no presenta sobre picos considerables.

**Ilustración 33** Comparación del voltaje de entrada con el voltaje de salida del booster solar  
*comparación del voltaje de entrada con el voltaje de salida del booster solar*



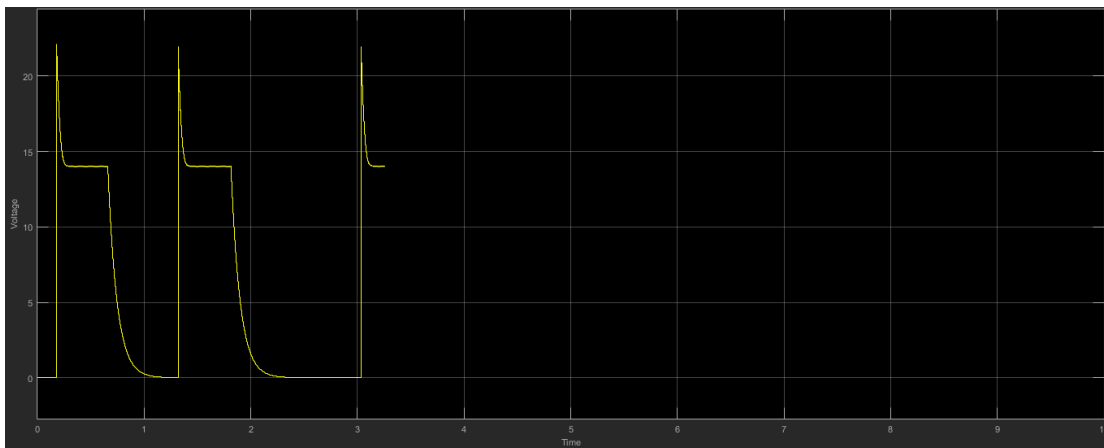
La **Ilustración 34** muestra las medidas de los voltajes del circuito elevador, tanto el voltaje de entrada (Display 1) como el voltaje de salida (Display2). Esta representación se realiza a máxima radiación de entrada ( $7050 \text{ w/m}^2$ ) y como se puede apreciar el voltaje no pasa de los parámetros requeridos para el inversor solar.

**Ilustración 35** Simulación MPPT Sistema Eólico



La base de funcionamiento de ambos subsistemas es la misma, de ahí que estos sean muy semejantes entre sí. Su principal diferencia es el bloque de generación eólica el cual trabaja mediante un bloque “MATLAB Function”. Este bloque traduce la velocidad del viento en energía que se introduce al circuito elevador, dichos valores son creados a partir de los datos proporcionados por el fabricante del aerogenerador.

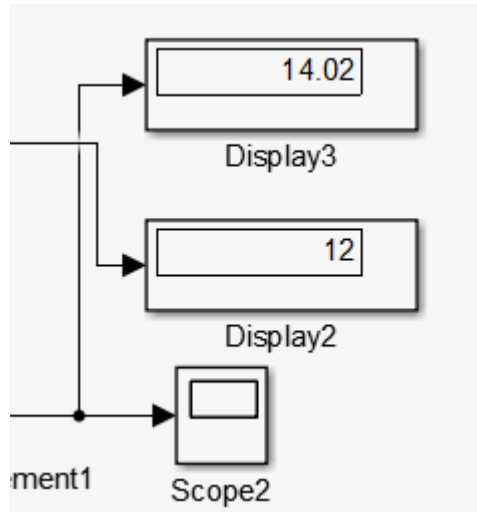
**Ilustración 36** Señal de voltaje de salida del booster eólico



En la ilustración 33 se puede apreciar la señal del voltaje de salida (voltaje controlado por el circuito elevador). Como se puede evidenciar existe un sobre pico al momento

del aumentar el voltaje, este ocurre debido a que el bloque cambia de 0 a 12V de manera espontánea, por lo que el sistema de control trata de regular ese cambio tan brusco de manera rápida tardando aproximadamente 0.15s. Además, se puede evidenciar que el voltaje no pasa nunca de los 14 voltios por lo que se ajusta a nuestras necesidades.

