

DISEÑO DE BANCOS DE LABORATORIO PARA EL ANÁLISIS DE LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, UTILIZANDO FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE Y NO RENOVABLES, PARA EL ÁREA DE SISTEMAS TÉRMICOS.

DANIELA YULEISY LEÓN MARIÑO
ELKIN IVÁN SALINAS ANTOLÍNEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2019

DISEÑO DE BANCOS DE LABORATORIO PARA EL ANÁLISIS DE LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, UTILIZANDO FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE Y NO RENOVABLES, PARA EL ÁREA DE SISTEMAS TÉRMICOS.

DANIELA YULEISY LEÓN MARIÑO
ELKIN IVÁN SALINAS ANTOLÍNEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Director:
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2019

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso por permitirme culminar con gran éxito este logro y por poderlo compartir con mi familia y amigos, con esfuerzo, valentía y confianza en él todo es posible.

A mi madre bella, por su apoyo incondicional, amor, tranquilidad y calma que alimentaron mi espíritu cada momento. Por su entusiasmo, alegría y comprensión que me ayudaron a ser la persona que hoy soy.

A mis hermanos Willy y Jhercy, quienes me impulsaron, apoyaron y permitieron que este logro fuera realidad, gracias por sus esfuerzos y sacrificios, por darme la motivación y el respaldo siempre, por su alegría en los momentos tristes y por sus carcajadas que siempre llenan de luz cada rincón.

A toda mi familia por cada una de sus palabras de aliento y de motivación; por el apoyo y la por la fe que tuvieron en mí a lo largo de este camino.

A mi compañero de trabajo de grado, por su apoyo y hacer parte de esta larga, pero gratificante aventura. A mis amigos, amigas y compañeros, por ser parte importante de este bonito proceso. Cada uno de ellos aportó de forma significativa su granito de arena, lo cual contribuyó en mi vida, por ser una mejor persona y profesional. Agradezco su compañía, apoyo y fuerza para seguir adelante.

Daniela Yuleisy León Mariño...

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios y a la Virgen de Chiquinquirá, quienes guiaron nuestro camino y colocaron a nuestro lado las personas indicadas en cada proceso de este logro obtenido.

A nuestras familias, amigos y compañeros, quienes nos dieron esa voz de aliento y la compañía para superar los momentos difíciles.

A nuestro profesor y director de proyecto, el ingeniero Omar Gélvez, por su paciencia, por sus grandes enseñanzas, por su ires y venires, los cuales nos permitieron ser mejores profesionales. Un gran mentor.

A la división de planta física y planeación, por el apoyo y colaboración en el desarrollo de este proyecto, a sus ingenieros y administrativos que aportaron valiosos conocimientos.

A la escuela de Ingeniería Mecánica, profesores, administrativos y personal de apoyo por sus enseñanzas, sus experiencias compartidas y la orientación brinda a lo largo de este bonito proceso.

A la Universidad Industrial de Santander, por ser la vía para alcanzar nuestros sueños, por cada una de las personas con las que compartimos y por hacernos mejores personas y profesionales al servicio de la comunidad.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. FUENTES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	20
2.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	21
3. SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS.....	22
4. COMPONENTES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	23
4.1 COMPONENTE PRINCIPAL DE GENERACIÓN O PANEL FV.....	23
4.1.1 Caracterización del panel fotovoltaico (FV).....	25
4.2 COMPONENTES AUXILIARES.....	27
4.2.1 Inversor solar.....	28
4.1.2 Regulador de carga.....	29
4.1.3 Baterías o acumuladores.....	29
4.1.4 Medidor de energía.....	30
5. SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED (SFCR) “GRID TIE”.....	31
5.1 IDENTIFICACIÓN DE LA RED ELÉCTRICA DEL EDIFICIO.....	33
5.2 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FV CONECTADO A LA RED “GRID TIE” A INSTALAR.....	34
5.2.1 Determinar el área disponible.....	35
5.2.1.1 Identificación del área bruta total.....	35
5.2.1.2 Factores que disminuyen el área disponible.....	37
5.2.1.3 Determinación del número de paneles FV.....	38
5.2.2 Determinar la disponibilidad del recurso solar.....	39
5.2.2.1 Cálculo de la irradiación para Bucaramanga.....	40
5.2.2.2 Cálculo de factores.....	45
5.2.3 Determinar la energía generada por el sistema.....	46

5.3 SELECCIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA FV “GRID TIE” A INSTALAR.....	47
5.3.1 Componentes del Sistema FV “ <i>Grid Tie</i> ” a instalar.....	47
5.3.1.1 Selección y cálculos de los paneles FV.....	47
5.3.1.2. Selección y cálculos de microinversores fotovoltaicos.....	49
5.3.1.3 Selección del medidor de energía.....	50
5.3.2 Seleccionar la estructura y los accesorios requeridos para la instalación de sistema FV.....	50
5.3.2.1 Estructura o soporte.....	50
5.3.2.2 Conductores y Accesorios del sistema a instalar.....	51
6. CENTRALES TÉRMICAS.....	58
6.1 CENTRAL TÉRMICA DE VAPOR A ESCALA LABORATORIO.....	58
6.1.1 Caldera.....	60
6.1.3 Turbina.....	61
6.1.4 Generador eléctrico.....	62
6.1.5. Suavizador de agua.....	63
6.1.6. Bomba de alimentación de agua.....	63
7. DISEÑO INTEGRAL DE LA CENTRAL TÉRMICA DE VAPOR COMO SISTEMA.....	65
7.1 RESTRICCIONES IMPUESTAS POR LOS ELEMENTOS DISPONIBLES.....	66
7.1.2 Procedimiento.....	68
7.2 ANÁLISIS TERMODINÁMICO GENERAL DE LA CENTRAL TÉRMICA DE VAPOR.....	69
7.2.1 Selección del sobrecalentador.....	72
7.2.2 Selección del condensador.....	73
7.2.2.1 Datos de entrada.....	74
7.2.2.2 Criterios térmicos.....	74
7.2.2.3 Criterios geométricos.....	75
7.2.3 Ecuaciones de diseño del condensador.....	75
7.2.3.1 Análisis en el lado del casco del intercambiador.....	75
7.2.3.2 Análisis en el lado de los tubos del intercambiador.....	77

7.2.4 Proceso de diseño del condensador.....	78
7.2.5 Resultados del diseño del condensador.....	80
7.2.6 Cálculos torre de enfriamiento.....	82
8. UBICACIÓN CENTRAL TÉRMICA.....	88
8.1 DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE LA CENTRAL TÉRMICA DE VAPOR.....	89
9. ANÁLISIS ECONÓMICO PARA CADA SISTEMA DISEÑADO.....	93
9.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED SFCR “GRID TIE”.....	93
9.1.1 Inversión inicial.....	94
9.1.2 Costo de la energía.....	96
9.1.3 Generación anual de Energía FV.....	96
9.1.4 Incentivos tributarios.....	97
9.1.5 Parámetros de evaluación financiera.....	99
9.2 CENTRAL TÉRMICA DE VAPOR.....	100
9.2.1 Presupuesto de la central térmica de vapor CTV a escala laboratorio.....	101
10. FORMATO BANCO DE PROGRAMAS Y PROYECTOS DE INVERSIÓN.....	103
11. CONCLUSIONES.....	104
12. RECOMENDACIONES.....	107
BIBLIOGRAFÍA.....	108

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Sistema Solar Fotovoltaico	21
Figura 2. Tipos de Celdas Fotovoltaicas	25
Figura 3. Curva de Carga para un Panel FV y datos fabricantes.....	26
Figura 4. Diferentes sistemas de arquitectura empleados en sistemas fotovoltaicos.	28
Figura 5. Esquema Sistema FV “Grid Tie”	32
Figura 6. Diagrama unifilar del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica	34
Figura 7. Plano cuarto piso sección Este.....	36
Figura 8. Vista superior edificio de laboratorios de Ingeniería Mecánica.	37
Figura 9. Área sombreada para el mes de noviembre.	38
Figura 10. Distribución de los Paneles FV a Instalar.	39
Figura 11. Irradiación global horizontal media diaria anual para Santander.	41
Figura 12. Vista superior del modelo 3D en Solidworks del sistema a instalar. ...	51
Figura 13. Circuito Base de Enphase Generación IQ	52
Figura 14. Microinversor IQ7 plus.	53
Figura 15. Cable Enphase Q.....	54
Figura 16. Enphase Agregador IQ.	55
Figura 17. Tapas de sellado.	55
Figura 18. Enphase Envoy IQ	56
Figura 19. Sistema de gestión para SFV.	57
Figura 20. Esquema eléctrico del sistema FV a implementar.	57
Figura 21. Central térmica de vapor.....	59
Figura 22. Ficha técnica N°1 calderas de 2 pasos Continental tamaño general. ...	60
Figura 23. Turbina JOHANNES NADROWSKI C-250.	62
Figura 24. Componentes diseño integral CTV.	65
Figura 25. Esquema y diagrama central térmico a vapor.....	70

Figura 26. Resistencia Tubular en U con Aletas Difusoras.....	73
Figura 27. Condensador de casco y tubos.	74
Figura 28. Diagrama de temperaturas a lo largo del condensador.	75
Figura 29. Arreglo geométrico de los tubos del condensador.	82
Figura 30. Datos torre de enfriamiento laboratorio de sistemas térmicos.	83
Figura 31. Área disponible laboratorio sistemas térmicos.....	88
Figura 32. Suministros de agua y gas.....	89
Figura 33. Suministros eléctricos.	89
Figura 34. Modelo 3D central térmica de vapor.	90
Figura 35. Distribución en planta central térmica de vapor.	90
Figura 36. Esquema CTV tramos de tubería.	92
Figura 37. Flujos de caja VS tiempo de recuperación de la inversión con incentivos tributarios.	99

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Sistemas Solares Fotovoltaico	22
Tabla 2. Promedios Mensuales de Irradiación Global Media de las Estaciones Convencionales de Colombia.	42
Tabla 3. NASA Meteorología de superficie y energía solar: datos RETScreen.	43
Tabla 4. Radiación Solar Promedio Diaria Mensual Estación UIS.	44
Tabla 5. Principales parámetros para la selección del panel fotovoltaico.	48
Tabla 6. Principales parámetros para la selección del Microinversor.	49
Tabla 7. Especificaciones técnicas caldera.	60
Tabla 8. Especificaciones técnicas turbina.	61
Tabla 9. Características geométricas de la turbina.	62
Tabla 10. Especificaciones técnicas generador eléctrico.....	63
Tabla 11. Trabajo mecánico y térmico de la turbina.	67
Tabla 12. Variables de entrada fijas.....	68
Tabla 13. Tabla de resultados eficiencia de la caldera.	69
Tabla 14. Variables de entrada del código EES central térmica de vapor.	71
Tabla 15. Resultados código EES central térmica de vapor.	72
Tabla 16. Resultados de la selección del condensador.	80
Tabla 17. Caracterización de la torre de enfriamiento.	86
Tabla 18. Tramos de tubería CTV.....	92
Tabla 19. Costo Mano de Obra.....	95
Tabla 20. Presupuesto del sistema FV Grid Tie.....	95
Tabla 21. Flujos de caja proyectados a 10 años con beneficio tributario.	98
Tabla 22. Costo inversión inicial de CTV a escala laboratorio.	101

LISTA DE ANEXOS

“Los anexos están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS”

Anexo A. Planos arquitectónicos y eléctricos.

Anexo B. Cálculos de la radiación solar y demanda.

Anexo C. Fichas técnicas y evaluación de parámetros.

Anexo D. Códigos EES.

Anexo E. Distribución en planta.

Anexo F. Análisis económico.

Anexo G. Formato Tipo A_BPPIUIS

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE BANCOS DE LABORATORIO PARA EL ANÁLISIS DE LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, UTILIZANDO FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE Y NO RENOVABLES, PARA EL ÁREA DE SISTEMAS TÉRMICOS*.

AUTORES: DANIELA YULEISY LEÓN MARIÑO
ELKIN IVÁN SALINAS ANTOLÍNEZ**

PALABRAS CLAVES: BANCOS LABORATORIO, OBTENCIÓN ENERGIA ELECTRICA, ENERGIA RENOVABLE, ENERGÍA NO RENOVABLE

DESCRIPCION:

En el presente trabajo de grado se diseñan dos sistemas de bancos de laboratorio para el área de sistemas térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, con el fin de promover la investigación de nuevas tecnologías respecto a la generación de energía eléctrica sustentable y amigable con el medio ambiente, de igual forma se busca fortalecer el aspecto técnico de los estudiantes de pregrado y posgrado en el área térmica.

Para el diseño del sistema fotovoltaico "SFV" conectado a la red "Grid Tie", se analiza el área útil, la disponibilidad del recurso solar del lugar de instalación y la selección de los componentes, teniendo en cuenta la nueva tecnología *Enphase*, para estudiar el comportamiento del sistema produciendo energía.

Para el diseño de la central térmica de vapor "CTV" basada en el ciclo Rankine con sobrecalentamiento, se tiene en cuenta los componentes disponibles en el laboratorio, para realizar los cálculos de diseño y selección de los componentes faltantes, y cálculo general de la "CTV" para conocer la producción de energía total del sistema.

Posteriormente se realizó la distribución en planta y el análisis económico de cada uno de los sistemas; lo cual determina al "SFV" factible, para finalmente gestionar la implementación del mismo ante el Banco de Programas y Proyectos BPPIUIS, mediante el Formato de Proyectos Tipo A.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.
Director: Omar Armando Gélvez Arocha

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF THE LABORATORY BANKS FOR THE ANALYSIS OF THE ELECTRICAL ENERGY OBTAINING USING RENEWABLE AND NONRENEWABLE ENERGY RESOURCES FOR THE THERMAL SYSTEMS AREA. *

AUTHORS: DANIELA YULEISY LEÓN MARIÑO
ELKIN IVÁN SALINAS ANTOLÍNEZ**

KEYWORDS: LABORATORY BANKS, OBTAINING ELECTRICAL ENERGY, RENEWABLE ENERGY, NON-RENEWABLE ENERGY

DESCRIPTION:

In this bachelor thesis two laboratory benches systems are designed for the thermal systems area of the School of Mechanical Engineering of the Industrial University of Santander, in order to promote the investigation of new technologies regarding the generation of sustainable electrical energy and environmentally friendly, likewise it seeks to strengthen the technical aspect of undergraduate and postgraduate students in the thermal area.

For the design of the grid tied photovoltaic system "PVS", the useful area, the availability of the solar resource of the installation site and the selection of the components are analyzed, taking into account the new Enphase technology to study the behavior of the system producing energy.

For the design of the steam power plant "SPP" based on the Rankine cycle with overheating, the components available in the laboratory are taken into account, to perform the design calculations and selection of the missing components, and general calculation of the "SPP" to know the total energy production of the system.

Subsequently, the plant distribution and the economic analysis for each system were carried out; which determines the feasible "PVS", to finally manage its implementation before the Bank of Programs and Projects BPPIUIS, through the Type A Projects Format.

* Bachelor Thesis.

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering.
Director: Omar Armando Gélvez Arocha.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de generación de energía desempeñan un papel importante en el desarrollo económico de un país, por lo tanto, el desarrollo de bancos de laboratorio para el área de sistemas térmicos, permite contribuir con el cumplimiento de la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander y promueve la investigación de nuevas tecnologías para generación de energía eléctrica sustentable y amigable con el medio ambiente.

En este trabajo se presenta el diseño de un sistema fotovoltaico conectado a la red “*Grid Tie*”, que permite la autogeneración de energía eléctrica para satisfacer la demanda parcial de las luminarias del edificio nuevo de laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica mediante el recurso solar y el diseño de una central térmica de vapor (CTV) a escala de laboratorio basada en un ciclo Rankine básico con sobrecalentamiento de vapor para visualizar el comportamiento de este sistema de forma práctica.

Finalmente, se tiene en cuenta el criterio de diseño de cada uno de los sistemas para definir los componentes necesarios, la distribución en planta y el estudio económico, con el fin de analizar el comportamiento teórico práctico de estas fuentes de energía y así determinar los factores de rendimiento que influyen en cada sistema.

1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir con el cumplimiento de la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander enfocada a la formación de ingenieros mecánicos con alta calidad humana y científica, con énfasis en el desarrollo e investigación para la aplicación de nuevas tecnologías sustentables y amigables con el medio ambiente teniendo en cuenta las políticas gubernamentales del país.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los requerimientos para la implementación de bancos experimentales, asociados al laboratorio de sistemas térmicos, que permitan analizar la generación de energía eléctrica utilizando fuentes de energía renovable y no renovable, para lo cual se deberá:
 - Diseñar y seleccionar los elementos de un sistema Fotovoltaico “*Grid tie*” como alternativa renovable no convencional, que garantice una producción de 11 Kw escalable según su requerimiento.
 - Diseñar y seleccionar los elementos de un sistema para la obtención de energía eléctrica a partir de la generación de vapor, basado en un ciclo Rankine básico con sobrecalentamiento, el cual será alimentado con gas natural, para garantizar la producción de 1 kw.

- Realizar la distribución de planta de los bancos de laboratorios para la obtención de energía eléctrica (*Grid Tie* y ciclo Rankine) en el edificio nuevo de laboratorios de la escuela de la Ingeniería Mecánica
- Elaborar la propuesta para radicar el proyecto en el Banco de Programas y Proyectos de Inversión de la Universidad Industrial de Santander, que contenga la documentación técnica de soporte, como son presupuestos, especificaciones y diseños detallados para cada uno de los sistemas a implementar.

2. FUENTES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La generación de energía eléctrica requiere de fuentes de energías primarias que pueden clasificarse como renovables (limpias sostenibles) y no renovables.

Las fuentes renovables son aquellas que dependen de recursos naturales inagotables como (el sol, el viento, corrientes de agua), estas energías pueden ser utilizadas a largo plazo, al ser de rápida generación. Normalmente estas energías son no convencionales, no contaminan en su generación lo que las hace compatibles con el medio ambiente.

Por otra parte, las energías no renovables dependen de recursos que se encuentran de forma limitada en el planeta, como la energía nuclear y los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), cuya velocidad de consumo es mayor que la de su generación, estas fuentes son altamente contaminantes, son convencionales y las de mayor uso en el mercado.

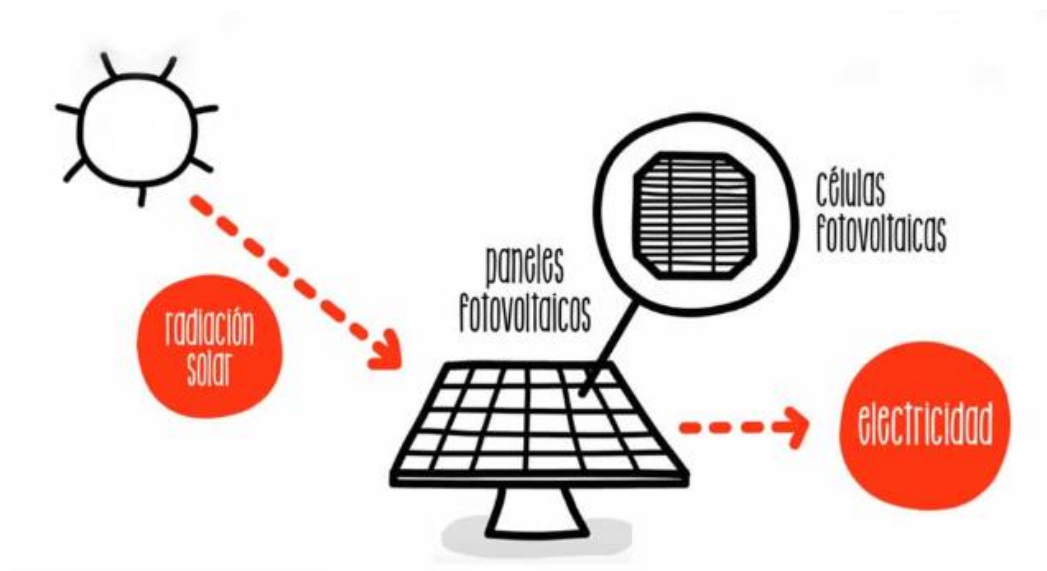
El objetivo de este proyecto es implementar prototipos prácticos como una estrategia para el adecuado análisis y comprensión de los procesos tecnológicos relacionados con la obtención de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y no renovables. Se considerará un sistema solar fotovoltaica FV y una Central Térmica de Vapor (CTV) básica, como los sistemas más adecuados para el cumplimiento de este objetivo.

2.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Es una fuente de energía renovable que mediante el efecto fotovoltaico la luz solar se transforma en electricidad, al incidir la radiación sobre un elemento conductor (paneles o módulos) que produce una diferencia de potencial capaz de generar corriente eléctrica.

La tecnología fotovoltaica es totalmente confiable, no contamina en su proceso de generación, no emite gases de efecto invernadero, y no genera ruidos molestos, su mantenimiento es mínimo, requiere una limpieza permanente de los paneles y una inspección de los equipos eléctricos anualmente.

Figura 1. Sistema Solar Fotovoltaico



Fuente: ACCIONA. [En línea]. (Recuperado el 29 abril 2019). Disponible en <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/>

3. SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Un sistema solar fotovoltaico es un conjunto de componentes, eléctricos, electrónicos y mecánicos, que se acoplan para captar la radiación solar disponible y transformarla en corriente eléctrica.

El criterio más común para clasificar los sistemas FV está relacionado con la autonomía que puedan tener para suministrar la producción de energía de una manera confiable y segura a los consumidores.

La *Tabla 1*, muestra los diferentes tipos de sistema de acuerdo a su nivel de autonomía y las características más relevantes en términos de sus componentes y aplicaciones.

