



Análisis de Prefactibilidad Técnica y Económica para un Sistema Híbrido de Energía Renovable para la Sede P

Andrés Ricardo Guevara Umaña

Universidad ECCI.
Maestría en Ingeniería con énfasis en Mecánica
Bogotá, Colombia
2020.

Análisis de Prefactibilidad Técnica y Económica para un Sistema Híbrido de Energía Renovable para la Sede P

Andrés Ricardo Guevara Umaña

Tesis de grado presentado como requisito para optar al título de:
Magíster en Ingeniería

Director:
Ph.D. Juan Sebastián Solís-Chaves

Línea de Investigación:
Energía y Transporte
Grupo de Investigación:
Grupo de Investigación en el Aprovechamiento Tecnológico de los Materiales y la Energía
«GIATME».

Universidad ECCL.
Maestría en Ingeniería
Bogotá DC, Colombia
2020

Dedicatoria

Investigar es ver lo que todo mundo ha visto, y pensar lo que nadie más ha pensado.

Isaac Rand

Agradecimientos

Quiero agradecer a cada una de las personas que hicieron posible este trabajo de investigación, por apoyarme aún cuando mis ánimos decaían.

También quiero agradecer a mi tutor, quien me brindó sus conocimientos, apoyo para el desarrollo de mi trabajo de investigación y alcanzar los resultados que buscaba.

Quiero agradecer a la Universidad por ofrecerme las herramientas, espacios y recursos que me ayudaron en el proceso de investigación y aplicación de este proyecto.

Declaración

Me permito afirmar que he realizado la presente tesis de manera autónoma y con la única ayuda de los medios permitidos y no diferentes a los mencionados en la propia tesis. Todos los pasajes que se han tomado de manera textual o figurativa de textos publicados y no publicados, los he reconocido en el presente trabajo. Ninguna parte del presente trabajo se ha empleado en ningún otro tipo de tesis.

Bogotá, D.C., 07/12/2020

Andres Ricardo Guevara Umaña

Resumen

En este trabajo, los sistemas de Energía Renovable del programa System Advisor Model -SAM, permiten configurar los diferentes parámetros de los sistemas de generación basados en fuentes renovables y afinar las diferentes simulaciones hasta conseguir un resultado muy cercano a la realidad, haciendo posible vincular información real (como curvas de carga, cantidad de recurso renovable disponible y precio de los componentes, como mínimo) que ayuden con el cálculo de la energía generada por el Proyecto, para el primer año y los 25 subsiguientes, así como los costos asociados a él (costo de paneles solares, generadores eólicos, instalación, mano de obra, etc), además de los ahorros generados tanto en energía como en dinero (dejado de pagar a la empresa de energía) e información relacionada con la amortización de la deuda. El primer proyecto es llamado SFV Bta Comercial que simula el sistema fotovoltaico de la sede P, considerando las siguientes características, a saber: “Ubicación y Recurso”, “Módulo, Inversor”, “Diseño del Sistema”, “Tiempo de Vida”, “Almacenamiento en Baterías”, “Costos del Sistema, Parámetros Financieros, Incentivos, Tarifas de Electricidad y Carga Eléctrica. El segundo proyecto simulado, dentro del mismo archivo de SAM para la sede P de la ECCI, es llamado WES Bta Comercial y simula un parque eólico para emplazar en la terraza del edificio. En él se encuentran los menús del “Recurso eólico”, el “Diseño de la Turbina” y del “Parque Eólico”, la estimación del “Tiempo de Vida” y los “Costos del Sistema”, además de los “Parámetros Financieros”, los “Incentivos Fiscales”, las “Tarifas de Electricidad” y nuevamente, la Carga Eléctrica. Adicionalmente se considera un sistema de almacenamiento de baterías, para completar la configuración del sistema híbrido. Este proyecto se enfoca en explicar con claridad los ítem técnicos y económicos de la Simulación para conseguir dar respuesta a la prefactibilidad de un proyecto como este.

Palabras clave: Baterías, Energía Renovable, Energía eólica, Energía Solar Fotovoltaica, Sistemas Híbridos de Energía Renovable, System Advisor Model - SAM, Costos.

Abstract

In this work, the Renewable Energy systems of the System Advisor Model -SAM program allow configuring the different parameters of generation systems based on renewable sources and fine-tuning the different simulations until a result is very close to reality, making it possible to link information real (such as load curves, amount of renewable resource available and price of the components, as a minimum) that help with the calculation of the energy generated by the Project, for the first year and the following 25, as well as the costs associated with it (cost of solar panels, wind generators, installation, labor, etc.), in addition to the savings generated both in energy and money (no longer paid to the energy company) and information related to the repayment of the debt. The first project is called SFV Bta Commercial that simulates the photovoltaic system of headquarters P, considering the following characteristics, namely: "Location and Resource", "Module, Inverter", "System Design," "Life Time", "Battery Storage", "System Costs, Financial Parameters, Incentives, Electricity Rates and Electric Charging. The second simulated project, within the same SAM file for ECCI headquarters P, is called WES Bta Comercial and simulates a wind farm to be located on the building's terrace. In it are the menus of the "Wind Resource", the "Turbine Design," and the "Wind Farm", the estimation of the "Life Time," and the "System Costs", as well as the "Financial Parameters", the "Tax Incentives", the "Electricity Rates," and again, the Electric Charge. Additionally, a battery storage system is considered to complete the configuration of the hybrid system. This project focuses on clearly explaining the technical and economic items of the Simulation in order to respond to the pre-feasibility of a project like this.

Key words: Battery Storage, Hybrid Renewable Energy Systems, Solar Photovoltaic Energy, System Advisor Model SAM, Renewable Energy, Wind Energy, Costs.

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	XI
Lista de figuras	XIX
Lista de tablas	XXI
1 Introducción y Objetivo de Investigación	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Objetivo general	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
1.1.3 Tipo de Investigación	4
2 Estimación de Consumos de Potencia y Energía para las Sedes de la Universidad ECCI	5
2.1 Carga Eléctrica	6
2.1.1 Cálculo para el mes de junio del 2017	6
2.1.2 Cálculo para el año 2017	7
2.2 Caracterización y Emplazamiento de los Sistemas de Generación Renovables	8
2.2.1 Sistema Solar Fotovoltaico y Banco de Baterías	9
2.2.2 Sistema Eólico de Eje Vertical	11
3 Caracterización del Sistema de Energía Eólica en SAM	13
3.1 Turbinas Eólicas de Eje Vertical	13
3.2 Eficiencia de una Turbina Eólica	17
3.2.1 Potencia Mecánica extraída del Viento	17
3.2.2 Ecuación del Rotor	18
3.2.3 Límite de Betz	19
3.3 Recurso Eólico para la Ciudad de Bogotá	19
3.3.1 Distribución Weibull para la Velocidad del Viento	20
3.3.2 Parámetros de la Turbina Eólica	21
3.3.3 Características de la Turbina Eólica Seleccionada en SAM	22
3.3.4 Configuración del Parque Eólico en la Sede P	23

4	Configuración del Sistema Solar Fotovoltaico (SFV)	26
4.1	La Radiación Solar y el Espectro Electromagnético	26
4.1.1	Espectro Electromagnético	26
4.1.2	La Radiación Solar y sus Principales Tipos	28
4.2	Caracterización del Radiación Solar para la Ciudad de Bogotá	29
4.2.1	Base de Datos de Radiación Solar de NREL	30
4.2.2	Estimación Satelital de la Radiación Solar para Bogotá en el año 2017	30
4.3	Modelo de la Celda Solar Fotovoltaica	31
4.4	Los Sistemas de Generación Solar FV	33
4.4.1	Módulos Solares FV	33
4.4.2	Inversores de CA	34
4.4.3	Baterías	36
4.5	Caracterización del Módulo SFV, del Inversor y Dimensionamiento del Sistema SFV	36
4.5.1	Módulo SFV Seleccionado	36
4.5.2	Inversor de CA Seleccionado	37
4.5.3	Caracterización del Sistema SFV en la Sede P	38
5	Configuración del Banco de Baterías	40
5.1	Bancos de baterías para el Sistema SFV	40
5.1.1	Generalidades	40
5.1.2	Función del Banco de Baterías SFV	42
5.2	Dimensionamiento del Banco de Baterías para el Sistema Híbrido de Energía Renovable	43
5.2.1	Banco de Baterías	44
5.2.2	Ciclos de Carga y Descarga de la Batería	44
5.2.3	Despacho de la Energía Almacenada en las Baterías	46
6	Análisis de Costos para los Sistemas Eólico, SFV y de BESS	48
6.1	Modelo de Costos para Turbinas en Tierra	48
6.1.1	Costo de la Turbina	51
6.1.2	Balance de Costos del Sistema	51
6.1.3	Capacidad Del Parque Eólico	51
6.1.4	Costo Total Instalado	52
6.1.5	Costos De Operación y Mantenimiento (O&M)	52
6.2	Costos Del Sistema Solar Fotovoltaico	53
6.2.1	Costos Directos de Capital	54
6.2.2	Costo Directo Total	55
6.2.3	Costos Indirectos de Capital	55
6.2.4	Costo Total de la Instalación	57

6.2.5	Costos de Operación y Mantenimiento (O&M)	57
6.3	Costos del Sistema de Almacenamiento por medio de Baterías	58
6.3.1	Sistema de Costos Eólico y Solar	60
7	Resultados de la Simulación en SAM	63
7.1	Resultados Energéticos	63
7.1.1	Sistema SFV	63
7.1.2	Sistema de Almacenamiento de Baterías	68
7.1.3	Sistema Eólico de Eje Vertical	71
7.1.4	Sistema de Energía Solar	72
7.1.5	Producción Total De Energía del Sistema Híbrido de la Sede P	78
7.2	Resultados Económicos	79
7.2.1	Sistema Eólico	79
7.2.2	Sistema SFV y Baterías	81
8	Conclusiones y Trabajo Futuro	83
8.1	Conclusiones	83
8.2	Trabajos Futuros	85
	Bibliografía	86

Lista de Figuras

1-1	Sistema Híbrido de Energía Renovable propuesto (HRES).	2
1-2	Sistema Híbrido de Energía Renovable, Eólica de eje vertical y Solar Fotovoltaico [1].	3
2-1	Vista del Edificio de la Sede P de la Universidad ECCI.	5
2-2	Gráfica perfil de carga Anual de la Sede P del año 2017 dada en kW	8
2-3	Ubicación de los Paneles SFV en la terraza de la Sede P.	10
2-4	Ubicación de las Turbinas de Eje Vertical en el Plano de la Terraza de la Sede P.	11
3-1	Limite de Betz y Eficiencia de los Aerogeneradores de Eje Vertical	14
3-2	Clasificación de las Turbinas Eólicas de Eje Vertical	14
3-3	Darrieus Aerogenerador de Eje Vertical	15
3-4	Turbina eje Vertical de Savonius	15
3-5	Turbina eje Vertical tipo Giromill	16
3-6	Turbina eje Vertical tipo Windside	16
3-7	Esquema Simple del Flujo de Aire a través de una Turbina Eólica [2].	18
3-8	Distribución Weibull para la velocidad del viento en Bogotá, Colombia y Energía de la turbina eólica	21
3-9	Curva de Potencia de la Turbina	23
3-10	Ubicación de las Turbinas	24
4-1	Curva de Espectro Electromagnético, tomado de [3]	27
4-2	Espectro Electromagnético, tomado de [4]	27
4-3	La radiación solar y resultantes de interacciones con la atmósfera, tomado de [5]	28
4-4	Base de Datos NREL de Irradiación Global	29
4-5	Unión de las capas semiconductoras en una celda solar fotovoltaica	31
4-6	Circuito con diodo equivalente de una celda fotovoltaica, tomado de [6]	32
4-7	Panel Solar, tomado de [7]	34
4-8	Puente de Inversor Trifásico, tomado de [8]	35
4-9	Inversor fotovoltaico	35
4-10	Curva de potencia que extrae el módulo a partir de la radiación solar incidente.	37
4-11	Curvas de Eficiencia del Inversor Trifásico de CA	38

4-12 Eje Azimuth para la Sede P, [9].	39
5-1 Modelo de Baterías Gel PV Bloc PowerSafe EnerSys, [10].	40
5-2 Operación electroquímica de Descarga de la Celda, [11].	41
5-3 Operación Electroquímica de Carga de la Celda [11].	42
5-4 Configuración del Banco de Baterías, tomado de [12].	43
5-5 Degradación del Ciclo de la Vida Útil de las Baterías	45
5-6 Manual de Despacho del BESS entre semana, tomado de [9]	47
5-7 Manual de Despacho del BESS para el fin de semana, tomado de [9]	47
6-1 Diagrama de Flujo del Balance de Costos (WindBos) del Sistema Eólico	49
6-2 Diagrama de Flujo de la Estimación de Costos de Sistema SFV	58
7-1 Producción de Energía Mensual	64
7-2 Pérdida de Energía	65
7-3 Producción de Energía Anual	66
7-4 Potencia Corriente Continua de los Paneles SFV	67
7-5 Radiación total Nominal	68
7-6 Despacho de baterías	69
7-7 Voltaje y Corriente de las Baterías	70
7-8 Electricidad desde las baterías	71
7-9 Producción de Energía Mensual	73
7-10 Pérdidas de Energía del Sistema de Energía Eólico	74
7-11 Energía Anual del Sistema Eólico	75
7-12 Promedio Mensual de Electricidad	76
7-13 Electricidad desde la Red vs la Carga Eléctrica	77
7-14 Factura de Carga	78
7-15 Energía total generada por HRES en <i>kWh</i> a lo largo de 30 años	79
7-16 Pago de la Deuda y los Intereses para el Sistema Eólico	80
7-17 Pago de la Deuda y los Intereses para el Sistema SFV	82

Lista de Tablas

2-1	Cálculo de la Facturación Eléctrica para la Sede P en 2017	7
2-2	Cálculo de la Energía Consumida por la Sede P en 2017	7
3-1	Características de Diseño la Turbina	22
3-2	Características de Potencia de la Turbina	23
3-3	Especificación Número de Turbinas	25
4-1	Modelo de Recursos de Datos Sistema SFV [13].	30
4-2	Parámetros solares y meteorológicos en Bogotá DC para el año 2017.	31
4-3	Características del Módulo SFV	36
4-4	Características Técnicas del Inversor de CA.	37
4-5	Resumen del Dimensionamiento del Sistema Solar Fotovoltaico	39
4-6	Configuración Eléctrica de los Paneles SFV	39
5-1	Propiedades de las Baterías	44
5-2	Vida útil de las Baterías	45
5-3	Modelo de Despacho del Sistema de energía de almacenamiento de las Baterías	46
6-1	Parámetros de Análisis de Costos para el HRES	48
6-2	Costos Indirectos del Sistema SFV	58
6-3	Costo del Área Utilizada	59
6-4	Costos Total de la Instalación	59
6-5	Costos de Operación y Mantenimiento	59
6-6	Costos Directos del Sistema SFV	60
6-7	Costos Capital	61
6-8	Costos Total del Sistema WES	61
6-9	Costos Directos del Capital	62
6-10	Costo Indirecto del Capital	62
7-1	Resultados Técnicos Simulación Sistema SFV	63
7-2	Resultados simulación sistema WES	72
7-3	Resultados simulación del sistema solar fotovoltaico	72
7-4	Resultados Económicos Simulación WES	80
7-5	Resultados Económicos Simulación SFV	81

1 Introducción y Objetivo de Investigación

Los Sistemas Híbridos de Energía Renovable (Hybrid Renewable Energy Systems, **HRES**) son una alternativa interesante para las poblaciones pequeñas y aisladas alrededor del mundo o para edificios públicos que fueron diseñados siguiendo la metodología **LEED** (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental). Por lo tanto, su infraestructura debe solventar las necesidades de energía a través de fuentes renovables como lo son el viento o el sol, de manera eficiente, tal como se explica en [14]. Una combinación de diferentes tipos de sistemas de energía renovable en conjunto con un sistema de almacenamiento que use baterías, puede proporcionar suficiente energía para satisfacer los requisitos de suministro (total o parcial) del consumo de energía de los edificios públicos o incluso de una casa estándar [15]. Algunos trabajos recientes sobre el tema demuestran su importancia en el desarrollo sostenible, los sistemas híbridos y la filosofía LEED [16, 17].

Para el presente caso, se simula una combinación de sistemas de generación eólica, fotovoltaica y de almacenamiento por baterías, utilizando el software de licencia libre System Advisor Model - SAM, que fue diseñado por el Laboratorio de Energías Renovables de EEUU (National Renewable Energies Laboratory -NREL), para la Sede P de la Universidad ECCI [12]. La configuración escogida para el HRES, se presenta en la Figura 1-1.

El objetivo de este proyecto es simular los sistemas de energía antes mencionados, utilizando SAM para así obtener características técnicas y económicas de cada uno de ellos, y un costo total del proyecto. Con el fin de conseguir un escenario de simulación real, una ubicación geográfica específica es necesaria, con ella se determinan las condiciones climáticas y de disponibilidad del recurso renovable, específicamente la Radiación Solar y la Velocidad del Viento para la Ciudad de Bogotá, pues son las entradas principales del modelo computacional para estimar la energía generada por cada sistema [12].

Los resultados de la simulación pueden proporcionar información sobre la factura de electricidad luego de instalar los sistemas de energía renovable considerados, el flujo de caja del proyecto, la energía generada por mes entregada a la carga, la energía anual almacenada y suministrada por las baterías, el costo nivelado de energía (LCOE), el pago de la deuda del proyecto para cuantificar el potencial renovable local, los costos de los componentes principales (es decir, paneles solares, inversores, turbinas eólicas, baterías, etc.), la depreciación de los componentes del sistema, todos sus costos asociados por unidad o por kilovatio, su

vida útil e incentivos, sus parámetros financieros y tarifas de electricidad, entre otros [18], algunos de ellos serán descritos en este documento.

Los modelos financieros de SAM pueden representar proyectos residenciales y comerciales que compran y venden electricidad a precios minoristas, o al por menor y Proyectos de tipo Acuerdo de Compra de Energía (Power Purchase Agreement -PPA) para cumplir con los requisitos de la tasa interna de rendimiento [12]. Estos proyectos pueden financiarse mediante un préstamo o un pago en efectivo (0% por ciento de la deuda) y recuperar los costos de inversión vendiendo electricidad a las tasas establecidas por el proveedor de servicios de electricidad a nivel local, regional o nacional. SAM también calcula medidas a nivel de proyecto, suponiendo que es una sola compañía la que desarrolla, mantiene y opera el proyecto.

Un diagrama de bloques del HRES simulado en el programa en cuestión, se representa en la Figura 1-1. **Aquí puede verse que no se considera una interconexión con la Red, sino solamente suplir de manera autónoma, total o parcialmente la carga eléctrica consumida por el Edificio de la Sede P, a lo largo del tiempo.**

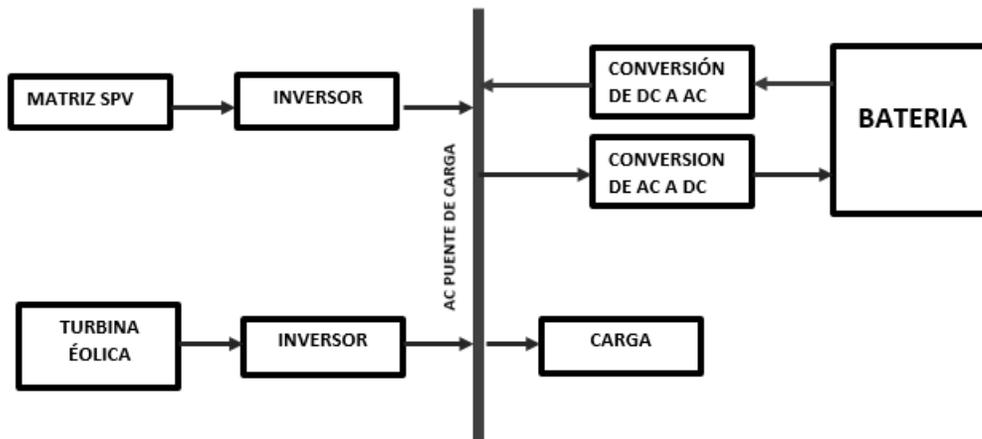


Figura 1-1: Sistema Híbrido de Energía Renovable propuesto (HRES).

Diferentes opciones comerciales de Sistemas de Generación Híbridos se encuentran ya disponibles, una de ellas se muestra en la figura 1-2 este sistema es fabricado por la empresa WindStream [1] denominado Solarmills que, como puede verse, considera turbinas de eje vertical tipo Savonius y paneles solares instalados sobre las turbinas. Otros modelos similares incluyen, como en esta propuesta, el banco de baterías.



Figura 1-2: Sistema Híbrido de Energía Renovable, Eólica de eje vertical y Solar Fotovoltaico [1].

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

El objetivo principal de esta investigación es caracterizar y simular un sistema híbrido de energías renovables solar y eólica, en conjunto con un sistema de almacenamiento basado en baterías, para sustentar eléctricamente el consumo de la Sede P de la Universidad ECCI.

1.1.2. Objetivos específicos

- Identificar espacios dentro de la Sede P para simular el proyecto de generación de energía sustentable por medio de energías solar fotovoltaica y eólica.
- Caracterizar los sistemas de generación de energía eólica, solar, almacenamiento de energía en las baterías para suplir total o parcialmente el consumo de energía en la Sede P.
- Simular una estimación de costos del proyecto para presentar la información financiera asociada, y las correspondientes al ahorro energético derivado de la instalación del HRES.

1.1.3. Tipo de Investigación

La investigación que se realizó para el desarrollo de este trabajo es una investigación aplicada, que utiliza datos medidos y obtenidos por medio de procedimientos específicos, permitiendo el análisis de los resultados a nivel de simulación. La investigación sigue tres fases: Caracterización, Modelamiento y Simulación de los sistemas de generación de energía y sus costos asociados. Los resultados mostrarán la viabilidad o no de la posible implementación de estos sistemas en la Sede P.

2 Estimación de Consumos de Potencia y Energía para las Sedes de la Universidad ECCI

Para la estimación del consumo de la sede P se decidió solicitar la información mensual de consumo de los medidores eléctricos asociados al edificio y utilizar el que presentara un costo anual mayor. Por lo tanto, la información presentada en las siguientes Secciones permite caracterizar la carga eléctrica y el emplazamiento de los sistemas de generación renovable. Una fotografía de la sede P es mostrada en la 2-1.



Figura 2-1: Vista del Edificio de la Sede P de la Universidad ECCI.

2.1. Carga Eléctrica

corresponde al valor de consumo mensual real de la sede P para el año 2017, fue obtenida a partir del valor pagado en pesos colombianos y considerado un costo pico del kWh igual a \$32'642880 para el mes de junio.

Estos datos mensuales se ingresan al software en ambos proyectos (WES y SFV), para caracterizar la “Carga Eléctrica” que consume el edificio y que deberá ser suplida por cada uno de los sistemas renovables incluidas las BESS.

2.1.1. Cálculo para el mes de junio del 2017

A partir de los datos de la factura de la energía mensual presentados en la Tabla **2-1**, se obtienen los estimativos de energía consumida al mes, al día y por hora. Estos se resumen en la Tabla **2-2**. Considerando un costo del kWh igual \$ 408,58 pesos¹ Para el mes de junio del 2017, y tomando como estándar que el mes consta de 30 días, se tiene:

$$\$_{kWh_{dia}} = \frac{\$_{kWh_{mes}}}{30_{días}} = \frac{\$9'066350}{30} = \$302212 \quad (2-1)$$

Es el costo de un día de energía en el mes de Junio.

Para estimar el costo de la energía consumida en una hora:

$$\$_{kWh} = \frac{\$_{kWh_{dia}}}{24_{horas}} = \frac{\$302212}{24} = \$12592 \quad (2-2)$$

Ahora es posible estimar, usando el costo del kWh, la energía consumida, por hora, por día y finalmente por mes, así:

$$E_{(kWh)_{hora}} = \frac{\$_{kWh}}{\$408,58} = \frac{12592}{408,58} = 30,82kWh \quad (2-3)$$

Para la energía consumida en un día:

$$E_{(kWh)_{dia}} = E_{kWh} \times 24_{horas_{dia}} = 30,82kWh \times 24 = 739,66kWh \quad (2-4)$$

Y la energía consumida en el mes (teniendo que un mes consta de 720 horas), finalmente es:

$$E_{kWh_{mes}} = E_{kWh_{dia}} \times 720_{horas_{mes}} = 739,66kWh \times 720 = 22189,9kWh \quad (2-5)$$

Se repite el cálculo para los meses del año restantes y así se obtiene la facturación y la energía consumida por la Sede P a lo largo del 2017 en las Tablas **2-1** y **2-2**.

¹en el sitio oficial del gobierno 1 kWh = US\$0,112 (\$ COP 458.58 para el 2019.). Se requiere el valor en dólares para su ingreso en el Software SAM)[19].

2.1.2. Cálculo para el año 2017

En la Tabla 2-2 se puede evidenciar las columnas correspondientes a la Energía que será ingresada por el usuario en SAM, la potencia es calculada por el software, adicional a esto el software calcula la potencia pico, por consiguiente, con los resultados ilustrados en esta Tabla se puede determinar que **el mes correspondiente del año en el que se genera un mayor consumo en la Sede es el mes de Junio**, estos valores de energía y potencia son los que se usan para dimensionar los sistemas de generación del HRES.