**Ilustración 37** comparación del voltaje de entrada con el voltaje de salida del booster eólico



La ilustración 34 muestra el aumento del voltaje en el circuito elevador, el “Display2” representa el voltaje de entrada, mientras que el “Display3” representa el voltaje de salida. Si bien existe un aumento en 0.03 voltios, estos no afectan el funcionamiento del inversor, ya que el máximo voltaje que puede recibir este es de 14.5V.

En base a los resultados mostrados anteriormente se determinó que el circuito elevador requiere de un PI intermediario el cual controla el ciclo de trabajo y así mismo repercute en la elevación de voltaje.

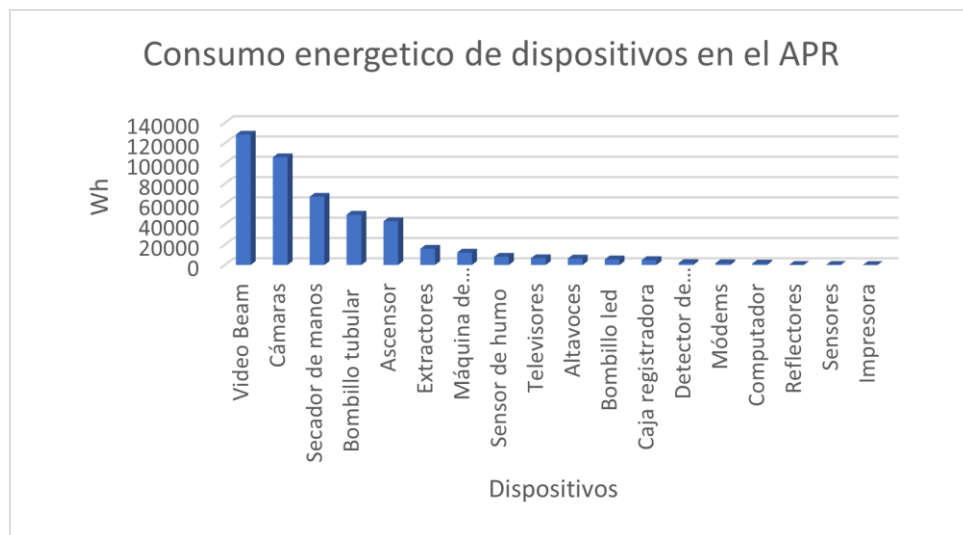


## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. CONCLUSIONES

- De acuerdo con los datos recopilados en el estudio energético **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar que dispositivos como video proyectores (128.4kWh), cámaras de seguridad (106.08kWh) y los secadores de manos (67.2kWh) son los dispositivos que más contribuyen al consumo en el edificio APR. Sin embargo, esto solo aplica en términos teóricos, ya que se está estimando el uso de los video proyectores en todas las clases, lo que eleva su consumo drásticamente. Este es uno de los factores que más afectan en el dimensionamiento del sistema híbrido, a mayor consumo más paneles fotovoltaicos y aerogeneradores, y por tanto un mayor costo.