Tabla 1. Sistemas Solares Fotovoltaico

Tipos	Características	Componentes	Aplicación
Sistema Autónomo	- Almacena la energía producida	- Panel FV - Regulador - Baterías - Inversor	- Lugares Remotos - Zonas No Interconectadas ZIN - Zonas agrícolas y ganado - Señalización y comunicaciones - Alumbrado público
Sistema Grid Tie	- Sistemas conectados a la red - Consumo Instantáneo, no almacena la energía. - Sistema modular	- Panel FV - Inversor Bidireccional - Medidor	- Autoconsumo hogares - Venta de energía empresas o la red pública - Edificios sostenibles
Sistema Híbrido	- Energía combinada de la red y la fotovoltaica -	- Panel FV - Regulador - Baterías - Inversor híbrido	- Respaldo de energía en área remotas - Plantas de respaldo

4. COMPONENTES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

Los componentes de un sistema FV se pueden clasificar en dos tipos:

- Componente principal de generación o panel FV
- Componentes auxiliares:
 - Inversor
 - Regulador
 - Medidor
 - Baterías

4.1 COMPONENTE PRINCIPAL DE GENERACIÓN O PANEL FV

El componente principal del sistema FV es el panel o módulo FV compuesto por un conjunto de celdas Fotovoltaicas interconectadas, encargadas de transformar la energía solar en corriente eléctrica continua, a partir del efecto fotoeléctrico. Estas celdas FV están compuestas de materiales semiconductores de dos capas que producen una diferencia de fotovoltaje y un potencial eléctrico entre las capas, este voltaje es el encargado de producir una corriente a través de un circuito externo.

Existen diferentes tecnologías de fabricación para las células fotovoltaicas como:

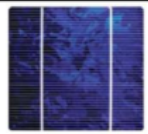
- Celdas de silicio
- Celdas de películas delgada (Ga, In, Te)
- Multifuncional
- Celdas Orgánicas
- Híbridas (orgánicas – Inorgánicas)

La mayoría de sistemas fotovoltaicos implementados en la industria utilizan paneles con **celdas de silicio** a pesar de los nuevos desarrollos. Estos paneles se encuentran en varias potencias de generación, desde 1[w] hasta 500 [w], con rendimientos de conversión del orden de 18% hasta 19,5% para celdas de silicio monocristalino. En una aplicación, esta potencia se ve reducida por diferentes factores como, por ejemplo, el tiempo de uso, al reducirse la eficiencia hasta un 80% en 25 años, además de otros factores relacionados con las condiciones ambientales que los rodean como, el polvo, las sombras, la humedad, la temperatura entre otras. La temperatura en particular tiene un efecto negativo en el rendimiento del panel, debido a que disminuye el voltaje y la potencia, al aumentar la corriente eléctrica.

Esta tecnología viene con una garantía de rendimiento de mínimo 80% en 25 años. Fallas en menos de 1%, causadas generalmente por daños externos. Aparte de una limpieza ocasional, no necesitan ningún mantenimiento.

Las células de Silicio se pueden clasificar en tres tipos dependiendo de su proceso de fabricación, monocristalinas, policristalinas y de película delgada o amorfa. La *Figura 2*, muestra las principales características y un valor aproximado en cuanto a la eficiencia teórica. Los paneles de células monocristalinas tienden a ser más costosos por la fabricación más complicada.

Figura 2. Tipos de Celdas Fotovoltaicas

CÉLULA		EFICIENCIA EN LABORATORIO	EFICIENCIA DIRECTA
	Mono-cristalina	24%	14-17 %
	Poli-cristalina	19-20%	11-14%
	De película delgada (amorfos)	16%	<10%

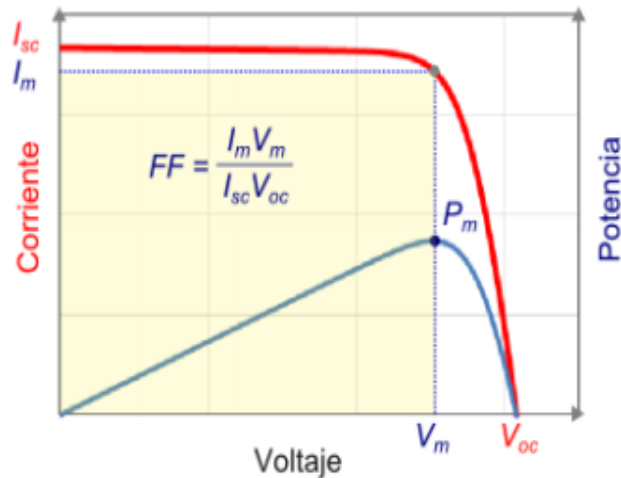
Fuente: Celdas fotovoltaicas. [En línea]. (Recuperado en 20 de febrero 2019). Disponible en <https://eliseosebastian.com/capas-de-las-celdas-solar-fotovolt>

Para clasificar la potencia de un panel FV existe un parámetro estandarizado que se denomina potencia pico, corresponde a la potencia máxima que el panel puede entregar bajo condiciones estándar de laboratorio TEC: radiación 1000 W/m^2 y temperatura 25°C .

4.1.1 Caracterización del panel fotovoltaico (FV). La representación gráfica característica de un panel FV se denomina curva Intensidad – Tensión, estas variables están definidas por:

- ✓ Radiación solar incidente
- ✓ Temperatura ambiente
- ✓ Características de carga conectada

Figura 3. Curva de Carga para un Panel FV y datos fabricantes.



CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS EN TNOC									
Potencia Maxima (P_{max})	221W	224W	228W	232W	236W	239W	243W	247W	251W
Voltaje de Circuito Abierto (V_{oc})	41.7V	41.8V	41.9V	42.0V	42.1V	42.2V	42.3V	42.4V	42.5V
Corriente de Corto Circuito (I_{sc})	7.03A	7.10A	7.17A	7.23A	7.32A	7.41A	7.50A	7.60A	7.70A
Voltaje a Potencia Maxima (V_{mp})	33.4V	33.5V	33.6V	33.7V	33.8V	33.9V	34.0V	34.1V	34.2V
Corriente a Potencia Maxima (I_{mp})	6.62A	6.69A	6.79A	6.89A	6.98A	7.05A	7.15A	7.25A	7.34A

Fuente: Curva Característica de Panel. [En línea]. (Recuperado en 20 de febrero 2019). Disponible en <https://www.greenenergy-latinamerica.com/tienda/producto/panel-solar-fotovoltaico-as-6p-340w/>

El comportamiento de esta curva se caracteriza por generar una intensidad de corriente constante para un amplio rango de tensiones, pero cuando alcanza cierto valor, la corriente disminuye asintóticamente a cero.

A continuación se describen las principales variables de la curva de carga del panel FV:

- La corriente de cortocircuito (I_{sc}) es la máxima corriente que puede fluir por un panel, cuando la tensión en los terminales es cero.
- El máximo voltaje que alcanza el panel es el voltaje de circuito abierto (cc, se da cuando la corriente en los terminales es cero.
- La corriente máxima (I_m), es cuando el panel está en cortocircuito.

- La tensión máxima (V_m), es cuando el panel está en circuito abierto.
- El punto de máxima potencia (P_{mpp}), es donde se alcanza la máxima eficiencia del panel, las coordenadas de dicho punto son designadas por (I_m) y (V_m).

$$P_{mpp} = I_m * V_m \quad (1.)$$

Para determinar la curva real de potencia, se define un factor de forma (FF) así:

$$FF = \frac{P_{mpp}}{(I_{sc} * V_{oc})} = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{(I_{sc} * V_{oc})} \quad (2.)$$

Este factor es útil para medir la forma de la curva, definida por las variables (I) y (V), su valor debe estar entre 0,7 y 0,85, para ser un valor aceptable. El (FF) es un parámetro de gran utilidad en la práctica, debido a que permite evaluar los diferentes paneles FV en el caso de hacer una comparación.

4.2 COMPONENTES AUXILIARES

Los componentes auxiliares varían según el diseño que se busque instalar, de acuerdo a la *Figura 1*, se presentan los elementos de cada sistema y se hace una pequeña descripción de cada uno de ellos:

- Inversor
- Regulador
- Baterías
- Medidor

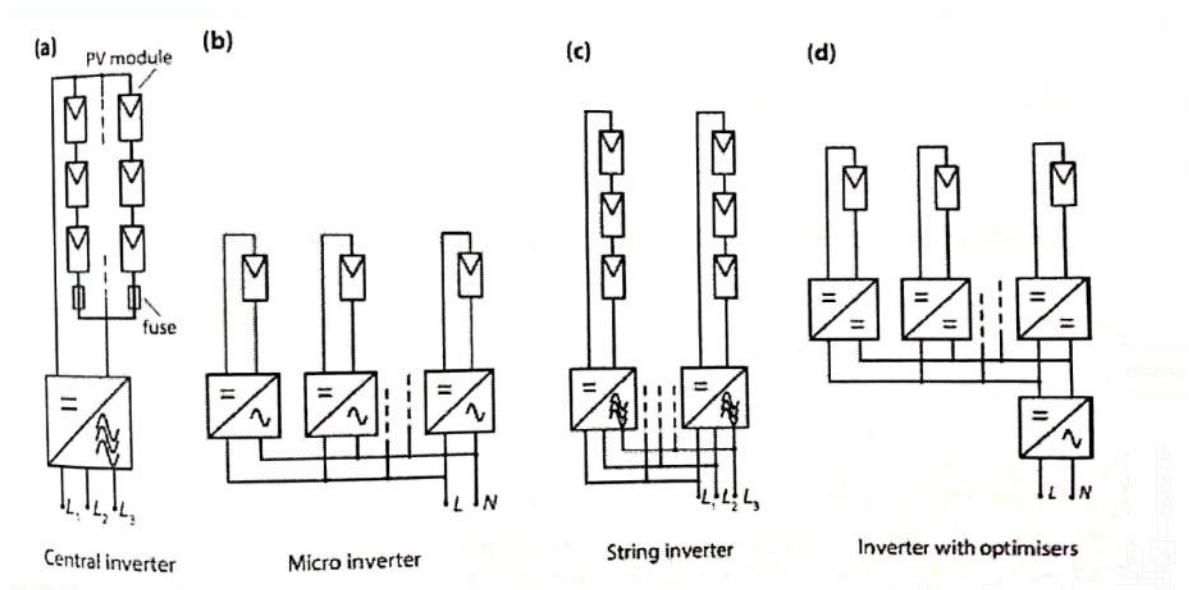
4.2.1 Inversor solar. Un inversor solar es básicamente un convertidor de energía que realiza la transformación de corriente continua (V_{dc}) generada a partir de los paneles FV en corriente alterna (V_{ac}) para ser almacenada en baterías, inyectada a la red o consumida directamente por la carga. Es el elemento principal constitutivo del sistema porque determina la conexión entre paneles y define la interfaz con la red.

La arquitectura del sistema FV depende de varios factores como, la localización, la escalabilidad, los costos, entre otros factores.

La *Figura 4*, muestra la tipología de la arquitectura de Inversores en sistema FV del mercado:

- Inversor central
- Microinversores
- Cadena de inversores
- Inversor con optimizadores

Figura 4. Diferentes sistemas de arquitectura empleados en sistemas fotovoltaicos.



Fuente: SMET, Arno, et al. Solar energy The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems. Cambridge: UIT Cambridge Ltd. 2016. p 453. ISBN 978 1 906860 32 5.

Según el objetivo de este trabajo de grado, el cual hace referencia a la implementación de bancos de laboratorio, se sugiere utilizar microinversores al ser la tecnología más viable, debido a sus múltiples beneficios en cuanto al monitoreo del comportamiento de cada panel y la ampliación del sistema a futuro al ser modular.

Esta tecnología de microinversores permite una conexión directamente con cada panel FV, lo cual mejora la capacidad de monitoreo del sistema y reduce pérdidas eléctricas en corriente continua, al extraer la máxima potencia de cada panel mediante el criterio de seguimiento del punto de máxima potencia (mppt) de esta forma la falla de uno de ellos no afectará la instalación completa del sistema y puede mitigar el efecto de sombra o la orientación errónea, además, ofrecen gran flexibilidad durante la instalación del sistema y puede ser modular.

La seguridad es otro factor determinante para la selección de estos componentes, gracias a la conversión de continua a alterna realizada en cada panel, se crea un entorno más seguro, debido a que se trabaja con tensiones más bajas, al mismo tiempo, la mayoría de fabricantes de microinversores incluyen protecciones eléctricas en corriente continua, (sobrevoltaje, subvoltaje, sincronismo, frecuencia, anti isla, sobrecorriente y sobret temperatura) para mayor seguridad de todo el sistema.

4.1.2 Regulador de carga. Este dispositivo produce el acople entre el módulo, la batería y la carga. Es el encargado de proteger la batería contra sobrecargas y descargas profundas. Cuando el regulador detecta que la batería está siendo sobrecargada, desconecta el generador FV y cuando detecta que la batería está siendo sobre descargada, desconecta los consumos. Además, evita que la corriente pueda fluir de las baterías al panel en periodos sin sol.

4.1.3 Baterías o acumuladores. La misión principal de una batería dentro de un Sistema Solar FV, es la de almacenar la energía producida por los módulos y entregarla cuando los equipos la requieran. Cuando el sistema está conectado a red no

necesita baterías. Existen varios tipos de baterías para sistemas FV como, las de Plomo-ácido y las de Níquel-Cadmio.

Las características fundamentales que definen el comportamiento de una batería hacen referencia a:

- ✓ Capacidad de descarga en amperios hora [Ah]
- ✓ Profundidad de descarga
- ✓ Vida útil en ciclos

4.1.4 Medidor de energía. Los medidores de energía son aparatos usados para la medida del consumo de energía eléctrica, estos instrumentos funcionan bajo el principio de inducción magnética, producido por la circulación de corriente. Este aparato recoge voltaje y corriente de la fuente de energía para contabilizarlas en líneas o redes de corriente alterna, tanto monofásicas como trifásicas y muestra la información en un registro o un visor digital. Existen diferentes tipos de medidores, dependiendo de su construcción, tipo de energía que mide, clase de precisión y conexión a la red eléctrica, para el desarrollo de este trabajo de grado se sugiere utilizar un medidor bidireccional.¹

Este componente, además de poder medir el consumo de energía eléctrica de la compañía girando en el sentido normal puede girar de manera contraria, lo cual indica que puede medir la entrada y salida de corriente eléctrica. De esta forma se puede conocer el ahorro económico de la energía solar y tener un valor específico del aprovechamiento del sistema FV a instalar.

¹ MEDIDORES-DE-ENERGÍA. [En línea]. (Recuperado en 20 de febrero 2019). junio Disponible en <https://es.scribd.com/doc/56468165/MEDIDORES-DE-ENERGIA>

5. SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED (SFCR) “*GRID TIE*”

A diferencia de un sistema autónomo donde se debe satisfacer una demanda requerida, los sistemas FV conectados a la red “*Grid Tie*”, tienen como objetivo producir energía para posteriormente ser inyectada a la red de distribución ver *Tabla 1*. La energía generada puede ser menor, mayor o igual a los requerimientos de la carga, en cualquier caso, el sistema estará respaldado por la red eléctrica.

En caso de superar la demanda, el sistema tiene la posibilidad de vender el excedente a red pública, según resolución 030 de la CREG², donde se establecen los aspectos operativos y comerciales para permitir la integración de la autogeneración y la generación distribuida de energía.

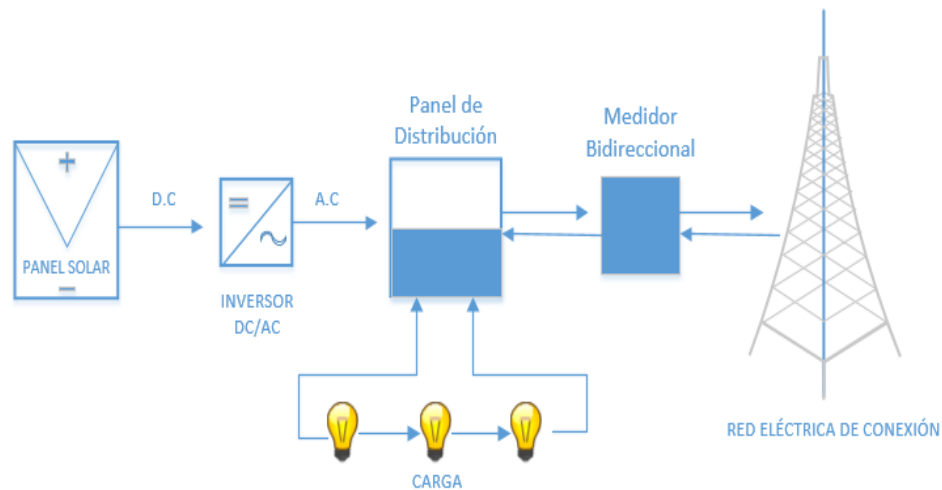
Por consiguiente, los sistemas conectados a la red, reducirán el consumo energético de la red que se verá representado en la disminución del costo de la factura; además, contribuyen con la reducción del impacto ambiental gracias a que estos sistemas no requieren el uso de baterías, la energía generada se vierte directamente a la red de distribución.

La conexión de estos sistemas depende de si se quieren controlar todos los paneles o sólo uno; generalmente se utiliza un inversor central capaz de sincronizar la onda eléctrica generada con la de la red eléctrica para que sea compatible, esta conexión se hace mediante una simple conexión física de (autoconsumo), un punto de acople común o una transferencia automática.

² CREG: Centro de Regulación de Energía y Gas. [En línea]. (Recuperado el 20 de febrero del 2019). Disponible en <http://apolo.creg.gov.co/Publicacac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c2c4474f05258243005a1191>

Para el diseño de este sistema, se utilizarán microinversores conectados a cada panel, con el fin de maximizar la captación de la radiación solar y tener un mayor control del comportamiento de todo el sistema, lo cual permitirá una inyección directa a red más segura y eficiente. Este proceso se sugiere hacer mediante una nueva tecnología de **ENPHASE**, la cual contiene los componentes adecuados para brindar las protecciones al sistema y hacer el empalme con la red de forma más fácil, adicional a esta tecnología, será necesario instalar un medidor bidireccional que pueda medir la energía fotovoltaica generada y un sistema de monitoreo permita hacer un seguimiento continuo al sistema, con el fin de estudiar y analizar los datos obtenidos por cada uno de los paneles, en el laboratorio de sistemas térmicos.

Figura 5. Esquema Sistema FV “Grid Tie”



La figura anterior, representa el esquema general del Sistema FV a implementar, este sistema inyecta la energía generada a la red eléctrica mediante la tecnología flexible y modular de **ENPHASE**, mencionada en el capítulo 5.3.2.2. Para inyectar la energía a la red es necesario definir la interfaz con la red, por lo cual, se deberá identificar apropiadamente la red eléctrica de edificio.

5.1 IDENTIFICACIÓN DE LA RED ELÉCTRICA DEL EDIFICIO

El edificio de laboratorios de la escuela de Ingeniería Mecánica, cuenta con un suministro de energía autónomo, gracias a que posee una subestación eléctrica de 13200/ 220- 127 [V], ubicada en el sótano uno del edificio, además del suministro de energía, cuenta con una planta de emergencia de 220 [kva].

La distribución de la energía del edificio se realizó mediante un sistema moderno de blindobarras³ las cuales se distribuyen en 4 diferentes líneas (Normal, Regulada, Energía de Emergencia y Aire Acondicionado), estas van desde el sótano del edificio hasta el último piso, cada piso tiene un cuarto llamado buitrón por donde pasa la línea, esta se divide en cajas o tableros de derivación para luego hacer la distribución final a cada uno de los circuitos eléctricos correspondientes.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar que representa de forma general la distribución eléctrica del edificio de laboratorios de la escuela de Ingeniería Mecánica.

³ Sistema de blindobarras: son una alternativa a la distribución de energía eléctrica con cable económica, de fácil instalación, de mejor apariencia y desempeño; muy estables mecánica y térmicamente

Diagrama de la red de distribución de energía eléctrica:

- Transformador 3φ DY5, tipo seco** alimenta la red principal de **4000 [A]**.
- La red principal se divide en tres ramas:
 - Red A.A** (400 [A])
 - Red Regulada** (250 [A])
 - Red Normal** (3200 [A])
- La **Red Normal** alimenta la **Planta** (200 [KVA]) y la **Transferencia Automática** (600 [A]).
- La **Transferencia Automática** está conectada a una red de **400 [A]** que alimenta una serie de interruptores de transferencia (TPS-1, TPS-12, TP1-1, TP1-12, TP2-1, TP2-12, TP3-1, TP3-12, TP4-1).

- Sobre la base de la demanda

Para este proyecto se toma la segunda opción, el criterio sobre la base del espacio disponible, debido a que la demanda del edificio es muy grande, respecto el área dispuesta, por lo tanto, no se puede satisfacer en su totalidad.

De acuerdo a este caso, se presenta la siguiente metodología del sistema FV a instalar:

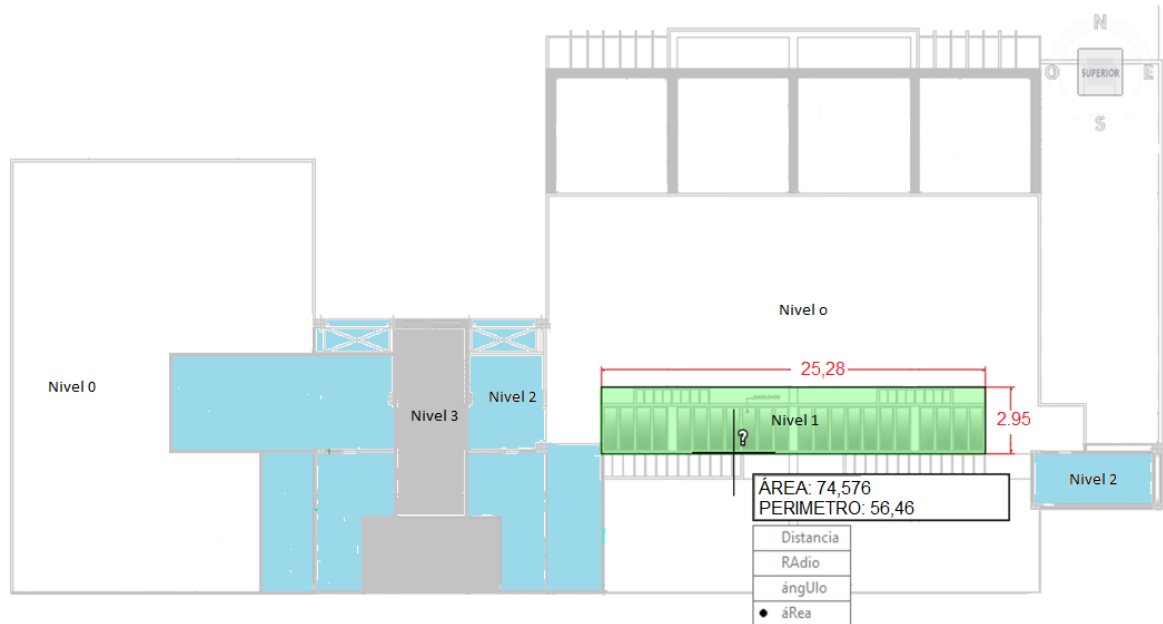
- Determinar el área disponible.
- Determinar la disponibilidad del recurso solar.
- Determinar la energía producida por sistema.