Dinero de Facturación			
Mes	\$COP (\$*kWh-mes)	\$kWh*día (1 mes = 30 días)	*kWh (1 día = 24h)
Enero	6'412280	213,743	8,906
Febrero	5'380900	179,363	7,473
Marzo	7'180160	239,339	9,972
Abril	8'783330	292,778	12,199
Mayo	7'452980	248,433	10,351
Junio	9'066.350	302.212	12.592
Julio	7'016720	233,891	9,745
Agosto	7'216540	240,551	10,023
Septiembre	8'356520	278,551	11,606
Octubre	8'226850	274,228	11,426
Noviembre	8'778720	292,624	12,193
Diciembre	8'471440	282,381	11,766

Tabla 2-1: Cálculo de la Facturación Eléctrica para la Sede P en 2017

Energía Consumida			
Mes	kW-h (\$*kWh = 408,58 \$COP)	kWh-día	kWh-mes (1 mes = 720 horas)
Enero	21,80	523,14	15694,06
Febrero	18,29	438,99	13169,76
Marzo	24,41	585,78	17573,45
Abril	29,86	716,57	21497,21
Mayo	25,33	608,04	18241,18
Junio	30,82	739,66	22.189,90
Julio	23,85	572,45	17173,43
Agosto	24,53	588,75	17662,49
Septiembre	28,41	681,75	20452,59
Octubre	27,97	671,17	20135,22
Noviembre	29,84	716,20	21485,93
Diciembre	28,80	691,13	20733,86

Tabla 2-2: Cálculo de la Energía Consumida por la Sede P en 2017

La carga eléctrica en forma gráfica mensual se presenta en la Figura 2-2.

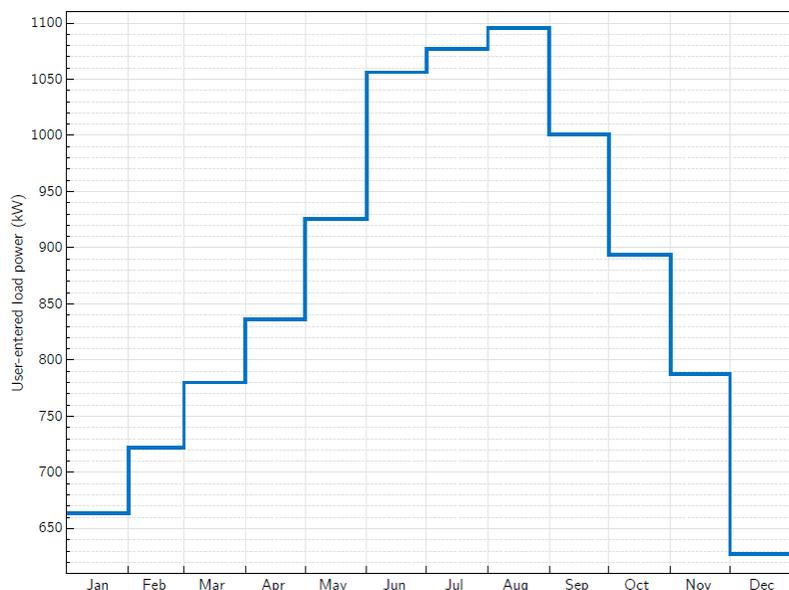


Figura 2-2: Gráfica perfil de carga Anual de la Sede P del año 2017 dada en kW

En la gráfica **2-2** se representan los doce meses del año, empezando por el mes de enero con una carga 665 kW , en la cual para el mes de marzo se evidencia un crecimiento de 780 kW , mayo que tuvo un consumo promedio al año de 935 kW y para el mes de junio se presenta el mayor pico de potencia de carga en el sistema, con un aumento de 1060 kW y para los siguientes meses entre julio y agosto se presentó una variación desde los 1060 hasta los 1100 kW de carga. Se observa una disminución en los meses de septiembre a diciembre de 1000 kW a 630 kW . Como ambos proyectos en SAM (WES Y SFV) requieren de la información del Perfil de Carga presentado en la figura **2-2**, esta es la misma para ambos casos.

2.2. Caracterización y Emplazamiento de los Sistemas de Generación Renovables

La simulación de Sistemas de Generación de Energía en (System Advisor Model (SAM) permite configurar diferentes parámetros técnicos y afinar diferentes escenarios hasta conseguir un resultado muy cercano a la realidad, haciendo posible vincular información como curvas de carga, cantidad de recurso renovable disponible y precio de los componentes, entre otros, que ayuden con el cálculo de la energía generada por el Proyecto tanto para el primer año como para los 25 años subsiguientes. así como los costos asociados a él (costo de paneles solares, generadores eólicos, instalación, mano de obra, etc), además de los ahorros generados tanto en energía como en dinero (dejado de pagar a la empresa de energía) e información relacionada con la amortización de la deuda.

El sistema de energía eólica (Wind Energy System -WES) tiene 30 kW de potencia nominal en CA, el sistema fotovoltaico solar (Solar Photovoltaic System - SFV) tiene una potencia de 12 kW de CA, el almacenamiento de energía de la batería (Battery Energy Storage System - BESS) tiene 12kW. Se tiene entonces una potencia total de 54 kW, que básicamente está limitada por las áreas disponibles elegidas para instalar estos sistemas en la estructura del edificio de la Sede P. Finalmente, el precio del kilovatio hora colombiano se considera para la metodología de costos implementada en el software [20, 21]. Para el propósito de investigación de este trabajo, los tres modelos mencionados se consideran proyectos de propietarios comerciales (PPA) en SAM.

Para el presente caso, el proyecto se ubica en la ciudad de Bogotá Colombia, por lo tanto, se debe encontrar el perfil meteorológico obtenido por satélite para ejecutar el software SAM correctamente [13]. Para obtener el nivel de radiación solar en kWh/m^2 para la ciudad seleccionada, se utiliza el visor web de la Base de datos de radiación solar nacional (NSRDB)[22], esto se explica en la Sección 4.2. Además, se utiliza una Distribución Weibull para la velocidad del viento de Bogotá en m/s y a 50 m de altura, obtenida por Pesca et. al. [23]; los costos para los componentes y dispositivos principales (es decir, los costos para los paneles fotovoltaicos, el inversor, el aerogenerador y el banco de baterías también están considerados) así como los costos directos e indirectos asociados se trabajan en dólares americanos, pues es la moneda que tiene configurada SAM [20].

2.2.1. Sistema Solar Fotovoltaico y Banco de Baterías

El sistema de energía renovable funciona mediante paneles solares fotovoltaicos, la cual es considerada una fuente sostenible gracias a que la radiación solar es una fuente de energía renovable e inagotable. Al revisar la información descargada de la base de datos de radiación solar NSRDB [22] y cotejando archivos de más de 10 años de diferencia, se decide utilizar la información de radiación solar promedio del Satélite 3 del año 2016, la cual contiene un total de 4 entradas de datos, estos se explican con detalle en el capítulo 4.

Este proyecto es llamado en SAM como "SFV Bta Comercial", en él se consideran los siguientes ítem que permiten simular el sistema fotovoltaico para la Sede P, a saber: «Ubicación y Recurso», «Módulo SFV», «Inversor de CA», «Diseño del Sistema», «Tiempo de Vida y Degradación», «Almacenamiento en Baterías», «Costos del Sistema» y «Carga Eléctrica».

En la figura 2-3 se representa el plano de la terraza de la Sede P, en esta área se propone realizar la instalación de los paneles solares, en esta terraza se evidencia un mayor espacio disponible, pero se pudo identificar que gran parte de ésta se encuentra construida con cielo raso, por esta razón no se puede realizar el montaje como tal de este sistema SFV, debido al peso de la obra civil de la estructura y puede provocar algún accidente por la magnitud del peso, para el área seleccionada se verificó la presencia de una estructura lo suficientemente resistente para poder soportar la instalación de este sistema.

El banco de baterías (BateriesEnergy Storage System - BESS), se dimensiona para la tota-

lidad de la energía que debe suministrarse en el horario nocturno. En el levantamiento de los planos de la terraza que conforman la sede P, se identificó el área donde se podría ubicar el sistema almacenamiento por baterías. En la figura 2-3 se aprecia la división de uno de los tres segmentos que la conforman, en la parte derecha se cuenta con unos sistemas de extracción de gases y ventilación, adicional a esto se encuentra el espacio donde se ubica el área del ascensor.

En los planos que se levantaron al momento de realizó la inspección visual de la terraza, se puede evidenciar el área donde se propone realizar la instalación del sistema SFV, esta área se encuentra desocupada y adicional a esto tiene un dimensión de $55 m^2$, según las características físicas de los paneles, se podría usar este espacio para la instalación del sistema SFV.

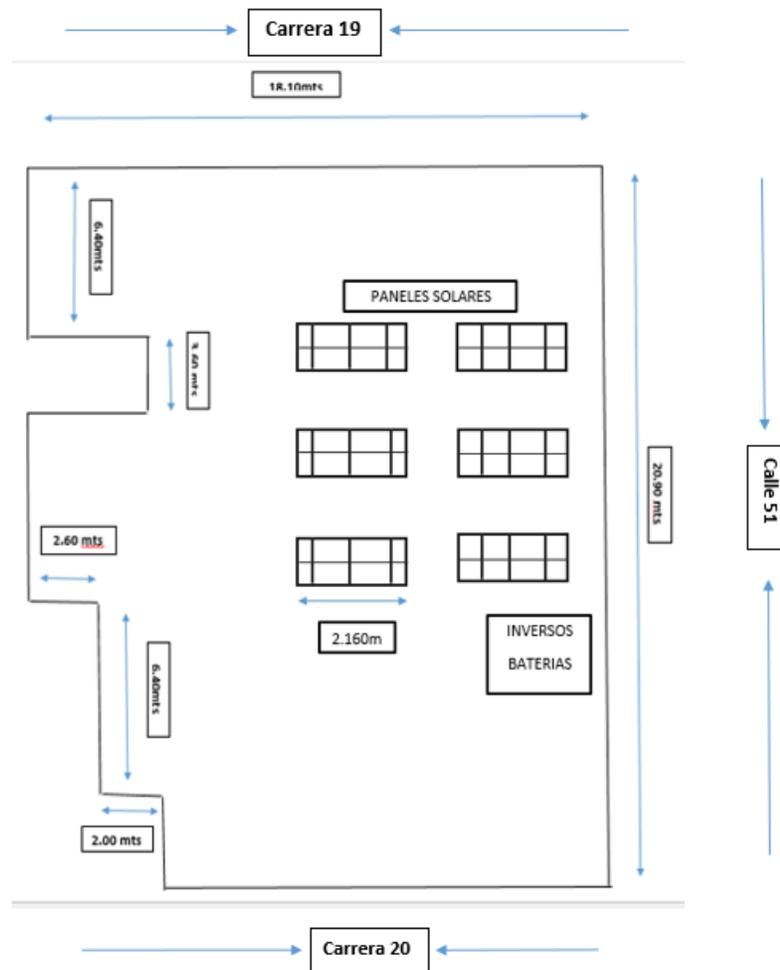


Figura 2-3: Ubicación de los Paneles SFV en la terraza de la Sede P.

La radiación promedio para el Proyecto SFV, se estima por medio de la información satelital obtenida por el software SAM al momento de ingresar la latitud y la longitud (ubicación

geográfica) del proyecto, es decir, de la ciudad de Bogotá en la base de datos de Radiación Solar de NREL [22].

2.2.2. Sistema Eólico de Eje Vertical

El sistema eólico se simula aprovechando la altura del edificio pues a mayor altura de la edificación, la velocidad del viento es mayor también. Las turbinas se ubicarían en la terraza del edificio. Este proyecto de simulación es llamado en SAM como WES Bta Comercial. En él se encuentran los menús del “Recurso eólico”, el “Diseño de la Turbina” y del “Parque Eólico”, la estimación del “Tiempo de Vida” y los “Costos del Sistema”, además de nuevamente, la Carga Eléctrica. Este proyecto se enfocará en explicar con claridad los ítem exclusivamente técnicos de la Simulación y asumirá los resultados por defecto que el software arroje en la simulación de la parte económica, en lo referente a incentivos e impuestos parafiscales, no obstante se investigan los costos reales de los equipos. Sin embargo para soportar los resultados técnicos de este trabajo de grado, se utiliza la curva real de energía consumida por la sede P en el año 2017, la cual fue suministrada amablemente por el departamento financiero de la Universidad ECCI.

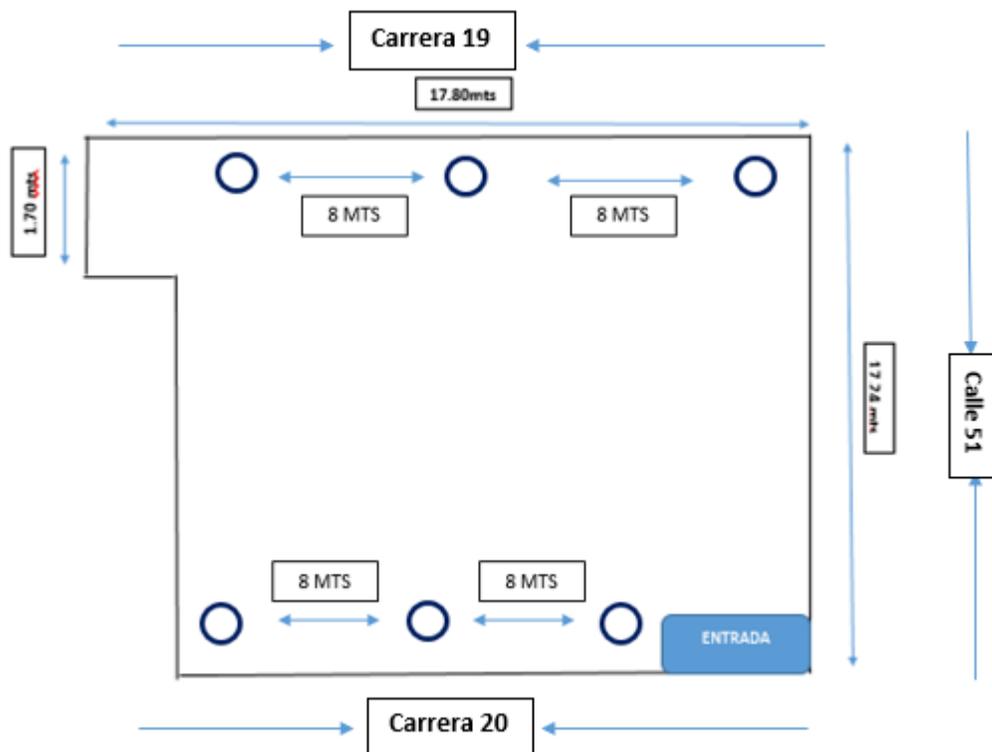


Figura 2-4: Ubicación de las Turbinas de Eje Vertical en el Plano de la Terraza de la Sede P.

La figura **2-4** presenta la ubicación de las Turbinas Eólicas en la terraza de la Sede P. En ella se representa el plano de la terraza principal de la sede P, los círculos significan la ubicación potencial de las turbinas, la separación de 8 mts entre ellas que se evidencia en el plano, es una separación de seguridad para que no se presente choques entre las aspas o que pueda llegase afectar el desempeño de la turbina, debido a la disminución del viento que circula a través de ellas. la configuración de este sistema es de aerogeneradores de eje horizontal, su configuración como tal en el programa SAM es de un diámetro de 15,5 m por ende al momento de la selección de este aerogenerador se realiza la separación de 8 m, esta separación se hace considerando el tamaño del rotor de la turbina. SAM no incluye modelos de turbinas de eje vertical, sin embargo, la potencia extraída con turbinas de este tipo, se incrementaría considerablemente, pero se deja este caso como un trabajo futuro.

Para la obtención de los datos del recurso eólico se decide utilizar la Distribución de Weibull para Bogotá [23]. Los resultados de la misma son corroborados también de manera experimental y para la Sede P por el trabajo de Villamarín et. al [24].

3 Caracterización del Sistema de Energía Eólica en SAM

Las tecnologías forman parte de un desarrollo de acuerdo a los cambios que se ven en las sociedades, estos han permitido tener energías mediante la electricidad, el calor y combustibles que han evolucionado posteriormente hacia nuevas alternativas, motivo por el cual se ha decidido utilizar las energías renovables que han causado un gran impacto en la sostenibilidad. Las más conocidas son la energía eólica y energía solar. La energía eólica ha desarrollado un alto potencial porque con mayor difusión en el mundo, genera un crecimiento en los últimos 10 años y que cuenta con presencia en países latinoamericanos como Brasil, Argentina Chile, Uruguay y Colombia. La energía eólica puede sustituir al gas natural, es económica y además complementaría la fuente hídrica, así, la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera disminuye y los costos de la electricidad generada son menores, cuando se comparan con otras formas de energía.

En la actualidad, la energía eólica desempeña un papel importante como fuente de energía principal en los países desarrollados, impulsada por décadas de descubrimientos científicos, desarrollos tecnológicos y un marco político de acuerdo con las agendas sostenibles [25]. La manera correcta de aumentar la capacidad instalada de energía eólica es que el costo nivelado de energía disminuya para seguir siendo económicamente atractivo para las compañías de inversión y los consumidores, tal vez con incentivos gubernamentales y beneficios fiscales [25].

En este Capítulo se presentará un panorama general sobre las turbinas eólicas, focalizándose en aquellas de eje vertical, así como en la eficiencia en la potencia generada a partir del viento, introduciendo conceptos básicos necesarios para el posterior modelamiento del WES en el software SAM.

3.1. Turbinas Eólicas de Eje Vertical

Su característica patrón es la disposición del eje respecto al piso, que se encuentra perpendicular a este. No necesitan de una maquinaria de orientación, ya que puede actuar con velocidades del viento menores. Su eficiencia, comparada con respecto al límite teórico, se presenta en la Figura 3-1.

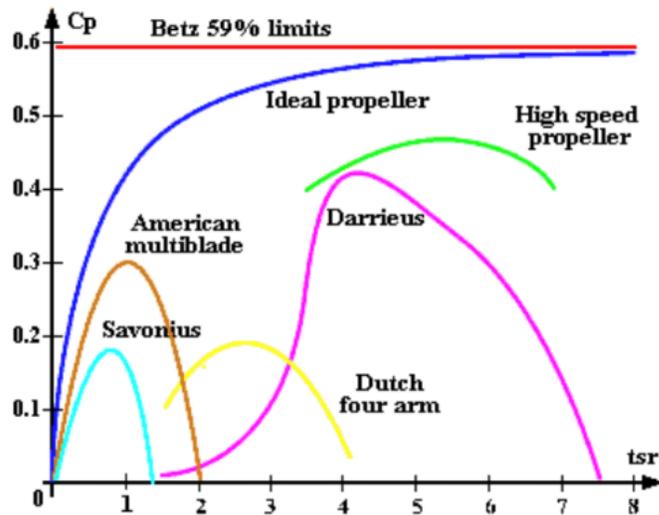


Figura 3-1: Limite de Betz y Eficiencia de los Aerogeneradores de Eje Vertical [26]

Una evolución y clasificación de las turbinas eólicas se presenta en la Figura 3-2. Existen cuatro categorías de aerogeneradores verticales:

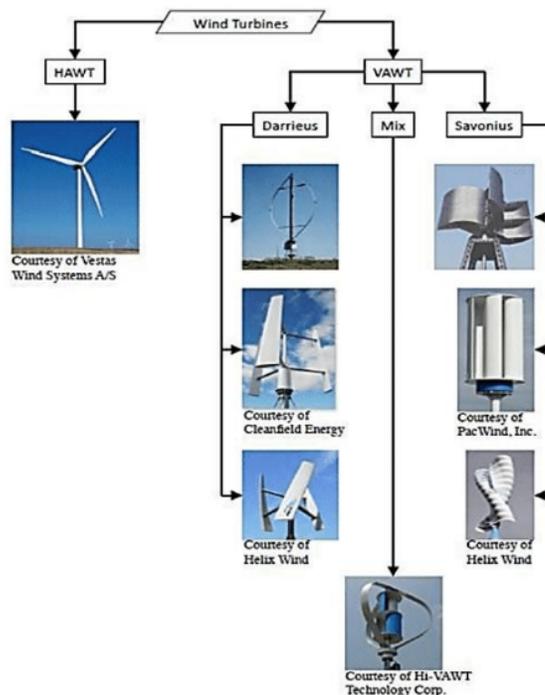


Figura 3-2: Clasificación de las Turbinas Eólicas de Eje Vertical [26]

- El tipo **Darrieus**, consta de una serie de palas de perfil aerodinámico curvadas montadas en un eje o armazón giratorio. Como se observa en la figura 3-3[26]



Figura 3-3: Darrieus Aerogenerador de Eje Vertical

- La variedad **Savonius**, son usadas para convertir la potencia del viento usando la torsión sobre un eje rotatorio. El aerogenerador consta de dos o más semicilindros que trabajan por arrastre, puede arrancar con poco viento pero su rendimiento es bajo. Tiene una velocidad de giro pequeña. Sencillo y de bajo costo. Los anemómetros, medidores de velocidad del viento situados en muchos tejados, funcionan como las turbinas Savonius [26]. Un ejemplo de esta turbina se muestra en la Figura 3-4.



Figura 3-4: Turbina eje Vertical de Savonius

- El generador tipo **Giromill**, consiste en palas verticales unidas al eje por unos brazos horizontales por los extremos del aspa e incluso desde su parte central. Las palas

verticales cambian su orientación a medida que se produce el giro del rotor para un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento [26]. Un ejemplo de esta turbina se muestra en la Figura 3-5.



Figura 3-5: Turbina eje Vertical tipo Giromill

- Las turbinas **Windside**, que se asemejan al tipo Savonius pero consiste en un perfil alabeado con torsión que asciende por el eje vertical para así aprovechar de manera más eficiente el viento. La principal diferencia frente a otros sistemas de eje vertical es el aprovechamiento del concepto aerodinámico, fue desarrollado por la empresa finlandesa del mismo nombre y en su concepto consta de alerones helicoidales alrededor del eje, de modo tal que aprovecha cualquier presencia de viento, siendo capaz de producir 50 kW en su etapa de prueba [26]. Un ejemplo de esta turbina se muestra en la Figura 3-6.



Figura 3-6: Turbina eje Vertical tipo Windside

Este tipo de aerogeneradores tienen una serie de ventajas y desventajas, en las que se consideran aspectos económicos de compra, mantenimiento, eficiencia, funcionamiento, entre otros. Estos se resumen a continuación:

Ventajas:

- Es eficiente.
- La dirección del viento no se altera.
- No es tan sensible a las turbulencias.
- Rango mínimo de vibraciones.
- Trabajan con velocidades de viento bajas.
- No son peligrosos para las aves.
- Ocupan menor espacio por su disposición.
- No genera mucho ruido.

Desventajas:

- Poco probado.
- La clasificación es más sensible a las turbulencias que el Savonius.
- La producción de energía es menor que la de los aerogeneradores, hasta en un 50
- La eficiencia es mayor que la de los aerogeneradores de eje horizontal.
- Los vientos con velocidades extremas deforma o rompen las palas.

3.2. Eficiencia de una Turbina Eólica

Para calcular esta eficiencia es importante conocer la diferencia de energía cinética del fluido antes y después a la turbina del aerogenerador; normalmente no debe ser superior al 59 %, esto se conoce como el límite de Betz, un resumen sobre estos tópicos se desarrolla a continuación, siendo adaptado de [2].

3.2.1. Potencia Mecánica extraída del Viento

La potencia mecánica que puede ser aprovechada a partir del viento se explica gráficamente en la Fig. 3-7. En ella puede verse que la velocidad aguas arriba de la turbina es mayor que

la velocidad aguas abajo.

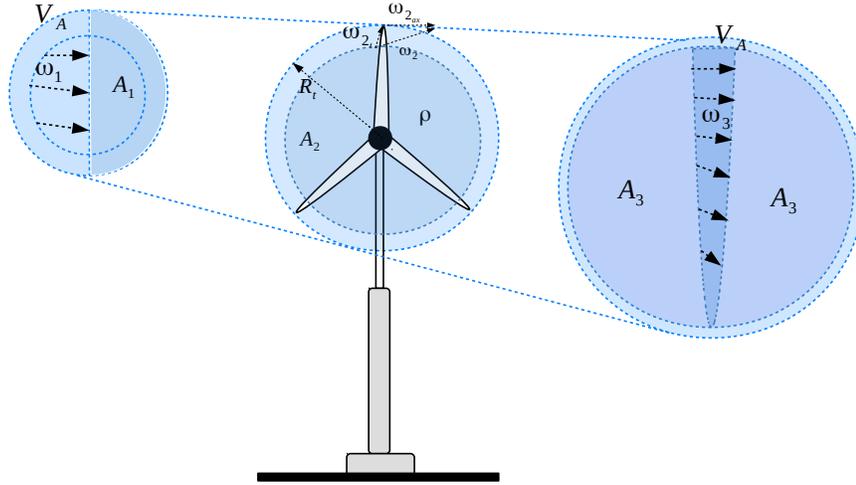


Figura 3-7: Esquema Simple del Flujo de Aire a través de una Turbina Eólica [2].

La potencia mecánica que se transforma en eléctrica se puede expresar como se muestra en las ecuaciones (3-1) y (3-2), para la potencia activa y reactiva, respectivamente:

$$P_t = P_s + P_r = v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} + v_{ds}i_{dc} + v_{qs}i_{qc} \quad (3-1)$$

y

$$Q_t = v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs} \quad (3-2)$$

3.2.2. Ecuación del Rotor

El rotor de la turbina eólica se puede modelar así:

$$P_{mec} = \frac{\rho}{2} c_p(\lambda, \theta) A_r \omega_w^3 \quad (3-3)$$

Donde, $c_p(\lambda, \theta) = 0,22\left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\theta - 5\right)e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}}$ y $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda+0,08\theta} - \frac{0,035}{\lambda^3+1}$.

P_{mec} es la potencia extraída del flujo de aire. Está dada en vatios [W].

ω_w es la velocidad del viento en [m/s].

ρ es la densidad del aire en $[kg/m^3]$.

El coeficiente $\lambda = \omega_t/\omega_1$ es la razón entre la velocidad de la aspa. (ω_t) y la velocidad del viento aguas arriba del rotor (ω_1) en $[m/s]$.

c_p es el coeficiente de desempeño o coeficiente de potencia.

A_r es el área cubierta por el rotor ($A_2 = A_r$). Adicionalmente, θ es el ángulo de Pitch y es dado en grados $[deg]$.

Este ángulo debe ser adicionado en (3-3), porque la potencia extraída del viento en una turbina eólica de velocidad variable es limitada por medio del control del Pitch.