**Ilustración 39** Consumo diario de dispositivos

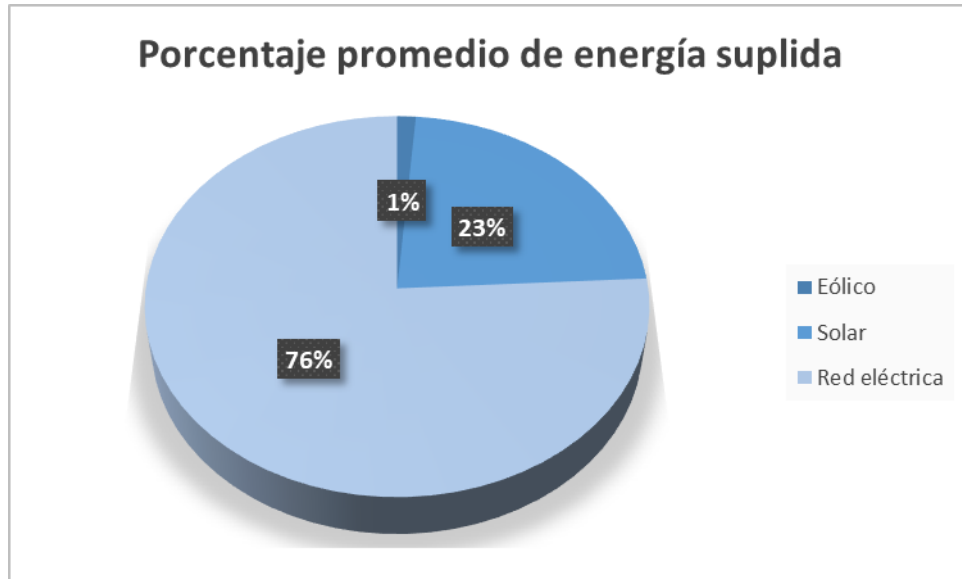


Fuente: Elaboración propia

- Otro de los factores que contribuye al dimensionamiento del sistema híbrido es el recurso energético disponible en la zona. Al caracterizar este se determinó que la radiación solar es más aprovechable, ya que un panel fotovoltaico genera 2332Wh, mientras que en el recurso eólico un aerogenerador genera 214.8Wh. Es por esta razón que en el diseño se emplean más paneles fotovoltaicos (45) que aerogeneradores (28). Lo mencionado anteriormente se puede apreciar en la siguiente grafica.



**Ilustración 40** *Porcentaje de energía suplida*



Fuente: Elaboración propia

- El recurso energético además de influir en el dimensionamiento del sistema híbrido. También afecta directamente la capacidad de los controladores que regulan la energía. Respecto al diseño de estos se sabe que los componentes del booster tales como condensadores, resistencias y bobinas determinan los límites de este. Sin embargo, la amplificación de un voltaje de entrada al booster está marcada por el ciclo de trabajo del PWM que entra al IGBT y es otorgado por el controlador MPPT.
- La simulación de los controladores apunta a que los mismos son robustos al controlar variaciones bajas y medias de voltaje, pero cuando hay saltos bruscos se pueden generar sobre picos que afecten el funcionamiento del sistema. Si bien esta situación es preocupante, es muy poco probable en la realidad, ya que los recursos energéticos no tienden a variar de manera espontánea, es decir, no es como que el sol se encienda y se apague de manera instantánea.
- Esta simulación también muestra que la velocidad de estabilización es considerablemente mejor en el controlador solar (0.04s máx.) a diferencia del eólico (0.15s máx.). Esto posiblemente se deba al hecho que el controlador solar tiene que mantener estable la energía a diferentes niveles de voltaje, por lo que requiere mayor robustez, mientras que el eólico solo funciona a un nivel de voltaje (12V).
- Además de implementar el sistema híbrido eólico solar, la universidad puede plantear un sistema de gestión energética para controlar y reducir mejor el consumo tanto en los estudiantes como en las comercializadoras del primer piso.

- De acuerdo con los datos de generación del sistema híbrido, se puede afirmar que la universidad tendría un ahorro económico del 11.29% que equivale a \$1'471,553.423 aproximadamente.

## 6.2. RECOMENDACIONES

Según la investigación realizada en el presente documento, se sugieren algunas recomendaciones las cuales se debe tener en cuenta para la financiación e implementación del proyecto. En la siguiente tabla se muestra el precio aproximado de los dispositivos que se usaron en el diseño del sistema híbrido Eólico-Solar.

**Tabla 14** Cotización de dispositivos

Seccion del Sistema	Cantidad	Dispositivo	Precio Unitario USD	Precio Total USD
Sistema Fotovoltaico	45	Paneles	\$ 139,00	\$ 6.255,00
Sistema Eolico	28	Aerogeneradores	\$ 260,00	\$ 7.280,00
Etapa de regulacion	2	Bobinas	\$ 50,00	\$ 100,00
	2	Transistores IGBT	\$ 1,15	\$ 2,30
	2	Condensadores	\$ 1,00	\$ 2,00
	4	Resistencias	\$ 1,00	\$ 4,00
	2	PIC 10F204	\$ 0,77	\$ 1,54
	1	LF412	\$ 1,69	\$ 1,69
Almacenamiento	9	Baterias	\$ 2.530,04	\$ 22.770,36
Etapa de control	1	LM324	\$ 1,00	\$ 1,00
Etapa Inversora	1	Convertor	\$ 4.250,00	\$ 4.250,00
Otros Sensores	1	Contactador	\$ 57,05	\$ 57,05
	1	Sensor de Voltaje	\$ 240,00	\$ 240,00
	1	Sensor de corriente	\$ 5,46	\$ 5,46
<b>TOTAL:</b>				<b>\$ 40.970,40</b>