5.2.1 Determinar el área disponible. Para determinar el área disponible, es necesario definir el procedimiento que ayudaran a precisar el área bruta total, con el fin de estimar la cantidad total de paneles que determinaran la potencia del sistema.

- Identificación del área bruta total
- Factores que disminuyen el área disponible (Sombras)
- Determinación del número de paneles FV

5.2.1.1 Identificación del área bruta total. El área disponible está ubicada en el cuarto piso del edificio de la Escuela de Ingeniería Mecánica. La *Figura 7*, muestra el área bruta total para la instalación de los paneles, previamente dispuesta según planos arquitectónicos obtenidos por parte de la División de Planta Física de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 7. Plano cuarto piso sección Este.



Este espacio consta de un área total aproximada de **74.58** metros cuadrados, siendo un rectángulo de 25.28 [m] x 2.95 [m], el cual coincide con algunas de las claraboyas del edificio y cuya inclinación es aproximadamente +/- 5 grados. Este espacio está ubicado en la terraza técnica del edificio de laboratorios de Ingeniería Mecánica, localizada en el cuarto piso de la edificación sección oriental donde comparte espacio con equipos de aire acondicionado y cafetería de estudiantes, como se evidencia en la siguiente Figura. Anexo A. Planos Arquitectónicos del Edificio.

$$\text{Área disponible} = 75 \text{ [m}^2\text{]}$$

Figura 8. Vista superior edificio de laboratorios de Ingeniería Mecánica.

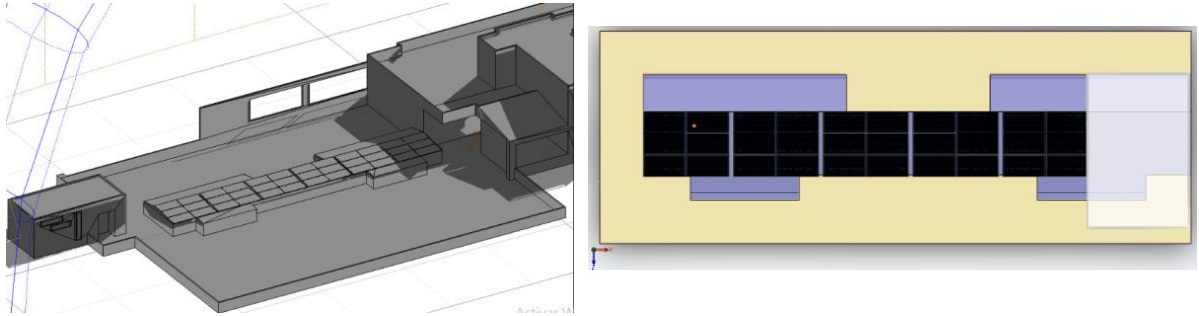


Fuente: Edificio de Laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica. [En línea]. (Recuperado 26 junio 2019). Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=afHdv2XhJtg&t=22s>

5.2.1.2 Factores que disminuyen el área disponible. Las sombras son el principal factor de disminución del área disponible, debido a que afectan directamente el rendimiento del panel, por lo cual es necesario evitar al máximo la cercanía con los obstáculos que las generen. Para el estudio de esta variable, se desarrolló un modelo que consistió en hacer una simulación de la ubicación exacta del espacio donde va a ser instalado el sistema, con el fin de identificar las sombras generadas por estructuras o edificios aledaños que afectan los paneles. Este análisis se realizó mediante el software **ECOTECH**, el cual permitió simular la trayectoria del sol durante un año y de forma gráfica mostrar las sombras que afectarán la instalación FV en los diferentes meses del año y a diferentes horas del día.

De acuerdo al análisis de sombras que se realizó anteriormente, se presenta de forma gráfica la cantidad de sombras en el punto más crítico.

Figura 9. Área sombreada para el mes de noviembre.



La Figura 9, muestra una vista isométrica y una superior, donde se observa el porcentaje crítico de sombras que afectarán el área de distribución del sistema FV. Este valor es equivalente a un 16.5% respecto al área bruta total disponible, para el mes de noviembre. El análisis de sombras se realizó para varios puntos del edificio obteniendo como resultados modelos en 3D. Ver informe del análisis de sombras en el Anexo B.

$$\text{Área con sombra} = 12,375 \text{ [m}^2\text{]}$$

5.2.1.3 Determinación del número de paneles FV. De acuerdo a los resultados obtenidos se define el área efectiva, este valor se tuvo en cuenta para determinar el número de paneles FV que se sugieren instalar en la azotea de la Escuela de Ingeniería Mecánica. La distribución de los paneles FV se realizó mediante un modelo 3D en Solidworks, para lo cual fue necesario tener en cuenta el espacio entre paneles para el mantenimiento del sistema.

$$\text{Área}_{\text{efectiva}} = A_{\text{bruta}} - A_{\text{somb}} \quad (3.)$$

$$\text{Área}_{\text{efectiva}} = 75 - 12,375 = 62.625 \text{ [m}^2\text{]}$$

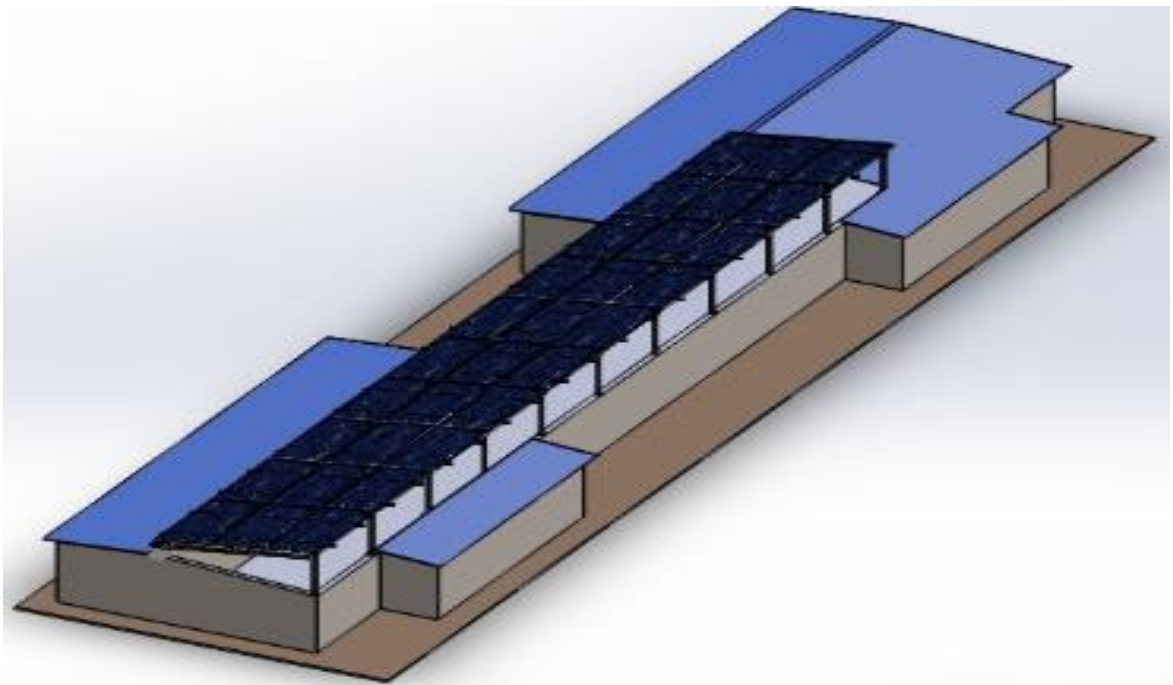
$$\# \text{ paneles} = \frac{\text{Área efectiva}}{\text{Área panel}} \quad (4.)$$

El área de un panel FV se asume de 2,1 metros cuadrados, para términos de cálculos así:

$$\# \text{ paneles} = \frac{62,625}{2,1} = 29.82$$

Como resultado se obtiene el número total de paneles FV que se sugieren instalar. **30 paneles** distribuidos como se observa en la *Figura 10*.

Figura 10. Distribución de los Paneles FV a Instalar.



5.2.2 Determinar la disponibilidad del recurso solar. Para calcular la energía producida por el sistema FV, es necesario determinar la disponibilidad del recurso solar. Para lo cual se analizó el nivel de radiación solar incidente por unidad de superficie horizontal para la ciudad de Bucaramanga y los diferentes factores que afectan la eficiencia del panel.

- Cálculo de la Irradiación para Bucaramanga
- Cálculo de Factores del sistema

5.2.2.1 Cálculo de la irradiación para Bucaramanga. El potencial energético con el que cuenta el sitio donde se sugiere instalar el sistema FV “*Grid Tie*” se determina mediante estudios de geoposicionamiento, lectura de mapas o programas de simulación, capaces de proporcionar la cantidad de radiación promedio diaria mensual disponible del lugar de instalación del sistema.

El recurso solar disponible se mide con la irradiación solar que viene dada por la cantidad de (*HPS*) Hora Pico solar. Este valor se calcula mediante tres diferentes fuentes de información:

- Atlas de radiación solar del IDEAM
- Radiación solar de la NASA
- Estación meteorológica de la Escuela de Ingeniería Mecánica

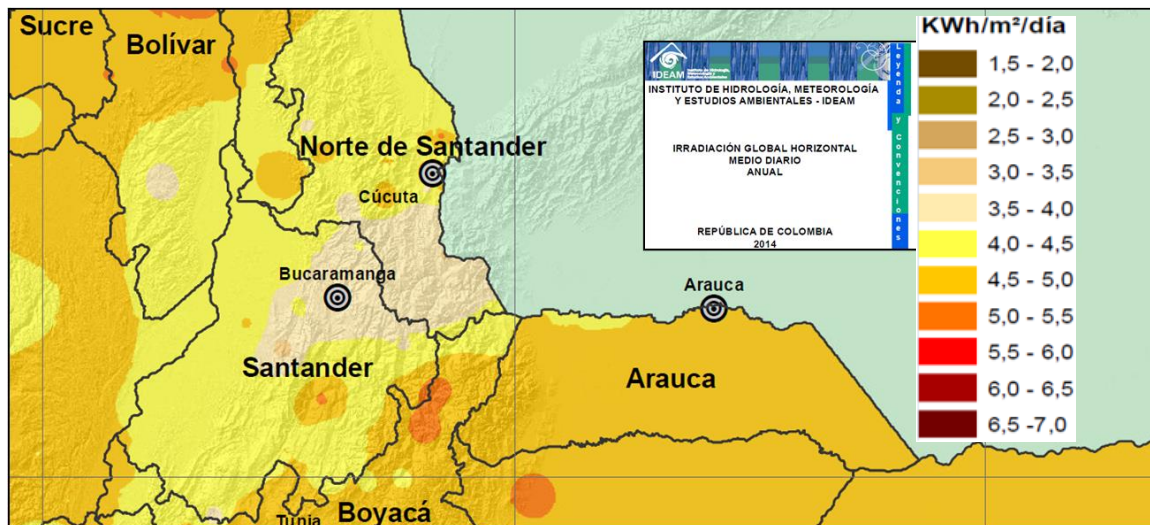
El desarrollo de cada una de estas formas de obtención de las (*HPS*), se hace con el fin de seleccionar la fuente más apropiada para el diseño de este sistema FV.

- **Atlas de radiación solar IDEAN**

El Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia es una herramienta fundamental para la valoración y el comportamiento de la disponibilidad de la energía solar en el territorio nacional. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en conjunto con la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), pone a disposición un conjunto de mapas, datos, tablas, análisis de información actualizada de la radiación solar, los cuales ilustran el potencial energético en Colombia, la disponibilidad de los recursos renovables, y además, se puede identificar las regiones estratégicas con mayor potencial en el aprovechamiento de la energía solar para su posible utilización.

La *Figura 11*, muestra de forma gráfica la irradiación disponible para el departamento de Santander, la irradiación global horizontal media diaria anual, tiene un valor promedio de 3,5 a 4 [KWh/m²/día], datos obtenidos para el año 2014.

Figura 11. Irradiación global horizontal media diaria anual para Santander.



Fuente: IDEAM. [En línea]. (Recuperado el 26 junio 2019). Disponible en <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>

La *Tabla 2*, muestra de forma estadística los promedios mensuales de irradiación global media recibida en la superficie de las estaciones convencionales del IDEAM, usadas para el atlas, donde se observa que la estación meteorológica del aeropuerto Palo Negro del municipio de Lebrija, está es la más apropiada debido a que su ubicación geográfica no difiere mucho. Para este caso la radiación promedio anual es de 3,968 [KWh/m²/día].

Tabla 2. Promedios Mensuales de Irradiación Global Media de las Estaciones Convencionales de Colombia.

Estación	Municipio	Departamento	Lat	Long	Elevación (m.s.n.m.)	Valor promedio (Wh/m ² por día)												Promedio Anual
						ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Simijaca	Simijaca	Cundinamarca	5,50	-73,85	2572	5074,2	5439,4	5824,3	4995,1	5002,1	4650,8	5382,4	5364,9	4948,6	4483,4	4817,1	4990,4	5081,1
La Primavera	Subachoque	Cundinamarca	4,85	-74,22	2590	4683,4	4548,5	4952,1	4201,9	4114,7	4184,5	4360,1	4240,3	4505,5	4297,3	4614,8	4392,7	4424,6
Tabio	Tabio	Cundinamarca	4,77	-73,93	2620	4677,6	3777,4	3805,3	3307,6	3404,1	3665,8	3500,6	3676,2	3559,9	3771,6	4264,7	3948,4	3779,9
Novilleros	Villa de San Diego de Ubaté	Cundinamarca	5,33	-73,78	2550	4565,9	4453,1	4717,1	4170,5	3970,5	3796,0	4007,7	4212,4	4322,9	4324,0	4003,0	4215,9	4229,9
Hidrobetania	Campoalegre	Huila	2,71	-75,42	500	4462,7	4420,4	4188,8	4068,3	4320,4	4527,0	4454,1	4501,8	4825,7	4491,8	4712,5	4387,3	4446,7
Aeropuerto Benito Salas	Neiva	Huila	2,95	-75,29	439	4836,0	4700,4	4590,5	4628,9	4552,2	4550,1	4509,7	4656,6	4785,1	4782,3	4607,8	4618,0	4651,5
Parque Arqueológico	San Agustín	Huila	1,89	-76,29	1800	4716,9	4657,5	4311,1	4462,7	4602,3	4384,2	4136,8	4228,7	4894,9	4829,1	4777,9	4826,6	4569,1
La Mina	Hatonuevo	La Guajira	11,14	-72,62	80	5091,6	4726,6	5105,4	5011,7	5033,1	5192,6	5307,9	5527,4	5077,0	5035,9	4756,2	4498,9	5030,4
Aeropuerto Almirante Padilla	Riohacha	La Guajira	11,53	-72,92	4	5202,8	5556,0	5761,0	5898,3	5618,0	5975,8	6237,6	6045,2	5832,8	5247,8	4977,5	4916,6	5605,8
Nazareth	Uribia	La Guajira	12,18	-71,28	85	4868,0	4763,8	5365,8	5023,6	4880,2	6052,6	5670,4	5842,4	5501,6	4601,5	4118,1	4321,1	5084,1
Prado Sevilla	Zona Bananera	Magdalena	10,76	-74,15	18	5373,1	5537,5	5698,7	5694,0	5349,7	5392,5	5488,7	5471,5	5037,5	5194,5	5026,5	5393,5	5388,1
La Holanda	Granada	Meta	3,52	-73,72	360	3658,7	3841,7	3595,3	4093,4	4482,2	3982,1	4742,8	5158,3	4686,3	5355,1	4515,3	4373,7	4373,7
Aeropuerto Vanguardia	Villavicencio	Meta	4,16	-73,62	422	4784,9	4514,5	4337,1	4565,8	4699,2	4650,1	4542,9	4993,2	5307,6	5286,1	4747,4	4580,0	4750,7
Aeropuerto San Luis	Aldana	Nariño	0,86	-77,68	2961	4236,0	3950,9	3902,6	3980,9	4161,5	4337,7	4301,9	4058,9	4203,6	4230,1	3997,0	4003,5	4113,7
Obocono	Pasto	Nariño	1,20	-77,30	2710	3710,6	3417,9	3534,0	3574,7	3497,4	3302,1	3576,1	3555,9	3530,9	3544,8	3475,5	3473,3	3516,1
Ábrego	Ábrego	N. de Santander	8,09	-73,22	1430	4910,9	4804,9	4839,1	4582,7	4515,6	4841,7	4885,8	4719,4	4723,3	4720,8	4510,5	4749,8	4733,7
Cinera Villa Olga	Cúcuta	N. de Santander	8,17	-72,47	100	4185,4	4708,1	5086,7	4877,9	5321,1	5728,1	5741,8	6006,7	6141,4	5467,2	5005,4	4895,4	5263,8
Salazar	Salazar	N. de Santander	7,77	-72,83	860	4667,5	4557,0	4292,4	4549,9	5059,7	5032,8	5695,3	5471,3	5470,7	5036,9	4801,9	4497,3	4927,7
Aeropuerto Matecaña	Pereira	Risaralda	4,82	-75,74	1362	4279,4	4406,3	4283,9	4099,7	3805,1	3940,5	4243,6	4362,0	4273,2	4338,6	4183,3	4315,4	4210,9
Aeropuerto Palonegro	Lebrija	Santander	7,12	-73,18	1189	4012,9	3930,1	4029,2	3908,6	4164,3	3871,2	4081,0	3656,1	4079,5	4062,9	3830,9	3995,5	3968,5
El Cucharo	Pinchote	Santander	6,53	-73,20	975	4862,1	4889,1	4969,9	4813,3	4788,5	4839,8	4789,8	5093,5	5098,7	5116,8	4975,5	4988,8	4935,5
Guamo	Guamo	Tolima	4,01	-74,98	360	5016,8	4783,9	4511,0	4979,6	4979,8	4824,6	5035,4	5442,9	5519,9	5395,2	5006,9	4828,2	5027,0
Aeropuerto Perales	Ibagué	Tolima	4,42	-75,14	943	4615,6	4578,8	4621,2	4651,4	4627,9	4717,9	4896,1	4986,2	4846,8	4679,7	4404,6	4332,7	4663,2
Ing. Manuelita	Palmira	Valle del Cauca	3,57	-76,28	1020	4634,3	4652,7	4625,4	4490,0	4419,0	4248,0	4570,1	4665,8	4607,5	4512,3	4363,1	4444,9	4526,2
Las Gaviotas	Cumaribo	Vichada	4,55	-70,93	171	5160,0	4990,4	4708,3	4254,0	4016,3	3820,5	4007,2	4227,2	4563,5	4502,4	4385,4	4814,5	4454,1

Fuente: Atlas radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia. IDEAM y UPME. [En línea]. (Recuperado el 25 de febrero). Disponible en <http://www.andi.com.co/Uploads/RADIACION.compressed.pdf>

Para diseño de un sistema solar FV se tuvo en cuenta el criterio del peor mes que para este caso se fue el mes de agosto con una irradiación **3.656 [Kwh/m²/día]**, equivalente a 3,65 HSP según la tabla anterior tomada del IDEAM.

- Radiación solar NASA

La NASA durante más de 20 años de apoyo mediante misiones científicas ofrece apoyo a sistemas de satélites e investigaciones encargados de generar datos para estudios relacionados con los procesos climáticos sobre la superficie terrestre, datos sobre recurso solar y meteorología los cuales han resultado ser precisos y confiables en diferentes lugares del mundo.

La *Tabla 3*, muestra los resultados proporcionados por la plataforma digital SSE RETScreen perteneciente a la NASA, los cuales corresponden a las coordenadas geográficas del edificio de laboratorios; en las que se presentan datos promedios mensuales y anuales.

Tabla 3. NASA Meteorología de superficie y energía solar: datos RETScreen.

Mes	Temperatura del aire	Humedad relativa	Radiación solar diaria-horizontal	Presión atmosférica	Velocidad del viento	Temperatura de la tierra	Grados de calentamiento diarios	Grados de enfriamiento diarios
	°C	%	kWh/m ² /d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
Enero	23.3	65.6%	5.34	91.9	2.0	24.3	0	417
Febrero	24.7	59.8%	5.34	91.8	1.9	26.4	0	416
Marzo	24.5	66.0%	5.28	91.8	1.7	26.2	0	451
Abril	23.7	76.6%	4.96	91.8	1.6	24.9	0	412
Mayo	23.2	80.1%	5.01	91.9	1.6	23.9	0	413
Junio	23.1	76.3%	5.16	91.9	1.8	23.6	0	399
Julio	23.4	70.0%	5.57	92.0	1.8	24.0	0	423
Agosto	23.6	69.1%	5.55	92.0	1.6	24.4	0	430
Septiembre	23.0	75.8%	5.27	91.9	1.5	23.8	0	395
Octubre	22.4	81.9%	4.80	91.9	1.5	23.2	0	386
Noviembre	22.3	81.5%	4.72	91.8	1.5	23.0	0	373
Diciembre	22.4	76.2%	4.86	91.8	1.9	22.8	0	390
Anual	23.3	73.2%	5.15	91.9	1.7	24.2	0	4905

Fuente: *Atmospheric Science Data Center*. [En línea]. (Recuperado el 14 de septiembre del 2018). Disponible en <https://eosweb.larc.nasa.gov>

El promedio anual de la radiación solar sobre la superficie horizontal corresponde a **5,15 [kWh/m²/día]**, según la tabla anterior. Este valor es ligeramente mayor a los datos suministrados por el IDEAM, sin embargo, estas mediciones son satelitales y se considera que tienen un mayor rango de error, en relación a la zona de objeto de estudio, motivo por el cual se indaga una tercera fuente, cuyos datos son medidos en la estación meteorológica ubicada en la escuela de Ingeniería Mecánica UIS.