3.2.3. Límite de Betz

Es el coeficiente de desempeño o coeficiente de potencia A_r es el área cubierta por el rotor ($A_2 = A_r$), también es denotado como c_p . Adicionalmente, θ es el ángulo de Pitch y es dado en grados $[deg]$ este ángulo debe ser adicionado en (3-3), porque la potencia extraída del viento en una turbina eólica de velocidad variable es limitada por medio del control del Pitch. La teoría de Betz no tiene presente algunos aspectos existentes en la práctica como resistencia aerodinámica de las palas, pérdida de energía por turbulencia de la estela, la compresibilidad del aire y la propia interferencia entre las palas. Esta teoría es una aproximación al problema de determinar la potencia que puede obtenerse de una eólica de eje horizontal, pero es útil dado que establece un límite superior para el coeficiente de potencia C_p (rendimiento de conversión de potencia eólica-mecánica un aerogenerador).

La máxima potencia de salida de una turbina eólica fue dada por *Betz* que establece que ninguna turbina eólica puede convertir más de $16/27 c_p = 59,3\%$ de la energía cinética del viento en energía mecánica en el eje del rotor, como se muestra en la Ecuación (3-4):

$$P_{mec_{max}} = \frac{16}{27} A_r \frac{\rho}{2} \omega_1^3 \quad (3-4)$$

La ecuación (3-4) se obtiene usando $\omega_2 = \frac{2}{3}\omega_1$ e $\omega_3 = \frac{1}{3}\omega_1$.

3.3. Recurso Eólico para la Ciudad de Bogotá

El ítem “Recurso Eólico” en SAM tiene como función definir la cantidad de viento.

A continuación se presentan las especificaciones técnicas que necesita el software, siguiendo la metodología descrita en [20] y [27], para realizar el algoritmo del programa.

3.3.1. Distribución Weibull para la Velocidad del Viento

La distribución de Weibull es una distribución versátil que se puede utilizar para modelar una amplia gama de aplicaciones en ingeniería, investigación médica, control de calidad, finanzas y climatología. Por ejemplo, la distribución se utiliza frecuentemente con análisis de fiabilidad para modelar datos de tiempo antes de falla. La distribución de Weibull también se utiliza para modelar datos asimétricos del proceso en el análisis de capacidad

A continuación se presenta una expresión de la distribución Weibull para la velocidad del viento en (3-5), y según [28]. Esta es una distribución de velocidad barométrica, con parámetros de forma y escala respectivamente y dada por la siguiente función:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} \quad (3-5)$$

Donde:

v es la velocidad del viento.

c es un factor de escala y

$k \in Z^+$ es un parámetro adimensional relacionado con la asimetría de la función.

Aquí $dP(v) = f(v)dv$ es la probabilidad de encontrar una partícula con velocidad en v y $v + dv$.

La velocidad media del viento es por lo tanto:

$$\langle v \rangle = \int_0^{\infty} v f(v) dv = kc \int_0^{\infty} \xi^k \exp[-\xi^k] d\xi \quad (3-6)$$

Que se puede escribir de la siguiente manera:

$$\langle v \rangle = \frac{c}{k} \Gamma\left(\frac{1}{k}\right) \quad (3-7)$$

Con $\Gamma(z)$ la función gamma.

En la Figura **3-8** la curva verde es la distribución de Weibull para la ciudad de Bogotá. Los parámetros de Weibull se determinaron tal como están escritos en [23].

Los factores de escala y forma son $c = 3,31$ m /s y $k = 1,27$ respectivamente para la velocidad del viento en la Localidad de Fontibon de la ciudad.

La velocidad media calculada experimentalmente con la ecuación (3-7) es $v = 3,07201$ m/s.

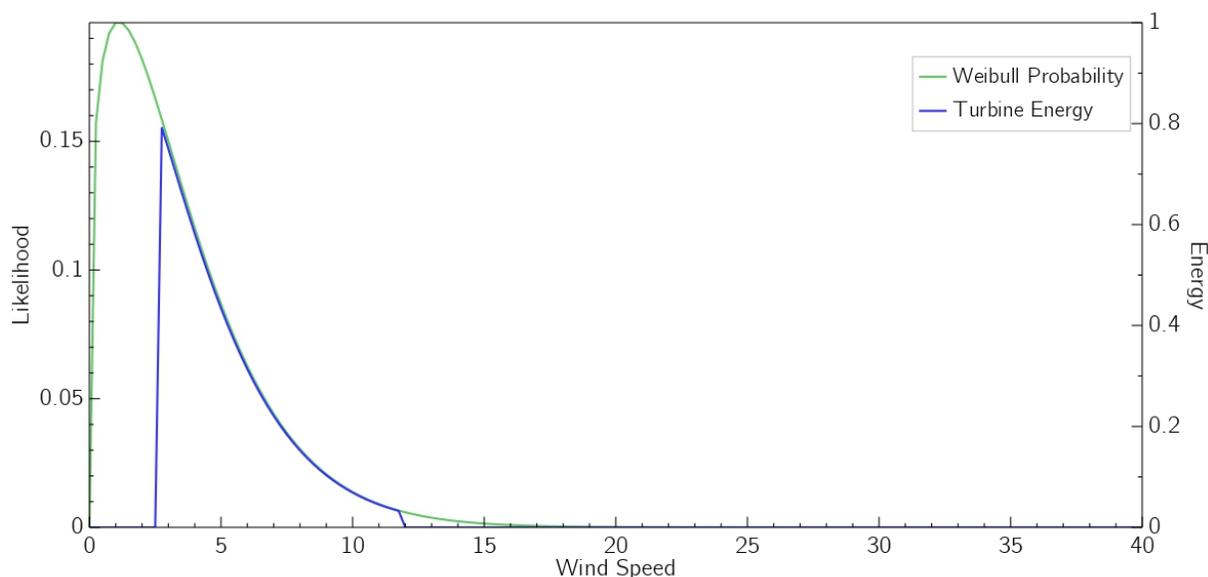


Figura 3-8: Distribución Weibull para la velocidad del viento en Bogotá, Colombia y Energía de la turbina eólica

3.3.2. Parámetros de la Turbina Eólica

En la Figura 3-8, la curva azul es la energía de la turbina eólica dibujada por SAM. Los límites de alimentación de entrada y de corte, son puestos por el usuario y de acuerdo con las limitaciones técnicas del generador. Para este caso, la curva de potencia tiene un límite de corte de $2,5 \text{ m/s}$ y un límite de corte de 12 m/s . Otros parámetros de la turbina que deben incluirse en la configuración del software se enumeran y se explican brevemente a continuación:

- Potencia nominal de la turbina en kW .
- Diámetro del rotor en metros.
- C_p Máximo: El máximo teórico se conoce como el límite de Betz y es igual a $0,59$. Para este caso, se decidió utilizar un $C_p = 0,45$, entendido como la eficiencia energética del rotor, esta es la fracción de la potencia total disponible del rotor que las palas pueden convertir en energía mecánica.
- Velocidad máxima de la punta de la aspa en m/s .
- Máxima velocidad de aspa: Relación entre la velocidad de la punta de la aspa y la velocidad del viento.
- Velocidad del viento de corte: La velocidad mínima del viento a la que la turbina genera

electricidad.

- La elevación del suelo en la base de la torre de la turbina, también se conoce como elevación de la turbina sobre el nivel del mar, dada por el usuario en metros.
- El diseño del tren de transmisión, la aspa y la torre se seleccionan como "modelo avanzado".

3.3.3. Características de la Turbina Eólica Seleccionada en SAM

En la Tabla **3-1** se evidencia las características de la turbina en donde se observa el diámetro del rotor, el radio de salida que se tiene del rotor de igual manera su altura mínima que tiene esta y su coeficiente.

Características de Diseño de la Turbina	
Radio de salida	5kW
Diámetro del rotor	15m
Altura	25m
Coeficiente	0,14

Tabla 3-1: Características de Diseño la Turbina

En la figura **3-9** muestra la curva de poder de la turbina con la velocidad del viento y la potencia que genera la turbina aproximadamente, desde $0kW$ con el aumento de la velocidad del viento a 5 y 15 metros genera una potencia de $5kW$. SAM aproxima la potencia de manera lineal en este rango de velocidades.

Complementando las características de la turbina de viento, en la Tabla **3-2** el usuario define el radio de salida, diámetro del rotor, por consiguiente el software calcula la velocidad del viento, la capacidad máxima, capacidad máxima del viento en un radio del aspa, el corte de inicio de la turbina para una velocidad del viento mínima dada y la de corte de la turbina para una velocidad del viento máxima de $15 m/s$ que se muestran en la Tabla **3-2**.

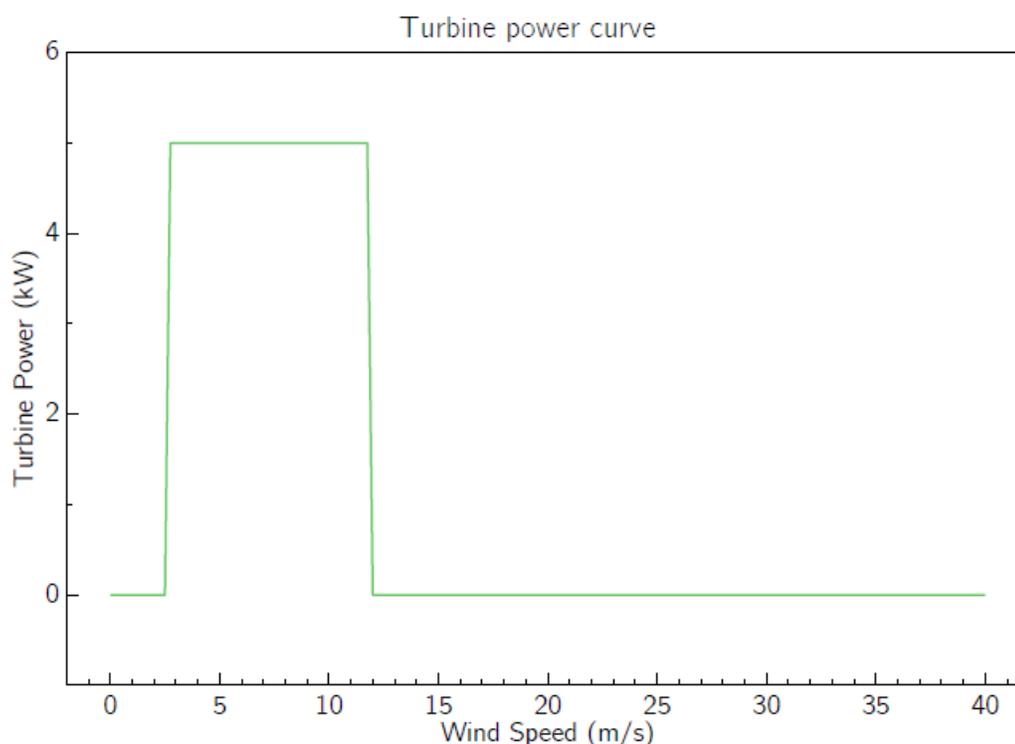


Figura 3-9: Curva de Potencia de la Turbina

Características de Potencia de la Turbina

Potencia Nominal	5kW
Diámetro del Rotor	15m
CP Máximo	0,41
Velocidad del viento máxima	15m/s
Máxima velocidad en el radio	1
Velocidad de Corte del viento	2,5m/s
velocidad del viento	12m/s

Tabla 3-2: Características de Potencia de la Turbina

3.3.4. Configuración del Parque Eólico en la Sede P

Las opciones de configuración del parque eólico permiten especificar el número de turbinas del proyecto HRES en la Universidad ECCI. Básicamente, esta es una representación simple del diseño del parque eólico y estima las pérdidas de energía cuando las turbinas están en contra del viento. La configuración del parque eólico tiene tres subdivisiones importantes para el desarrollo del proyecto: dimensionamiento del sistema, sus pérdidas (en kW) y los efectos de estela en el diseño de la turbina, significa:

- **Dimensión del sistema** es el tamaño del parque eólico, que está diseñado teniendo en cuenta la potencia nominal deseada, significa la capacidad de la placa de identificación en kW .
- **Pérdidas y efectos de estela** pérdidas esperadas en la producción eléctrica del parque eólico, entendiéndose como un porcentaje de la producción del parque, también dado en kW .
- **Diseño de turbina** en m^2 .

En la Tabla **3-3** se muestra el número de turbinas que se requieren para la implementación del sistema, el software hace un cálculo de 6 turbinas ubicadas en distintos puntos de la terraza, cada una de estas tiene una capacidad máxima de $5 kW$ para una potencia total entregada de $30kW$.

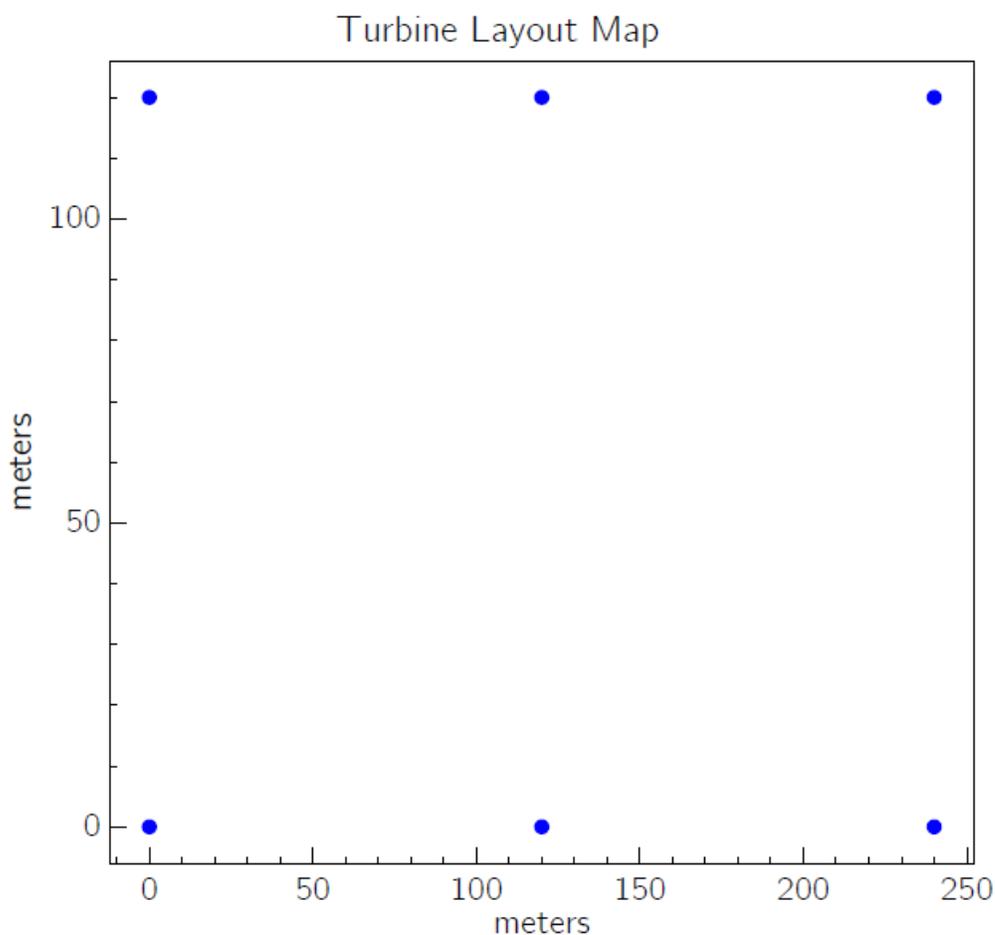


Figura 3-10: Ubicación de las Turbinas

La figura **3-10** muestra la ubicación de las turbinas en la terraza de la sede P, realizado por el software donde se evidencia el número de turbinas requeridas por el sistema, de igual

manera realiza la distribución de cada una de ellas a 8m de distancia de separación entre si para que estas no choquen en el movimiento de las aspas del rotor, cabe tener cuenta que cada una de estas tiene una capacidad máxima de 5 kW para una potencia total entregada de 30 kW ..

Especificación de Número de Turbinas	
Número de turbinas en la granja	6
Capacidad de la turbina	30 kW

Tabla 3-3: Especificación Número de Turbinas

4 Configuración del Sistema Solar Fotovoltaico (SFV)

La energía solar es aprovechada hasta en un 60 %, el resto es reflejado nuevamente a la atmósfera, con ayuda de dispositivos convertidores basados en el efecto fotoeléctrico o en el efecto de termosifón, esta energía se transforma y con ello se aprovechada en forma de energía eléctrica (Energía Solar Fotovoltaica) o calor (Energía solar térmica). También se tiene que una tercera energía derivada del sol y es aquella que toman las plantas para realizar su fotosíntesis, esta es conocida como Energía Helioquímica.

La distribución de la radiación solar en Colombia presenta características interesantes en diferentes regiones del país, estas radiaciones se presentan en mapas, los cuales son planos de información que determinan el periodo de tiempo con mayor intensidad en los niveles de radiación solar.

4.1. La Radiación Solar y el Espectro Electromagnético

La radiación solar es una de las fuentes generadas por el sol, la cual su propagación se presenta a través de ondas electromagnéticas, es la energía encargada de determina procesos atmosféricos y el clima del país. La radiación horizontal es una de las más importantes, debido a los parámetros que implica en la evolución de la energía del sol en una región en particular ya que la importancia es directa en sus componentes con la generación de sombra y la difusión de la radiación que se define como la cantidad de energía solar que puede llegar incidir sobre una superficie horizontal desde todos los lugares diferentes de la radiación solar directa que genera.

4.1.1. Espectro Electromagnético

La luz y la radiación configura un rango que se denomina espectro electromagnético, debido a que no cuenta con un límite inferior o superior, porque se puede encontrar la irradiancia espectral (eje Y) y la longitud de onda (eje X), como se ve en la figura 4-1.

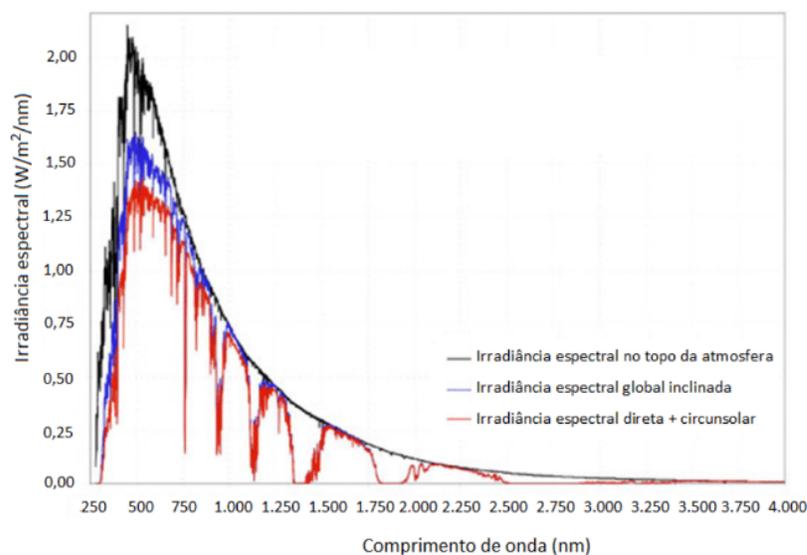


Figura 4-1: Curva de Espectro Electromagnético, tomado de [3]

El espectro EM es la forma de clasificar una onda electromagnética en función de su frecuencia; que clasifica los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta, el espectro visible, la luz infrarroja, las microondas y las ondas de radio [4], como se muestra en la figura 4-1.

En la figura 4-2 se pueden observar las tres curvas de espectro, la luz solar en la cima de la atmósfera, la radiación del cuerpo negro a 500 °C y la radiación a nivel del mar formada por la masa de aire que se mantiene en la capa atmosférica de las diferentes bandas de absorción.

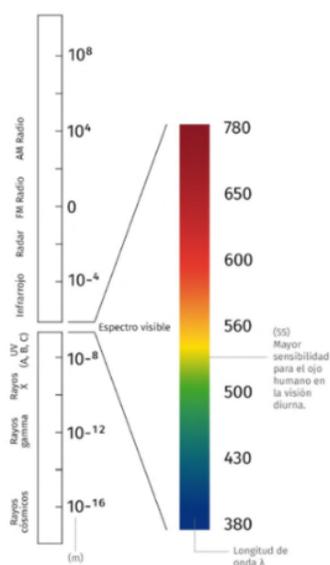


Figura 4-2: Espectro Electromagnético, tomado de [4]

Se debe tener en cuenta la importancia que tiene cada material, dado que la superficie refleja la radiación que insidie sobre ellos. Este fenómeno se llama albedo [4]. Este espectro electromagnético pasa por la atmósfera para aprovechar la energía limpia o renovable, como electricidad (esto es debido al efecto fotoeléctrico, o como calor, energía solar térmica).

4.1.2. La Radiación Solar y sus Principales Tipos

En un plano perpendicular la dirección de propagación de los rayos solares, recibe el nombre de constante solar y corresponde a $1,367 \text{ W/m}^2$.

La energía que se propaga emitida por el sol en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas, por el cual esta energía determinaría los procesos atmosféricos y el clima que se generan por el sol [29].

El rayo solar ingresa a la atmósfera, incidentes de manera perpendicular y mediante receptores se les puede cambiar de dirección teniendo en cuenta que la radiación solar permite ser dividida de la siguiente manera radiación solar directa y radiación solar indirecta, Como se ilustrar en la figura 4-3:

Respondamos algunas preguntas respecto de los tipos de radiación solar:

¿Qué es la radiación solar directa?

La organización mundial de meteorología , la define como la cantidad de la radiación producida por el sol y un espacio anular estrecho del cielo, donde se puede medir con un pirheliómetro [5].

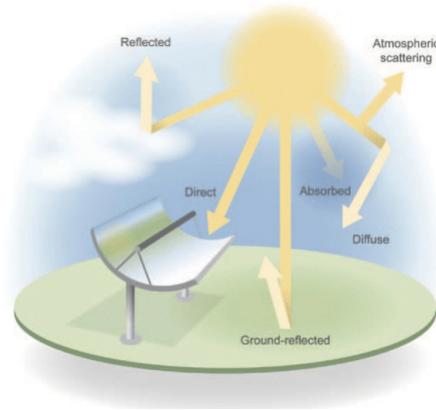


Figura 4-3: La radiación solar y resultantes de interacciones con la atmósfera, tomado de [5]

¿Qué es la radiación solar indirecta o difusa?

La radiación cuasi paralela desde el sol, esto incluye la radiación reflejada por las nubes [5].

¿Qué es la radiación reflejada?

La cantidad de radiación que se refleja al espacio exterior, sucede cuando se choca con las capas atmosféricas, suele reflejar alrededor del 4% [30].

¿Qué es la dispersión atmosférica?

Es la cantidad de radiación solar que choca y rebota antes de ingresar a la atmósfera.

¿Qué es la radiación absorbida?

Toda aquella radiación que es absorbida por algún cuerpo, tomada de las plantas, animales o la superficie terrestre.

¿Qué es la radiación reflejada por el terreno?

Este tipo de radiación también se conoce como albedo, ya que algunas superficies pueden llegar a reflejar, conociendo que las superficies claras tienen mayor valor de albedo con respecto a las superficies oscuras.

4.2. Caracterización del Radiación Solar para la Ciudad de Bogotá

El Laboratorio Nacional de Energía Renovable, presenta una actualización en la base de datos de radiación solar a nivel global, presentada en la figura 4-4.

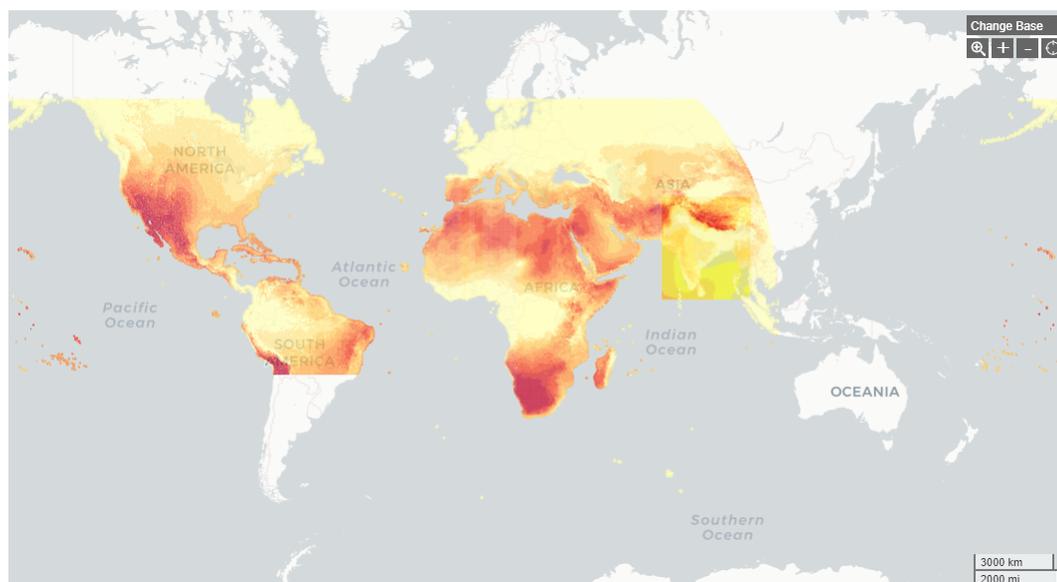


Figura 4-4: Base de Datos NREL de Irradiación Global

Con ella, la investigación de energías renovables son posibles, pues se caracteriza el recurso disponible y se focaliza en los impactos, ambientales, económicos y sociales con el objetivo de garantizar el mejor aprovechamiento de los recursos naturales por medio de la implementación de sistemas solares FV, eólicos, hidroeléctricos, que ayudan a reducir gases del efecto invernadero. Por consiguiente, el laboratorio muestra de forma ilustrativa, como se puede observar en **4-4** la radiación que es aprovechada en los países de América como Asia y África que son utilizados y actualizados, en este caso, para el HRES que se caracterizará en este proyecto.

4.2.1. Base de Datos de Radiación Solar de NREL

Para obtener el nivel de radiación solar en kWh/m^2 para Bogotá, se utiliza el visor web de la **Base de datos nacional de radiación solar (NSRDB)** [22], que contiene no solo datos para los EEUU, sino también para una lista creciente de países del mundo. Un resumen, estos conjuntos de datos internacionales se proporciona a continuación en la Tabla **4-1** que al ingresar los datos en el software SAM se obtiene una simulación de la radiación solar que se genera en Bogotá y esto proporciona una ampliación del análisis en datos para la ejecución de la simulación académica del proyecto de energías renovables.