Se recomienda realizar una evaluación financiera con flujo de caja incluido donde se tenga en cuenta tanto el consumo, como el recurso energético. Así mismo evaluando los porcentajes de ahorro, los valores unitarios de consumo, el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR), ya que no está dentro de los alcances de este estudio.

Por otro lado, es recomendable usar datos actualizados del consumo energético y realizar una preauditoria presencial, con el fin de evaluar cambios en la cotización y reducir costos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] Compañía de expertos en mercado (XM). 2020. Informe oferta y generación abril 2020 (04). Recuperado de: [https://www.xm.com.co/Informes Mensuales de Análisis del Mercado/02\\_Informe\\_Oferta\\_y\\_Generacion\\_04\\_2020.pdf](https://www.xm.com.co/Informes%20Mensuales%20de%20Análisis%20del%20Mercado/02_Informe_Oferta_y_Generacion_04_2020.pdf)
- [2] Benchimol, M. Peres, C. (2015). Widespread Forest Vertebrate Extinctions Induced by a Mega Hydroelectric Dam in Lowland Amazonia. Plos One. Recuperado de: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0129818>
- [3] Ocko, I. Hamburg, S. (2019). Climate Impacts of Hydropower: Enormous Differences among Facilities and over Time. ASC Environmental Science and Technology. Recuperado de: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.9b05083>
- [4] Compañía de expertos en mercado (XM). 2018. Informe Mensual de Demanda de Energía. diciembre 2018 (12). Pag 8. Recuperado de: [https://www.xm.com.co/Informes Mensuales de Análisis del Mercado/01\\_Informe\\_Demanda\\_y\\_Fronteras\\_TXR\\_12\\_2018.pdf](https://www.xm.com.co/Informes%20Mensuales%20de%20Análisis%20del%20Mercado/01_Informe_Demanda_y_Fronteras_TXR_12_2018.pdf)
- [5] Empresas públicas de Medellín (EPM). (2013). Parque Eólico Jepírachi. Recuperado de: <https://www.epm.com.co/site/home/nuestra-empresa/nuestras-plantas/energia/parque-eolico>
- [6] Unidad de planeación minero energética (UPME).(2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Recuperado de: [www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion\\_Energias\\_Renovables/INTEGRACION\\_ENERGIAS\\_RENOVANLES\\_WEB.pdf](http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf)
- [7] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).(2014). Actualización del componente meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y la Niña en Colombia, como insumo para el atlas climatológico. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Actualizacion+Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o+-+La+Ni%C3%B1a.pdf/02f5e53b-0349-41f1-87e0-5513286d1d1d>
- [8] Compañía de expertos en mercado (XM). 2016. Informe de oferta y generación Julio de 2016 (07). Pag 6. Recuperado de: [https://www.xm.com.co/Informes Mensuales de Análisis del Mercado/02\\_Informe\\_Oferta\\_y\\_Generacion\\_07\\_2016.pdf](https://www.xm.com.co/Informes%20Mensuales%20de%20Análisis%20del%20Mercado/02_Informe_Oferta_y_Generacion_07_2016.pdf)
- [9] Datos promediados de los informes de oferta y generación de enero a junio del 2020
- [10] España Exportación e Inversiones (ICEX). (2018). Energías renovables en Colombia. Recuperado de: <https://www.icex.es/icex/GetDocumento?dDocName=DAX2018783697&site=icexES#:~:text=Colombia%20se%20ha%20posicionado%20entre,puesto%20por%20detr%C3%A1s%20de%20Espa%C3%B1a.>