- Estación meteorológica Escuela de Ingeniería Mecánica UIS

La escuela de Ingeniería Mecánica cuenta con una estación meteorológica personalizable VENTAGE PRO2, la cual permite la recolección de datos como temperatura, humedades internas y externas, presión barométrica, punto de rocío, precipitaciones, dirección y velocidad del viento, radiación solar y UV en intervalos de

tiempo cortos y continuos durante las 24 horas del día. Estos datos son promedios de radiación solar sobre la superficie horizontal.

La *Tabla 4*, muestra los resultados obtenidos, respecto la radiación promedio diaria mensual; esta se obtiene mediante una simulación en MATLAB, al tener en cuenta los datos de la estación y las fórmulas tomas del libro *Solar Engineering of Thermal Processes*⁴, mediante la siguiente tabla evidencia el mes de julio, como el mes más crítico con una irradiación de 2.63 [kwh – día], equivalente a 2.63HSP.

Tabla 4. Radiación Solar Promedio Diaria Mensual Estación UIS.

MES	Wh/m ² *d
ENERO	4351,56
FEBRERO	5368,10
MARZO	3620,62
ABRIL	4725,04
MAYO	6824,86
JUNIO	4294,34
JULIO	3166,85
AGOSTO	3877,56
SEPTIEMBRE	3672,95
OCTUBRE	3828,48
NOVIEMBRE	3861,07
PROMEDIO	4326,49

De acuerdo con los datos de irradiación solar obtenidos mediante las tres fuentes anteriores se sugiere tomar la primera opción como la más favorable para determinar el potencial energético disponible del lugar, la opción hace referencia a la **Radiación Solar del IDEAM**.

La *Tabla 2*, muestra el promedio Mensual de Irradiación correspondiente al mes de agosto con un valor de 3.656 [Kwh/m²/día], equivalente a:

⁴ DUFFIE, John A. BECHMAN, William A. Solar Engineering of Thermal Processes. New Jersey: Wiley, 2013. Pp 3-133. ISBN 978-0-470-87366-3

$$\text{Horas Solar Pico} = 3.65 \text{ HSP.}$$

Este valor se elige debido a que los datos de la estación meteorológica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, son incongruentes en muchos de los casos por lo cual, se decidió tomar los de la estación de Palo Negro del municipio de Lebrija.

5.2.2.2 Cálculo de factores. Estos factores están relacionados directamente con la eficiencia del panel, debido a que se disminuye la producción energética de cada panel. Las pérdidas por uso y temperatura, son los factores que se tendrán en cuenta para determinar la energía producida por el sistema a instalar. El primero se calcula en relación a los parámetros del catálogo donde se establece la eficiencia del panel a largo plazo y el factor de pérdidas por temperatura disminuyen el voltaje al aumentar la temperatura lo cual afecta directamente la producción energética del panel FV.

- Factor uso del panel FV

Se considera un factor de depreciación o degradación del equipo; es decir una disminución anual en la capacidad de generación de potencia de los paneles FV, este valor lo define el fabricante quien garantiza que a largo plazo (20 años), se puede reducirse un 5%, de manera que el rendimiento del panel FV será del 0,95 para los cálculos respectivos.

$$F_{uso} = 0,95$$

- Factor de temperatura del panel FV

Para este factor es necesario definir el lugar a instalar el sistema y verificar que no haya brisas diurnas sostenidas durante el verano, encargadas de disipar el calor que la temperatura ambiente alcance los 35 a 40°C, para usar un coeficiente de degradación Cd de 0,8% (0,008) para esa estación.

$$F_{temp} = 1 - 0,008 (T_p - 25^\circ) \quad (5.)$$

Donde:

T_p : Temperatura del Panel Solar

Al reemplazar el valor de la temperatura del panel solar igual a 40° , según el catálogo del fabricante, se obtiene un valor de 0.88

$$F_{temp} = 1 - 0,008 (40^\circ - 25^\circ)$$

$$F_{temp} = 0,88$$

5.2.3 Determinar la energía generada por el sistema. Para el desarrollo de esta sección, se calculó inicialmente la energía capaz de satisfacer la demanda de las luminarias de zonas comunes, equivalente a un valor aproximado de **30 [KWh/m2/día]**, valor tomado del Anexo B. Esta energía pertenece a una parte de las luminarias totales del edificio de Ingeniería Mecánica donde será inyectada la energía FV que se busca producir.

La producción energética del sistema fotovoltaico se calculó teóricamente, a partir de la siguiente fórmula y teniendo en cuenta las variables calculadas anteriormente.

$$E_{gen} = Nt * P_p * HPS * F_{uso} * F_{temp} \quad (6.)$$

$$E_{gen} = 30 * 0,375 * 3,65 * 0,95 * 0,88 = 34,328 \text{ [KWh/día]}$$

La energía producida por el sistema equivale a 12.530 kWh/año, 1.030 kWh/mes y un promedio diario de **34,328 kWh**, esta configuración atenderá la demanda parcial del edificio en el área de luminarias, así mismo, este sistema debido al uso de microinversores permitirá el monitoreo instantáneo de la producción y la demanda del sistema panel a panel, lo cual permitirá evaluar el comportamiento del sistema mediante el desarrollo de laboratorios prácticos para el área de sistemas térmicos ya que es el objetivo principal de este trabajo de grado.

5.3 SELECCIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA FV “GRID TIE” A INSTALAR.

Para garantizar el funcionamiento óptimo del sistema FV conectado a la red “*Grid Tie*”, se debe hacer una selección adecuada de los componentes; por lo cual, se definen una serie de parámetros correspondientes a las especificaciones técnicas de los componentes, con el fin de seleccionar adecuadamente cada uno de ellos, dentro de este ítem, se debe tener en cuenta la disponibilidad actual del mercado, el servicio técnico y la tecnología adecuada para el montaje y puesta en marcha.

5.3.1 Componentes del Sistema FV “*Grid Tie*” a instalar. Los componentes principales que constituyen el Sistema FV “*Grid Tie*” a instalar son los siguientes:

- Paneles FV
- Microinversores
- Medidor

5.3.1.1 Selección y cálculos de los paneles FV. Para seleccionar el panel FV se tuvo en cuenta los siguientes parámetros de selección, además del factor de forma del panel quien define la curva de eficiencia del panel FV seleccionado.

Tabla 5. Principales parámetros para la selección del panel fotovoltaico.

Parámetro	Valor Estándar	Observaciones
Tipo Panel FV	Policristalino o Monocristalino	Depende del sistema fotovoltaico y de la eficiencia.
Potencia de salida	$\geq 280 \text{ Wp}$	Valor requerido para mejorar el desempeño del sistema.
Voltaje en $P_{\text{máx}}$	$\geq 30,5 \text{ V}$	Tensión máxima de funcionamiento en condiciones con carga que puede producir el panel solar.
Corriente en $P_{\text{máx}}$	$\geq 8,5 \text{ A}$	Corriente máxima de funcionamiento en condiciones con carga que puede producir el panel solar.
Voltaje C.O	$\geq 37,5 \text{ V}$	Tensión máxima generada por el panel bajo condiciones sin carga.
Corriente C.C	$\geq 9 \text{ A}$	Corriente máxima generada por el panel cuando la tensión en sus terminales es nula.
Eficiencia del Módulo	$\geq 16 \%$	Eficiencia solicitada en el módulo para garantizar menores pérdidas de energía eléctrica.

Condiciones STC: 1000 W/m² de Irradiancia, 25°C de temperatura de célula, espectro AM 1.5g

A partir de los parámetros establecidos en la *Tabla 5*, y el cálculo del factor de forma de varias referencias del mercado vía web, se recomienda usar el PV de referencia **TSM-DD14A- PERC-375W**, monocristalino de 72 celdas para este sistema FV, de la empresa **TRINASOLAR**, distribuida por **MEICO S.A**, es quien ofrece la mejor relación costo/beneficio, ver *Anexo C* especificaciones técnicas de las diferentes referencias.

A partir de los datos técnicos del panel FV seleccionado se halla la curva de carga del panel seleccionado y se calcula el factor de forma. A continuación, se reemplazan los valores en la ecuación 2 del capítulo 4.1 y se obtiene un valor equivalente a 0,78, siendo este el más alto respecto a las demás referencias.

$$FF = \frac{9,37 \text{ [A]} * 40,0 \text{ [V]}}{9,88 \text{ [A]} * 48,5 \text{ [V]}} = 0,78$$

5.3.1.2. Selección y cálculos de microinversores fotovoltaicos. Para la selección del microinversor se tuvo en cuenta la siguiente tabla, a partir de esta se realizó una búsqueda vía web de las diferentes tecnologías que se utilizan respecto a la utilización de microinversores.

Tabla 6. Principales parámetros para la selección del Microinversor.

Parámetros	Valor Estándar	Observaciones
Combinación de módulos recomendada	250 – 350 W	Define un rango como referencia
Potencia Pico AC de Salida	≥ 250 w	Valor de potencia alterna disponible para inyectar a la red
Máximo Voltaje DC de entrada	48 a 62 V	Compatibilidad de los paneles solares para el sistema
Máxima Corriente Cortocircuito DC	15 A	Nivel de Sobrecorriente del equipo
Factor de Potencia	$\geq 0,95$	Se garantiza un valor cercano a 1 para evitar cargas reactivas
Compatibilidad del panel	60 -72 celdas	Compatibilidad de los paneles solares seleccionados
Eficiencia del dispositivo	$\geq 95\%$	Garantiza el rendimiento del equipo
Frecuencia Nominal	60 Hz	Frecuencia establecida por normativa
Temperatura	-40 a 65 °C	Condiciones térmicas de operación del equipo
Máxima cantidad de dispositivos por circuito de 20 A (208 VAC)	≥ 24	Permite seleccionar mayores cantidades de microinversores a un circuito de 20 A

Según el análisis de los parámetros de la *Tabla 6*, y la búsqueda en el mercado se sugiere utilizar la tecnología **Enphase**, específicamente el microinversor de referencia **IQ7 plus**, este dispositivo brinda una mayor potencia y asegura un sistema más eficiente en relación costo/beneficio, ver *Anexo C. Ficha técnica y evaluación de parámetros*.

La cantidad de los microinversores será equivalente al número total de paneles necesarios para el diseño del sistema FV, para este caso serán 30 equipos de referencia **IQ7 Enphase**, debido a que cada equipo se conecta directamente a cada panel FV por medio de un conductor particular de esta tecnología.

5.3.1.3 Selección del medidor de energía. Para la implantación de este sistema, con base en el trabajo de campo desarrollado, se sugiere un medidor bidireccional Trifásico tetrafilar 208/120V 60Hz cuya referencia es **ISKRA**, (Puede ser usado en instalaciones bifásicas y monofásicas).

Este tipo de medidor debe ser instalado y supervisado por la empresa de distribución eléctrica de la red, según la normativa del **RETIE**⁵ y el código de medida de la CREG Resolución 038 del 2014.

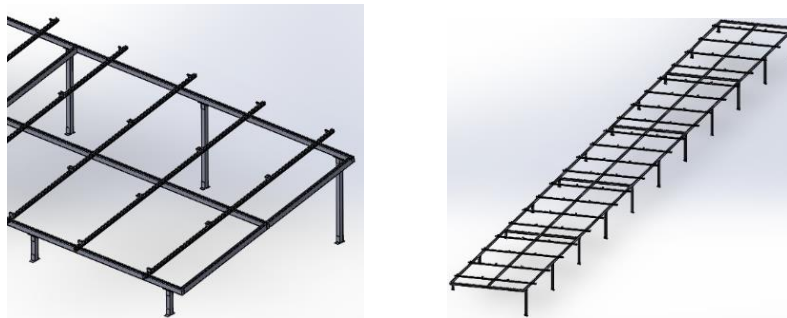
5.3.2 Seleccionar la estructura y los accesorios requeridos para la instalación de sistema FV. Esta parte del sistema no es menos importante en el diseño del sistema FV, hace referencia al proceso de instalación de los equipos, las estructuras, los conductores y demás sistemas que permitirán determinar la energía total producida por el sistema FV “*Grid Tie*”

5.3.2.1 Estructura o soporte. Para instalar el sistema FV en la azotea del edificio de Ingeniería Mecánica se requiere de una estructura que pueda soportar el peso muerto de los paneles. A partir de la cantidad de paneles previamente calculados, se recomienda una estructura compuesta que comprende 3 paneles en paralelo y 10 en serie. Esta estructura tendrá un área aproximada de 60 [m^2] y una inclinación de 10° sur.

⁵ RETIE: Reglamento técnico de instalaciones eléctricas. Capítulo 3, 20.22 Paneles solares fotovoltaicos.

La inclinación de la estructura se estableció mediante un análisis de orientación e inclinación, a partir de las ecuaciones del modelo de *Liu and Jordan*⁶ con datos de radiación horizontal tomados de la estación meteorológica de la escuela de Ingeniería Mecánica. Para mayor detalle del análisis ver *Anexo B*. La *Figura 12*, muestra el modelo 3D simulado mediante **SOLIDWORKS**, de la estructura del sistema FV.

Figura 12. Vista superior del modelo 3D en *Solidworks* del sistema a instalar.



El diseño de la estructura en Solidworks se elaboró a partir de una serie de elementos, (rieles, tubos, gaviotas, uniones, anclajes...) en acero inoxidable, tomados de catálogos estándar para garantizar el funcionamiento y facilitar la visualización del montaje (ver *Anexo E*) y puesta en marcha del sistema FV *Grid Tie*.

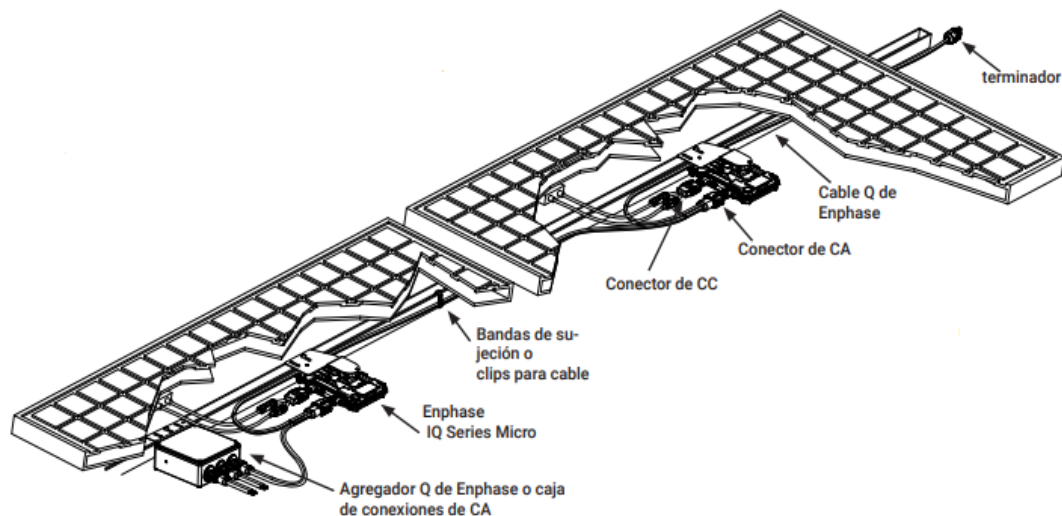
5.3.2.2 Conductores y Accesorios del sistema a instalar. La nueva tecnología de **ENPHASE** que se recomienda implementar facilitará la instalación del sistema, debido a que reduce la utilización de cables y accesorios. Además de ser un sistema flexible y lo más importante, brinda una mayor estabilidad y protección tanto al sistema como a las personas.

⁶ DUFFIE, Jhon A y BECKMAN, William A. Solar engineering of thermal processes. New Jersey: John Wiley & Son. Inc. 2013. p. 887. ISBN 978-0-470-87366-3.

La arquitectura de la nueva generación IQ está diseñada de tal forma que tiene la capacidad de medir en tiempo real la producción energética del sistema y al mismo tiempo mide la demanda requerida, para evaluar el rendimiento y la necesidad del sistema. A continuación, se presenta los componentes **Enphase** de la nueva generación IQ necesarios para instalar del sistema “Grid Tie”:

- Microinversor IQ7 plus
- Cable *Enphase* Q de dos líneas
- *Enphase* Agregador IQ
- Conectores y tapas de sellado
- *Envoy* IQ
- *Enlighten*

Figura 13. Circuito Base de *Enphase* Generación IQ



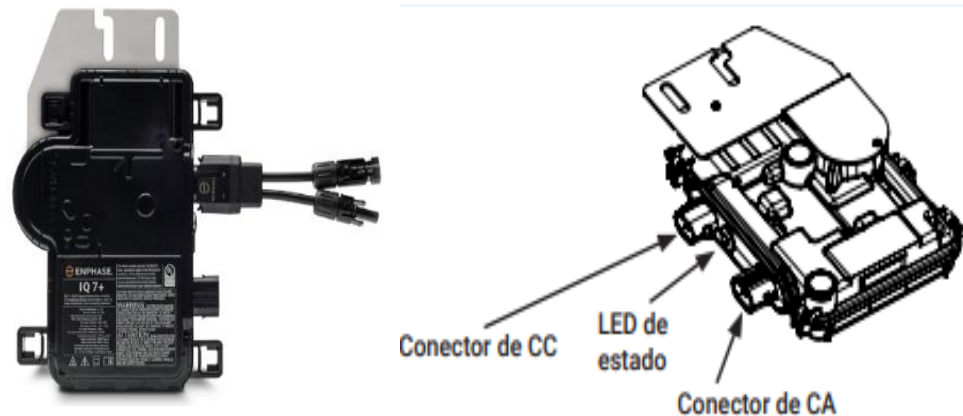
Fuente: ENPHASE. [En línea]. (Recuperado el 14 junio 2019). Disponible en-
<https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/IQ-Envoy-QIG-NA-ES.pdf>

Esta nueva tecnología **Enphase IQ** no necesita ser aterrizada, debido al aislamiento que tienen los microinversores quienes ofrecen al sistema una conexión a tierra de

protección por falla. Sin embargo, de acuerdo con la NTC 2050⁷, se deberán aterrizarse las partes metálicas expuestas, como los paneles FV y la estructura de soporte.

- **Microinversor IQ7 plus**: Físicamente están compuestos por una carcasa de un polímero de alta calidad, por lo cual no necesitan conductores de puesto a tierra. Esta séptima generación de microinversores alcanzan hasta una eficiencia del 97% según CEC. Estos equipos tienen la capacidad de monitorear la demanda y el consumo del sistema en tiempo real, pueden interactuar con las frecuencias de la red, tanto reactiva como capacitiva.

Figura 14. Microinversor IQ7 plus.



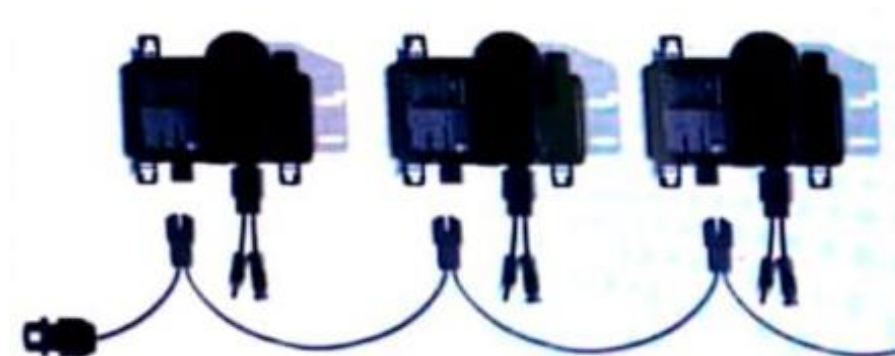
Fuente: ENPHASE. [En línea]. (Recuperado el 14 junio 2019). Disponible en <https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/IQ7-QIG-ES-LAC.pdf>

- **Cable Enphase Q**: El cable Q “Quick”, es más inteligente, más liviano y más fácil de instalar. Es un cable agregador de dos hilos (línea- línea) que elimina la conexión a tierra y el neutro. Mediante este conductor se podrá unir las tres series de microinversores cada uno con los diez microinversores, de acuerdo al diseño previamente establecido; esto con el fin de sumar esta energía y posteriormente ser llevada al *Enphase agregador IQ* quien tendrá

⁷ NTC 2050: CÓDIGO ELÉCTRICO COLOMBIANO.

la función de unificar e inyectar la energía a la red eléctrica del edificio de Ingeniería Mecánica.

Figura 15. Cable *Enphase Q*.



Fuente: ENPHASE. [En línea]. (Recuperado el 14 junio 2019). Disponible en <https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/IQ7-QIG-ES-LAC.pdf>

- **Enphase Agregador IQ:** Esta caja agregadora busca simplificar el trabajo en el techo, puede agrupar hasta 3 circuito de microinversores de 20A y bajarlos con un único cable al centro de distribución. Para este caso la caja agregadora es ideal, debido a que el diseño del sistema tiene exactamente los tres circuitos y cumplen con el mínimo de paneles conectados en serie, como se especificó anteriormente.

La selección de este dispositivo permite eliminar las antiguas cajas de conexión, los disyuntores (*Breaker*), conductores y conductos. Para la implementación de este dispositivo, se recomienda la mano de obra de un profesional.

Figura 16. Enphase Agregador IQ.



Fuente: ENPHASE. [En línea]. (Recuperado el 14 junio 2019). Disponible en <https://enphase.com/es-lac/productos-y-servicios/microinversores/accesorios#agregador-q>

- **Conectores, tapas de sellado y otros accesorios:** Estos conectores de campo son soluciones puntuales de alambrado a la hora de instalar el sistema, por lo tanto, la selección de estos accesorios dependerá del diseño del sistema. Para este caso se sugiere utilizar tapas de sellado o terminador, para ser instaladas al final de cada línea y cerrar el sistema adecuadamente.