Región	México/ América Central
Conjunto de datos	Modelo solar físico (PSM) V. 3.0
Resolución temporal	1/2 hora
Resolución espacial	4 x 4 km
Años abarcados	1998-2017

Tabla 4-1: Modelo de Recursos de Datos Sistema SFV [13].

4.2.2. Estimación Satelital de la Radiación Solar para Bogotá en el año 2017

Los datos disponibles se calcularon utilizando el Modelo Solar Físico (PSM) versión 3.0, esto se explica completamente en [31] y [13]. Para este caso particular, se utilizaron las coordenadas geográficas de Bogotá (**4,61 °N y -74,1 °E**). En la Tabla **4-2** se muestran los resultados de los datos satélites para la ubicación del proyecto.

- Elevación del suelo.
- Climatológico como agua precipitable y ozono retenido en la atmósfera.

Tipo de radiación/ Otros factores	Valor
Irradiación horizontal global	4,81 $kWh/m^2/dia$
Haz normal directo	3,7 $kWh/m^2/dia$
Difusión horizontal	2,5 $kWh/m^2/dia$
Albedo anual	0,136
Temperatura media	17,2 °C
Elevación	2539 metros por encima del nivel del mar

Tabla 4-2: Parámetros solares y meteorológicos en Bogotá DC para el año 2017.

Entradas adicionales para el modelo de radicación solar pueden ser obtenidas de [31, 13]. Para obtener explicaciones más a fondo sobre la evaluación de los recursos solares, el lector puede consultar en [32].

4.3. Modelo de la Celda Solar Fotovoltaica



Figura 4-5: Unión de las capas semiconductoras en una celda solar fotovoltaica [33]

Las celdas fotovoltaicas están hechas de dos placas delgadas de semiconductor que en su mayoría es silicio. Cuando el silicio está expuesto a la luz solar genera cargas eléctricas, las cuales se conducen por contactos de metal en forma de corriente directa.

Existen tres tipos de celdas, policristalinas, monocristalinas y de capa fina, los policristalinas son de rendimiento intermedio y usadas normalmente para instalaciones residenciales, de tal forma que son las más adecuadas para las simulaciones. La figura 4-7 muestra un esquema de la estructura de una celda solar SFV [34]

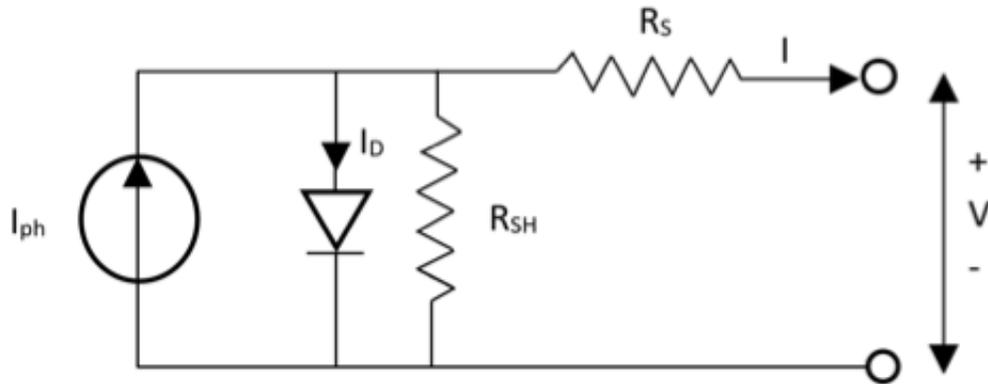


Figura 4-6: Circuito con diodo equivalente de una celda fotovoltaica, tomado de [6]

El comportamiento de una celda fotovoltaica es similar a la de un circuito que integra un diodo. En la Figura 4-6 se presenta el circuito eléctrico equivalente que representa el comportamiento de una celda SFV [6]

Donde:

V - es el voltaje a través de la celda

I_{ph} - es una fuente de corriente generada por la irradiancia

R_S - es la resistencia dentro de la celda

R_{SH} - es una resistencia de Shunt

I_D - es la corriente a través del diodo

I - es la corriente neta

Basándose en el circuito en la figura 4-6, se obtiene la ecuación característica de una celda solar fotovoltaica [35]

$$I = I_{ph} - I_D \quad (4-1)$$

la implementación de este tipo de celda se realiza según la carga requerida para la alimentación del sistema, estas celdas fotovoltaica están compuestas por silicio la cual es un materia que al momento que esta expuesto a la luz hace una generación de cargas eléctricas convirtiéndolas en energía corriente directa de energía gracias a los rayos de luz, la cual se genera energía de corriente directa[36].

4.4. Los Sistemas de Generación Solar FV

4.4.1. Módulos Solares FV

La energía que proviene del soles transformada por los dispositivos en energía eléctrica, debido a que la luz que incide sobre un material que es semiconductor que produce un diferencial de voltaje entre las capas [37].

Estas celdas están fabricadas por silicio cristalino, teniendo otra cantidad de materiales como telurio de cadmio, diselenurio de cobre indio y galio e hidróxido de silicio amorfo [38].

Compuestas por una capa de material tipo n y otra de mayor espesor tipo p con la unión de esas capas forma el campo eléctrico, por un conductor donde se conecta la capa negativa a la positiva, realizando un flujo de electrones, por tal motivo esta capa estará iluminada por el sol y habrá generación de corriente proporcional a la intensidad de la luz que llegue a ella [33].

La diferencia de potencial o tensión en la unión pn, en función de la temperatura se da por la ecuación 4-2, [38]:

$$V_0(T) \cong \frac{k * T}{q} * \ln \left(\frac{N_d * N_a}{n_i^2} \right) \quad (4-2)$$

Donde:

1. V_0 (T): diferencia de potencial o tensión
2. n_i : concentración de portadores intrínsecos del material.
3. N_d : Concentración del dopante tipo n.
4. N_a : Concentración del dopante tipo p.
5. q: carga del electrón ($1,6 \times 10^{-19} C$).
6. k: constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} J/K$).
7. T: temperatura absoluta (K).

Con esto se hace referencia de la eficiencia de las celdas de acuerdo a los materiales con los cuales se construyen dichas celdas.

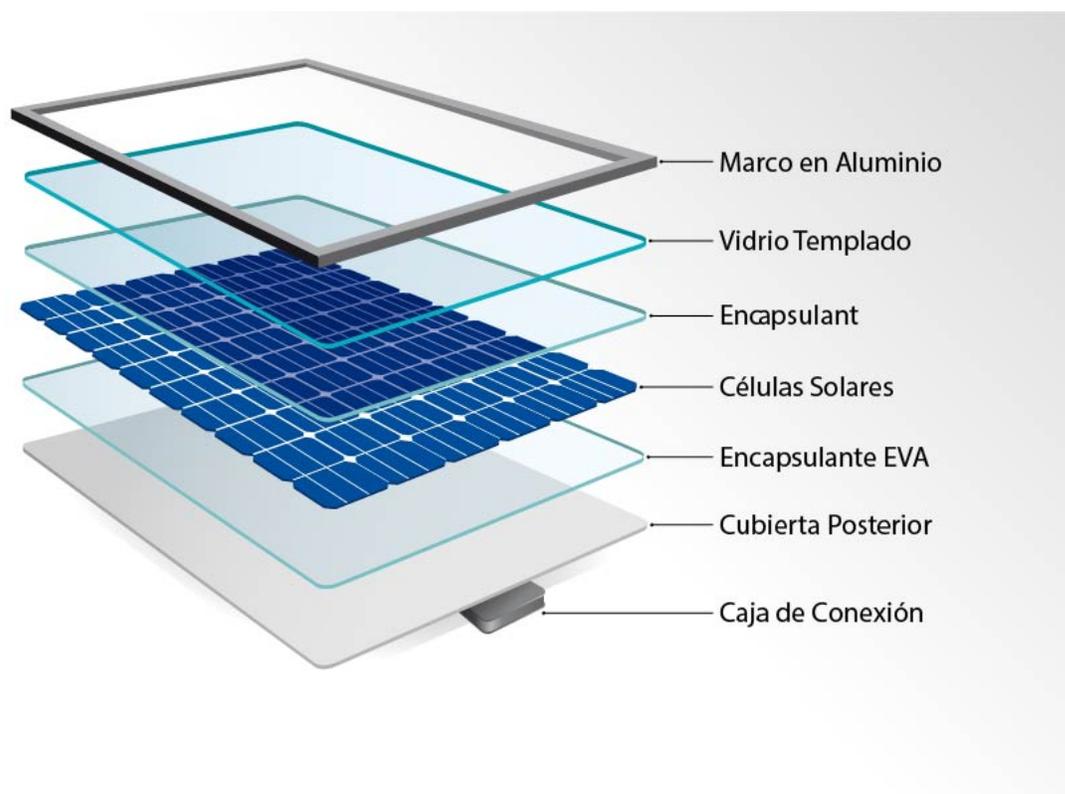


Figura 4-7: Panel Solar, tomado de [7]

4.4.2. Inversores de CA

En los sistemas energía fotovoltaicos pueden generar corriente continua, es necesario que esta corriente que genera la corriente alterna, por ende se presenta la necesidad de poder tener un dispositivo como el inversor ya que este se encargó de cambiar el tipo de corriente, en los sistemas que no se encuentran conectados a la red, por lo cual el inversor está conectado a la batería y en los sistemas conectados el inversor está conectado al generador fotovoltaico.

Por consiguiente, se encuentra dentro de sus funciones lo siguiente:

1. Inversor CC/CA.
2. Modulación de la onda alterna de salida.
3. Regulación del valor eficaz de la tensión de salida [39].

Los inversores se pueden clasificar de acuerdo a la función de la onda de la tensión de salida:

1. De onda cuadrada.
2. De onda modificada.

3. De onda sinusoidal [39].

En la figura 4-8 se puede apreciar el esquema eléctrico donde se ve tiene 6 IGBTs el primer par son G_5 y G_6 que corresponden a la fase A, G_3 y G_4 pertenecen a la fase B y G_1 y G_2 pertenecen a la fase C. Al momento que se realiza la conexión se hace desde el punto medio, G_1 , G_3 y G_5 pertenecen a la mitad superior del puente, la cual este es un puente inversor trifásico, y G_2 , G_4 y G_6 , pertenecen a la parte inferior, adicional se tiene un bus de corriente continua, por lo general en éste se conecta un condensador, que se encarga de entregar la potencia necesaria, para convertir en corriente alterna con amplitud y frecuencia controlables en cada una de las fases, en la figura 4-8 no se observa el controlador del puente inversor pero sí las 6 señales de compuerta necesarias para el disparo de los interruptores.

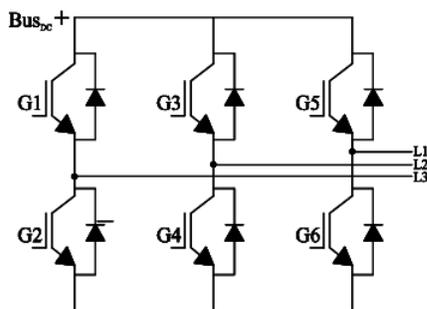


Figura 4-8: Puente de Inversor Trifásico, tomado de [8]

En la figura 4-9 se observa ver un inversor trifásico típico que se utiliza en sistemas solares fotovoltaicos.



Figura 4-9: Inversor fotovoltaico

[8]

4.4.3. Baterías

Es un dispositivo que permiten almacenar la energía que se captado mediante la generación de la radiación solar. En la mayoría de las baterías que se ofrecen en el mercado se encuentran con características de Plomo ácido, de igual manera se pueden encuentran baterías de Plomo Calcio y de Plomo Antimonio, por lo cual las primeras requieren de poco mantenimiento y presentan un menor auto descarga, a comparación de las segundas baterías la cual estas se deterioran menos en su ciclado de trabajo diario y cuentan con mejores prestaciones de servicio para los niveles bajos de carga [39]. Este componente del sistema Híbrido de Energía renovable se explicará con mayor detalla en el capítulo 5.

4.5. Caracterización del Módulo SFV, del Inversor y Dimensionamiento del Sistema SFV

4.5.1. Módulo SFV Seleccionado

Para calcular la eficiencia de los componentes, SAM utiliza el voltaje y la corriente del módulo solar fotovoltaico además del porcentaje del inversor de la potencia de salida nominal.

En la figura 4-10 se muestra la eficiencia del modulo solar, su voltaje y corriente. Para este caso, el voltaje es de 75VDC y la corriente se mantiene constante en 6.2A

Características del Módulo	
Eficiencia nominal	22,237 %
Carga máxima	480,320 Wdc
Carga máxima de voltaje	79,0 Vdc
Carga máxima de Tensión	6,1 Adc
Tensión de Circuito abierto	92,9Vdc
Tensión de corto circuito	6,5 Adc

Tabla 4-3: Características del Módulo SFV

La Tabla 4-3 muestra las características que tiene el modulo del voltaje seleccionado sun power SPR-X22-480-COM por el software don de nos arroja los datos de eficiencia nominal, carga máxima,carga máxima de voltaje y de frecuencia, estas características demuestra que este tipo de inversor seleccionado suple la carga que se requiere el sistema para el edificio de la sede p, con la carga almacenada por los paneles solares.

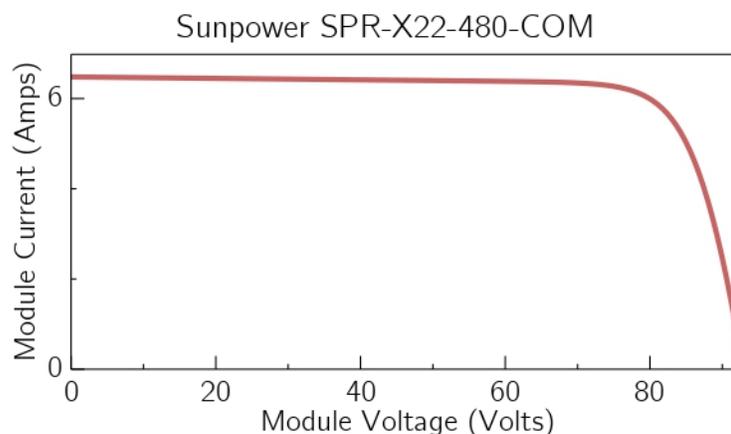


Figura 4-10: Curva de potencia que extrae el módulo a partir de la radiación solar incidente.

En la figura 4-10 los parámetros son usados como entradas en el menú de configuración del sistema SFV en SAM. La idea es que la relación CC (corriente continua) / CA (corriente alterna) entre la matriz solar fotovoltaica y el inversor se mantenga igual o cercana a 1, como se explica en [9].

En la figura 4-11 se muestra la curva de eficiencia para el inversor, esto se toma de la biblioteca del conjunto de datos de inversores Sandia. Estos parámetros están dados en términos de la potencia de salida nominal y los puntos de seguimiento de potencia máxima, el voltaje de salida de CC y el voltaje de CA nominal del modelo inversor.

4.5.2. Inversor de CA Seleccionado

Características Técnicas del Inversor de CA	
Máxima carga AC	12500 Wac
Máxima carga DC	128117 Wdc
Carga de operación	460366 Wdc
Carga de operación en la noche	3,75 Wac
Voltaje nominal AC	480 Vac
Máximo voltaje DC	800 Vdc
Máximo Tensión DC	187033Ade
Mínimo voltaje MPPTDC	350 Vdc
Voltaje nominal DC	685 Vdc
Máximo voltaje MPPTDC	800 Vdc

Tabla 4-4: Características Técnicas del Inversor de CA.

En la tabla 4-4 se muestra las características que conforma el inversor seleccionado por el software Fronius international GmbH: Fronius Symo 12.5-3480, la cual se pueden determinar los siguientes valores como la carga máxima en AC, carga máxima en DC carga de operación durante día y noche, voltaje máximo y voltaje nominal en DC, estos valores obtenidos al momento de seleccionar este inversor suple la carga de energía que se requiere para el edificio de las sede p.

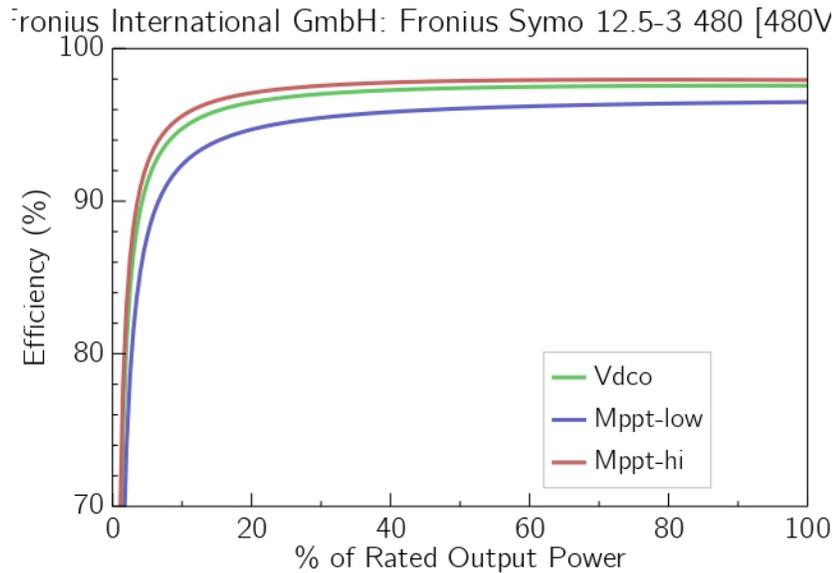


Figura 4-11: Curvas de Eficiencia del Inversor Trifásico de CA

En la figura 4-11 se muestra la curva de eficiencia y características del inversor del sistema fotovoltaico, donde se observa las curvas que corresponde, la de color verde indica el voltaje DC que se genera en el sistema, la línea de color rojo indica el voltaje máximo que se genera para la eficiencia del sistema y por ultimo tenemos la de la curva de color azul que indica un mínimo de voltaje de energía en el sistema del edificio de la sede P.

4.5.3. Caracterización del Sistema SFV en la Sede P

La sección de costos del sistema fotovoltaico en el programa SAM proporciona un acceso a las variables que definen los costos de instalación y operación del proyecto fotovoltaico en la universidad ECCI. Por otro lado, los costos relacionados con la deuda y los impuestos se especifican en la sección de parámetros financieros.

En este sistema se realiza como tal el dimensionamiento de la adecuación del sistema fotovoltaico para la sede p, en la cual se puede en la tabla 4-5 las especificaciones tales como la capacidad total del sistema en AC y DC en el inversor, como también se evidencia la capa-

cidad máxima de carga de la batería y el número total de módulos y así mismo el número total de paneles solares que se requieren para el sistema.

Resumen del Dimensionamiento del Sistema Solar Fotovoltaico	
Capacidad total AC	12500 <i>kWac</i>
Capacidad total del inversor en DC	12812 <i>kWdc</i>
Capacidad del módulo solar fotovoltaico en DC	17292 <i>kWdc</i>
Carga máxima de la batería	10848 <i>kWdc</i>
Número total de módulos	36
Número total de paneles	6
Área total del módulo	77,8m ²

Tabla 4-5: Resumen del Dimensionamiento del Sistema Solar Fotovoltaico

En la tabla 4-6 se muestra el sistema en dos arreglos de 6 por 6, la cual esto hace referencia a los módulos por cadena, adicional a esto se tiene 3 cadena en paralelo, un numero de módulos de 18 y cadenas en referencias en condiciones de Voc y Vmp, para el sistema fotovoltaico.

Configuración Eléctrica de los Paneles SFV		
Configuración	Submatriz 1	Submatriz 2
Módulos por cadena	6	6
Cadena en paralelo	3	3
Número de módulos	18	18
Voc de la cadena de módulos solares	557,4	557,4
Vmp de la cadena de módulos solares	474,0	47,40

Tabla 4-6: Configuración Eléctrica de los Paneles SFV

En este sistema 4-12 se evidencia la orientación la cual tiene una inclinación de 90° y va ubicado de sura norte con los 180°, el eje en la cual estas características la simulación del montaje, para esto se emplea un eje de Azimuth, en La cual se requiere un área de 77.8 metros cuadrados en la terraza de la sede P.

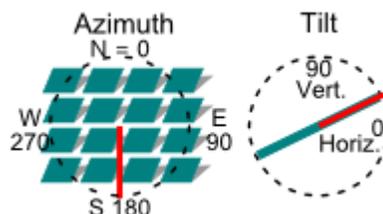


Figura 4-12: Eje Azimuth para la Sede P, [9].

5 Configuración del Banco de Baterías

5.1. Bancos de baterías para el Sistema SFV

5.1.1. Generalidades

Las baterías para los sistemas de generación SFV, también llamados, Bancos de Baterías (del inglés Battery Storage Energy System - BESS) necesitan acumular la energía generada por el sistema SFV para ser utilizadas ya sea en la noche o en el día, debido a que la electricidad requerida para el equipo que va utilizar. Otra función que cumple conlleva a suministrar una intensidad de corriente mayor hacia las placas fotovoltaicas en pleno funcionamiento, lo que genera un gran beneficio a la hora utilizar varios equipos eléctricos en un mismo trabajo.

La batería permite convertir la energía química en energía eléctrica esta no está sujeta al igual que los motores de combustión o de calor, a las limitaciones del ciclo de Carnot dictadas por la segunda ley de la termodinámica. Las baterías, por lo tanto, son capaces de tener mayores eficiencias de conversión de energía según se explica en [11]. Una batería típica se presenta en la Figura 5-1.



Figura 5-1: Modelo de Baterías Gel PV Bloc PowerSafe EnerSys, [10].

Una batería consta de acumuladores eléctricos de 2V integrados en el elemento. Suministran corriente continua a 6, 12, 24 o 48V, al acumulador se le conoce como celda y esta es la que produce el efecto electroquímico que genera energía.

Las celdas se conforman de tres componentes:

- **Ánodo o electrodo negativo:** Este electrodo reductor o de combustible, entrega electrones al circuito externo y se va oxidando durante el trabajo electroquímico.
- **Cátodo o electrodo positivo:** Conocido también como electrodo oxidante, acepta electrones del circuito externo y se reduce durante durante la reacción electroquímica.
- **Electro-litio:** Este tipo de celda funciona como un conductor iónico que proporciona el medio para la transferencia de carga, como iones, dentro de la celda entre el ánodo y el cátodo. El electrolito es típicamente un líquido, como agua u otros solventes, con sales disueltas, ácidos o alcalinas para impartir conductividad iónica según se explica en [11]

Las celdas dentro de las baterías pueden identificarse como no-recargables (primarias) y recargables (secundarias), dependiendo de la capacidad de recarga eléctrica. Estas celdas cuentan también con otras clasificaciones apartadas de las primarias y secundarias como reservas de baterías y celdas de combustibles.

Las celdas operan de dos formas, en descarga y carga lo cual se explicara a continuación:

Descarga

En el proceso que se realiza en una celda al momento de descargarse, la cual esta funciona al momento que la celda se encuentra conectado a una carga externa, los electrones empiezan a circular desde el ánodo, oxidándolos. Por medio de la carga externa mediante el cátodo, donde los electrones son aprobados y el material catódico, en la cual esto se va reduciendo como se muestra observa en la imagen **5-2** .

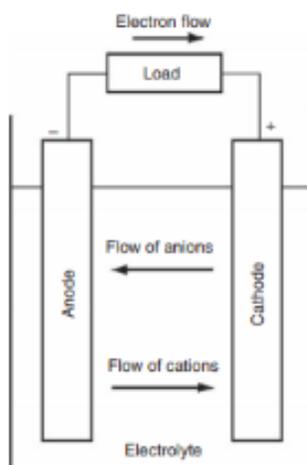


Figura 5-2: Operación electroquímica de Descarga de la Celda, [11].

El circuito eléctrico se completa con el electrolito por medio del flujo de aniones (iones negativos) y cationes (iones positivos) al ánodo y cátodo, respectivamente. La reacción de descarga se puede escribir, asumiendo un metal como el material de ánodo y un material de cátodo, como el cloro (Cl_2) como se representa en [11]

Carga

En el proceso de carga, la celda de almacenamiento, genera un flujo de corriente inverso y la oxidación por la cual tiene lugar en el electrodo positivo y a su vez una reducción en el electrodo negativo como se muestra en la figura 5-3.

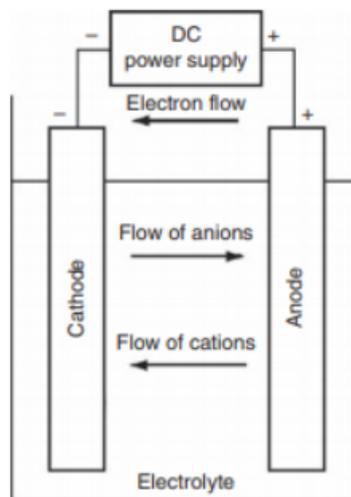


Figura 5-3: Operación Electroquímica de Carga de la Celda [11].

El ánodo es el electrodo donde se produce la oxidación y en el cátodo tiene lugar la reducción, por lo tanto el electrodo positivo es ahora el ánodo y el cátodo es el negativo.

5.1.2. Función del Banco de Baterías SFV

se explicada el funcionamiento y propósito de las celdas, por el cual se procede a explicar la función de la batería, la cual en este proceso consiste en suministrar energía eléctrica al equipo, en el momento en el momento en el que el sistema SFV al momento que el sistema no genere la cantidad suficiente de energía eléctrica. Ya en el momento en donde las placas fotovoltaicas generen mayor electricidad, el sistema se vuelve a un plano inicial donde son

ahora las placas las que se encargan de realizar el suministro de energía al equipo y el sobrante que se genera de las baterías se ira a las baterías nuevamente.

5.2. Dimensionamiento del Banco de Baterías para el Sistema Híbrido de Energía Renovable

Los cálculos de dimensionamiento del banco de baterías utilizan ecuaciones básicas de voltaje y corriente en unión con la información de propiedad de la celda. La figura 5-4 muestra el cálculo del banco de baterías.