- [11] Amezquita, L. (2019). Diseño de un sistema de energía híbrido (Solar - Eólico) para el soporte de las telecomunicaciones en el cerro Girasoles del ejército nacional de Colombia. Universidad Piloto de Colombia, Bogotá. Recuperado de: <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/5203/Disen%cc%83o%20de%20un%20sistema.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [12] Martínez Giraldo, J. S., & . (2018). Diseño energético, eléctrico y de comunicaciones para un edificio inteligente residencial: caso de estudio. Recuperado de: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_electrica/181](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/181)
- [13] Estévez, J. Ortiz, J. (2018). Identificación de los factores críticos para la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en Colombia. Universidad Libre. Recuperado de: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ambiental/article/view/5806/5389>
- [14] Núñez, R. Pinzón, O. (2017). Controlador robusto basado en la técnica QFT para convertidores DC-DC Buck-Boost como regulador de voltaje en generadores fotovoltaicos. Revista UIS Ingenierías. Vol. 17. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/5537/553756967025/html/index.html>
- [15] Gómez, N. Rivera, S. (2017). Regulación de frecuencia en sistemas de potencia que integran fuentes de energías eólicas mediante un controlador PI e imitación de inercial. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: <https://revistas.ucc.edu.co/index.php/in/article/view/1981/2386>
- [16] Rojas, B. (2017). Sistema híbrido eólico fotovoltaico para el autoabastecimiento de energía eléctrica en el sector rural. Universidad tecnológica equinoccial. Quito, Ecuador. Recuperado de: [http://192.188.51.77/bitstream/123456789/14659/1/68775\\_1.pdf](http://192.188.51.77/bitstream/123456789/14659/1/68775_1.pdf)
- [17] Peña, A. Gutiérrez, D. Caldas, F. (2017). Diseño e implementación de un sistema solar fotovoltaico para la generación de energía eléctrica con potencia activa de 1 KW. Universidad cooperativa de Colombia. Villavicencio, Colombia. Recuperado de: [https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/14677/1/2017\\_dise%C3%B1o\\_e\\_implementaci%C3%B3n\\_sistema.pdf](https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/14677/1/2017_dise%C3%B1o_e_implementaci%C3%B3n_sistema.pdf)
- [18] Gómez, N. (2016). Gestión para el desarrollo y diseño de un sistema energético híbrido eólico-solar para aplicaciones en zona no interconectada (ZNI) de Colombia. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. Recuperado de: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/15253/u728900.pdf?sequence=1>
- [19] Asprilla, D. (2016). Estudio de sistemas híbridos de energía renovable (solar-gasificación de biomasa) como alternativa para satisfacer necesidades energéticas en zonas no interconectadas del departamento del Chocó. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. Recuperado de: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/59125/1077199202.2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[20] Ley No. 1715. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Bogotá, Colombia. 13 de mayo del 2014. Recuperado de: [https://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY\\_1715\\_2014.pdf](https://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf)

[21] Norma 50001. Sistemas de gestión de la energía – requisitos con orientación para su uso. Norma internacional. 15 de junio de 2011. Recuperado de: ISO 50001 <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta#:~:text=RADIACI%C3%93N%20SOLAR%20%2D%20IDEAM&text=La%20radiaci%C3%B3n%20solar%20es%20la,procesos%20atmosf%C3%A9ricos%20y%20el%20clima.&text=El%20Sol%20emite%20energ%C3%ADa%20en%20forma%20de%20radiaci%C3%B3n%20de%20onda%20corta-2015> Sistemas de Gestión de la Energía.pdf (itvalledelguadiana.edu.mx)

[22] RETIE. Reglamento técnico de instalaciones eléctricas. 30 de agosto del 2013. Recuperado de: RETIE RESOLUCION No DE (minenergia.gov.co)

[23] Norma técnica colombiana 2050. Código eléctrico colombiano. 25 de noviembre del 1998. Recuperado de: NTC2050 - CEC (idrd.gov.co)

[24] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).(2014). Radiación Solar. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta#:~:text=RADIACI%C3%93N%20SOLAR%20%2D%20IDEAM&text=La%20radiaci%C3%B3n%20solar%20es%20la,procesos%20atmosf%C3%A9ricos%20y%20el%20clima.&text=El%20Sol%20emite%20energ%C3%ADa%20en%20forma%20de%20radiaci%C3%B3n%20de%20onda%20corta>

[25] National Aeronautics and Space Center (NASA). (2003). Power Data Access Viewer – 1.1.1. Recuperado de: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

[26] Tobajas, M. (2019). Energía solar fotovoltaica (Edición I). España: ECOE Ediciones.