Figura 17. Tapas de sellado.



- **Envoy IQ**: Este equipo es el cerebro del sistema, además es compatible con el sistema *Enphase IQ*, permite el monitoreo y la actualización remota del sistema, tiene la capacidad de medir la producción en pequeños intervalos, de igual forma, puede monitorear el consumo de la instalación para poder obtener un registro más exacto del comportamiento energético en tiempo real a través de la plataforma *Enlighten*, la comunicación es línea a línea con el fin de tener instalaciones más rápidas, más inteligentes, desde el punto de vista del monitoreo, así mismo, tiene opciones flexibles de conexión en red con *wifi* integrado, celulares 3G y 4G.

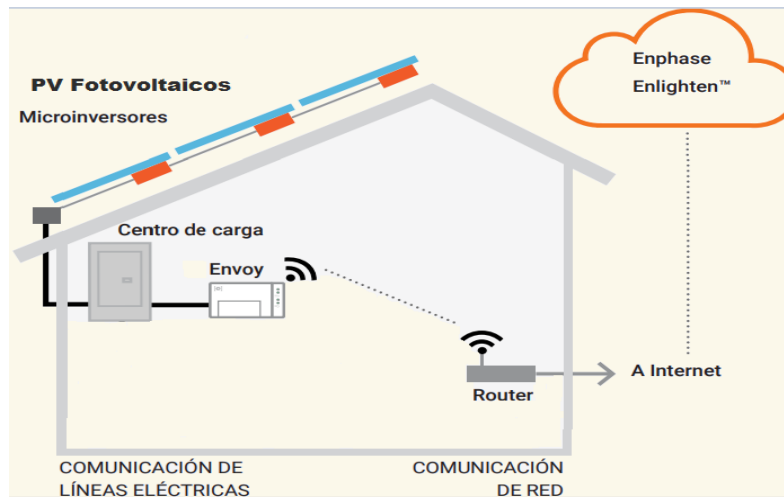
Figura 18. Enphase Envoy IQ



Fuente: ENPHASE. [En línea]. (Recuperado el 14 junio 2019).<https://enphase.com/es-lac/productos-y-servicios/envoy/familia#iq-envoy>

- **Enlighten**: Es una plataforma que tiene dos vistas. Junto con el Envoy, se puede verificar el estado del sistema sin desplazarse de forma detallada con lo cual se monitorea el rendimiento de cada panel FV instalado en el sistema.

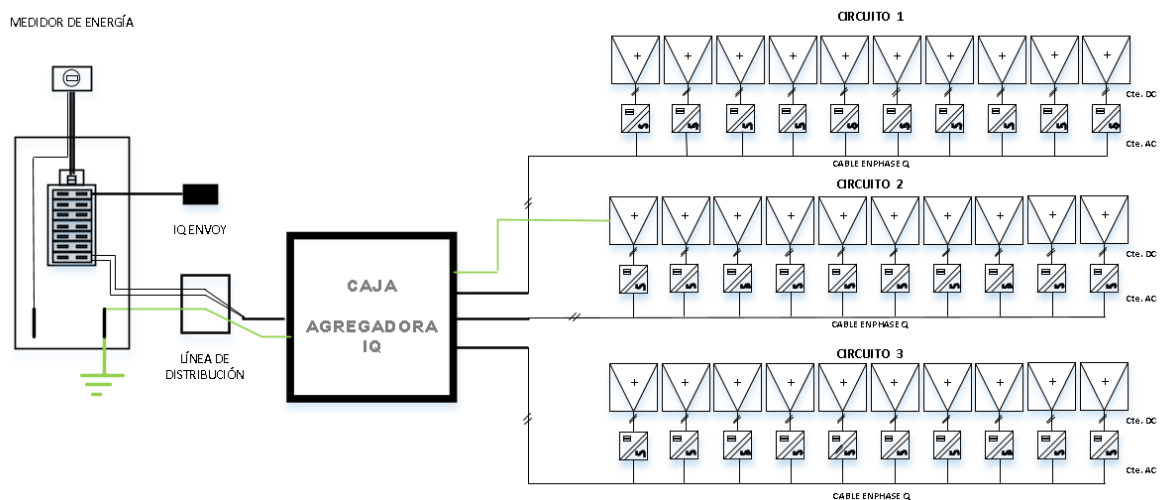
Figura 19. Sistema de gestión para SFV.



Fuente: ENPHASE. [En línea]. (Recuperado el 28 mayo 2019). Disponible en <https://enphase.com/es-lac/productos-y-servicios>

A continuación, se presenta el esquema eléctrico de la conexión del sistema FV que se recomienda implementar:

Figura 20. Esquema eléctrico del sistema FV a implementar.



6. CENTRALES TÉRMICAS

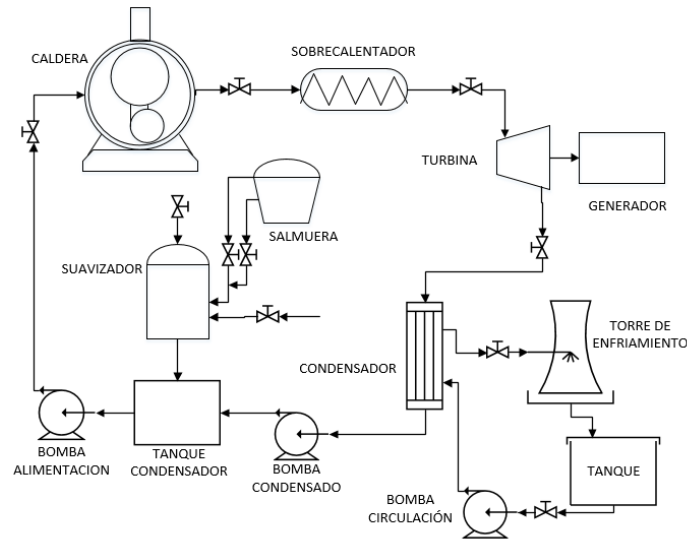
Una central térmica produce energía eléctrica a partir de la energía almacenada en el vapor sobrecalentado que se obtiene por la combustión de carbón, fuel-oíl o gas en una caldera diseñada al efecto. Existen varios tipos de plantas térmicas, pero todas se componen de tres elementos básicos, un elemento que transforma energía química (combustión o quemado de combustible), un elemento que transforma energía mecánica (turbina o motor) y un elemento que transforma energía eléctrica (generador o alternador).⁸

6.1 CENTRAL TÉRMICA DE VAPOR A ESCALA LABORATORIO.

La central térmica de vapor a diseñar se basa en un ciclo Rankine convencional con sobrecalentador de vapor, también conocido como ciclo Hirm, ciclo termodinámico que permite visualizar un proceso de obtención de energía de forma sencilla y el funcionamiento de cada uno de sus componentes, esta se utilizará en el laboratorio de sistemas térmicos dedicada a la formación técnica de los estudiantes de ingeniería mecánica, y su diseño es similar a una planta tipo laboratorio fabricada por la empresa GUNT, y referenciada como modelo ET-830 Central Térmica de Vapor 1.5 [kw].

⁸ GAFFERT, G. A. Centrales térmicas de vapor. Bogotá: Editorial Reverté, S.A. p.593. ISBN -84-291-4830-2

Figura 21. Central térmica de vapor.



La figura anterior muestra un esquema simplificado de los componentes de la central térmica de vapor a diseñar, la cual será a escala de laboratorio y está compuesta por los siguientes elementos principales y secundarios:

- ▶ Caldera.
- ▶ Turbina.
- ▶ Generador eléctrico.
- ▶ Bomba de alimentación de agua.
- ▶ Condensador.
- ▶ Sobrecalentador.
- ▶ Suavizador de agua.

Algunos de los elementos mencionados en la lista anterior están disponibles en el laboratorio de sistemas térmicos y serán utilizados como componentes principales de la central térmica de vapor y determinan el diseño de la misma, estos elementos son la caldera, turbina, generador, sistema de tratamiento de agua y bomba, los demás elementos que se mencionan van a ser diseñados o seleccionados según sea el caso.

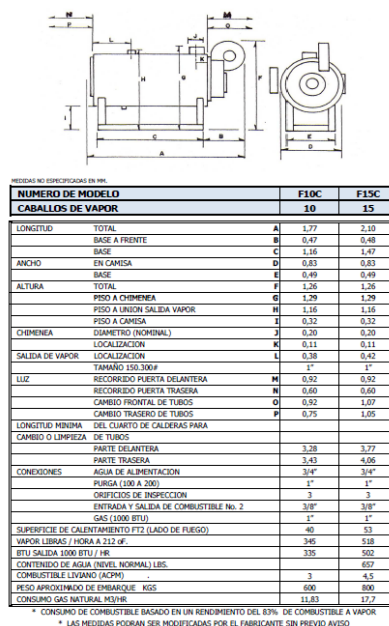
6.1.1 Caldera. La caldera a un dispositivo dedicado a la generación de vapor, mediante la transferencia de calor, en el cual agua en estado líquido es transformando en vapor saturado.

La caldera a instalar en el laboratorio de sistemas térmicos y utilizada en el diseño de la central térmica a vapor es una caldera pirotubular de 15 [BHP] marca Continental, en las siguiente tabla y figura se muestran las especificaciones técnicas.

Tabla 7. Especificaciones técnicas caldera.

CALDERA DE 15 BHP	
Marca	CONTINENTAL
Número de pasos	Dos pasos
Modelo	F15C-G
Operación	ON-OFF con arranque a fuego bajo
Capacidad	15 [BHP]
Generación	518 [lbs/hora]
Presión de trabajo máxima	150 [Psig]
Combustible	Gas natural 17.7 [m ³ /h]

Figura 22. Ficha técnica N°1 calderas de 2 pasos Continental tamaño general.



Fuente: Calderas Continental Ltda. [En línea]. Recuperado el 15 abril 2019. Disponible en <http://calderascontinental.com/wp-content/uploads/2015/07/FICHA-TECNICA-No-1-CONTINENTAL-2-PASOS.pdf>

6.1.3 Turbina. La turbina es una máquina de flujo permanente, en la cual el fluido de trabajo (vapor sobrecalentado) entra por la tobera a alta presión y se expande hasta una presión más pequeña. Parte de la energía cinética del chorro de vapor es cedida a los álabes de la turbina convirtiéndose en energía mecánica. Las turbinas de vapor son comúnmente usadas para el accionamiento de bombas, ventiladores y compresores a baja potencia y con mayor frecuencia generadores eléctricos a mayores de potencia.

La turbina existente a utilizar en el diseño de la central térmica a vapor para el laboratorio de sistemas térmicos es una turbina de impulsión de una sola etapa de la marca *Johannes Nadrowski*, la siguiente tabla muestra las especificaciones técnicas.

Tabla 8. Especificaciones técnicas turbina.

TURBINA	
TIPO	De acción
MARCA	<i>JOHANNES NADROWSKI</i>
MODELO	C-250 Curtis
CAPACIDAD NOMINAL	6 [HP]
CAPACIDAD MÁXIMA	7 [HP]
VELOCIDAD NOMINAL	3000 [rpm]
PRESIÓN DE ENTRADA	13 [kg/cm ²] 1274.86 [kPa]
PRESIÓN DE SALIDA	0.5 kg/cm ²] 49.03 [kPa]

Figura 23. Turbina JOHANNES NADROWSKI C-250.

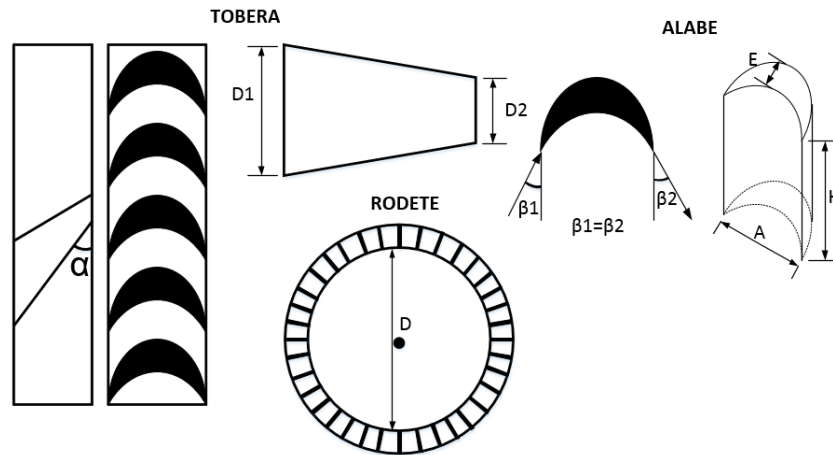


Tabla 9. Características geométricas de la turbina.

Turbina JOHANNES NADROWSKI C-250		
N° de alabes		67
Angulo alabes	$\beta1, \beta2$	27°
Espesor del alabe	E	4.6 [mm]
Ancho del alabe	A	14.5 [mm]
Altura alabe	H	20 [mm]
Angulo de la tobera	α	20°
Diámetro entrada tobera	$D1$	28 [mm]
Diámetro salida tobera	$D2$	17 [mm]
Diámetro rodete	D	280 [mm]
Diámetro medio	Dm	300 [mm]

6.1.4 Generador eléctrico. El generador eléctrico es la máquina dedicada a transformar energía mecánica en energía eléctrica por medio de un rotor y un campo magnético, siendo el equipo más importante en la central térmica de vapor ya que es el producto final en la construcción de la central.

El generador eléctrico al igual que la turbina ensamblados en un solo bloque, son equipos con los que cuenta el laboratorio, la Tabla 10 muestra las especificaciones técnicas del generador.

Tabla 10. Especificaciones técnicas generador eléctrico.

Generador	
Clase	Corriente continua
Tipo	EG-20
Capacidad	4.4/6.6 [kW]
Velocidad nominal	2350 RPM
Velocidad de trabajo	2000 RPM
Voltaje	110-170 [V]
Amperaje	30 [A]
Excitación	Independiente 0.45/0.7 [A]

Fuente: FIGUEROA DUARTE, Guillermo, et al. Montaje y automatización del laboratorio de plantas térmicas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicomecánicas. 1994.p 324.

6.1.5. Suavizador de agua. Equipo suavizador de agua de intercambio iónico de 15 GPM de capacidad para operación automática. Provisto de válvulas de corte para operación automática, de los ciclos de servicio, retrolavado, regeneración y enjuague. Con 3 pies cúbicos de resina de intercambio y tanque para salmuera de 120 [litros]. La presión recomendada a la entrada del suavizador debe ser inferior a 50 [PSI], como sugerencia que sea de entre 40 y 50 [PSI].⁹

6.1.6. Bomba de alimentación de agua. La bomba de alimentación para la caldera es una bomba centrífuga de alta presión, funciona al máximo para mantener el nivel

⁹ Cotización No.040. Calderas Continental Ltda. , Anexo F.

adecuado de agua en la caldera garantizando condiciones de operación continuas y seguras. La bomba de alimentación a instalar en la central térmica de vapor tiene una capacidad de 4 [GPM] y hace parte de los equipos auxiliares de alimentación de agua para la caldera de 15 [BHP] suministrada por la empresa Calderas Continental (ver Anexo F).

7. DISEÑO INTEGRAL DE LA CENTRAL TÉRMICA DE VAPOR COMO SISTEMA

El diseño de la central térmica de vapor para el laboratorio comprende el dimensionamiento y/o selección de todos los componentes que la componen, los cuales pueden dividirse en dos tipos:

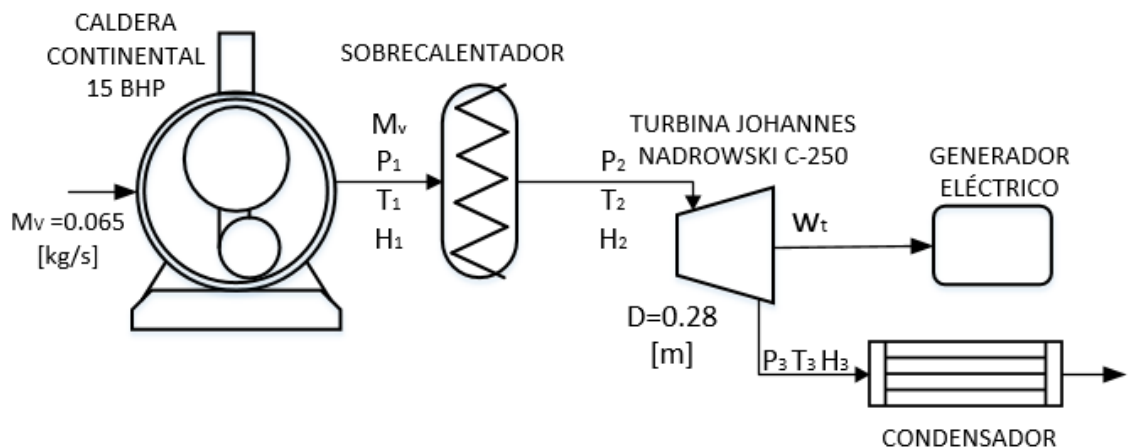
Componentes disponibles:

- Turbina generador
- Caldera

Componentes a diseñar y/o seleccionar.

- Sobrecalentador
- Condensador
- Equipos auxiliares (suavizador de agua, tuberías y torre de enfriamiento)

Figura 24. Componentes diseño integral CTV.



7.1 RESTRICCIONES IMPUESTAS POR LOS ELEMENTOS DISPONIBLES

A partir de los componentes del sistema disponibles (caldera y turbina), que imponen las condiciones de entrada en el análisis del sistema, la caldera fija la cantidad de masa de vapor que se va a disponer para toda la CTV y la turbina mediante su geometría fija, define el trabajo con el flujo de vapor suministrado por la caldera. Se busca determinar las condiciones del vapor (Presión y Temperatura) a la entrada y salida de la turbina que permitan el mejor rendimiento de esta.

La caldera produce un flujo másico de vapor de 0.065 [kg/s], con presión de 928.7 [kPa] y temperatura de 216.7 [°C] que alimentará la turbina, para generar un trabajo mecánico que pueda desarrollar de acuerdo a su geometría (rodete, ángulos de álabes y de la tobera, etc.), este deberá ser igual al trabajo termodinámico cedido por el vapor.

$$\dot{W}_m = \dot{W}_t \quad (7.)$$

$$\dot{m}U\Delta C_w = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (8.)$$

En la *Tabla 10* se muestran las ecuaciones que permiten calcular las velocidades relativas, absolutas, tangenciales, etc.

Donde:

C_1 Velocidad absoluta de entrada del vapor a los alabe.

U Velocidad tangencial del rodete.

ΔC_w Diferencia de velocidades de giro del vapor.

C_{w1} y C_{w2} Velocidad de giro del vapor a la entrada y salida de la turbina

β_1 y β_2 Ángulo de entrada y salida del vapor de los álabes.

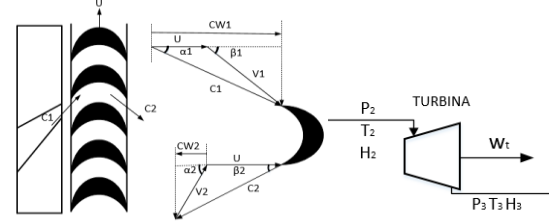
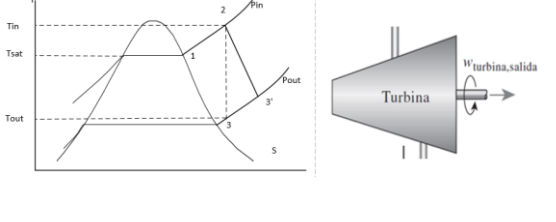
α_1 Ángulo salida de vapor de la tobera.

V_1 y V_2 Velocidad relativa a la entrada y salida del vapor de los álabes.

h_2 y $h_{3'}$ Entalpia a la entrada y salida de la tobera.

De acuerdo al diagrama de velocidades perteneciente al trabajo mecánico de la siguiente tabla, también se muestran las ecuaciones que establecen las relación entre las entalpías utilizadas en la ecuación 6 de la conservación de la energía aplicada a la tobera para establecer las velocidades relativas (ecuación 14) y su relación con la potencia de la turbina (ecuación 15).

Tabla 11. Trabajo mecánico y térmico de la turbina.

Trabajo mecanico	Trabajo termodinámico
	
$\dot{W}_m = \dot{m}U\Delta C_w \quad (9.)$ $U = \frac{\pi DN}{60} \quad (10.)$ $\Delta C_w = C_{w1} + C_{w2} \quad (11.)$ $C_{w1} = C_1 \cos \alpha_1 \quad (12.)$ $C_{w2} = V_2 \cos \beta_2 - U \quad (13.)$ $h_2 + \frac{V_1^2}{2} = h_{3'} + \frac{V_2^2}{2} \quad (14.)$	$\dot{W}_t = \dot{m}(h_2 - h_{3'}) \quad (15.)$

Los valores de los ángulos de los álabes, ángulo de salida de la tobera, diámetro de entrada y salida de la tobera y rodete se midieron directamente al desarmar la turbina, valores que se pueden leer de la Figura 23 y Tabla 9.

7.1.2 Procedimiento. La solución simultánea del conjunto de ecuaciones de la *Tabla 10* permitirá obtener la igualación de los trabajos, mediante la utilización de EES. En la siguiente tabla se muestran los valores fijos, la masa y presión de vapor determinada por la capacidad de la caldera, la presión de salida de la turbina según la presión de diseño del condensador y la temperatura a la entrada de la turbina se fija al estipula un aumento de delta de temperatura en el sobrecalentador de 80 grado.

Tabla 12. Variables de entrada fijas.

VARIABLE	VALOR
Mesa de vapor	0.065 [kg/s]
Presión de salida de la caldera	928.7 [kPa]
Presión de salida de la turbina	49.03 [kPa]
Temperatura	216.7 [°C]

A partir de los datos de entrada de la tabla anterior, se realizan variaciones de temperatura a la salida de la turbina entre un rango determinado, con el fin de igualar los valores de trabajo mecánico y térmico, para así de forma simultánea obtener la eficiencia propia de la turbina y ser visualizador en una tabla de valores.