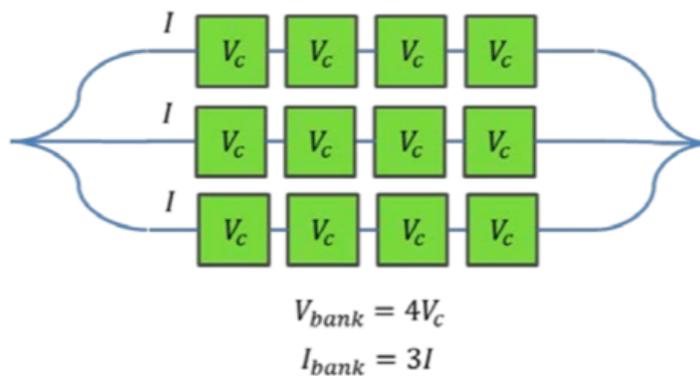


Figura 5-4: Configuración del Banco de Baterías, tomado de [12].

Los requisitos del software precisan en el número de celdas para una batería convencional o el número de celdas por pila para una batería de flujo , que cumple exactamente o excede ligeramente el voltaje de banco deseado estimado a través del voltaje nominal de la celda [12] de esta forma:

$$V_{bank} = nV_c \tag{5-1}$$

$$I_{bank} = mI \tag{5-2}$$

Donde n es el número de celdas de la batería en serie para cada cadena del banco y m es el número de cadenas unidas en paralelo.

La capacidad del banco de baterías está determinada por el número de cadenas de celdas en paralelo necesarias para garantizar que la capacidad real sea lo más cerca posible del valor deseado, dada la capacidad de la celda especificada en los parámetros de corriente y capacidad del sistema.

En un cálculo en modo automático, el usuario debe definir la capacidad del banco deseada en kWh y la potencia del banco deseada en kW [40]. Los valores estimados son útiles para comenzar con un diseño de sistema fino. Muchos factores de diseño de la vida real no se consideran en esta primera aproximación.

Un envío manual de baterías formado por tres períodos de dos horas por cada día a la semana, está diseñado para cargar (desde SFV o desde la red eléctrica) y descargar los ciclos de la batería como se describe en [40]. Las baterías tipo VRLA se seleccionan para este caso de estudio.

5.2.1. Banco de Baterías

Hay dos formas de hacer el cálculo de las baterías en SAM, se busca el tipo de batería y así poder encontrar la atención de baterías se puede evidenciar la atención de la batería al momento que se realiza el camino , por la capacidad nominal del banco, la cual define una batería la capacidad nominal del banco con un valor de $21696kWh$, y la carga acumula la carga en las baterías en un período un día entero de trabajo .

Propiedades de las Baterías	
Capacidad del banco nominal	21696kWh
Voltaje nominal del banco	48V
Total de numero de celdas	96
Celdas en series	24
Cadenas en paralelo	4

Tabla 5-1: Propiedades de las Baterías

5.2.2. Ciclos de Carga y Descarga de la Batería

Primer periodo que permite la carga de la batería desde la red, la cual inicia su periodo de carga al momento que llega al 45% de capacidad y su porcentaje de descarga es hasta el 25%, adicionalmente funcionará en el horario nocturno, los otros dos periodos descargarán la batería que produce la descarga en el periodo diurno .

La tabla 5-2 muestra los tres despachos de carga y descarga de la batería donde se puede evidenciar la capacidad de carga que tiene la batería , de igual manera los ciclos de carga y

de descarga de estas para entregar a los sistemas híbridos de la sede P, que fueron tomados de los cálculos de vida útil de la baterías que realiza el software SAM.

Vida útil de la Batería

Capacidad de descarga %	Ciclos transcurridos %	Capacidad %
30	0	100
30	1100	90
30	1200	50
50	0	100
50	400	90
50	500	50
100	0	100
100	100	90
100	150	50

Tabla 5-2: Vida útil de las Baterías

Se tienen unos despachos para cada mes del año, cargando las baterías en la noche y entregando energía en la mañana y en la tarde, por ende después de las 10 de la noche hasta las 6 de la mañana se pone a cargar de la red, para que el banco este como respaldo o fuente de energía aparte del panel solar y de las turbinas durante las horas del día, hasta las 6 de la tarde es decir en todo el día están los tres sistemas híbridos esperando para hacer entrega de energía y las baterías se usan como sistema de carga durante la noche con la cuadrícula el software o el sistema no da la posibilidad de tomar la energía de las turbinas , la cual s tomada de la red, por un periodo que le permito cargarse a la batería, ya que en los otros dos períodos descargan las baterías a partir de la energía suministrada por las turbinas.

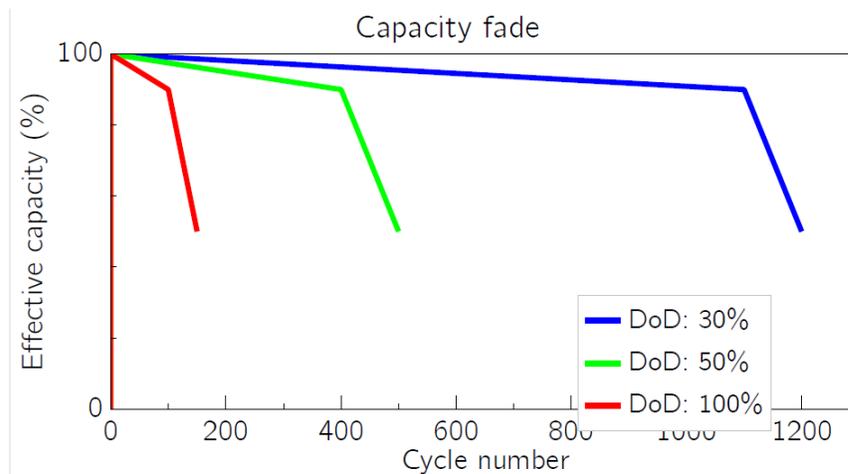


Figura 5-5: Degradación del Ciclo de la Vida Útil de las Baterías

En la figura 5-5 el estado inicial de la capacidad de carga de la batería tiene como valor inicial el 100 % de la capacidad de ciclos de carga, cuando la batería se encuentra en un 50 % de su vida útil , se puede evidenciar que el ciclo de cargas disminuye en un 30 % , que indica que debe ser reemplazada dado que ha cumplido su vida útil.

5.2.3. Despacho de la Energía Almacenada en las Baterías

Se realizó la configuración del despacho de baterías , para lo cual se consideraron tres periodos, un período que permite la carga de la batería desde la red e inicia su carga a partir de un 45 % de capacidad, y así permite su descarga de la batería hasta un 25 %, esto funcionando en el horario nocturno, los dos periodos adicionales están solamente descargando la batería, la cual estos está trabajando en el periodo diurno.

Estos despachos se crean para cada mes del año, en donde se realiza la carga de las baterías en el periodo de la noche y se realiza la entrega de energía en dos formas en los periodos de la mañana y la tarde. La carga de las baterías de la red en la noche, ya que la sede se encuentra en funcionamiento hasta las 10:00pm hasta las 6:00am , como no se encuentra ningún consumo en la sede P entonces realiza su carga al banco de energía, para que esté disponible como respaldo o fuente de energía aparte del panel solar y de las turbinas durante las horas del día hasta las 6:00am , se puede concluir que en el día se tiene en operación los tres sistemas, híbrido funcionan para entregar energía en la sede y el uso de baterías como sistema de carga durante la noche.

Modelo de Despacho Sistema de Energías de Almacenamiento de las Baterías

Periodos	Carga desde PV	Carga desde la red		Descarga	
		Permitir	% capacidad	Permitir	% Capacidad
Periodo 1		ok	45	ok	25
Periodo 2	ok		25	ok	25
Periodo 3	ok		25	ok	25

Tabla 5-3: Modelo de Despacho del Sistema de energía de almacenamiento de las Baterías

En el sistema de carga la red como se muestra en la tabla 5-3 y el software no dan la posibilidad de tomar la energía de las turbinas, en la simulación indica que se debe de tomar de la red, se propone que en el periodo 1 permita cargar la batería en los otros dos periodos cuando se esté descargando. Las baterías cargan a partir de la energía suministrada por las turbinas.

En los tres Despachos creados para el ciclo de carga de las baterías se genera entre los manuales , el cual realiza dos tipos que corresponden para entre semana y los fines de semana esto con el fin de abastecer con los sistemas híbridos que tiene la sede P.

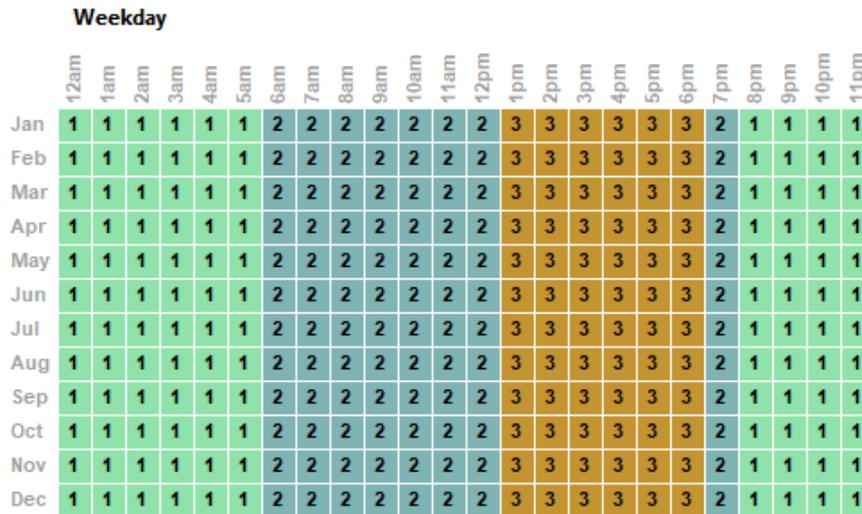


Figura 5-6: Manual de Despacho del BESS entre semana, tomado de [9]

En la figura 5-6 se ve el despacho que se tiene para entre semana donde está configurado con el horario del día y los meses del año donde se genera mayor carga a partir de la 1 pm hasta las 6:00pm.

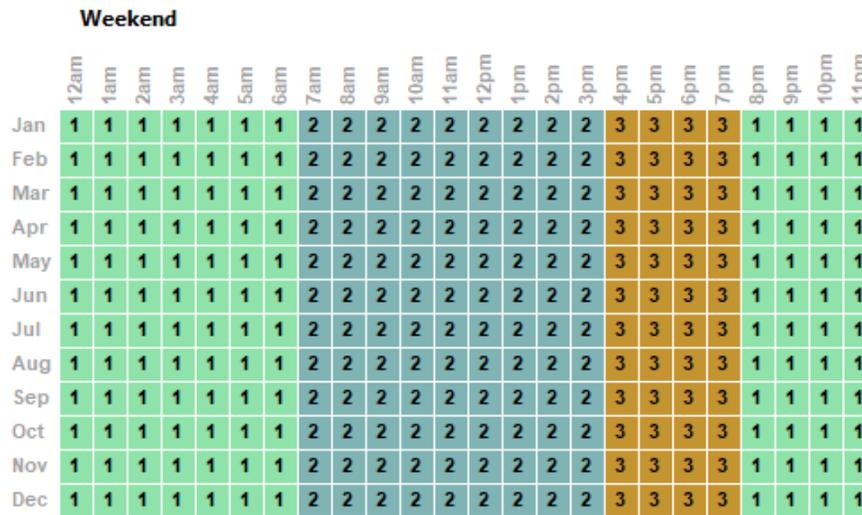


Figura 5-7: Manual de Despacho del BESS para el fin de semana, tomado de [9]

Sin embargo, en la siguiente figura 5-7 se ve el despacho que se tiene para el fin de semana, donde está configurado con el horario del día y los meses del año donde se genera mayor carga a partir de la 4 pm hasta las 7:00pm. Los restados asociados a este sistema se presentarán en el capítulo 6.

6 Análisis de Costos para los Sistemas Eólico, SFV y de BESS

En este Capítulo se describe un Balance de Costos estimado para el HRES de la sede P. Los costos de los componentes principales del Sistema fueron consultados con diferentes proveedores y su valor convertido a dólares. Si bien el software permite incluir las Tasas de Impuestos y los Seguros del Proyecto, así como los Incentivos fiscales, al ser un Software diseñado en EEUU, estos valores se han dejado por defecto y solamente se han modificado algunos de ellos. Estos se resumen en la Tabla 6-1.

Periodo de Análisis	30 Años
Tasa de Inflación	2,5 %/Año
Tasa Real de Descuento	5,5 %/Año
Tasa de Descuento Nominal	8,14 %/Año

Tabla 6-1: Parámetros de Análisis de Costos para el HRES

Por otra parte SAM usa las variables de la sección de Costos del Sistema para calcular el costo de inversión del proyecto y los costos operativos anuales reportados como flujo de caja y que son usados para calcular las métricas de costos. El programa proporciona las categorías de costos directos de capital y costos indirectos de capital para ayudar a realizar un seguimiento de los costos de instalación del proyecto. Por último, SAM representa el costo total instalado en el año 0 del flujo de caja del proyecto.

6.1. Modelo de Costos para Turbinas en Tierra

También conocido como WindBoS (Wind Balance of System), se usa de manera general para el sistema de energía eólica *on shore* (en tierra). El modelo tiene las siguientes variables predeterminadas que el usuario debe especificar en el software [20]:

- Tensión de interconexión,
- distancia a la interconexión,

- características del terreno del sitio,
- diseño de la turbina eólica y
- las condiciones del suelo.

Este modelo de costos se puede aplicar para estimar el costo total de instalación. Se pueden encontrar entradas adicionales para el modelo en [27]. SAM suma los valores para calcular todos los costos de la categoría [21, 20]. El diagrama de flujo es explicado en la figura 6-1.

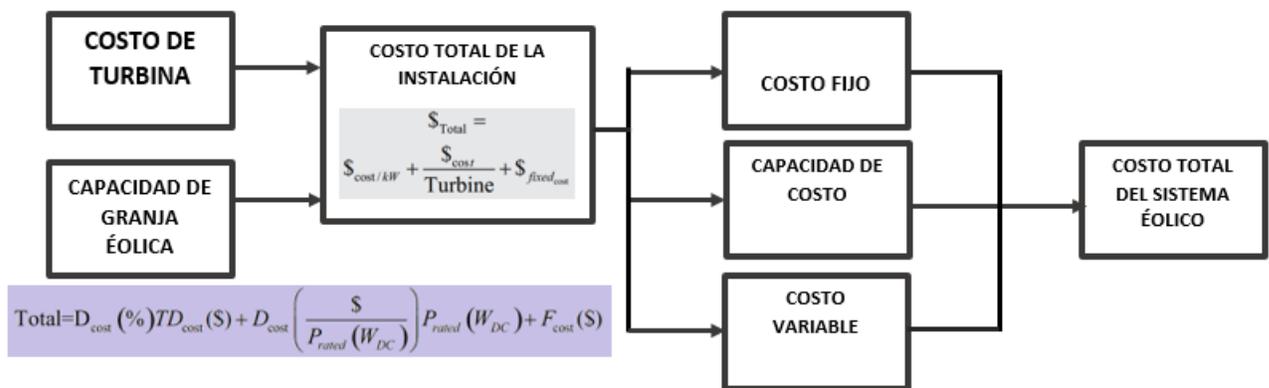


Figura 6-1: Diagrama de Flujo del Balance de Costos (WindBos) del Sistema Eólico

Los principales costos asociados se enumeran a continuación:

- Costo de la turbina.
- Balance del costo del sistema.
- Capacidad del parque eólico.
- Total de costos instalados.
- Costos de operación y mantenimiento (O&M).
- Costo anual fijo (\$/año)
- Un costo anual fijo que se aplica a cada año en el flujo de caja del proyecto.
- Costo fijo (\$/kW-yr) por capacidad Un costo anual fijo proporcional a la capacidad nominal o nominal del sistema.
- Costo variable por generación (\$/MWh) Un costo anual variable proporcional a la producción eléctrica anual total del sistema en megavatios-hora de CA.
- Tiempo de construcción
- O&M tamaño del edificio

- Número de torres meteorológicas temporales
- Número de torres meteorológicas permanentes
- Días de demora por viento / clima
- Averías de grúas y accesos viales

Las entradas avanzadas se enumeran a continuación:

- Asistencia de entrega necesaria,
- Transformador Pad Mounted requerido,
- Nuevo Switch-yard requerido,
- Bono de rendimiento,
- Voltaje medio (MV) Relleno Térmico,
- MV de gastos generales ,
- Transporte de la turbina,
- Zanja de roca requerida,
- Contingencia,
- Gestión de garantías,
- Impuesto sobre ventas y uso,
- gastos generales,
- Margen de beneficio
- Tarifa de desarrollo.

Algunas de las características principales para la construcción del proyecto eólico que considera el modelo WindBos de SAM son:

- El modelo utiliza datos empíricos, lo que resulta en una sobre estimación de los costos en proyectos de menos de 40MW debido a la falta de datos en proyectos más pequeños.
- Para proyectos de más de 500 MW, se debe considerar ejecutar el programa como dos proyectos iguales a la mitad del tamaño, ya que un proyecto muy grande tendría una complejidad adicional y posibles ciclos múltiples de construcción de varios años.
- El modelo ejecutable en SAM no permite plantas de lote cero.
- El modelo dentro del software asume torres reunidas de hasta 100 m de altura y no es escalable para torres más altas.
- El modelo asume una subestación para el proyecto, independientemente de su tamaño.

Sin embargo, el modelo se escala en consecuencia e incluye los transformadores requeridos en función del MW total.

- Los sistemas SCADA están asumiendo una configuración promedio sin funciones avanzadas y están incluidos en el cálculo de la subestación.
- El modelo no tiene en cuenta los requisitos específicos del proyecto, tales como líneas de gas, líneas de agua, tuberías, etc. Cualquier información conocida se puede agregar como porcentaje o como una suma global adicionada al % de contingencia contemplada en el modelo.
- El costo de los cimientos de la turbina eólica aumenta linealmente desde alturas de torre de 100 *m* y más, agregando \$10000 por cada 20 *m* de altura de la torre.

6.1.1. Costo de la Turbina

Es el costo de una sola turbina. Puede ingresar los valores del modelo computacional en *kW* para la turbina, cantidad fija o una combinación de ellos. El costo total de la turbina es la suma de estos valores.

Los costos de turbina se encontró que el costo por turbina oscila entre 750- \$950 *kW* y el balance del sistema entre \$795/*kW*, teniendo en cuenta estos valores la turbina de viento estaría generando 500 *kW*, alrededor de \$ 3000 a 8000 por *kW* de capacidad. Revisando otros valores correspondientes al costo por turbina esta entre USD \$50000- USD \$80000 con instalación, es decir luego de instalado el sistema.

Al momento de cambiar los valores por los de la turbina investigada, se evidencia un incremento en el costo total de la instalación del sistema USD \$146991, y el costo total por *kW* instalado por USD \$4899 *kW* [41].

6.1.2. Balance de Costos del Sistema

En este tipo de costo, se consideran el material, las obras civiles asociados para la construcción de los cimientos de la turbina para todo el parque eólico. Se deben dar valores en *kW* por turbina, una cantidad fija o una combinación de los tres. El costo total de la turbina es la suma de estos tres valores.

6.1.3. Capacidad Del Parque Eólico

Esta es la capacidad nominal del parque eólico. Se puede entender como el número de turbinas en el proyecto, multiplicada por la potencia de cada una de ellas, son 30 *kW* distribuidos en 6 turbinas la figura se presentó en el capítulo 2 **2-4**.

6.1.4. Costo Total Instalado

Estos costos deben incluir dos tipos: la suma del costo total de la turbina y el costo total de windBoS. SAM también considera el costo total instalado por kW , como el costo total instalado dividido por la capacidad de nominal del parque eólico, esto se muestra en la Ecuación (6-1).

$$Total = \frac{cost}{kW} + \frac{cost}{turbine} + Fixed_{costs} \quad (6-1)$$

Donde:

Total: Costo total de la instalación del sistema.

$\frac{cost}{kW}$: Costo por kW .

$\frac{cost}{turbine}$: Costo de la turbina.

Fixed_{costs}: Costo fijo.

6.1.5. Costos De Operación y Mantenimiento (O&M)

Este tipo de costos representan los gastos anuales en equipos y servicios que se producen después de instalar el sistema. SAM le permite ingresar los costos de O&M de tres maneras: fija anual, fija por capacidad y variable por generación. Los costos de O&M se informan sobre el flujo de caja del proyecto en el primer año y más tarde.

$$\$_{1st_{year}} = \frac{\$}{yr} + \frac{\$}{kW - yr} + \frac{\$}{MWh} \quad (6-2)$$

Donde:

$\$_{1st_{year}}$ es el costo O&M asociado al primer año de operación del proyecto.

$\frac{\$}{yr}$ es el costo fijo anual.

$\frac{\$}{kW-yr}$ es el costo fijo por capacidad.

$\frac{\$}{MWh}$ es el costo variable por generación.

Estos costos representan los gastos anuales en equipos y servicios que ocurren después de instalar el sistema, considerando una tasa de escalamiento de 1,5 %, 3 % y 2 % para cada uno de los costos relacionados en la Ecuación (6-2), respectivamente. SAM permite ingresar los costos de O&M de tres maneras:

1. fija anual,
2. fija por capacidad y
3. variable por generación.

Los costos de O&M se informan sobre el flujo de caja del proyecto del primer año y posteriores. Para los gastos tales como reemplazos de componentes que ocurren en años posteriores, puede usar un cronograma anual para asignar costos a años individuales. La producción de energía anual depende del valor calculado para el primer año del modelo de rendimiento y de la tasa de degradación de la vida útil, o de un programa anual de costos, según la opción elegida.

6.2. Costos Del Sistema Solar Fotovoltaico

En el modelo de Balance de costos de SFV, se debe definir las variables para el costo de inversión del proyecto y los cálculos de costos operativos anuales para generar el LCOE que se utilizará para evaluar las métricas de costos. El software organiza los costos en tres categorías diferentes:

Las categorías bajo Costos Directos de Capital y Costos Indirectos de Capital ayudan a seguir el seguimiento de los Costos de Instalación del Proyecto. El valor del Costo Total Instalado solo afecta los cálculos de Flujo de Efectivo, por lo tanto, los Costos de Capital tienen tres categorías de costos diferentes para realizar el análisis:

- Costos Directos de Capital: En esta simulación, los costos del Módulo y del Inversor se dan en $\$/W_{AC}$, $\$/W_{DC}$ o en $\$/Unidades$.
- Costos Indirectos de Capital (para licencias legales, ingeniería y costos relacionados con el uso del suelo):
- Porcentaje del Costo Directo.
- Un costo de CC proporcional a la potencia nominal de CC del sistema e igual a la potencia nominal de SFV.
- Un Costo Fijo en dólares americanos.
- Un Costo Total calculado como la suma de las tres categorías, estas se describen a continuación :

$$Total_{Cost} = D_{Cost}(\%) \times TD_{Cost}(\$) + D_{Cost} \left(\frac{\$}{P_{rated}(W_{DC})} \right) \times P_{rated}(W_{DC}) + F_{Cost}(\$) \quad (6-3)$$

Donde:

$Total_{Cost}$: costo total del sistema.

$D_{Cost}(\%)$: porcentaje de costo directo.

$TD_{Cost}(\$)$: total costo directo en dólares.

$D_{Cost}(\frac{\$}{P_{rated}(W_{DC})})$: costo directo en dólares sobre real costo directo

$P_{rated}(W_{DC})$: porcentaje de costo

$F_{Cost}(\$)$: costo directo en dólares

- Los costos de la tierra: se expresan como el costo en US\$ por hectárea.
- Costos de operación y mantenimiento (O&M): Esta clase de costos se incluyen los equipos y componentes, equipos de trabajo y otros costos asociados con la operación del proyecto y brindan información del flujo de caja para el año uno y siguientes

Inicialmente se toma del texto [41], la referencia de que el sector al que está dirigido el diseño del sistema fotovoltaico pertenece al sector comercial ya que el diseño del presente proyecto es para la obtención de 12kW y la tabla ES-1 del documento en mención el rango de la energía producida aplica para el sector comercial.

- \$2,70 por vatio DC (W_{DC}) (o \$ 3,11 por vatio AC [W_{AC}]) para sistemas residenciales
- \$1,83 / W_{DC} (o \$2,10 / W_{AC}) para sistemas comerciales
- \$1,06/ W_{DC} (or \$1,44/ W_{AC}) para sistemas de escala de utilidad de inclinación fija
- \$1,13/ W_{DC} (or \$1,47/ W_{AC}) para sistemas de escala de utilidad de seguimiento de un eje.

Las ganancias resultantes de la generación de CA durante los períodos de producción fotovoltaica por debajo del pico compensaron con creces las pérdidas ocasionadas por el recorte ocasional del período pico [42]

A medida que aumenta el tamaño del sistema, disminuye el costo por vatio para construirlos. Esto se cumple incluso cuando suponemos que un desarrollador típico tiene 10 MW de desarrollo e instalación de sistemas por año, y por lo tanto tiene una sobrecarga en esta capacidad total de 10 MW que no varía para diferentes tamaños de sistema.

6.2.1. Costos Directos de Capital

Estos se estiman para la compra de equipos y trabajos de instalación. Un costo de capital directo es un gasto que adquiere un equipo específico o contrata un servicio de instalación y se aplica en el año cero de flujo de caja. En esta simulación, los costos del Módulo y del Inversor se dan en \$/WAC, \$/WDC o en\$/Unit. A lo largo de estos, otras categorías de costo de capital directo son: equipo de monitorización, Balance del sistema (BOS), trabajos de

instalación y margen y gastos generales del instalador. La cantidad total para cada categoría se calcula y luego se informa en los Resultados de simulación.

Contingencia

En este SFVBoS, se considera un porcentaje de la suma del módulo, inversor, balance del sistema, trabajos de instalación, margen del instalador y costos generales. Esto puede usarse para estimar la cuenta de las incertidumbres esperadas de los costos indirectos.

6.2.2. Costo Directo Total

Esto puede definirse como la suma del módulo, el inversor, el saldo del sistema, los trabajos de instalación, el margen del instalador, los costos generales y los costos de contingencia.

$$TD_{Cost}(\$) = \$ + \frac{\$}{W_{DC}} \times P_{rated}(W_{DC}) + \frac{\$}{m^2} \times A_{TOTAL}(m^2) \quad (6-4)$$

Donde:

$TD_{Cost}(\$)$: costo total directo en dólares.