[27] Unidad de planeación minero-energética (UPME). (2006). Atlas de Viento y energía eólica de Colombia. Recuperado de: <http://www.upme.gov.co/Docs/MapaViento/CAPITULO1.pdf>

[28] Gobierno de Navarra (Año Desconocido). Viento. Recuperado de: <http://meteo.navarra.es/definiciones/viento.cfm#:~:text=La%20velocidad%20del%20viento%20mide,de%20viento%20se%20denominan%20calmas>.

[29] Villarrubia López, M. (2013). Ingeniería de la energía eólica (Edición I). España: Alfaomega.

[30] RestScreen Expert (8.0.1.48) [Software] (2021). Recuperado de: RETScreen (nrcan.gc.ca)

- [31] Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna (Edición V). España: Pearson.
- [32] Valenzuela, B. (2020). Determinación de punto de máxima potencia en un sistema de bombeo solar fotovoltaico utilizando el algoritmo perturbación y observación P&O. Universidad Politécnica Salesiana. Quito, Ecuador. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19166/1/UPS%20-%20TTS106.pdf>
- [33] Ruiz, C. Luis, J. Beristáin, J. José, A. Sosa, T. Ian, M. Hernández, L. Jesús, H. (2010). Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar. Revista De Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Vol. 8, No 1. Recuperado de: [https://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/Documents/v8/art3vf\\_estudio\\_del\\_algoritmo\\_de\\_seguimiento\\_de\\_punto\\_de\\_maxima\\_potencia\\_perturbar\\_y\\_observar.pdf](https://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/Documents/v8/art3vf_estudio_del_algoritmo_de_seguimiento_de_punto_de_maxima_potencia_perturbar_y_observar.pdf)
- [34] A. Kuperman, "Proportional-Resonant Current Controllers Design Based on Desired Transient Performance," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 10, pp. 5341-5345, Oct. 2015. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2408053.
- [35] Abd, A. (2010). Seguimiento del punto máxima de potencia en sistemas fotovoltaicos Villavicencio, Colombia. Recuperado de: Resumen.pdf (us.es)
- [36] Rashid, M. (2004). Electronica de potencia circuitos, dispositivos y aplicaciones. (Edición III). Florida, Estados Unidos. Pearson.

**ANEXO 1.**

**CÓDIGO CONTROLADOR MPPT DEL SISTEMA EÓLICO**

**PROYECTO PG-20-1-06**

**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA  
HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR UTILIZANDO UN SISTEMA DE CONTROL**

## ANEXO 1. CÓDIGO CONTROLADOR MPPT DEL SISTEMA EÓLICO

---

```
1. function Vref = RefGen(V,I)
2. Vrefmax = 13;
3. Vrefmin = 0;
4. Vrefinit = 12;
5. deltaVref = 1;
6. persistent Vold Pold Vrefold;
7. if isempty(Vold)
8.     Vold = 0;
9.     Pold = 0;
10.     Vrefold = Vrefinit;
11. end
12. P = V * I;
13. dV = V - Vold;
14. dP = P - Pold;
15. if dP ~= 0
16.     if dP < 0
17.         if dV < 0
18.             Vref = Vrefold + deltaVref;
19.         else
20.             Vref = Vrefold - deltaVref;
21.         end
22.     else
23.         if dV < 0
24.             Vref = Vrefold - deltaVref;
25.         else
26.             Vref = Vrefold + deltaVref;
27.         end
28.     end
29. else Vref = Vrefold;
30. end
31.
32. if Vref >= Vrefmax | Vref <= Vrefmin
33.     Vref = Vrefold;
34. end
35. Vrefold = Vref;
36. Vold = V;
37. Pold = P;
```