A continuación, se presenta la tabla de resultado del modelo de la turbina, la columna uno corresponde a la temperatura de salida de la turbina, la columna dos muestra la entalpía de salida, las columnas tres y cuatro corresponden a los valores de trabajo mecánico y térmico respectivamente, valores que se pretenden igualar, para finalmente de la columna cinco obtener un valor aproximado que pertenece a la eficiencia de la turbina.

Tabla 13. Tabla de resultados eficiencia de la caldera.

	1	2	3	4	5
	t_{out} [C]	h_{out}	$\dot{W}_{mec}$ [W]	$\dot{W}_{term}$ [W]	h
Run 1	189	2,367E+06	3986	4368	0,02891
Run 2	189,1	2,367E+06	3966	4321	0,0286
Run 3	189,2	2,367E+06	3947	4274	0,02829
Run 4	189,2	2,367E+06	3928	4228	0,02798
Run 5	189,3	2,367E+06	3908	4181	0,02767
Run 6	189,4	2,367E+06	3889	4134	0,02736
Run 7	189,5	2,367E+06	3869	4087	0,02705
Run 8	189,6	2,367E+06	3849	4040	0,02674
Run 9	189,6	2,367E+06	3830	3993	0,02643
Run 10	189,7	2,367E+06	3810	3946	0,02612
Run 11	189,8	2,367E+06	3790	3899	0,02581
Run 12	189,9	2,367E+06	3770	3852	0,0255
Run 13	190	2,367E+06	3750	3806	0,02519
Run 14	190	2,367E+06	3730	3759	0,02488
Run 15	190,1	2,367E+06	3709	3712	0,02457
Run 16	190,2	2,367E+06	3689	3665	0,02426
Run 17	190,3	2,367E+06	3668	3618	0,02395
Run 18	190,4	2,367E+06	3648	3571	0,02363
Run 19	190,4	2,367E+06	3627	3524	0,02332
Run 20	190,5	2,367E+06	3607	3477	0,02301
Run 21	190,6	2,367E+06	3586	3431	0,0227
Run 22	190,7	2,367E+06	3565	3384	0,02239
Run 23	190,8	2,367E+06	3544	3337	0,02208
Run 24	190,8	2,367E+06	3523	3290	0,02177
Run 25	190,9	2,367E+06	3502	3243	0,02146
Run 26	191	2,367E+06	3481	3196	0,02115

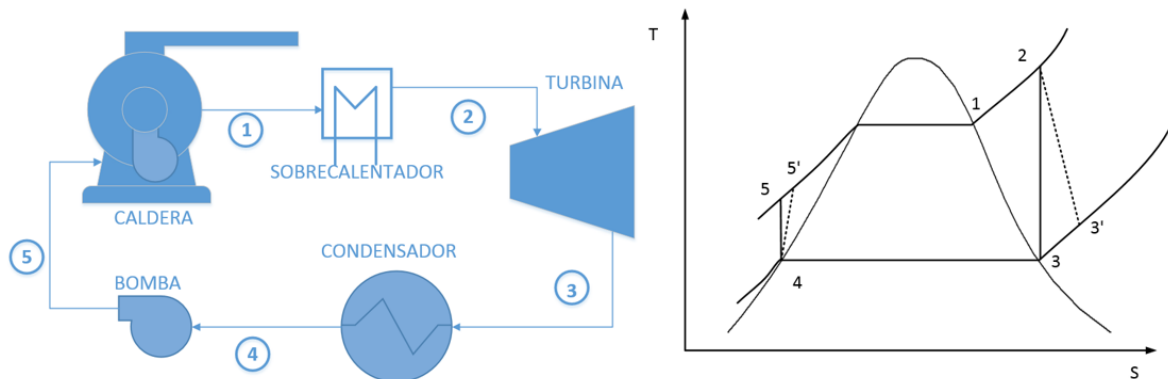
Como resultado final se obtuvo una eficiencia del **2.4%** aproximadamente, resultado obtenido de variar la temperatura de salida de la caldera entre 189°C a 191°C, con valores de trabajo mecánico y térmico similares de **3.7 [kw]**, datos correspondientes a las filas 15 y 16 de la tabla anterior.

7.2 ANÁLISIS TERMODINÁMICO GENERAL DE LA CENTRAL TÉRMICA DE VAPOR.

Mediante un análisis general de la central térmica de vapor basado en las propiedades termodinámicas establecidas para cada uno de los elementos que la conforman, ver *Figura 25*, se desea conocer la potencia total disponible, al igual que valores

adicionales para el diseño y/o selección de los equipos que hacen falta y elementos adicionales.

Figura 25. Esquema y diagrama central térmico a vapor.



Para determinar la potencia disponible de la central térmica de vapor se crea un código en el programa **EES**, cuyas ecuaciones utilizadas y código generado se encuentran en el *Anexo D*, algunos de los puntos en el ciclo termodinámico de la central térmica se definieron de acuerdo a las especificaciones técnicas de los equipos existentes, (caldera, turbina y bomba de alimentación). A continuación, se presentan las variables de entrada definidas y utilizadas en el código EES.

La presión de salida de la caldera y masa de vapor se define según la ficha técnica de la misma (ver *Tabla 7*), la presión de salida de la turbina suministrada por la ficha técnica (ver *Tabla 10*) y eficiencia calculada en el capítulo 7.1.2 y la eficiencia de la bomba, la siguiente tabla muestra los valores numéricos iniciales que se consideran en el código de EES.

Tabla 14. Variables de entrada del código EES central térmica de vapor.

VARIABLES	VALOR
Presión salida de la caldera	928.7 [kPa]
Presión salida de la turbina	49.03 [kPa]
Flujo másico caldera	0.06527 [kg/s]
Aumento de temperatura en el sobrecalentador	80 [°C]
Eficiencia turbina	2.4 %
Eficiencia bomba	80 %

Las ecuaciones utilizadas para la realización de los cálculos en cuanto a trabajos, calor y eficiencias de los equipos en la central térmica de vapor son las siguientes.

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}(h_5 - h_4) \quad (16.)$$

$$\dot{Q}_{caldera} = \dot{m}(h_1 - h_5) \quad (17.)$$

$$\dot{Q}_{sobrecalentador} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (18.)$$

$$\dot{W}_{turbina} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (19.)$$

$$\dot{Q}_{condensador} = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (20.)$$

$$\dot{W}_{total\ ciclo} = \dot{W}_{turbina} + \dot{W}_{bomba} \quad (21.)$$

$$\dot{Q}_{total\ suministrado} = \dot{Q}_{caldera} + \dot{Q}_{sobrecalentador} \quad (22.)$$

$$\eta_{total\ del\ ciclo} = \frac{\dot{W}_{total\ ciclo}}{\dot{Q}_{total\ suministrado}} \quad (23.)$$

Tabla 15. Resultados código EES central térmica de vapor.

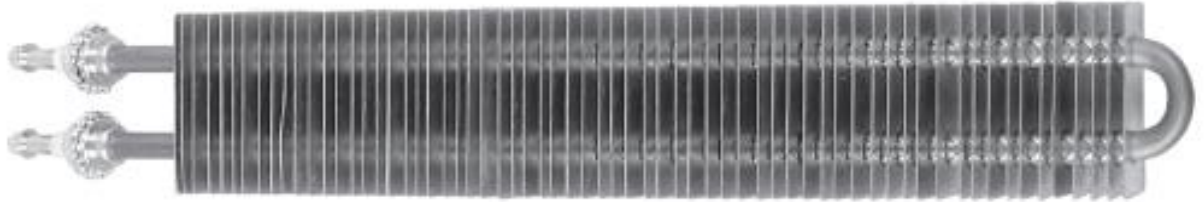
Flujo	Punto	T [C]	Pabs [kpa]	Entalpía [kj/kg]	Potencia [kw]
Agua alimentación	5	80.86	928.7	339.2	
Vapor saturado	1	176.7	928.7	2775	
Vapor sobrecalentado	2	256.7	928.7	2959	
Δ_t en el sobrecalentador		80			
W turbina					0.8313
Salida turbina	3	235.3	49.03	2947	
Condensador	4	80.85	49.03	338.5	
Q condensador					170.2
W bomba alimentación					0.047
Q sobrecalentador					12.04
Q caldera					159

Después de realizar los cálculos generales de la central térmica de vapor y seleccionar el aumento de temperatura adecuado en el sobrecalentador, se obtuvieron los resultados que se muestran en la *Tabla 15*, como resultados relevantes se consideran el calor disipado en el condensador y calor suministrado por el sobrecalentador, valores que posteriormente se utilizarán en la realización de los cálculos necesarios para diseñar y/o seleccionar cada uno de los elementos faltantes de la central térmica de vapor.

7.2.1 Selección del sobrecalentador. De acuerdo a la *Tabla 15* de resultados obtenidos del cálculo general de la central térmica de vapor, se utiliza el valor de 12 [kw] pertenecientes al calor suministrado por el sobrecalentador, para realizar la selección una serie de resistencias eléctricas cuyas especificaciones son: sumergibles en vapor de agua y cuyas especificaciones son: 5 Resistencias Tubular en U con

Aletas Difusoras de 2,4 [kw] cada una con capacidad total del montaje de 12 [kw], conectadas a 230 [v]. (Ref: 80*10)¹⁰.

Figura 26. Resistencia Tubular en U con Aletas Difusoras.



Fuente: Resistències Elèctriques Asturgó, s.l. [En línea]. (Recuperado en 12 mayo 2019). Disponible en <http://www.resistenciasasturgo.com/catalogo2016/Catalog%20General%202018%20COLOR%20web.pdf>

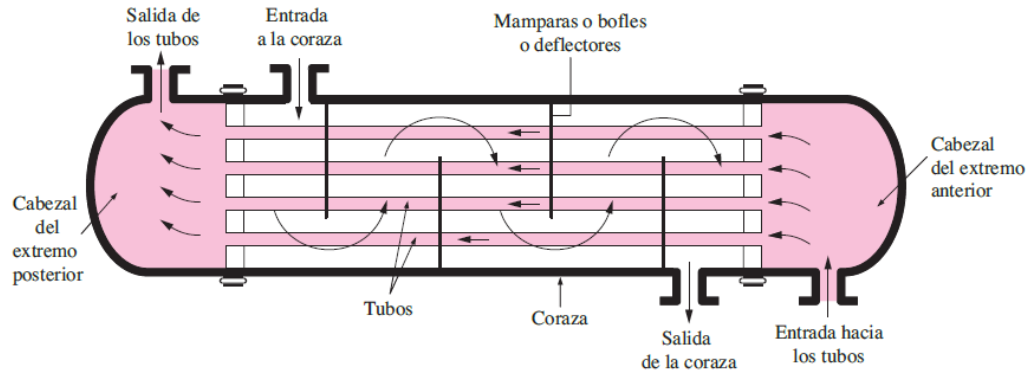
La figura anterior muestra la resistencia eléctrica en u con aletas rectangulares, para aumentar la superficie de intercambio de calor, las 5 resistencias conforman un batería de resistencias de sobrecalentamiento.

7.2.2 Selección del condensador. El condensador que se considera a seleccionar en del tipo casco y tubos enfriados por agua, condensador de amplia utilización en la industrial¹¹.

¹⁰ COTIZACIÓN 280619, RESISTENCIAS ELÉCTRICAS PRESIS. Anexo F.

¹¹ GALVIS TORRES, Oswaldo Alonso y GOMEZ ACEVEDO, Yury Francisco. Diseño y construcción de una microplanta de generación eléctrica como banco de pruebas para el laboratorio de plantas térmicas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicomecánicas. p. 195.

Figura 27. Condensador de casco y tubos.



Fuente: YUNUS A, Cengel y AFSHIN J, Ghajar. Transferencia de calor y masa. México: McGraw Hill, 2011. p.915. ISBN 978-607-15-0540-8.

El vapor de agua ingresa al condensador por el casco y el agua utilizada como fluido de refrigeración circula por el interior de los tubos.

Para iniciar con el respectivo cálculo en la selección del condensador se deben especificar los datos de entrada según los requerimientos de la CTV, los criterios térmicos y criterios geométricos.

7.2.2.1 Datos de entrada. Los datos de entrada para el diseño del condensador son, flujo másico de 0.06527 [kg/s] (*Tabla 14*), presión de 49.03 [KPa] (*Tabla 14*) y temperatura de saturación de 81 [C], pertenecientes a la salida de la turbina ver *Tabla 9*.

7.2.2.2 Criterios térmicos. Dentro de los criterios térmicos se considera una temperatura de entrada del agua a los tubos de 25 [C], considerando un incremento de temperatura de 10.5 [°C] entre la salida y entrada del intercambiador, por lo tanto, la temperatura de salida del intercambiador es de 35.5 [C].

7.2.2.3 Criterios geométricos. En los criterios geométricos se consideran los tubos del condensador con un diámetro de 13 [mm] y espesor de 1.5 [mm], con una longitud de 1 [m] y 4 pasos del intercambiador.

La temperatura en la superficie de los tubos al interior del condensador se considera constante.

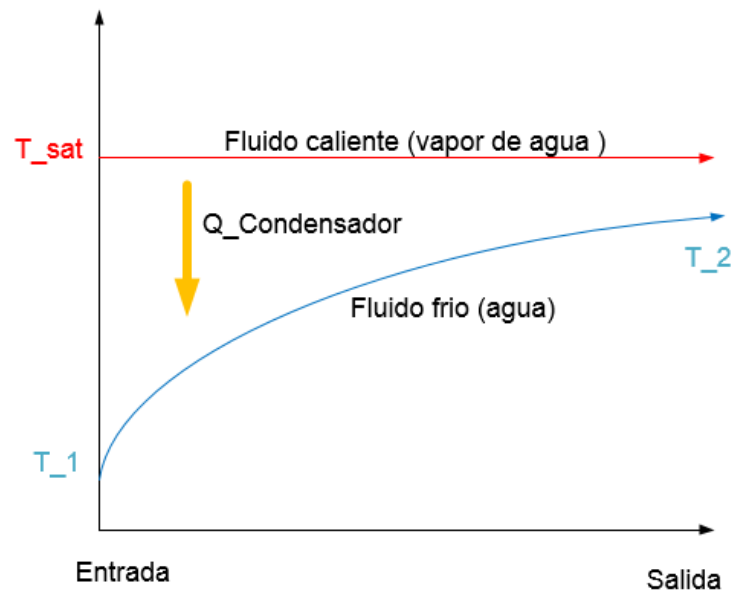
7.2.3 Ecuaciones de diseño del condensador. Las ecuaciones utilizadas para el condensador hacen referencia al calor que se retira del flujo de vapor para cambiar su estado de gas a líquido, por lo que se hace un análisis en el lado del casco del intercambiador y en el lado de los tubos del intercambiador

7.2.3.1 Análisis en el lado del casco del intercambiador El calor necesario para condensar el flujo de vapor es:

$$Q = h_f * \dot{m}_v \quad (24.)$$

h_f Es el calor latente al agua saturada a una temperatura de saturación de vapor de 81 [°C], $h_f = [\text{kJ/kg}]$.

Figura 28. Diagrama de temperaturas a lo largo del condensador.



Con la teoría de transferencia de calor en la condensación se determina el coeficiente de transferencia de calor par condensar vapor de agua sobre una hilera de tubos horizontales de acuerdo a la siguiente correlación:

$$h_o = 0.729 \left[\frac{9.81 * \rho_l * (\rho_l - \rho_v) h_{fg} * k_l^3}{\mu_l * (T_{sat} - T_s) D_o} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (25.)$$

ρ_l Densidad del líquido a la temperatura de película.

ρ_v Densidad del vapor saturado a la temperatura de película.

K_l Conductividad térmica del líquido saturado a la temperatura de película.

μ_l Viscosidad del líquido saturado a la temperatura de película.

h_{fg} Calor latente modificado de vaporización que se determina como:

$$h_{fg} = h_f + 0.68 * cp_l * (T_{sat} - T_s) \quad (26.)$$

cp_l Calor específico del líquido saturado a la temperatura de película.

La temperatura de película es el promedio de las temperaturas de saturación del vapor y la temperatura de superficie de los tubos del intercambiador de calor.

$$T_f = \frac{T_{sat} + T_s}{2} \quad (27.)$$

El calor también puede ser expresado de acuerdo a la diferencia media logarítmica de temperatura:

$$Q = UA * LMTD \quad (28.)$$

Coeficiente global de transferencia de calor.

$$UA = \frac{1}{\frac{1}{h_i * \pi * L * NTT * D_i} + \frac{1}{h_o * \mu * L * NTT * D_o}} \quad (29.)$$

Temperatura media logarítmica.

$$LMTD = \frac{T_2 - T_1}{\ln \left[\frac{T_{sat} - T_1}{T_{sat} - T_2} \right]} \quad (30.)$$

7.2.3.2 Análisis en el lado de los tubos del intercambiador. El análisis de los tubos del intercambiador se hace considerando la transferencia de calor por convección interna y forzada, (dentro de los tubos del intercambiador y el agua fluye por medio de una bomba).

$$Re = \frac{4 * m_{agua\ tubos}}{\pi * \mu_{agua} * D_i} \quad (31.)$$

Es el número adimensional Reynolds para flujos turbulentos.

μ_{agua} Es la viscosidad del agua que fluye dentro de los tubos del condensador a una temperatura media.

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (32.)$$

$m_{agua\ tubos}$ Flujo másico del agua que fluye por cada tubo del intercambiador.

$$f = (0.790 * \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (33.)$$

f Factor de fricción.

El número de Nusselt.

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) * (Re - 1000)}{1 + 12.7 * \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} * \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (34.)$$

Pr Es el número de Prant que fluye dentro de los tubos del condensador evaluado a una temperatura media.

El número de Nusselt a su vez es igual:

$$Nu = \frac{h_i L}{k_{agua}} \quad (35.)$$

h_i Coeficiente de transferencia de calor por convección para el agua que fluye por el interior de los tubos del condensador.

k_{agua} Conductividad térmica del agua que fluye por el interior de los tubos del condensador.

El calor que gana el agua es:

$$Q = m_{agua} * cp_{agua} * (T_2 - T_1) \quad (36.)$$

m_{agua} Es el flujo másico del agua que fluye por todos los tubos.

El número de tubos por paso es:

$$NTP = \frac{NTT}{NP} \quad (37.)$$

NTT Es el número total de tubos del condensador.

NP Es el número de pasos.

El flujo másico del agua por tubo es:

$$m_{agua\ tubo} = \frac{m_{agua}}{NTP} \quad (38.)$$

El calor que gana el agua en función de la temperatura de la superficie es:

$$Q = NTT * \pi * h_i * L * D_i * (T_s - T_m) \quad (39.)$$

7.2.4 Proceso de diseño del condensador

1. Calcular el calor necesario para condensar el flujo de vapor.

$$Q = h_f * \dot{m}_v \quad (40.)$$

2. Calcular el flujo másico que se requiere para poder condensar el vapor.

$$Q = m_{agua} * cp_{agua} * (T_2 - T_1) \quad (41.)$$

3. Calcular el coeficiente global de transferencia de calor.

$$Q = U * A * LMTD \quad (42.)$$

$$MTD = \frac{T_2 - T_1}{Ln \left[\frac{T_{sat} - T_1}{T_{sat} - T_2} \right]} \quad (43.)$$

4. Supongo un número total de tubos del condensador.

5. Calcular el número de tubos por paso.

$$NTP = \frac{NTT}{NP} \quad (44.)$$

6. Calcular el flujo másico de agua por tubo del condensador.

$$m_{agua\ tubo} = \frac{m_{agua}}{NTP} \quad (45.)$$

7. Calcular número de *Reynolds*, factor de fricción y el número de *Nusselt*.

$$Re = \frac{4 * m_{agua\ tubos}}{\pi * \mu_{agua} * D_i} \quad (46.)$$

$$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (47.)$$

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) * (Re - 1000)}{1 + 12.7 * \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} * \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (48.)$$

8. Calcular el coeficiente de transferencia de calor en la parte interna de los tubos.

$$Nu = \frac{h_i * L}{k_{agua}} \quad (49.)$$

9. Calcular la temperatura de superficie con la siguiente ecuación.

$$Q = NTT * \pi * h_i * L * D_i * (T_s - T_m) \quad (50.)$$

10. Calcular la temperatura de película.

$$T_f = \frac{T_{sat} + T_s}{2} \quad (51.)$$

11. Calcular el coeficiente de transferencia de calor en la parte externa de los tubos.

$$h_o = 0.729 * \left[\frac{9.81 * \rho_l * (\rho_l - \rho_v) * h_{fg} * k_l^3}{\mu_l * (T_{sat} - T_s) * D_o} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (52.)$$

12. Calcular el coeficiente global de transferencia de calor.

$$U_r A = \frac{1}{\frac{1}{h_i * \pi * L * NTT * D_i} + \frac{1}{h_o * \mu * L * NTT * D_o}} \quad (53.)$$

13. Comparar el U_r del paso anterior con el U del paso 3, en la situación en que sean diferentes, volver a iniciar el proceso con un NTT diferente hasta que converjan los coeficientes globales de transferencia de calor

14. Calcular el área necesaria del intercambiador de calor para lograr la condensación del vapor.

$$A = \pi * L * D * NTT \quad (54.)$$

7.2.5 Resultados del diseño del condensador. La siguiente tabla muestra los diferentes valores utilizados y obtenidos en la realización del cálculo del diseño del condensador.

Tabla 16. Resultados de la selección del condensador.