$\$$: Costo del Proyecto en Dólares.

$\frac{\$}{W_{DC}}$: valor en dólares sobre el trabajo en DC.

$P_{rated}(W_{DC})$: costo de trabajo en DC

$\frac{\$}{m^2}$: valor en dólares sobre el área cuadra en metros.

$A_{TOTAL}(m^2)$: área total del proyecto.

6.2.3. Costos Indirectos de Capital

Se puede definir como uno que no se puede correlacionar con un equipo específico o servicio de instalación.

Las cinco categorías de costos indirectos se calculan como la suma de los tres valores: estudios ambientales, ingeniería e interconexión a la red. Estos se expresan, con las siguientes unidades:

- porcentaje del costo directo.
- Un costo de CC proporcional a la potencia nominal de CC del sistema e igual a la potencia nominal de SFV.
- Un costo fijo en dólares americanos.

- Un total como la suma de las tres categorías, estas se describen a continuación :

$$total = D_{Cost}(\%) \times TD_{Cost}(\$) + D_{Cost} \left(\frac{\$}{P_{rated}(W_{DC})} \right) \times P_{rated}(W_{DC}) + F_{Cost}(\$) \quad (6-5)$$

Donde:

$total$: costo indirecto del capital $D_{Cost}(\%)$: costo en porcentaje de DC.

$TD_{Cost}(\$)$: total costo DC en dólares $D_{Cost} \left(\frac{\$}{P_{rated}(W_{DC})} \right)$:

Costo en DC por el valor en dólares sobre la potencia de trabajo en DC $F_{Cost}(\$)$: costo final en dólares

Los costos de la tierra: se expresan como el costo en US\$ por hectárea.

Precio fijo en \$USD.

$$L_{Costs_{total}} = Cost \left(\frac{\$}{acre} \right) + \%of D_{Cost} \times \frac{Costs_{total}}{\$} + Cost \left(\frac{\$}{W_{DC}} \right) \times P_{rated}(W_{DC}) + F_{Cost}(\$) \quad (6-6)$$

Donde:

$L_{Costs_{total}}$: costo total.

$Cost \left(\frac{\$}{acre} \right)$: costo en dólares sobre el área.

$\%of D_{Cost}$: porcentaje en DC del costo.

$\frac{Costs_{total}}{\$}$: costo total sobre valor en dólares.

$Cost \left(\frac{\$}{W_{DC}} \right)$: costo por valor en dólares sobre W_{DC} .

$P_{rated}(W_{DC})$: Potencia nominal por W_{DC}

$F_{Cost}(\$)$: costo fijo del sistema en dólares

La tasa de impuesto a las ventas: El usuario debe especificar el porcentaje de costos directos del sistema solar fotovoltaico, por lo tanto, el algoritmo estima el impuesto a las ventas correspondiente :

$$S_{TAX_{total}} = S_{TAX_{Rate}} \times \%D_{Cost} \times D_{Cost} \quad (6-7)$$

Donde:

$S_{TAX_{total}}$: Total de la tasa de impuesto.

$S_{TAX_{Rate}}$: la tasa de impuesto

$\%D_{Cost}$: porcentaje de costo en DC

D_{Cost} : costo en DC

Para todo lo anterior, los costos indirectos totales se determinan como la suma de las cinco categorías de costos indirectos, más el impuesto a las ventas

6.2.4. Costo Total de la Instalación

Esta es la suma de todos los costos de capital directos e indirectos especificados por el usuario.

Este valor se utiliza para calcular el costo de capital neto del proyecto, que es el costo total de instalación menos los incentivos en efectivo y más los costos de financiamiento adicionales, de la siguiente manera, consulte la ecuación.

$$T_{Cost}(\$) = D_{Cost_{total}} + I_{Cost_{total}} \quad (6-8)$$

Donde:

$T_{Cost}(\$)$: costo total de la instalación.

$D_{Cost_{total}}$: costo total.

$I_{Cost_{total}}$: costo total de la inversión

6.2.5. Costos de Operación y Mantenimiento (O&M)

Esta clase de costos se informa en el flujo de efectivo del proyecto para el año uno y posteriores.

Se da para equipos, grupos de trabajo y otros costos asociados con la operación del proyecto): Esta clase de costos se informa sobre el flujo de caja del proyecto para el año uno y siguientes.

En la Figura 6-2 se presenta un diagrama de flujo de la estimación de costos del sistema SFV.

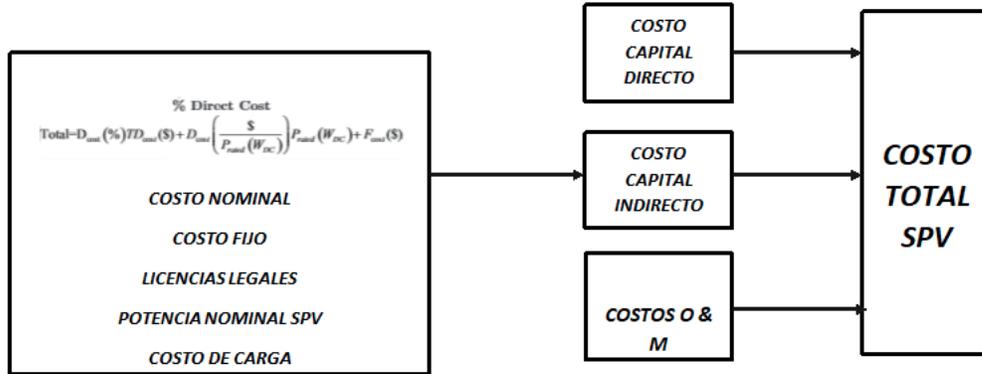


Figura 6-2: Diagrama de Flujo de la Estimación de Costos de Sistema SFV

6.3. Costos del Sistema de Almacenamiento por medio de Baterías

En primera instancia se realizará el análisis de la gráfica a continuación presentada: Los costos Indirectos de capital, incluyen pagos como impuestos de propiedad, seguros, derechos de tierra, actuaciones, vínculos, y otros costos administrativos:

Para el caso que nos ocupa, se asocian los siguientes costos en la tabla 6-2: Permisos y estudios ambientales: para el que se asume un 0,5% de los costos directos, lo que equivale a \$0,30 el valor por W_{DC} lo cual alcanzará un valor de USD \$567198. En cuanto a gastos generales de Ingeniería y Desarrollo un 0,5% de los costos directos, lo que equivale a \$0,20 el valor por W_{DC} lo cual alcanzará un valor de USD \$399283. Se presume un 10%. Para Interconexión de Red, lo que equivale a \$0,10 el valor por W_{DC} lo cual alcanzará un valor de USD \$581970.

Costo Indirecto del Sistema SFV

Costos indirectos	% de costo directo	\$/ W_{DC}	Costo total
Estudios ambientales	0,5	0,30	USD \$ 567198
Ingeniería y desarrollo	0,5	0,20	USD \$ 399283
Interconexión de red	10	0,10	USD \$ 581970

Tabla 6-2: Costos Indirectos del Sistema SFV

En terrenos como se muestra en la tabla 6-3, un área de 0,1 acres, sin costo ya que es terreno propio del lugar en el que se llevará el Proyecto pero sí se contempla un 5% del precio del terreno que equivale a USD \$184527. Preparación del terreno y transmisión un 2,5% de

los costos indirectos lo que representa USD \$92264. En la franja de Impuestos y porcentaje directo un 60 % de los costos indirectos, con una tasa de impuesto a las ventas del 1 % lo que representa USD \$22143, para un total en costos indirectos de USD \$1847386.

Costos del Área Utilizada		
Costo de área	% de costo directo	Total
0,1	5 %	USD \$ 184527
0,1	2,5 %	USD \$ 92264
Porcentaje de costo directo	60 %	USD \$ 22143
Tasa de impuesto	1 %	USD \$ 1847386

Tabla 6-3: Costo del Área Utilizada

En costos totales instalados equivale a USD \$5537931 lo que nos da un costo de USD \$320 por W_{DC} en la tabla **6-4**

Costo total de la Instalación	
Total de costo	USD \$ 55379,31
Total de instalación por capacidad	USD \$3,20/ W_{DC}

Tabla 6-4: Costos Total de la Instalación

Costos de operación y mantenimiento como se observa en la tabla **6-5:** para el primer año los costos fijos por capacidad rondan los \$001404 por kW por año, con una tasa de escalada del 1 %. El costo variable por generación para el primer año es de \$10 MW por hora por año y una tasa de escalada del 2,5 %. Se aclara que en el modo “valor” SAM aplica inflación y escala al costo del primer año. En modo “horario” no aplica ninguna.

Costo de Operación y Mantenimiento		
Costos	Costos primer año	Escala de inflación
Costo fijo por capacidad	USD \$ 001404/ kW -año	1 %
Costo variable por generación	USD \$ 10/ mWh	2,5 %

Tabla 6-5: Costos de Operación y Mantenimiento

En la siguiente Tabla **6-6** se evidencia de los precios del proyecto instalado, los proyectos solares también incurren en costos de operación y mantenimiento (“O&M”), los cuales están definidos aquí para incluir sólo aquellos costes directos para operar y mantener la planta de generación. En otras palabras, los costos de O&M excluyen pagos como impuestos de propiedad, seguros, derechos de tierra, actuaciones, vínculos, y otros costos administrativos.

En los costos directos de capital para este caso, encontramos el Modulo es decir 36 unidades de módulos con un $kW_{DC}/unidad$ equivalente a 0,5 para un total de 17,3 kW_{DC} y un costo por unidad de USD \$553329 y costo total de USD \$231713 Por otro lado, el inversor utilizado (uno) genera 12,5 kW_{cd} con un costo de USD \$553329. El paquete de baterías produce 217 kWh a un costo de USD \$843 el kW_{DC} . El poder de la batería se estima en 10,8 kW con un costo de USD \$4500 por kW_{DC} . Para un total (sumando los costos anteriores) de USD \$3690546.

Costos Directos del Sistema SFV				
Características	Ud	kW_{DC}/ud	kW_{DC}	Total
Módulos	36 ud	0,5 kW_{DC}/ud	17,3 kW_{DC}	USD \$ 553329
Inversor	1ud	12,5 kW_{AC}/ud	12,5 kW_{AC}	USD \$ 553329
Banco de Baterías			217,0kWh	
Potencia de la Batería			10,8 kW	
Total			USD \$ 231713	
Costo total directo			USD \$ 3690546	

Tabla 6-6: Costos Directos del Sistema SFV

Es importante indicar que según estudios recientes, las baterías Li-ion han aumentado su capacidad en un índice de crecimiento anual compuesto de 173% en plazos de capacidad acumulable, y un 89% de capacidad contabilizada de almacenamiento de energía anual en 2015. Para reducir los costos de instalación, algunos fabricantes de baterías pueden combinar Li- con células de batería del ión, un sistema de administración de la batería, y la batería inversora en uno unidad compacta (Sonnen Batterie 2018) como un AC batería.

6.3.1. Sistema de Costos Eólico y Solar

Dentro de esta sección de costos del sistema eólico se encontrará el costo de la turbina, costo por kW , costo fijo y el total del sistema coincide con los parámetros se encuentran la turbina de costos que es aproximadamente de \$0,56 por kW y el balance del sistema de costos es de \$795000 por kW , lo que permite a la granja tener una capacidad de 30 kW por un número de 6 turbinas, cabe tener en cuenta que el costo por turbina está dentro de USD \$28500 la turbina y el balance del sistema es de USD \$1110 por el manteniendo un costo entre los dos de USD \$50000 dólares con un total de USD \$31010 dólares, con un total instalación de USD \$202526 dólares y el costo de instalación por kW es de USD \$6750 por kW como se puede observa en la siguientes tablas **6-7** y **6-8**

Costos Capital				
Costos Capital	Costo por kW	Costo por turbina	Costo fijo	Total
Costo de la turbina	USD \$ 0,56/ kW	USD \$ 28500/turbina	USD \$ 50000	USD \$ 17151680
Balance del sistema de costos	USD \$ 795,00/ kW	USD \$ 111000/turbina	USD \$ 50000	USD \$ 3101000
Capacidad de la granja eólica	30 kW	Número de turbinas 6		

Tabla 6-7: Costos Capital

Costo Total del Sistema WES	
Costo total de la instalación	USD \$ 20252680
Costo total de la instalación por kW	USD \$ 675089/ kW

Tabla 6-8: Costos Total del Sistema WES

La energía anual durante un año tendrá un valor de 131891 kWh y su nivel de COE nominal y real tienen valores negativos de 55,52 kWh y -4247 kWh . Otro valor negativo que encontramos dentro del cuadro es la factura de electricidad con el sistema durante un año tendrá un costo de USD \$-7472 dólares el cual puede que se recupere durante los 3 periodos en un lapso de tiempo 3 años y el capital del Net sea de USD \$201477 dólares con una deuda de USD \$60443 que se recuperarán dentro de estos periodos que se mencionaron con anterioridad.

En los costos del sistema fotovoltaico sus costos están dentro de las categorías rentables de este sistema para hacer la sostenibilidad y el manejo de este en el edificio de la Universidad ECCI, la energía anual que producirá este sistema es de 23999 kWh , lo que da una capacidad de 15,8% y el batería con una eficiencia en la batería en un 89,03% con un nivel de COE nominal de 7,72 kWh y el nivel real de 5,95 kWh con ventajas en la factura de electricidad con sistema y sistema dentro de precios que oscilan entre USD \$28648 y USD \$26646 dólares que será evaluado por USD \$7489 con una deuda total de USD \$14637, lo que confirma que este sistema es sostenible y rentable dentro de los parámetros de energía renovable que se presentarán en el proyecto de energía fotovoltaica.

En el sistema fotovoltaico el valor del costo directo e indirecto tienen valores como el balance del sistema de equipamiento que es de USD \$1000 dólares y el sistema de instalación dentro de USD \$80000 para un total de USD \$36905 dólares teniendo en cuenta la batería, el poder de la batería los módulo y el inversor por unidades con una cantidad de 36 módulos y un inversor como se evidencia en la tabla **6-9**

Costos Directos de Capital

Módulo	36 ud
Inversor	1 ud
Balance del sistema de equipamiento	USD \$ 100000
Labor de instalación	USD \$ 80000
Costo directo total	USD \$ 3690546

Tabla 6-9: Costos Directos del Capital

Los costos indirectos del capital se pueden observar en la tabla **6-10** para el sistema fotovoltaico teniendo en cuenta los estudios de el ambiente la ingeniería que se va a desarrollar que cuesta dentro de USD \$5671 dólares y USD \$3992, con un costo sobre la tierra o el área que se va a usar referente también a la tasa de impuestos este sistema tendría un costo total indirecto de USD \$18473 dólares para la financiación del proyecto fotovoltaico.

Costo Indirecto del Capital

Estudios ambientales	USD \$ 567198
Ingeniería y desarrollo	USD \$ 399283
Costo total indirecto	USD \$ 1847386

Tabla 6-10: Costo Indirecto del Capital

7 Resultados de la Simulación en SAM

Para este Capítulo se presentan los resultados técnicos y económicos que explicarán aspectos fundamentales para el proceso en la implementación de sistemas híbridos en la sede P. Por consiguiente, la simulación realizada en SAM nos muestra una variedad de datos obtenidos a partir de la carga de energía mensual que se ingreso manualmente al software y así los resultados del Sistema de Generación Híbrido en la sede P, descrito en los capítulos precedentes. Se inicia dando los resultados de la simulación con el software SAM del sistema fotovoltaico y después con el sistema eólico.

7.1. Resultados Energéticos

7.1.1. Sistema SFV

En la siguiente tabla 7-1 se muestra el resumen de los resultados técnicos obtenidos por la simulación del sistema fotovoltaico en la sede P, se presenta la energía anual genera del sistema con un valor de 23998kWh, con un factor de capacidad de energía producida de 15,8%, un rendimiento energético de 1388kWh/kW, en el desempeño del sistema se observa un valor correspondiente a 0,68; cabe de resaltar que estos factores que se presentaron anteriormente estarán vigentes durante un periodo de un año, y por último la eficiencia de las baterías es de 89,05% de con una duración estimada de 30 años, tiempo en el cual el sistema cumpliría su vida útil.

Resultados Técnicos Simulación Sistema SFV	
Métrica	Valor
Energía anual (1año)	23998 <i>kWh</i>
Factor de capacidad (1 año)	15,8 %
Rendimiento energético (1año)	1388 <i>kWh/kW</i>
Presentación de radio (1 año)	0,68
Eficiencia de la batería	89,05 %

Tabla 7-1: Resultados Técnicos Simulación Sistema SFV

Producción de Energía Mensual

Esta gráfica **7-1** muestra la producción de energía mensual por año de mes a mes, en contraste con la generación de *kWh*; en ella se observa poca variación de un mes a otro: en los meses desde febrero, marzo, mayo, noviembre y diciembre hay una producción superior de 1500 *kWh*. En los meses de abril, junio, julio, agosto, septiembre, se evidencia que se alcanzó a generar una producción de más de 2000 *kWh*. En el mes de enero se generó una producción de 2500 *kWh* siendo el más alto de energía producida en el año.

Como conclusión, en la gráfica hay una variación de producción de energía del recurso renovable del cual se está tomando, ya que se evidencia que no se mantiene constante en los meses del año, puesto que tiene variaciones que determinan la implementación de este sistema de entrega un porcentaje de producción al sistema y de la misma manera hay retorno para el consumo propio de la sede P.

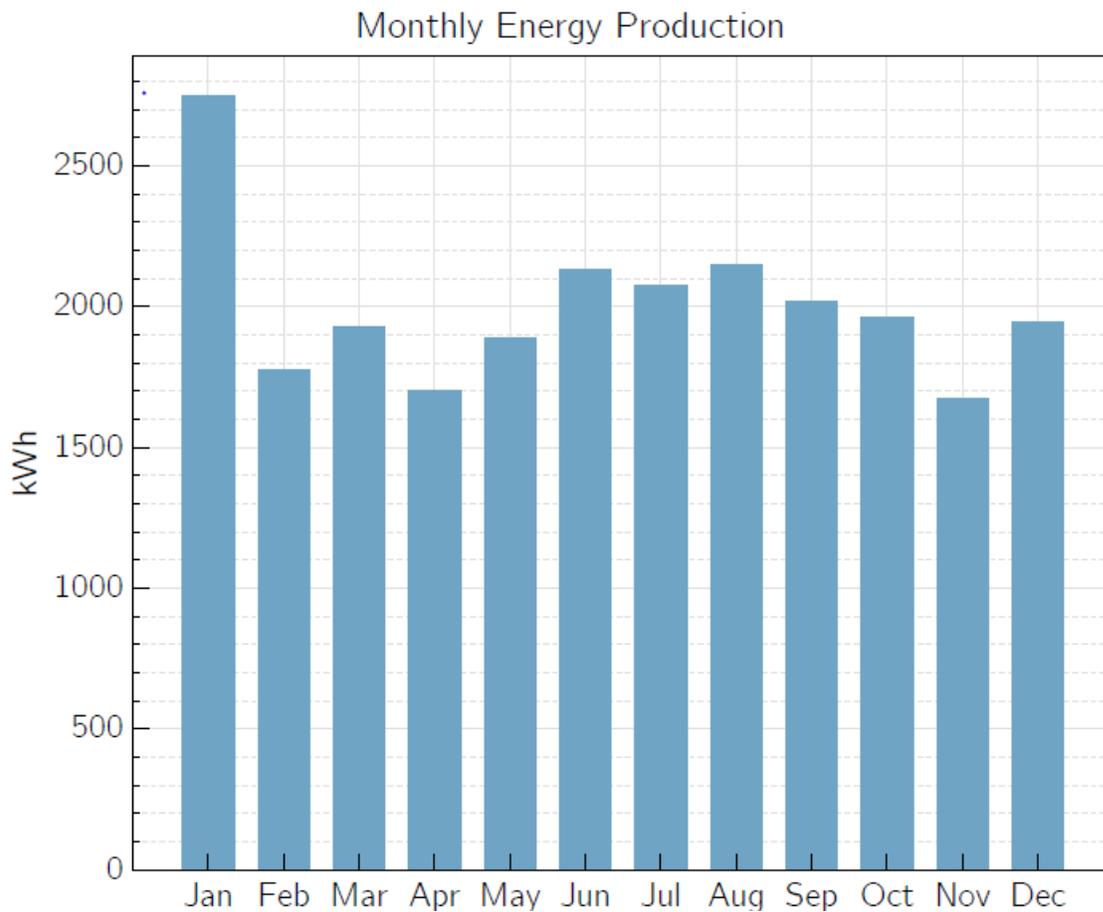


Figura 7-1: Producción de Energía Mensual

Pérdida de Energía

En la figura 7-2 se muestra las pérdidas de energía, en el módulo DC se evidencia un 7% en pérdida con los siguientes factores, el inversor DC MPPT (Maximum Power Point Tracking) con un 2,7% de pérdida, en la potencia del inversor AC con una pérdida de 2,1, en cuanto a eficiencia y carga nocturna del sistema llega a una pérdida de 3,5%, en general en el sistema el que mayor pérdida presenta es el inversor en el cual su porcentaje es el más alto, esto con el fin de su entregar la carga al sistema de la sede P.

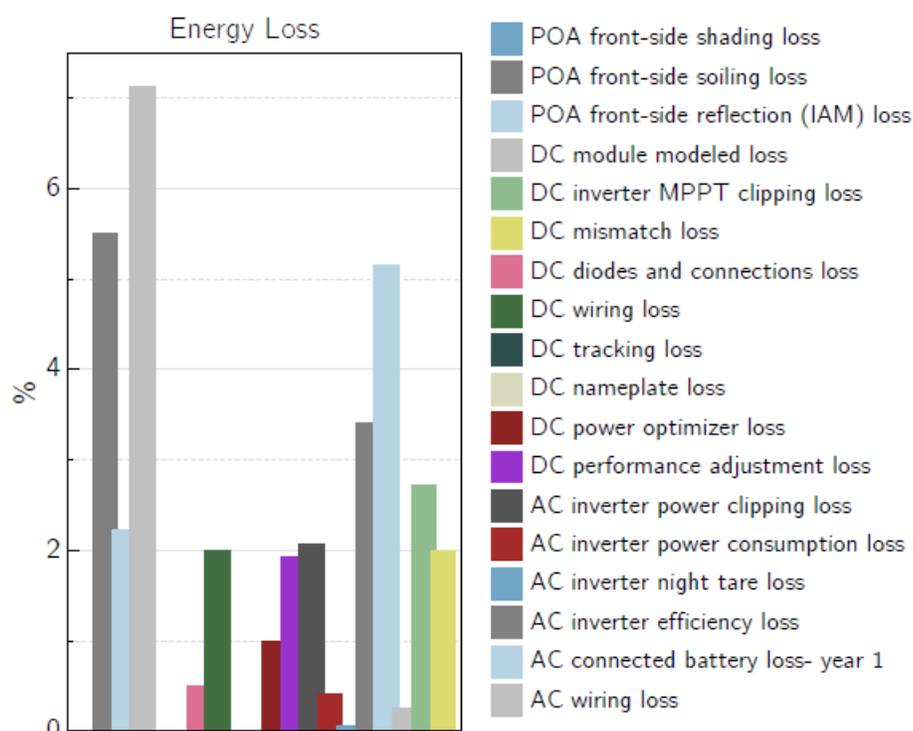


Figura 7-2: Pérdida de Energía

Producción de Energía Anual

En esta gráfica 7-3 se puede evidenciar la energía anual producida la cual está proyectada a 30 años, de uso del sistema obteniendo el primer año una producción superior a los 24000 kWh, y para los 25 años su producción será aproximada unos 22000 kWh, donde se observa la pérdida de producción, debido a que la capacidad de acumulación de energía de las baterías, disminuyen por su funcionamiento realizado durante estos años.

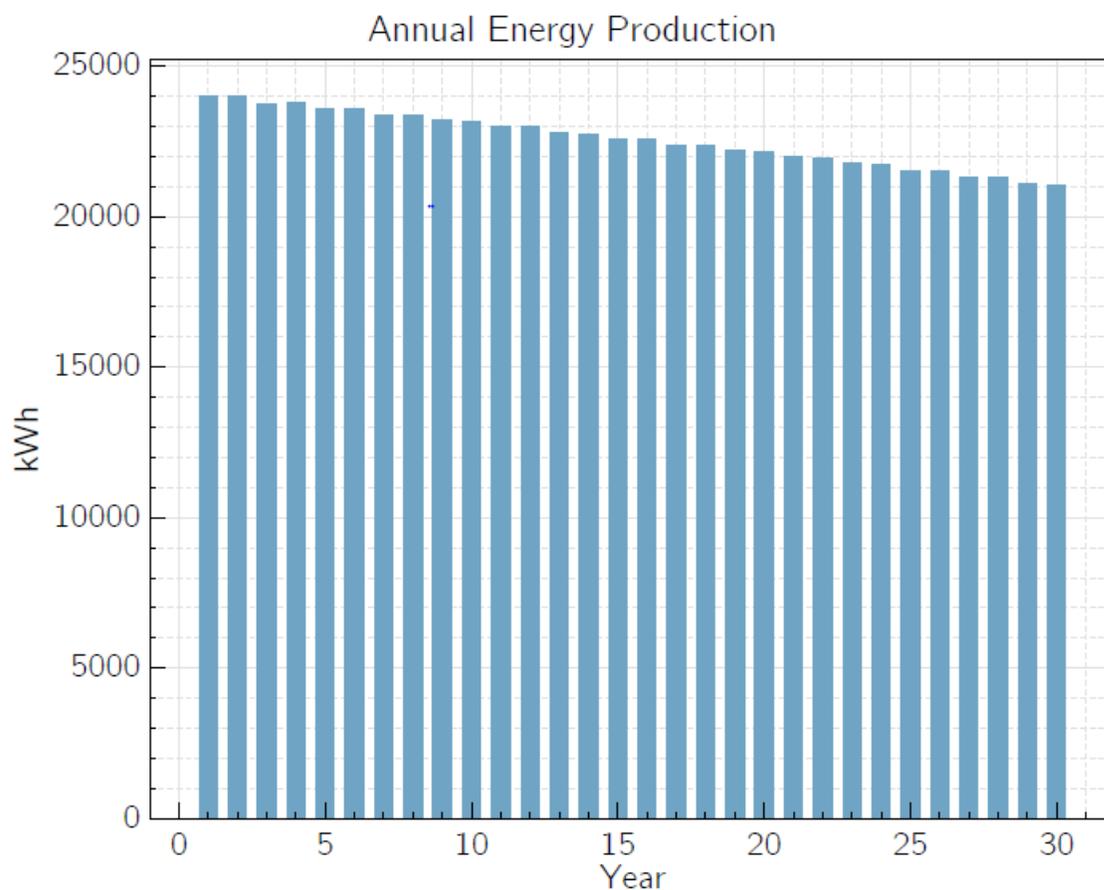


Figura 7-3: Producción de Energía Anual

Potencia Corriente Continua

En esta gráfica 7-4 se muestra la potencia de corriente continuada dada en kW , **para un día promedio del mes correspondiente**, que transforma la energía por los paneles solares, es decir que a partir de la radiación se evidencia la potencia útil que se vuelve energía, en el mes de enero es el más soleado del año 2017, en la cual se evidencia que esta sobre los 13 kW al medio día.