**ANEXO 2.**  
**CÓDIGO SIMULACIÓN DEL AEROGENERADOR**

**PROYECTO PG-20-1-06**

**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA  
HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR UTILIZANDO UN SISTEMA DE CONTROL**

## ANEXO 2. CÓDIGO SIMULACIÓN DEL AEROGENERADOR

---

```
1. function [Vo,Io] = Aero_mppt(Vel)
2. x = Vel;
3.
4.
5. P = -0.1148*(x)^3 + 3.018*(x)^2 + 12.305*(x) - 26.47;
6. Vo = 12;
7. Io = P/Vo;
8. if (x < 1.5 || x > 40)
9.     P = 0;
10.     Vo = 0;
11.     Io = 0;
12. end
13. if (x >= 15 && x < 40)
14.     P = 450;
15.     Vo = 12;
16.     Io = P/Vo;
17. End
18.
```

**ANEXO 3.**

**CÓDIGO CONTROLADOR MPPT DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO**

**PROYECTO PG-20-1-06**

**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA  
HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR UTILIZANDO UN SISTEMA DE CONTROL**

### ANEXO 3. CÓDIGO CONTROLADOR MPPT DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

---

```
1. function Vref = RefGen(V,I)
2. Vrefmax = 170;
3. Vrefmin = 0;
4. Vrefinit = 150.3;
5. deltaVref = 1;
6. persistent Vold Pold Vrefold;
7. dataType = 'double';
8. if isempty(Vold)
9.     Vold = 0;
10.    Pold = 0;
11.    Vrefold = Vrefinit;
12. end
13. P = V * I;
14. dV = V - Vold;
15. dP = P - Pold;
16. if dP ~= 0
17.     if dP < 0
18.         if dV < 0
19.             Vref = Vrefold + deltaVref;
20.         else
21.             Vref = Vrefold - deltaVref;
22.         end
23.     else
24.         if dV < 0
25.             Vref = Vrefold - deltaVref;
26.         else
27.             Vref = Vrefold + deltaVref;
28.         end
29.     end
30. else Vref = Vrefold;
31. end
32.
33. if Vref >= Vrefmax | Vref <= Vrefmin
34.     Vref = Vrefold;
35. end
36. Vrefold = Vref;
37. Vold = V;
38. Pold = P;
```