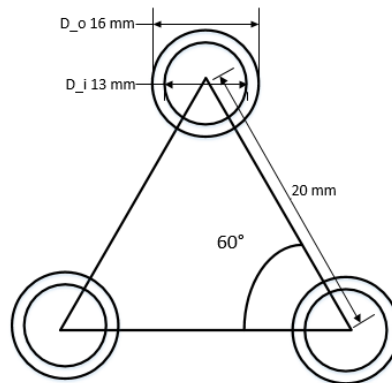
Nombre variable	Símbolo	Valor
Datos lado casco		
Flujo másico de vapor	m_{vapor}	0.06527 [kg/s]
Temperatura entrada vapor	T_{sat}	80.85 [°C]
Datos lado tubos		
Temperatura de entrada del agua	T_1	25 [°C]
Temperatura de salida del agua	T_2	35.5 [°C]
Temperatura promedio del agua	T_m	30.25 [°C]
Diámetro interior de los tubos	D_i	0.013 [m]
Diámetro exterior de los tubos	D_o	0.016 [m]
Longitud de los tubos	L	1[m]
Número de pasos	NP	4
Ecuaciones de diseño del intercambiador de calor		
Calor para condensar el vapor	Q	150.5 [kw]
Entalpía de vaporización	$h_{f@t_{sat}}$	2306 [kJ/kg]
Flujo másico del agua por todos los tubos	m_{agua}	3.427 [kg/s]
Calor específico del agua	$cp_{agua@T_m}$	4.183 [kJ/kg*k]

Coeficiente global de transferencia de calor del condensador por su área	U	1.856 [kw*m ² /°C]
Temperatura media logarítmica	$LMTD$	50.42
Número total de tubos del condensador	NTT	32
Flujo de agua por tubo	$m_{agua\ tubos}$	0.4283 [kg/s]
Número de Reynolds	Re	52867
Viscosidad del agua de los tubos	μ_{agua}	0.0007935 [kg/m*s]
Factor de fricción	f	0.02069
Número de Nusselt	Nu	56.68
Número de Prant del agua	Pr	5.502
Coeficiente de transferencia de calor interna de los tubos	h_i	2.63 [kw/m ² *k]
Conductividad térmica del agua	$K_{agua@T_m}$	0.6033 [w/m*k]
Temperatura de la superficie de los tubos	T_s	74.03 [°C]
Temperatura de película	T_f	77.44 [°C]
Coeficiente de transferencia de calor por parte externa de los tubos	h_o	14.38 [kw/m ² *k]
Densidad del líquido saturado	ρ_l	973.4 [kg/m ³]
Densidad del vapor saturado	ρ_v	0.266 [kg/m ³]
Conductividad térmica del líquido saturado	$K_{l@T_f}$	0.6546 [w/m*k]
Área intercambio de calor	A	1.608 [m ²]

El intercambiador que se requiere para lograr la condensación del vapor tiene un arreglo de tubos distribuidos a 4 pasos, con una distribución de tubos de 362 a 60° como se muestra en la siguiente figura y un área total de intercambio de calor de 1.608 [m²].¹²

¹² GALVIS TORRES, Oswaldo Alonso y GOMEZ ACEVEDO, Yury Francisco. Diseño y construcción de una microplanta de generación eléctrica como banco de pruebas para el laboratorio de plantas térmicas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicomecánicas. p. 195.

Figura 29. Arreglo geométrico de los tubos del condensador.



Para reducir los gastos en el montaje de la CTV, se recomienda la utilización del condensador vapor-agua de casco y tubos, Tipo Bem, condensador de vapor-agua Suministrado por la empresa Tosin & Cía. S.A.S (ver Anexo F).

7.2.6 Cálculos torre de enfriamiento. La torre de enfriamiento a ser utilizada en el montaje de la CTV inicialmente es la que se encuentra a disposición en el laboratorio de sistemas térmicos.

Para conocer la capacidad y factibilidad de la torre de enfriamiento de tiro inducido disponible en el laboratorio, se debe caracterizar el relleno que utiliza.

La siguiente figura muestra los datos de interés utilizados para realizar la caracterización de la torre de enfriamiento, datos suministrados por el laboratorio de sistemas térmicos.

Figura 30. Datos torre de enfriamiento laboratorio de sistemas térmicos.

DATOS TORRES DE ENFRIAMIENTO									
$T_{w_{in}} (^{\circ}C)$	$T_{w_{out}} (^{\circ}C)$	$V_{air} (m/seg)$	$Q (L/seg)$	ϕ_{in}	ϕ_{out}	$Ta_{in} (^{\circ}C)$	$Ta_{out} (^{\circ}C)$	$V_T (m^3)$	$D_{ch} (m)$
47	34	2,4	0,1538	71,0%	100%	28,6	45	0,2574	0,3
47	36	3,1	0,235	71,2%	100%	28,7	44	0,2574	0,3
45,15	33,9	3,1	0,1818	72,5%	100%	27,7	45	0,2574	0,3
49	36,5	2,2	0,1818	73,3%	100%	27,7	43	0,2574	0,3
47	36	1,8	0,1563	73,5%	100%	27,6	47	0,2574	0,3
48	36	2,5	0,1563	73,4%	100%	27,5	45	0,2574	0,3

$T_{w_{in}}$	'temperatura de entrada del agua a la torre'
$T_{w_{out}}$	'temperatura de salida del agua de la torre'
V_{air}	'velocidad de salida del aire '
Q	'cauda del agua que circula en la torre'
ϕ_{out}	'humedad relativa a la salida del ventilador'
ϕ_{in}	'humedad relativa del sitio'
Ta_{out}	'temperatura de salida del aire'
Ta_{in}	'temperatura de entrada del aire'
V_T	'volumen total de relleno'
D_{ch}	'diámetro de la chimenea'

Fuente: Laboratorio de sistemas térmicos, Escuela de Ingeniería Mecánica.

A continuación, se muestra el procedimiento que se hizo utilizando el software EES para caracterizar la torre de enfriamiento.

1. Calcular la densidad del agua con la presión atmosférica y temperatura de salida del agua de la torre, para hallar el flujo másico del agua:

$$\dot{m}_{H_2O} = \rho * \dot{v} \quad (55.)$$

2. Calcular el área de salida de flujo de aire de la torre de acuerdo al diámetro de chimenea suministrado por la Figura 29.

$$area = \frac{\pi}{4} * d_{ch}^2 \quad (56.)$$

3. Calcular la densidad del aire a temperatura ambiente y presión atmosférica, para después calcular el flujo másico del aire que sale de la torre teniendo en cuenta el área y velocidad de salida.

$$\dot{m}_{air} = \rho_{air} * v_{air} \quad (57.)$$

4. Hallar la presión de saturación a temperatura de bulbo seco, por lo que se utiliza la siguiente ecuación tomada del libro de Termodinámica Aplicada del profesor J.F. Maradey Ch.

$$P_{SAT} = 611.2 * \exp \left[a \left(\frac{T_{db}}{T_{db} - b} \right) \right] \quad (58.)$$

Donde: $a = 17.67$ y $b = 243.5$

5. Calcular la entalpía de aire no saturado de acuerdo a la humedad específica y temperatura de bulbo húmedo.

6. Calcular el incremento de la entalpía para cada una de los intervalos de temperatura de agua, el diferencial de temperatura se hace para 10 intervalos de acuerdo a las siguientes ecuaciones.

$$\Delta T = \frac{T_{in} - T_{out}}{10} \quad (59.)$$

$$m = \frac{m_{H2O} * c_p}{m_{aire}} \quad (60.)$$

$$\Delta H = m * \Delta T \quad (61.)$$

El incremento de entalpía para cada intervalo de temperatura será de

$$H_1 = h_1 + \Delta H \quad (62.)$$

7. Calcular la entalpía de aire saturado cuando la humedad relativa sea del 100% a la temperatura de salida del agua de la torre.

8. Realizar la resta de las entalpías de aire saturado y no saturado para cada uno de los 10 intervalos de temperatura.

9. Calcular los valores promedios resultante de realizar la resta entre la entalpía de aire no saturado y aire saturado del ítem anterior.

10. Calcular el número de unidades de difusión requeridas para cada uno de los 10 intervalos de temperatura.

$$\sum NUD_R = \frac{\Delta T c_p}{(H^* - H)} \quad (63.)$$

11. Caracterizar el relleno, calculando el kxa igualando el número de unidades requeridas y disponibles, de acuerdo al volumen del relleno de la torre de enfriamiento.

$$UD_R = NUD_D \quad (64.)$$

$$NUD_R = kxa * \frac{volumen}{m_{H2O}} \quad (65.)$$

Volumen de relleno de 0.24574 [m³], ver Figura 29.

12. Para cada una de las 6 mediciones de temperatura de la tabla se repiten los numerales anteriores para organizarlos en una tabla comparativa donde se muestre la relación masa de agua sobre masa de aire, número de unidades requeridas y el kxa de la torre de enfriamiento.

13. Por último se grafica las componentes kxa y la relación masa agua sobre masa de aire, para encontrar la ecuación lineal característica del relleno de la torre.

La ecuación característica del relleno de la torre kxa que dio como resultado de la realización de los anteriores pasos fue:

$$k * a = 0.6161 + 0.1441 * \frac{m_w}{m_a} \quad (66.)$$

El código de EES, tablas y gráficas realizadas en Excel, resultado de la realización de los 13 pasos mencionados anteriormente, y la caracterización del relleno de la torre de enfriamiento se encuentran en el *Anexo D*.

Después de realizar la caracterización del relleno de la torre de enfriamiento, y a partir de los requerimientos del condensador en cuanto a flujo másico de agua de enfriamiento y sus respectivas temperaturas, se calcula el número de unidades requeridas para ser igualadas al número de unidades disponibles y así hallar el volumen necesario de la nueva torre de enfriamiento, teniendo en cuenta las condiciones de presión y temperatura de bulbo seco para la ciudad de Bucaramanga.

Tabla 17. Caracterización de la torre de enfriamiento.

Nombre variable	Símbolo	Valor
Requerimientos de la torre		
Flujo másico del agua que circula por la torre	$\dot{m}_w$	3.427 [kg/s]
Temperatura de entrada del agua a la torre	T_{H2Oin}	35.5 [°C]
Temperatura de salida del agua de la torre	T_{H2Oout}	25 [°C]
Calor en la torre de enfriamiento	Q	150.5 [kw]
Datos de entrada y resultados		
Temperatura de bulbo húmedo	T_{db}	22.6 [°C]
Temperatura de bulbo seco	T_{wb}	20.04 [°C]
Humedad relativa	ω_r	80 [%]
Relación de masas del agua y aire	$\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a}$	0.8
Flujo másico del aire	$\dot{m}_a$	4.284 [kg/s]
Número de unidades de disipación requeridas	NUD_R	2.8825
Volumen total de la torre.	$volumen$	2.372 [m ³]

El relleno caracterizado anteriormente no es el adecuado para los requerimientos de la torre a diseñar por lo que se utilizó un nuevo relleno cuya ecuación característica es la siguiente:

$$k * a = 4.0768 + 0.1079 * \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} \quad (67.)$$

$$NUD_R = \left(4.0768 + 0.1079 * \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} \right) * \frac{v_t}{\dot{m}_w} \quad (68.)$$

Por lo tanto, con este relleno aumenta la capacidad de disipación de calor al interior de la torre dando como resultado un total de 2.372 [m³], para enfriar agua de 35.5 a 25.5 [°C] un flujo másico de 3.4 [kg/s] proveniente del condensador datos que se

recomienda tener en cuenta a la hora de realizar la selección de la torre de enfriamiento. De acuerdo a los datos obtenidos se recomienda utilizar la torre de enfriamiento perteneciente a la empresa GLACIAR modelo GLC-40402P020-1, ver *Anexo F*.

8. UBICACIÓN CENTRAL TÉRMICA

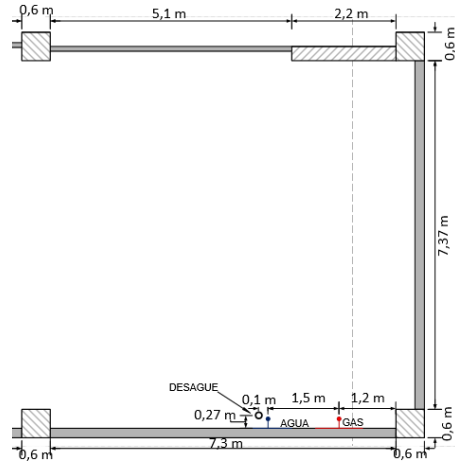
La central térmica de vapor se sugiere instalar en el laboratorio de sistemas térmicos, ubicado en el sótano 1 del edificio de Ingeniería Mecánica, la siguiente figura muestra el área total disponible para la instalación equivalente a 56 [m²].

Figura 31. Área disponible laboratorio sistemas térmicos.



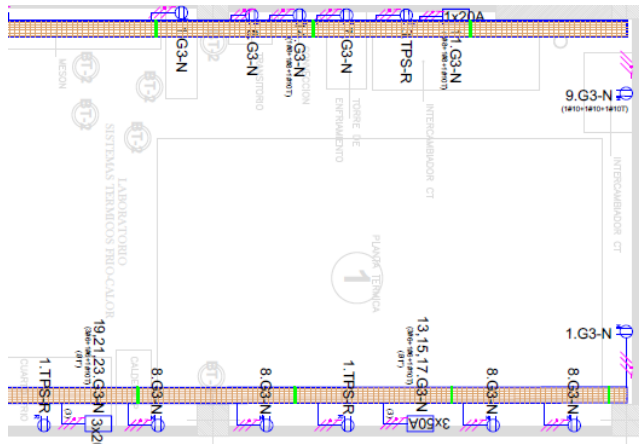
El espacio disponible para la instalación de la CTV al interior del laboratorio, obedece a la cercanía a la cual quedarán los equipos respecto a los suministros de agua, electricidad y gas, como se muestra en las *Figuras 32 y Figura 33*, por lo tanto, se selecciona la esquina noreste del laboratorio.

Figura 32. Suministros de agua y gas.



Fuente: División de planta física UIS.

Figura 33. Suministros eléctricos.



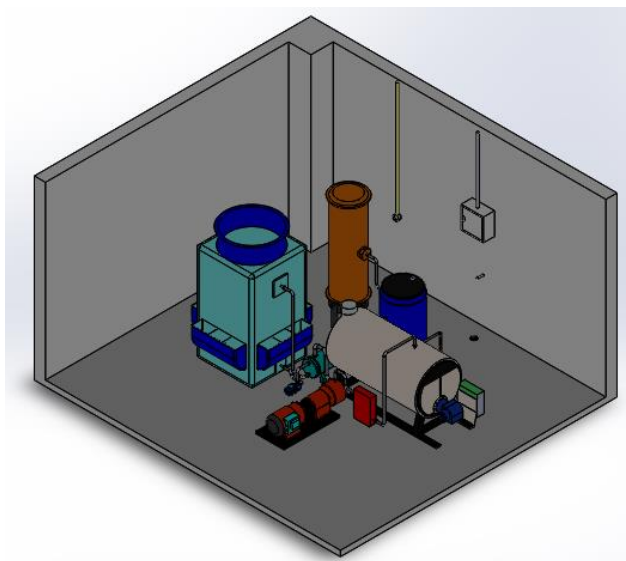
Fuente: División de planta física UIS.

8.1 DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE LA CENTRAL TÉRMICA DE VAPOR

La siguiente figura muestra un modelo 3D perteneciente a la distribución en planta de la central térmica de vapor, ubicada en la esquina noreste del laboratorio de

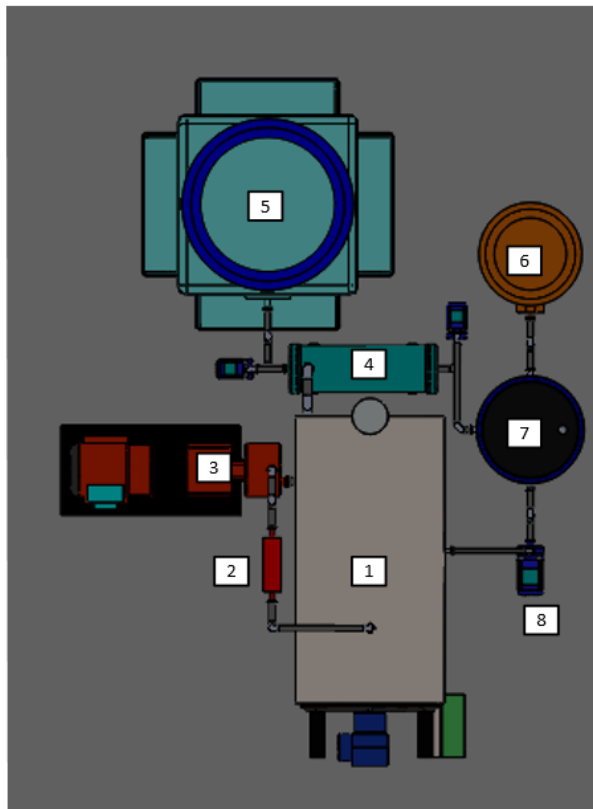
sistemas térmicos, donde también se ubican los suministros de agua, gas y electricidad ver Anexo E.

Figura 34. Modelo 3D central térmica de vapor.



En la siguiente figura se muestra una vista superior de la central térmica de vapor, donde se listan cada uno de los componentes que la conforman.

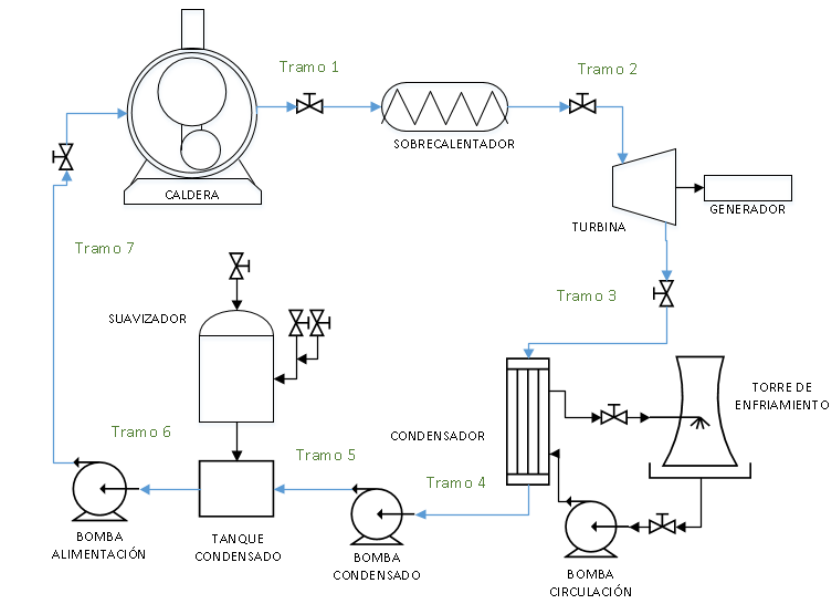
Figura 35. Distribución en planta central térmica de vapor.



1. Caldera Continental
2. Sobrecalentador
3. Turbina C-250 y generador eléctrico
4. Condensador de superficie
5. Torre de enfriamiento
6. Suavizador de agua
7. Tanque de condensado
8. Bomba de alimentación

Distribuidos inicialmente los equipos en el laboratorio, se procede con la selección de tuberías y accesorios de forma preliminar entre los diferentes equipos, por lo que se hace necesario realizar un esquema donde se muestre los tramos de tuberías de la CTV, para ser caracterizados en diámetros, longitudes y accesorios respectivamente.

Figura 36. Esquema CTV tramos de tubería.



Basados en el esquema anterior se realiza la siguiente tabla, la cual contiene diámetros y longitudes por cada tramo definidos a partir de fichas técnicas de los equipos de la CTV.

Tabla 18. Tramos de tubería CTV

Tramos	Descripción	Diámetro	Longitud [m]	Accesorios
Tramo 1	Caldera – sobrecalentador	1 [in]	1,7	3 codos 90° Válvula
Tramo 2	Sobrecalentador – turbina	1 [in]	0,4	3 codos 90° Válvula
Tramo 3	Turbina – condensador	1 1/4 [in]	0,8	4 codos 90° Válvula estrangul
Tramo 4	Condensador – Bomba de condensado	1 [in]	0,75	2 codos 90°
Tramo 5	Bomba condensado – tanque condensado	3/4 [in]	1	2 Codos 90° Válvula seguridad
Tramo 6	Tanque de condensado – Bomba alimentación	1 [in]	0,3	2 Codos 90° Válvula seguridad
Tramo 7	Bomba alimentación - caldera	3/4 [in]	0,8	1 codo 90° válvula

9. ANÁLISIS ECONÓMICO PARA CADA SISTEMA DISEÑADO

Para este capítulo se realizará un análisis económico, evaluando el presupuesto del sistema solar fotovoltaico conectado a la red *Grid Tie* y de la Central Térmica de Vapor CTV, teniendo en cuenta los diferentes factores que influyen en el análisis de cada uno de los sistemas diseñados.

9.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED SFCR “GRID TIE”

Para el estudio de este sistema, se determinan los flujos de caja resultantes de la implementación del SFCR “*Grid Tie*”, con el fin de evaluar la rentabilidad a largo plazo, mediante indicadores o parámetros que justifiquen la viabilidad financiera respecto al valor de la inversión inicial del proyecto.

A continuación, se presentan las variables para calcular la viabilidad del sistema FV “*Grid Tie*”.

- **Inversión inicial:** Valor determinado por el dimensionamiento del proyecto de acuerdo a los elementos que serán implementados en la instalación y puesta en marcha del sistema FV “*Grid Tie*”.
- **Costo de la energía:** Valor anual de la energía regulada por la industria, este varía respecto a la inflación del país.
- **Generación anual de Energía FV:** Es la energía total producida por el sistema FV anualmente, para este valor se deben considerar las pérdidas en paneles y la irradiación disponible del lugar de instalación del sistema, cuantificada en horas de sol o HSP.

- **Incentivos tributarios:** Sujetos a la Ley 1715 de 2014, la cual se encarga de regular, promover, incentivar y reglamentar el desarrollo de las energías alternativas en Colombia, para lo cual se toman en cuenta los siguientes artículos:
- *Artículo 11:* Descuento del impuesto sobre renta del 50% sobre el valor total de la inversión inicial para proyectos de autogeneración y cogeneración con fuentes de energía no convencional.
 - *Artículo 12:* Exención del impuesto del valor agregado (IVA) en equipos utilizados para el desarrollo y la implementación de proyectos con fuentes no convencionales de energía.
 - *Artículo 13:* Exención del arancel de importación en equipos utilizados para el desarrollo de proyecto con fuentes no convencionales de energía.
 - *Artículo 14:* Depreciación acelerada al 20% anual en equipos utilizados para el desarrollo de proyectos no convencionales de energía.

9.1.1 Inversión inicial. Para estimar la inversión total inicial se calcula el costo unitario de los equipos por la cantidad necesaria requerida del sistema, para este caso también se tiene en cuenta el costo de la mano de obra calificada necesaria para hacer la instalación del sistema. Se asumen (dos técnicos electricistas y un ingeniero electricista).