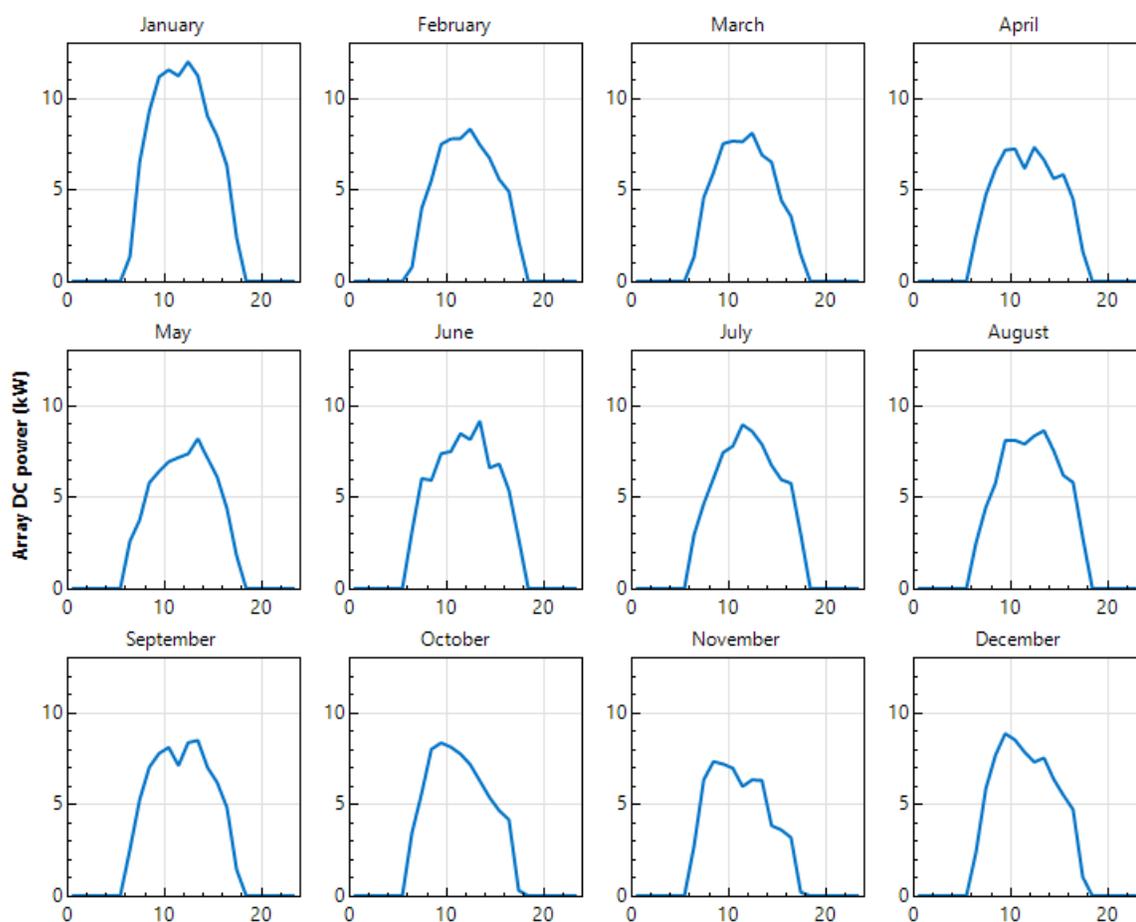


Figura 7-4: Potencia Corriente Continua de los Paneles SFV

Radiación Total Nominal

Radiación total nominal **7-5** de la red que se presenta en kW/h en el sistema, la línea azul que aparece en las gráficas está aprovechando la configuración del sistema, debido a que no se tiene más paneles para poder captar más energía, la línea anaranjada es la radiación incidente que se tiene en el mes sobre los paneles solares, la línea azul transforma la potencia eléctrica. Debido a lo anterior se concluye que la limitación por parte de la área de la terraza de la sede p no permite capturar más potencia por falta de espacio para poder instalar más paneles.

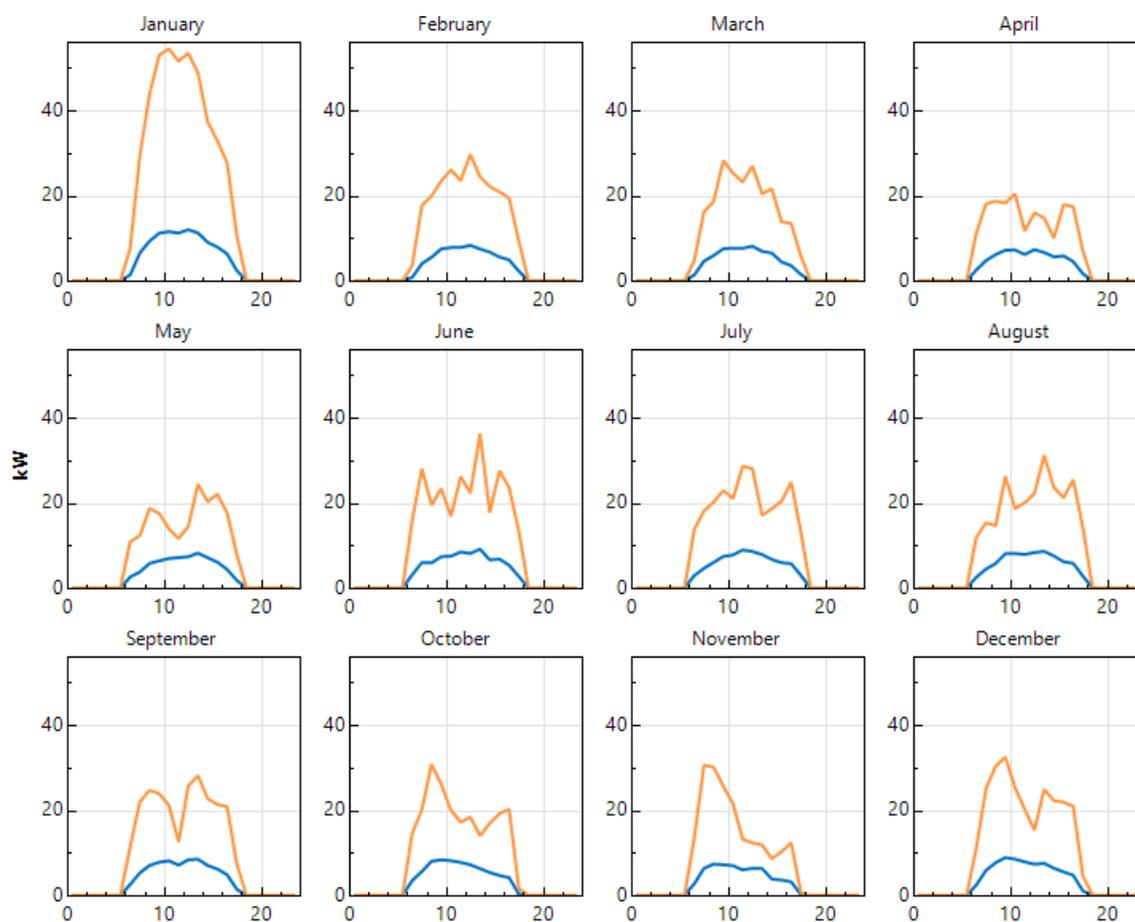


Figura 7-5: Radiación total Nominal

7.1.2. Sistema de Almacenamiento de Baterías

Despacho de Baterías

La electricidad desde las baterías como se observa en **7-6** con el despacho en la sede P, presenta consumo nocturno, a partir de las 9 de la noche se descargan las baterías y después realiza ciclos de carga con energía de la red, de igual manera en la madrugada se cargan y comenzando el día trabajan al mismo tiempo entregando la energía el banco de energía, al momento que empieza a salir el sol , entrega la energía del panel solar con las configuraciones del despacho de las baterías, es de resaltar que al momento que se está de día las baterías no funcionan, que permite a la energía ser suministrada por el sistema, cuando se termina el horario de la luz del día, entran a funcionar entregando su energía, y después llegan a cero para cargar la red eléctrica, por ende se puede tener una reducción en el consumo.

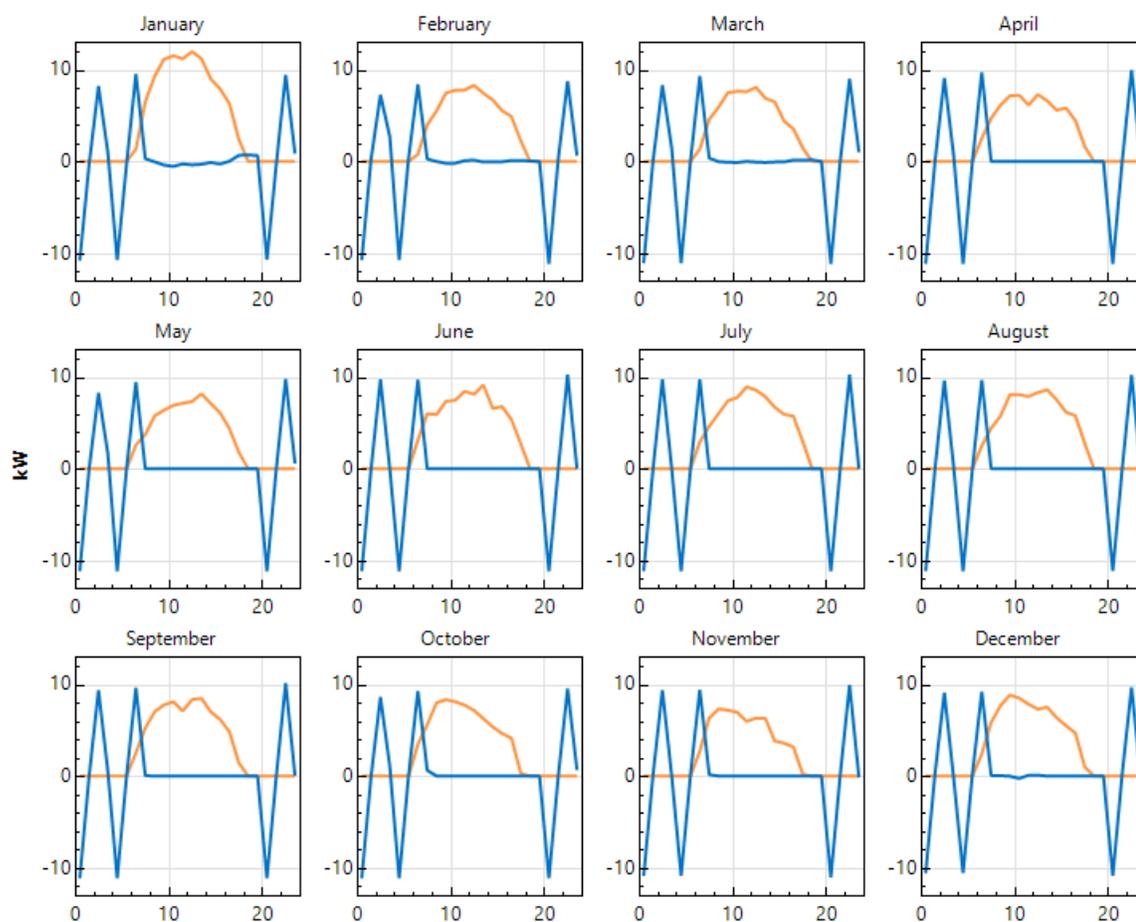


Figura 7-6: Despacho de baterías

Tensión y Corriente de las Baterías

La Tensión y corriente de las baterías se encuentra presente en los picos de corriente en los horarios de la noche según la configuración que se realizó en el despacho con el fin de garantizar una continuidad a lo largo de las 24 horas de energía en el suministro del sistema, en los meses de enero, abril, junio, julio, agosto, septiembre, noviembre y diciembre con una corriente superior a 200A.

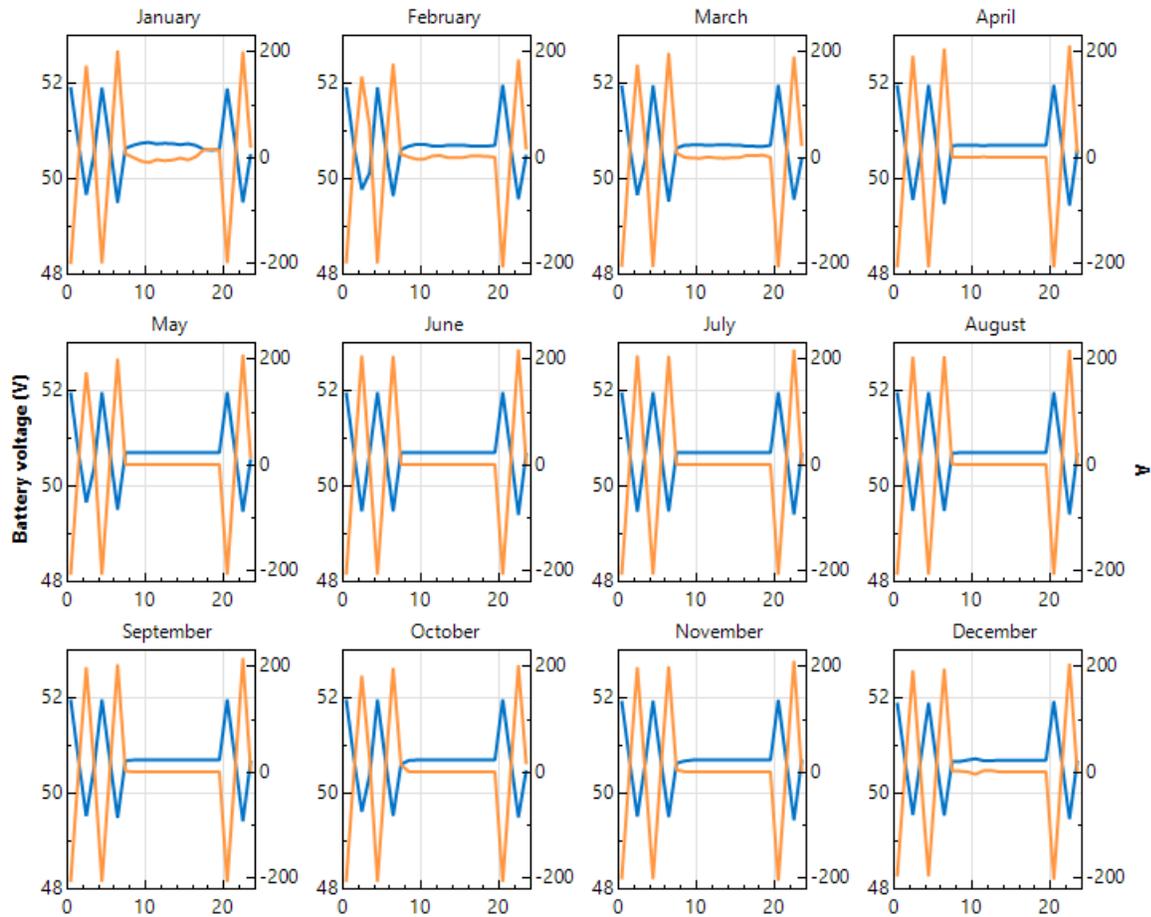


Figura 7-7: Voltaje y Corriente de las Baterías

Electricidad desde las Baterías

La electricidad desde las baterías se muestra en el 7-8 donde el periodo de carga que inicia desde las 12:00 pm hasta las 2:00am aproximadamente y desde las 4:00am hasta las 5:00am y desde la 7:00am hasta las 8:00am para ser utilizadas en el día. Los resultados que arroja la simulación sugiere cambiar el modelo de despacho para optimizar mejor el sistema de las baterías.

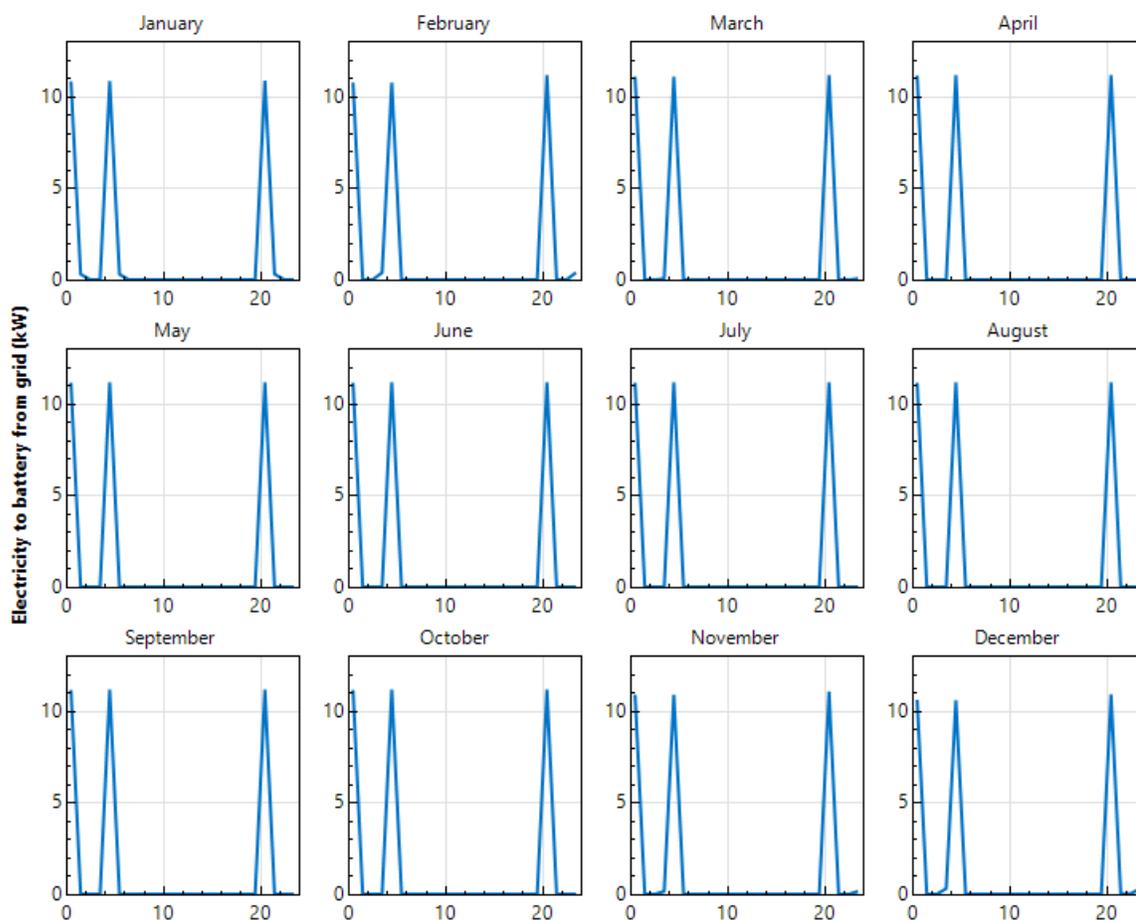


Figura 7-8: Electricidad desde las baterías

7.1.3. Sistema Eólico de Eje Vertical

En la figura 7-2, se muestra los resultados de la simulación del sistema, en la cual según el consumo del mes seleccionado (Junio) que se genera en la sede P, con este valor se verificó cada uno de los componentes tales como tipo de sistema para así especificar cada una de los pasos con el que se realiza el montaje del sistema que se está trabajando; teniendo en cuenta los datos específicos de cada uno de los componentes, obteniendo los siguientes resultados sobre los requerimientos para poder realizar la implementación.

En la simulación se muestra la energía anual producida de 131891 kW-h , la cual es favorable para el consumo que se requiere en la sede P, el factor de capacidad $50,2\%$ del sistema que indica el porcentaje aproximado, factura de electricidad sin sistema USD \$27120, factura de electricidad con sistema de USD \$11294.

Resultados simulación sistema WES

Métrica	Valor
Energía anual (1año)	131891 <i>kWh</i>
Factor de capacidad (1 año)	50,2 %
Costo Nivelizado de Energía (nominal)	-55,52 ¢/ <i>kWh</i>
Costo Nivelizado de Energía (real)	-42,47 ¢/ <i>kWh</i>

Tabla 7-2: Resultados simulación sistema WES

7.1.4. Sistema de Energía Solar

En la siguiente tabla se presenta tan los resultados de la simulación del sistema fotovoltaico, que toma el mes seleccionado que en este caso es el mes de junio, donde se verificaron las características para poder especificar el montaje de la instalación con datos específicos para realizarla implementación de la simulación en el programa SAM.

En la tabla **7-3** se observa la energía producida de 23998 *kWh*, para el consumo de la sede P, el factor de capacidad de 15,8 %, costo nivelizado de energía nominal de 7,2 *kWh* y costo nivelizado de energía real, obteniendo como costo de factura con sistema de USD \$ 26440, factura sin sistema de USD \$28327.

Resultados simulación del sistema solar fotovoltaico

Métrica	Valor
Energía anual (1año)	23998 <i>kWh</i>
Factor de capacidad (1 año)	15,8 %
Costo Nivelizado de Energía (nominal)	7,72 ¢/ <i>kWh</i>
Costo Nivelizado de Energía (real)	5,95 ¢/ <i>kWh</i>

Tabla 7-3: Resultados simulación del sistema solar fotovoltaico

Producción de Energía Mensual

Para la gráfica 7-9 muestra la producción de energía mensual del año donde se observa cómo mes a mes se obtiene diferentes valores con la generación de kWh .

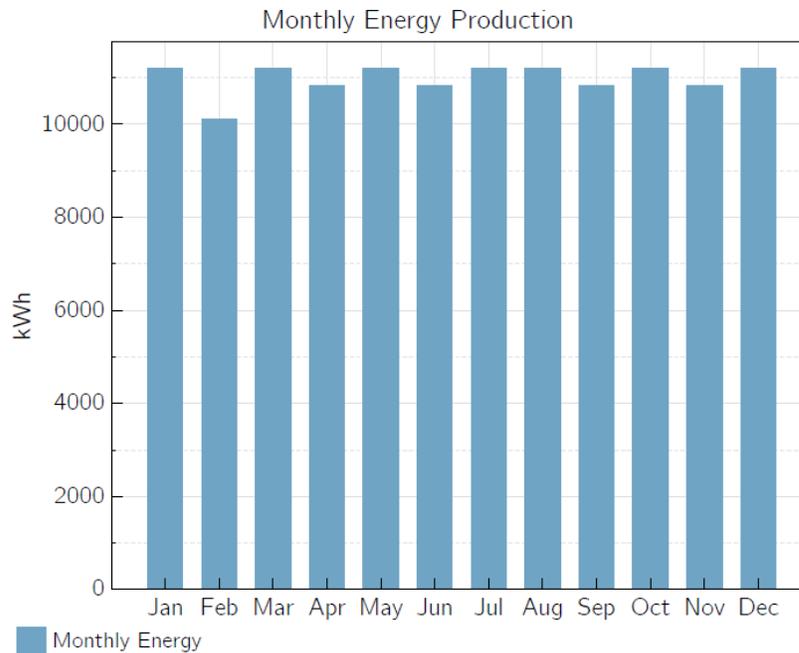


Figura 7-9: Producción de Energía Mensual

Se resalta la poca variación de un mes a otro. En los meses desde enero, marzo, mayo, julio, agosto, octubre y diciembre se presenta una producción superior de $11500 kWh$ que significa un mayor consumo.

En los meses de abril, junio, septiembre y noviembre se evidencia una producción alrededor de $10900 kWh$. Como conclusión, en la gráfica se muestra una variación de producción en la energía del recurso eólico renovable ya que se evidencia que su flujo de viento no es constante puesto que en meses como julio, agosto y septiembre son meses de invierno en el año, puesto que tiene variaciones que determinan la implementación de este sistema de entrega un porcentaje de producción al sistema.

Pérdidas de Energía

En esta gráfica 7-10 se muestra los diferentes tipos de pérdidas del sistema eólico dados en porcentajes.