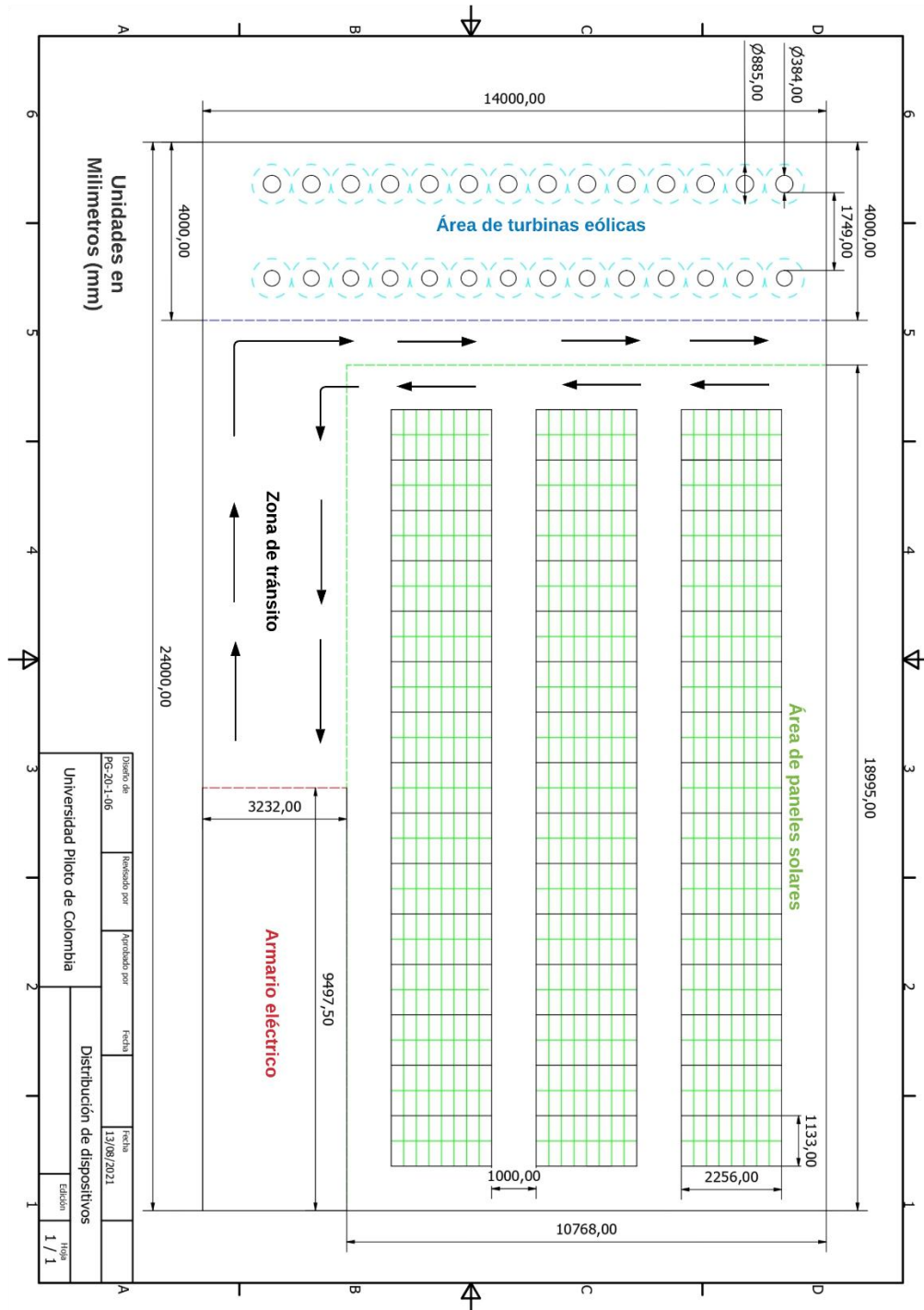
**ANEXO 4.**

**ESQUEMA DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO**

**PROYECTO PG-20-1-06**

**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA  
HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR UTILIZANDO UN SISTEMA DE CONTROL**

## ANEXO 4. ESQUEMA DISTRIBUCION DEL SISTEMA HÍBRIDO



Nota: Las unidades se encuentran en milímetros.

**ANEXO 5.**

**CÓDIGO CONTROLADOR ON/OFF**

**PROYECTO PG-20-1-06**

**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA  
HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR UTILIZANDO UN SISTEMA DE CONTROL**

## ANEXO 5. CÓDIGO CONTROLADOR ON/OFF

---

```
1. function [switchapr1,switchsh]= fcn(carga, apr)
2. persistent descarga;
3. switchapr1 = 0;
4. switchsh = 1;
5. if isempty(descarga)
6.     descarga = false;
7.     switchapr1 = 0;
8.     switchsh = 1;
9. end
10.     if(carga == 100 && apr > 75)
11.         descarga = true;
12.         switchapr1 = 1;
13.         switchsh = 0;
14.     end
15.     if(carga > 99.5 && apr > 75 && descarga == true &&
    carga < 100)
16.         descarga = true;
17.         switchapr1 = 1;
18.         switchsh = 0;
19.     end
20.     if(carga < 99.5 && apr > 75 && descarga == true)
21.         descarga = false;
22.         switchapr1 = 0;
23.         switchsh = 1;
24.     end
25.     if(carga > 99.5 && apr > 75 && descarga == false)
26.         descarga = false;
27.         switchapr1 = 1;
28.         switchsh = 0;
29.     end
```



**ANEXO 6.**  
**DIAGRAMA DE SIMULACIÓN EN MATLAB**

**PROYECTO PG-20-1-06**  
**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA**  
**HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR UTILIZANDO UN SISTEMA DE CONTROL**

# ANEXO 6. DIAGRA DE SIMULACIÓN EN MATLAB