El salario mensual de un ingeniero electricista asciende en promedio a los 3.000.000 pesos colombianos, mientras que para el técnico electricista 1.500.000 pesos colombianos. El periodo de montaje, pruebas y puesta en marcha del sistema, se estima como mínimo quince días según los imprevistos, por lo cual se establece el pago de la mano de obra en la *Tabla 19*.

Tabla 19. Costo Mano de Obra

Personal Capacitado	Salario [COP/día]	Tiempo [días]	Salario Total [COP]
Ingeniero	\$ 100.000	15	\$ 1.500.000
Técnico Electricista	\$ 50.000	15	\$ 750.000
Técnico Electricista	\$ 50.000	15	\$ 750.000
	Costo mano obra [COP]		\$ 3.000.000

Finalmente se agrega el valor del certificado RETIE, este es un documento expedido por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia, con el propósito de establecer patrones controlables e iguales en las instalaciones y redes eléctricas. Asimismo, busca garantizar y velar por la seguridad de las personas, la sociedad, los animales y para la conservación del medio ambiente.

Tabla 20. Presupuesto del sistema FV *Grid Tie*

Descripción	Precio por Unidad	Cantidad	Valor Total [\$COP]	Valor Unitario [\$US/W]
Panel FV - 375 WP Mono	\$ 381.706	30	\$ 11.451.180.	\$ 0,303
Microinversores IQ7 plus - Enphase	\$ 398.275	30	\$ 11.948.250	\$ 0,316
Enphase Agregador IQ	\$ 1.550.000	1	\$ 1.550.000	\$ 0,041
Cable Q Enphase -2 líneasx1m	\$ 39.213	30	\$ 1.176.390	\$ 0,031
Terminador Q Cable ends	\$ 49.311	3	\$ 147.933	\$ 0,004
Enphase Envoy IQ	\$ 1.210.803	1	\$ 1.210.803	\$ 0,032
Estructura	\$ 2.735.358	1	\$ 2.735.358	\$ 0,072
Certificado de Conformidad - RETIE	\$ 2.000.000	1	\$ 2.000.000	\$ 0,053
		Instalación	\$ 3.000.000	\$ 0,079
	\$US/W Instalado	\$ 0,93		
			\$ 35.219.914	

El presupuesto total estimado para la implementación del sistema fotovoltaico corresponde a \$ **35.219.914** pesos colombianos. En el presupuesto no se contempló el IVA ni los aranceles de importación, ya que el marco jurídico así lo define en sus incentivos tributarios, con previa autorización de la UPME y la ANLA.

Por otra parte, el costo unitario (\$US/W) del sistema FV “*Grid Tie*”, mostrado en la tabla anterior, se obtiene convirtiendo el precio unitario (COP) de cada componente en dólares (US), para luego dividirlo entre la potencia nominal del sistema, se fija la tasa representativa del Dólar estadounidense (\$US) al Peso colombiano (\$COP) equivalente a:

$$\text{\$1 } US = \text{\$3.358 } COP$$

9.1.2 Costo de la energía. Es el precio que se paga por unidad de consumo del servicio de energía eléctrica, es decir, por cada kilovatio-hora (kWh), este valor es regulado por la industria y varía anualmente según la tasa de inflación del país.

$$\textit{Inflación} = 3.18 \%$$

9.1.3 Generación anual de Energía FV. Para obtener el ahorro monetario anual proyectado, se estima el potencial de producción energética anual del sistema FV “*Grid Tie*”, por medio de la siguiente ecuación:

$$E_{gen} = \frac{Pot_{int} * HSP * F_{uso} * F_{temp}}{H_{pr}} * 365 \text{ días} \quad (69.)$$

$$E_{gen} = \frac{11,250 * 3,65 * 0,95 * 0,88}{1000} * 365 \text{ días}$$

$$E_{gen} = 12530 [KW/año]$$

A partir de la producción anual del sistema y el valor de la energía, se calcula el ahorro anual del sistema a instalar para el año cero, pero se hace una proyección a 10 años teniendo en cuenta los diferentes factores que afectan la eficiencia del panel y el precio del [KWh].

9.1.4 Incentivos tributarios. Para determinar los flujos de caja, se deben tener en cuenta los incentivos de ley, estos reducirán de forma significativa el tiempo de recuperación de la inversión inicial, lo cual hace a este tipo de proyectos rentables financieramente y ambientalmente.

Los siguientes artículos de la ley 1715 influyen directamente sobre el flujo de caja del proyecto para los primeros cinco años:

- El artículo 11 afecta de manera significativa el flujo de caja del proyecto solar, ya que genera sobre la inversión inicial un descuento del 50% este es aplicado a la renta del cliente y podrá ser descontado del primer al quinto año del proyecto.

Para este caso el descuento equivale a un valor de **\$COP 17.609.957** y será descontado el primer año.

- De acuerdo al artículo 14 aquellos equipos que se implementen en proyectos de generación energética utilizando fuentes de energía renovable no convencional, se les aplicará el beneficio de depreciarse aceleradamente en un periodo de 5 años y no 10 años como lo estipula el estatuto tributario nacional colombiano.

Si los equipos se depreciaran según el estatuto tributario a 10 años la carga impositiva adicionada al balance es:

$$\frac{35.219.914}{10} = 3.0521.991 \left[\$/año \right]$$

Ya que la depreciación es acelerada, la carga impositiva en este caso para los 5 años es:

$$\frac{35.219.914}{5} = 7.043.983 \left[\$/año \right]$$

Para el Descuento anual agregado al flujo de caja del proyecto, se tiene en cuenta una tasa tributaria del 35%

$$(3.0521.991 - 7.043.983) * 0,35 = 1.232.697 \left[\$/año \right]$$

Este valor se fija para los cinco primeros años como estipula la ley.

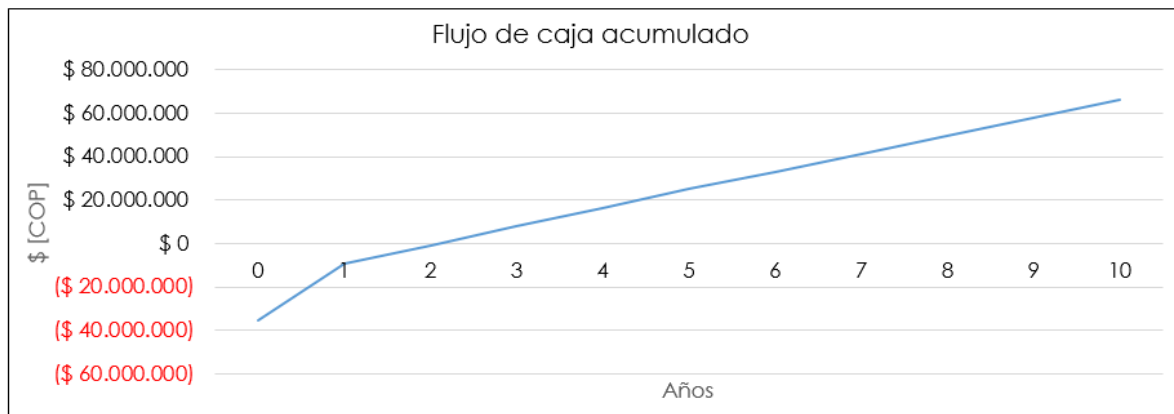
Tabla 21. Flujos de caja proyectados a 10 años con beneficio tributario.

0,35 Tasa Tributaria 2018 0,0318 Inflación 2018											
Flujo de caja proyectado a 10 años con Beneficio Tributario											
Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precio kWh Año (COP)	565	583	602	621	640	661	682	703	726	749	773
Recibo 25-mayo											
Desempeño del panel (%)	1	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9
Generación kWh anual	12530	12405	12279	12154	12029	11903	11778,02	11652,72	11527,43	11402,13	11276,83
Ahorro anual (COP)		\$7.079.343	\$7.231.422	\$7.386.014	\$7.543.125	\$7.702.759	\$7.864.918	\$8.029.601	\$8.196.805	\$8.366.523	\$8.538.746
Inversiones de capital BPPI UIS (bienes y servicios)	(\$ 35.219.914)										
Incentivo renta ley 1715 (50%)		\$17.609.957									
Ley 1715 Depreciación activos (20%)		\$1.232.697	\$1.232.697	\$1.232.697	\$1.232.697	\$1.232.697					
Flujo de caja operativo	(\$ 35.219.914)	\$ 25.921.997	\$ 8.464.119	\$ 8.618.711	\$ 8.775.822	\$ 8.935.456	\$ 7.864.918	\$ 8.029.601	\$ 8.196.805	\$ 8.366.523	\$ 8.538.746
Flujo de caja acumulado	(\$ 35.219.914)	(\$ 9.297.917)	(\$ 833.798)	\$ 7.784.913	\$ 16.560.734	\$ 25.496.190	\$ 33.361.108	\$ 41.390.709	\$ 49.587.514	\$ 57.954.037	\$ 66.492.782

Flujo de caja operativo (FCO): Es la cantidad de dinero en efectivo que se genera a través de operaciones de entrada y salida. En este caso los flujos de entrada hacen referencia a la producción energética anual del sistema, más los incentivos tributarios de ley y el flujo de salida sería la inversión inicial de la instalación del sistema.

Flujo de caja acumulado: Es un informe financiero que se presenta en detalle acerca de los flujos totales anuales, esto se hace con el propósito conocer la liquidez, mediante este flujo se puede determinar el año de recuperación de la inversión inicial. La *Figura 37*. Muestra de forma gráfica el flujo de caja acumulado, en donde se evidencia que después del segundo año la inversión inicial del proyecto se recupera.

Figura 37. Flujos de caja VS tiempo de recuperación de la inversión con incentivos tributarios.



Esta *Figura* representa gráficamente la viabilidad del proyecto, debido a que se puede ver que el retorno de la inversión se da en un corto tiempo y la tendencia de la gráfica muestra un crecimiento positivo de los flujos de caja con respecto al tiempo. Según la proyección, a 10 años se espera tener un ahorro de más de sesenta millones de pesos.

9.1.5 Parámetros de evaluación financiera. Un análisis que se anticipe al futuro puede evitar posibles problemas a largo plazo y evaluarán la viabilidad financiera del sistema a instalar, por lo cual se determinan las siguientes herramientas. El VPN y la TIR se mencionan juntos porque en realidad es el mismo método, sólo que su resultado se expresa de diferente forma.

- **Valor Presente Neto (VPN):** Es una herramienta de muy fácil aplicación, permite llevar todos los ingresos y egresos del futuro a un valor en pesos de hoy, con lo cual se podrá evaluar las pérdidas o ganancias respecto a inversión inicial del proyecto. Para este caso el valor presente corresponde a:

$$VPN = \frac{\sum_{t=0}^I (FNE_f) f}{(1+i)^2} - Inversión Inicial \quad (70.)$$

$$VPN = \$ 60.026.714$$

- **Tasa Interna de Retorno (TIR):** Es aquella tasa que está ganando un interés sobre el saldo no recuperado de la inversión en cualquier momento de la duración del proyecto. Para este caso el valor de la TIR corresponde a:

$$TIR = 36.22\%$$

- **Plazo de Recuperación (Payback):** Es un criterio estático de valoración que permite determinar el tiempo de recuperación de la inversión inicial del proyecto mediante los flujos de caja.

Para este caso el periodo de recuperación es:

$$PayBack = \text{Último periodo de flujo acum negativo} + \frac{|\text{último flujo acum negativo}|}{\text{flujo en el sigt periodo}} \quad (71.)$$

$$ayBack = 2.096$$

De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que el análisis económico es viable puesto que se evidencia el retorno de la inversión inicial del sistema Fotovoltaico “Grid Tie”. Para mayor detalle de los cálculos ver *Anexo F*.

9.2 CENTRAL TÉRMICA DE VAPOR

Para el estudio económico de la CTV a escala laboratorio, se genera una tabla que determina un presupuesto inicial de los componentes diseñados y/o seleccionados.

Es importante tener en cuenta los componentes disponibles del laboratorio de Sistemas Térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

De acuerdo a lo anterior, se estima la inversión inicial de los equipos seleccionados, para lo cual se tiene en cuenta las cotizaciones solicitadas a las diferentes empresas, ver *Anexo F*. Por otra parte, se tendrá en cuenta un costo relacionado con las tuberías y accesorios, el montaje y puesta en marcha de la instalación, además del personal capacitado.

Este costo de todo en conjunto descrito anteriormente se asume de **\$ 6.000.000 COP**

9.2.1 Presupuesto de la central térmica de vapor CTV a escala laboratorio. La siguiente tabla muestra la inversión inicial, para la estimación del presupuesto no se tendrá en cuenta el IVA.

Tabla 22. Costo inversión inicial de CTV a escala laboratorio.

Componente	Descripción	Empresa	Cant	Valor unitario	Total
Caldera	Caldera 15 BHP	Continental	1	\$ 46.800.000	\$ 46.800.000
Tanque retorno y Moto-bomba	Capacidad 30 gal y 4GPM	Continental	1	\$8.200.000	\$8.200.000
Sobrecalentador	Resistencia tubular en U con aletas difusoras de	Presis	1	\$ 930.000	\$ 930.000

	2,4kw x12Kw Ref:80*10				
Condensador	Intercambia- dor de casco y tubos tipo BEM- con- densador va- por-agua.	Tosin.	1	\$32.950.000	\$32.950.000
Tuberías, ac- cesorios e ins- talación.	Tubería Galvanizada.			\$6.000.000	\$6.000.000
Torre de refri- geración.	Torre de en- friamiento GLACIAR modelo GLC- 40402P020-1	GLACIAR Ingeniería S.A.S.	1	\$13.000.000	\$13.000.000
TOTAL					\$ 107.880.000

De acuerdo con la *Tabla 22*, el presupuesto estimado para la implementación de la Central Térmica de Vapor CTV corresponde a **\$ 107.880.000** pesos colombianos. Este presupuesto queda sujeto a modificaciones del sistema y valores del mercado. La inversión de este laboratorio no tiene recuperación monetaria, debido a que el objetivo está enfocado en a fines netamente académicos.

10. FORMATO BANCO DE PROGRAMAS Y PROYECTOS DE INVERSIÓN

Para dar cumplimiento al objetivo específico número tres planteado al inicio de este trabajo de grado se diligencia el formato de Proyectos Tipo A, suministrado por la oficina de bancos de programas y proyectos de inversión adscrita a la oficina de planeación de la Universidad Industrial de Santander, el cual contiene información detallada del diseño de una sistema fotovoltaico conectado a la red “*Gried Tie*”, el cual busca ser instalado en el cuarto piso del edificio nuevo de la escuela de ingeniería mecánica, el formato en su totalidad se encuentra en el *Anexo G*.

11. CONCLUSIONES

- ▶ Se diseñó un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red SFCR “*Grid Tie*” con capacidad de aproximadamente de 11.5 [kw] para el desarrollo de bancos de laboratorio referente al uso de energías renovable y para satisfacer la demanda parcial del edificio nuevo de laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para zona de luminarias de áreas comunes. Este sistema, al ser un sistema conectado directamente a la red elimina el uso de baterías, reduce los costos del diseño y permite el autoconsumo instantáneo de la energía producida, debido a que es inyectada directamente al tablero de distribución.
- ▶ Para dar cumplimiento a segundo objetivo, el cual hace referencia a la distribución en planta del sistema, se realizó un análisis de sombras del lugar seleccionado donde se proyecta realizar el montaje de los paneles solares, es decir el cuarto piso de la Escuela de Ingeniería Mecánica, mediante la utilización de modelos 3D y el programas gráficos donde fue simulado el comportamiento solar típico para la ciudad de Bucaramanga, y los diferentes efectos de sombreado que puedan tener la estructura aledaña sobre lugar seleccionado, este análisis permitió establecer un área total disponible de 62.625 [m²].
- ▶ Cada una de las características evaluadas en este diseño SFCR “*Grid Tie*”, permitió establecer la viabilidad técnica de este sistema en particular, mediante la utilización de Matlab se modeló el comportamiento de un panel solar inclinado para determinar el ángulo más óptimo y la mejor orientación del sistema, con el fin de tener la mayor radiación posible. De acuerdo a las coordenadas cartesianas de la Escuela de Ingeniería Mecánica, este estudio dio como resultado una inclinación de 10° grados orientados hacia el norte.

- ▶ El diseño de este sistema SFCR “*Grid Tie*”, lleva a la conclusión que mediante el análisis económico elaborado, su implementación es factible a corto plazo, debido al retorno de la inversión bajo correspondiente a dos años y un mes, aproximadamente. Este valor se da gracias a los bajos precios del mercado y las actuales políticas del país en relación con el uso e implementación de energías renovables, establecidos en la Ley 1715 del 2014.
- ▶ Se diseñó la central térmica de vapor considerando la utilización de equipos principales existentes, los cuales fueron caldera, generador y turbina, esta última se consideró como elemento crítico en el diseño de la CTV por su baja eficiencia al ser un equipo antiguo. Los demás elementos fueron resultado de cálculos de diseño y selección comercial, los cuales al ser puestos en funcionamiento de forma adecuada en el proceso de generación de la CTV puedan garantizar una producción de energía eléctrica de 0.83 [kw] aproximadamente.
- ▶ Se realizó la distribución en planta de la CTV en el laboratorio de sistemas térmicos ubicado en el sótano del edificio de la Escuela de Ingeniería Mecánica, la cual obedeció principalmente a la disponibilidad de los suministros de agua, gas y electricidad con los que cuenta el laboratorio ubicados en la parte noreste. Además, se consideró una disposición adecuada de los equipos que conforman la CTV para tener acceso confortable a la hora de su puesta en marcha, para garantizar la observación y control de cada uno de los equipos por parte de los estudiantes y atendiendo las recomendaciones de instalación propias de cada equipo.
- ▶ Se diligencio el formato Tipo A suministrado por el Banco de Programas y Proyectos de Inversión de la UIS BPPIUIS, el cual fue nombrado como “Diseño e Implementación de un Sistema Fotovoltaico “*Grid Tie*” como Banco

de Laboratorio para el Análisis de la Obtención de Energía Eléctrica, para la Escuela de Ingeniería Mecánica”, este formato queda a consideración del consejo de Escuela y consejo de Facultad, quienes darán el visto bueno para ser entrega oficial a la Dirección de Planeación con el objetivo de radicar el proyecto.

12. RECOMENDACIONES

- ▶ Para el diseño e implementación del SFCR “*Grid Tie*”, se sugiere utilizar todos los componentes de la nueva tecnología *Enphase IQ* esto con el fin de garantizar un análisis detallado tanto del consumo, como de la producción energética de la carga de forma instantánea, los cuales además de brindar mayor seguridad basan su funcionamiento en tecnologías como la de Seguidor Punto de Máxima Potencia MPPT utilizado en los microinversores, los cuales también manejan bajas tensiones en comparación a un sistema central o un sistema en cadena.
- ▶ Elaborar guías de laboratorio enfocadas en la toma de datos instantáneos de radiación solar captados por los paneles solares a diferentes ángulos de inclinación, con el fin de compararlos con modelos matemáticos que se ajusten a las condiciones meteorológicas de la ciudad de Bucaramanga.
- ▶ Cambiar los equipos con mayor antigüedad utilizados en el diseño de la CTV (caldera y generador eléctrico), equipos que debido a sus condiciones de diseño y años de utilización tienen eficiencias, capacidades térmicas y mecánicas bajas, lo cual repercute en el funcionamiento de la CTV haciéndola menos eficiente y disminuyendo la producción de energía eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

AFSHIN J, Ghajar y YUNUS A, Cengel. Termodinámica. México: McGraw Hill, 2012. p.999. ISBN 978-607-15-0743-3.

ALJAZ A, Khan y RAMA S R, Gorla. Turbomachinery Design and Theory. New York: Marcel Dekker, p.403. ISBN 0-8247-0980-2.

BECKMAN, Willian A y DUFFIE, Jhon A . Solar engineering of termal processes. New Jersey: John Wiley & Son. Inc. 2013. p. 887. ISBN 978-0-470-87366-3.

CANTILLO CASTILLO, Pablo Julián y GONZALEZ PEREZ, Luis Alberto. Análisis energético de la planta térmica de la escuela de ingeniería mecánica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicomecánicas. 2009. p.151.

DEGLER, H.E, MILES, J.C Y SEVERNS, W.H.La producción de energía mediante vapor, aire o gas. Barcelona: Editorial Reverté, S.A. p.503. ISBN 84-291-4890-6.

DeWITT, David P y ICROPERA, Freank P. Fundamentos de transferencia de calor. Mexico: Person Educación. p. 912. ISBN 970-17-0170-4

FIGUEROA DUARTE, Guillermo, et al. Montaje y automatización del laboratorio de plantas térmicas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicomecánicas.1994.p 324.

GAFFERT, G. A. Centrales térmicas de vapor. Bogotá: Editorial Reverté, S.A. p.593. ISBN -84-291-4830-2.

GALVIS PACHECO, Andrés Felipe y MORALES ARDILA, Cesar Guillermo. Diseño de una instalación fotovoltaica conectada a la red para el edificio Mamitza Bayer ubicado en el campus central de la Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas. 2017. p.125.

GALVIS TORRES, Oswaldo Alonso y GOMEZ ACEVEDO, Yury Francisco. Diseño y construcción de una microplanta de generación eléctrica como banco de pruebas para el laboratorio de plantas térmicas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicomecánicas. p. 195.

KERM, Donald Q. Procesos de transferencia de calor. México: Compañía Editorial Continental, S.A. p. 957. 1999. ISBN 968-26- 040-0

SANCHÉZ GUEVARA, Sebastián y FRANCO GIL, Julian. Diseño e implementación de un sistema fotovoltaico interconectado a red con soporte de almacenamiento en la Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. 2016. p.36.

SMET, Arno, et al. Solar energy The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems. Cambridge: UIT Cambridge Ltd. 2016. p 453. ISBN 978 1 906860 32 5.

YUNUS A, Cengel y AFSHIN J, Ghajar. Transferencia de calor y masa. México: McGraw Hill, 2011. p.915. ISBN 978-607-15-0540-8.