Se puede evidenciar que la barra de color muestra una pérdida del 5,5 %, la cual corresponde a la disponibilidad de perdida en el sistema, en el barra de color gris oscuro se evidencia una pérdida de 2 %, la cual esta corresponde a la electricidad perdida del sistema, en la siguiente barra de color azul claro, se evidencia la perdida ambiental de 2,6 % de igual manera se observa la pérdida operacional del sistema la cual es de 2,9 %,

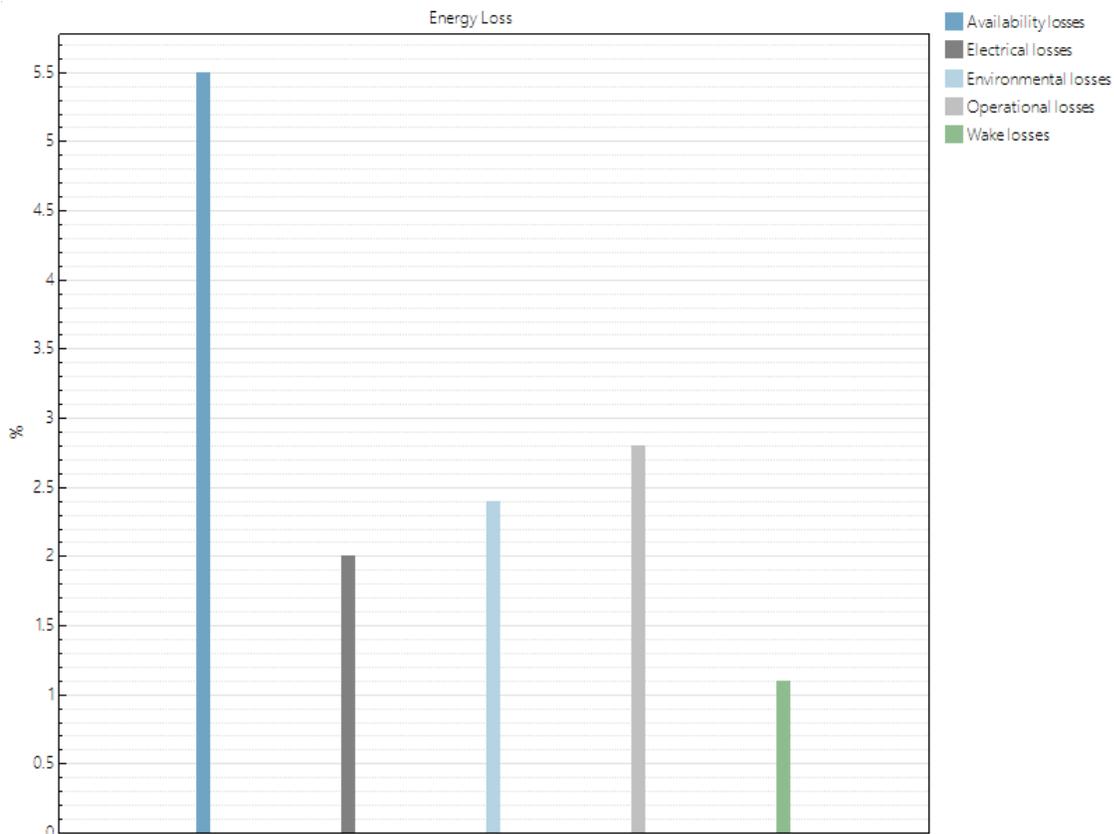


Figura 7-10: Pérdidas de Energía del Sistema de Energía Eólico

Por último tenemos la perdida que corresponde al despertar debido a que las turbinas para volverá realizar su proceso de generar energía, la turbulencia crea una distancia en la dirección del viento que minimiza el impacto en la capacidad de producción.

Producción de Energía Anual

En la gráfica 7-11 se puede evidenciar la energía anual producida la cual está proyectada a 30 años de uso del sistema se obteniendo en el primer año una producción de energía superior a los 131000 *kWh*.

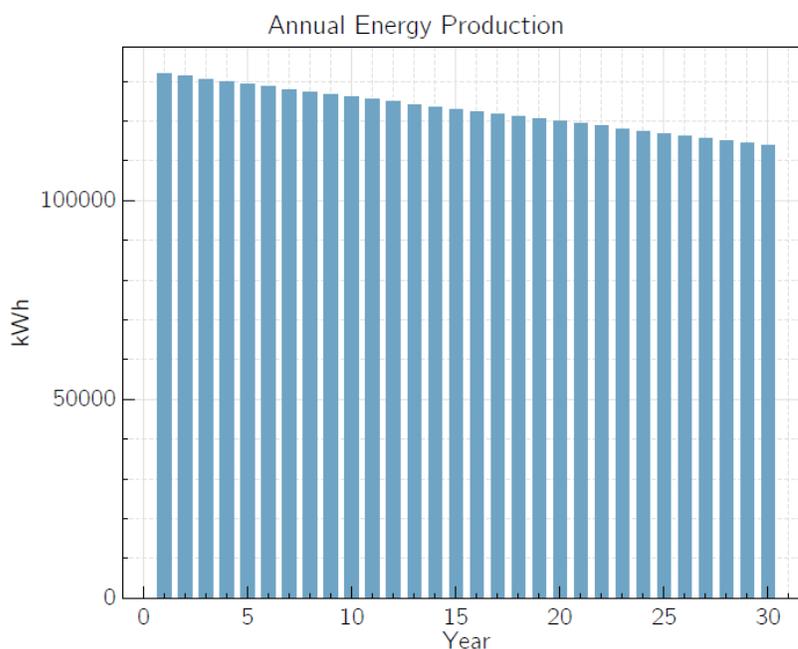


Figura 7-11: Energía Anual del Sistema Eólico

Su disminución de producción se observa en el año 20 donde de ahí en adelante disminuyó su producción para los 30 años se puede notar que la pérdida de producción en el lapso de tiempo es entre una variable de 114000 *kWh* eso indica que puede llegar a ser un 10% de su vida útil del sistema.

Promedio Mensual Electricidad

Se puede ver en la Figura 7-12 el comportamiento hora a hora a lo largo de un día promedio del mes.

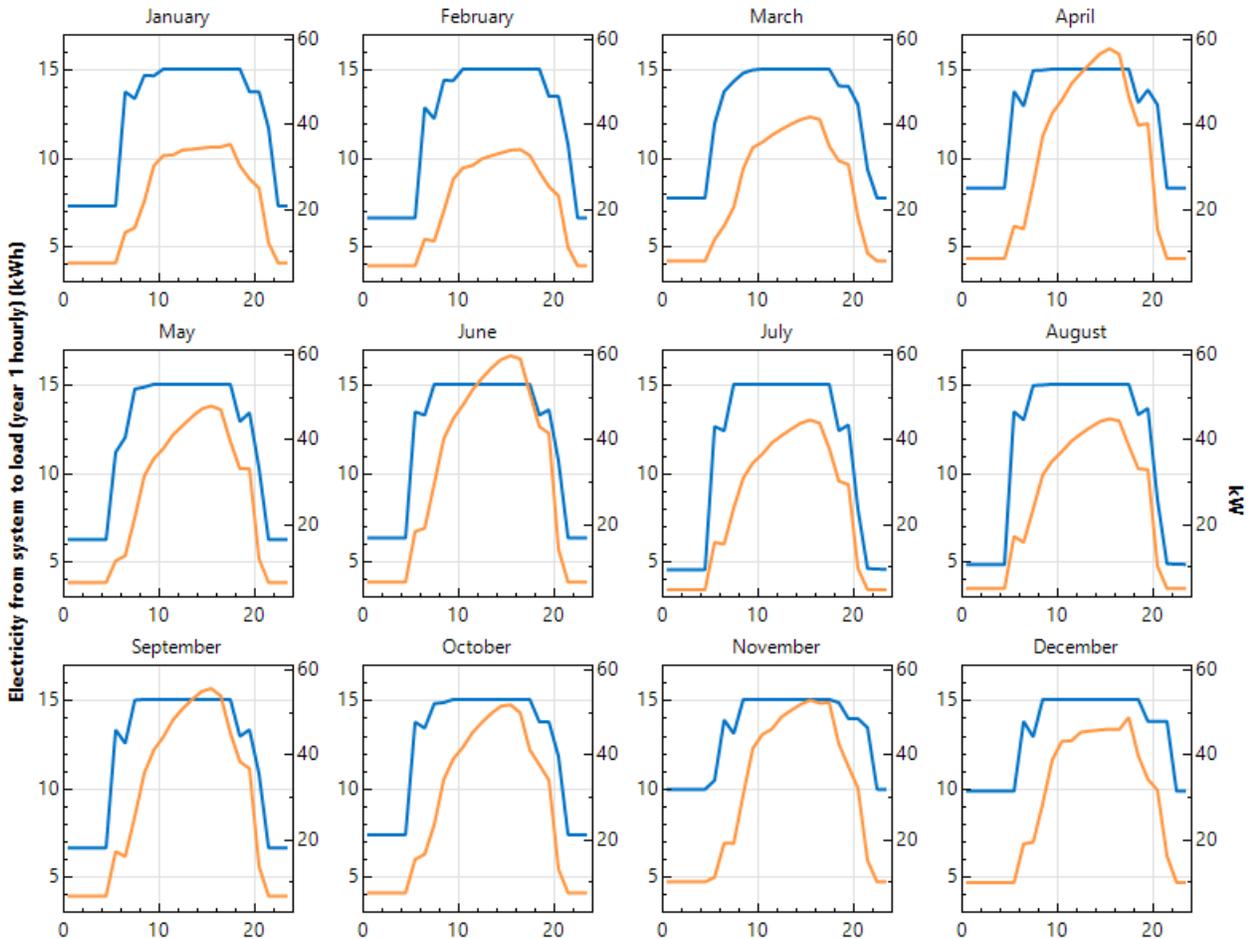


Figura 7-12: Promedio Mensual de Electricidad

Esta gráfica muestra el promedio mensual, la línea anaranjada representa la carga eléctrica del sistema con mayor pico de kWh en los meses de abril, junio, septiembre y noviembre con la electricidad del sistema hacia la carga. la línea azul representa la electricidad del sistema hacia la carga la cual se mantiene en $15kWh$.

Electricidad desde la Red vs la Carga Eléctrica

La electricidad desde la red versus la carga eléctrica, como se presenta en **7-13**

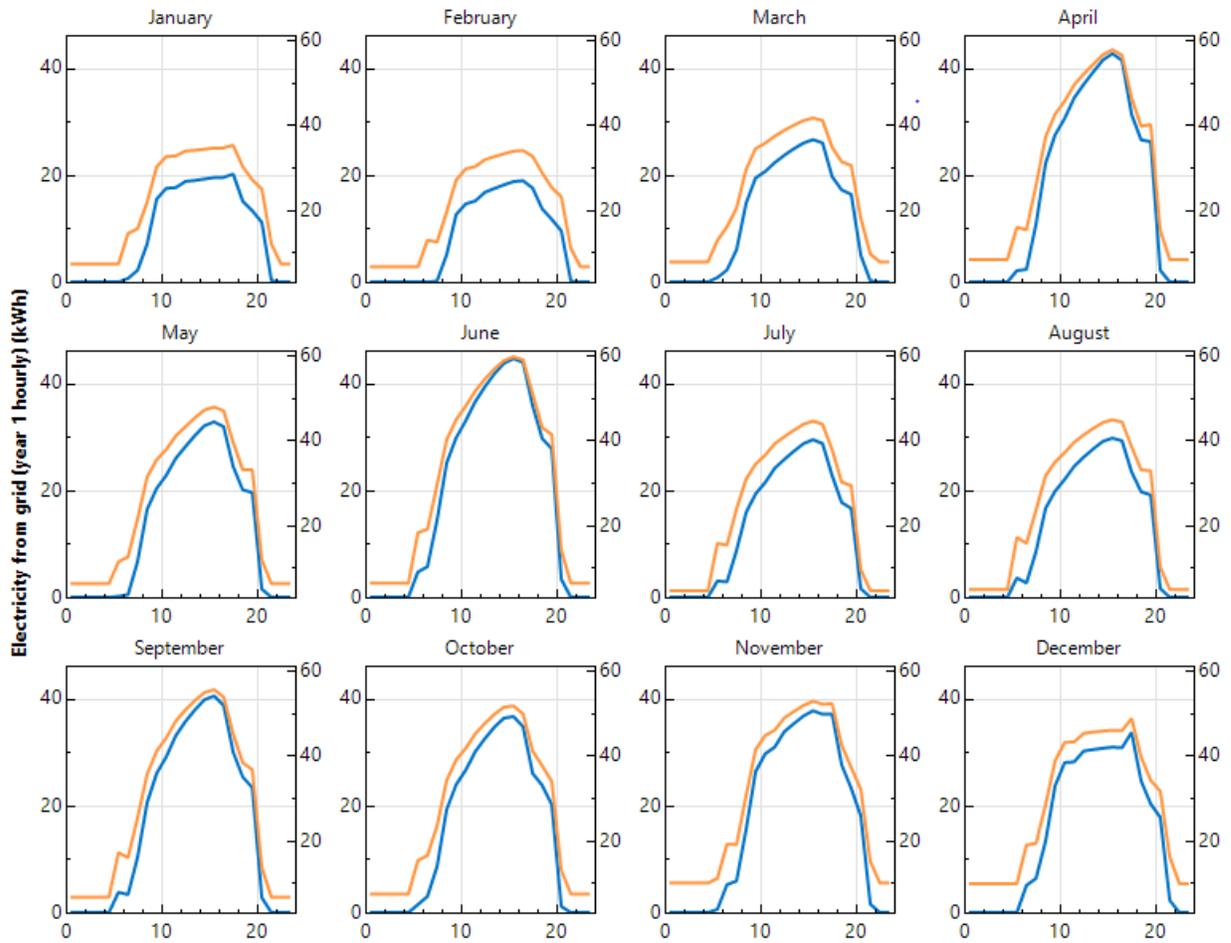


Figura 7-13: Electricidad desde la Red vs la Carga Eléctrica

La carga eléctrica es representada con la línea naranja que se tendrá durante el periodo de un año, con meses predominantes como abril, junio, septiembre y octubre tuvieron carga eléctrica entre los $60kW$ y $40 kW$; la línea azul representa la electricidad desde la red durante un año por horas, en la cual se presenta una similitud de electricidad con carga en los meses indicados anteriormente.

Facturación de Carga

En la gráfica **7-14** se presenta el consumo de energía al año, en la cual se observa el crecimiento en los meses de abril, junio, septiembre, octubre, noviembre, diciembre este crecimiento

es inferior a los 60 kWh , con una carga mayor en los meses de abril y junio obteniendo alrededor de 58 kWh .

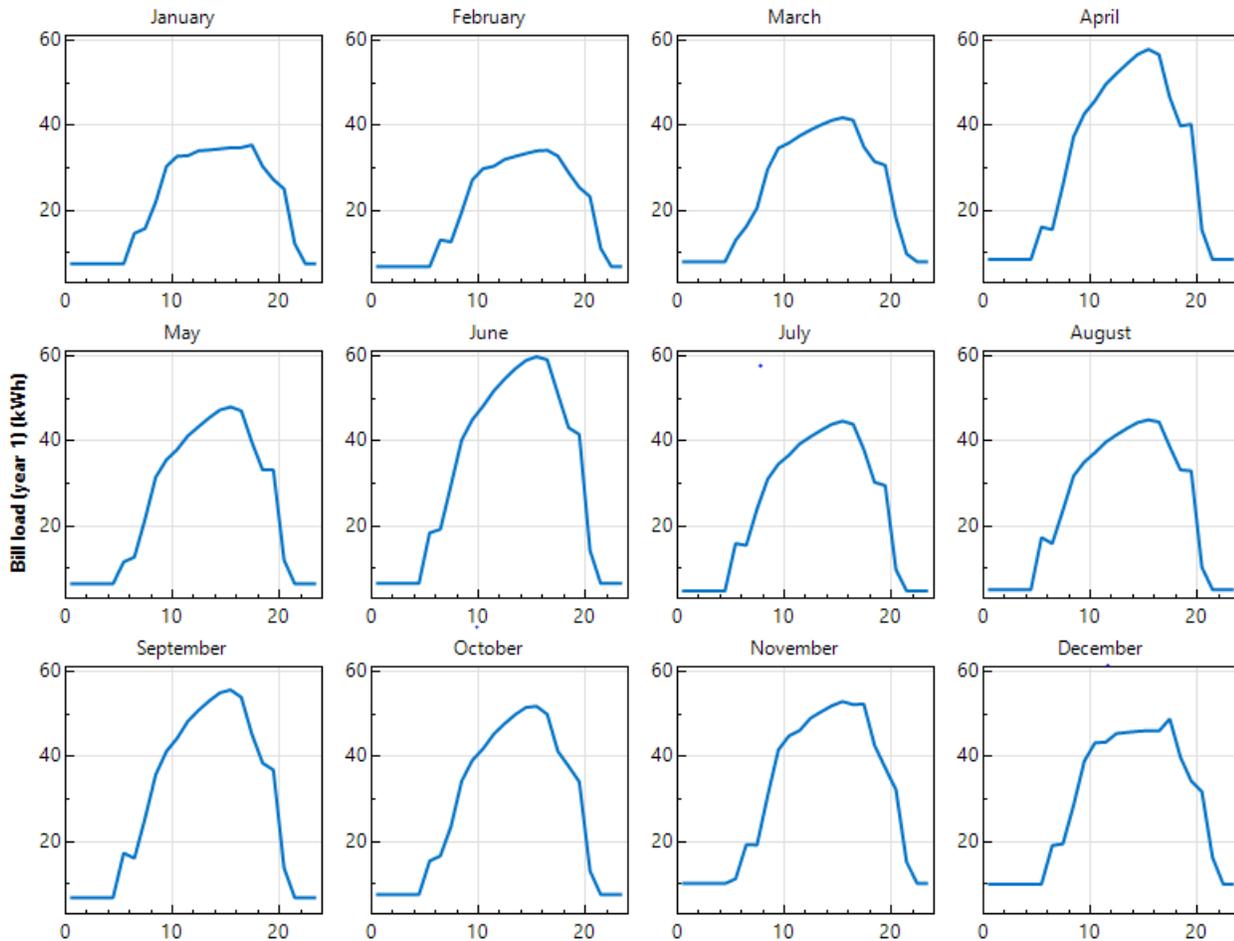


Figura 7-14: Factura de Carga

7.1.5. Producción Total De Energía del Sistema Híbrido de la Sede P

Esta es la energía producida por cada sistema (WES, SFV y BES) en kWh a lo largo de la vida del proyecto. Una distribución anual se representa en la figura 7-15. En la figura 7-15, La cantidad total de energía generada por el HRES es la energía anual en $kWh/año$ y el ahorro anual de energía $kWh/año$ del proyecto.

La energía total generada por HRES se analiza a lo largo del trigésimo año. La energía SFV y BES en kWh se mantiene estable durante el ciclo de vida del proyecto, mientras que la energía generada por WES disminuye de 130000 kWh a 121000 kWh , debido a la relación de degradación de los componentes.

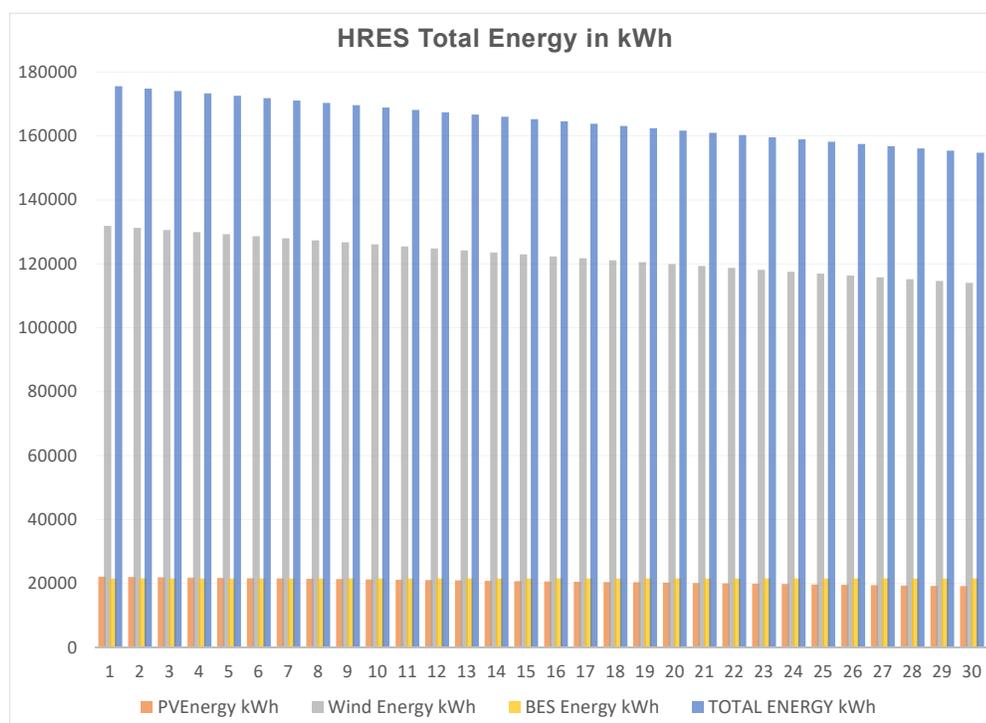


Figura 7-15: Energía total generada por HRES en kWh a lo largo de 30 años

El valor final de energía total disminuye hasta los 160000 kWh/h .

7.2. Resultados Económicos

A continuación se presentan dos factores económicos importantes para comprender el rendimiento y la viabilidad de HRES a lo largo de la vida útil del proyecto, estos son el pago de la deuda y los intereses y el costo nivelado de energía (LCOE) [21].

7.2.1. Sistema Eólico

La tabla 7-4 muestra el resumen de los resultados económicos obtenidos al momento de realizar la simulación del sistema eólico en la sede P, se presenta un factura eléctrica sin sistema de con un valor de USD \$27120, de igual manera una factura eléctrica con sistema con valor de USD \$11294, un ahorro neto de USD \$ 15827 con el sistema en un periodo de un año, y como valor diferenciador con entradas de efectivo de USD \$1018318 que representa un

costo capital de USD \$201477, y una deuda de USD \$60443 con un periodo de recuperación de un año y 4 meses con descuento de devolución simple.

Resultados Económicos Simulación WES

Factura de electricidad sin sistema (1 año)	USD \$27120
Factura de electricidad con sistema (1 año)	USD \$11294
Ahorro neto con sistema (1 año)	USD \$15827
Valor presente neto	USD \$1018318
Costo capital neto	USD \$201477
Equidad	USD \$141034
Deuda	USD \$60443

Tabla 7-4: Resultados Económicos Simulación WES

Pago de Capital y de Intereses

En la figura 7-17 se muestra como se pierde el primer año, los próximos 15 años el proyecto se pagará con la energía generada y en el año 15 al año 30 tendrá nuevos valores económicos.

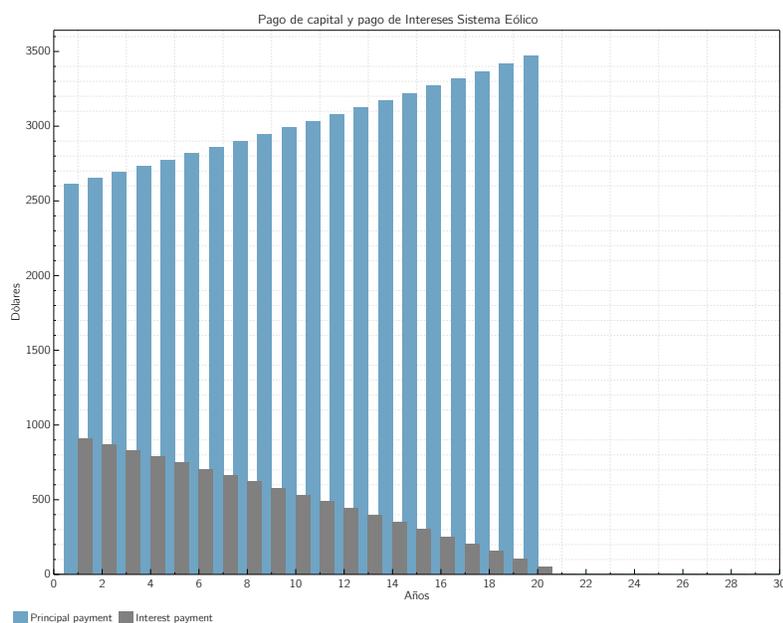


Figura 7-16: Pago de la Deuda y los Intereses para el Sistema Eólico

El costo de energía nominal nivelado de WES después de la vida útil del sistema de flujo de efectivo. Después de impuestos para comprender el rendimiento de HRES y la viabilidad a lo largo de la vida útil del proyecto, en el año cero se considera como perdida, pero después

de los 15 años siguientes en un periodo de 30 años con valores a 150.000 COP en flujo de caja.

En la figura **7-16** se muestra el costo capital del sistema que es representado dentro de la gráfica con barras azules y de igual manera los intereses que están representados con barras grises; en el pago de los intereses para el primer año se obtiene un pago de USD \$ 900, que va disminuyendo a partir del segundo año con un aproximado de USD \$ 850, hasta llegar al año 20 con un pago de intereses de USD \$ 70. El pago del capital del sistema eólico empieza con un total de USD \$ 2600 en la cual va aumentando a partir del segundo año, hasta llegaren el año con un pago total de USD \$ 3480, reflejando las ganancias en el año 12, consolidándolo como un sistema de energía sostenible.

7.2.2. Sistema SFV y Baterías

La Tabla **7-5** muestra el resumen de los resultados económicos obtenidos al momento de realizar la simulación del sistema fotovoltaico en la sede P, con las siguientes características y valores, factura eléctrica sin sistema tiene un valor de USD \$28327, la factura eléctrica con sistema con un valor de USD \$26440, con un ahorro neto del sistema de USD \$1887, de acuerdo con los valores anteriores la duración de cada uno de los resultados tiene como previsto una duración de 1 año. El valor presente neto es de USD \$6536, con un costo capital neto de USD \$48791, al igual se tiene una equidad de USD \$34154, y por ultimo una deuda de USD \$14637, en el cual tiene un periodo simple de devolución de un año y 9 meses, esto es de acuerdo con los resultados obtenidos en la simulación.

Resultados Económicos Simulación SFV	
Factura eléctrica sin sistema (1 año)	USD \$28327
Factura eléctrica con sistema (1 año)	USD \$26440
Ahorro neto con sistema (1 año)	USD \$1887
Valor presente neto	USD \$6536
Costo capital neto	USD \$48791
Equidad	USD \$34154
Deuda	USD \$14637

Tabla 7-5: Resultados Económicos Simulación SFV

Pago de la Deuda y los Intereses para el Sistema SFV

En la gráfica **7-17** se muestra el pago de capital que está representada en las barras de color azul, y el pago de intereses del sistema solar fotovoltaico representado con las barras de color gris, el pago de capital tiene un valor principal de USD \$ 780 a partir del primer año y en

aumento hasta en el año 20, con un total de USD \$ 880. El pago de intereses tiene un valor inicial de USD \$ 210 que disminuye a partir del tercer año hasta el año 20, con un total de USD \$ 25 con un pago total de la deuda del mismo año.

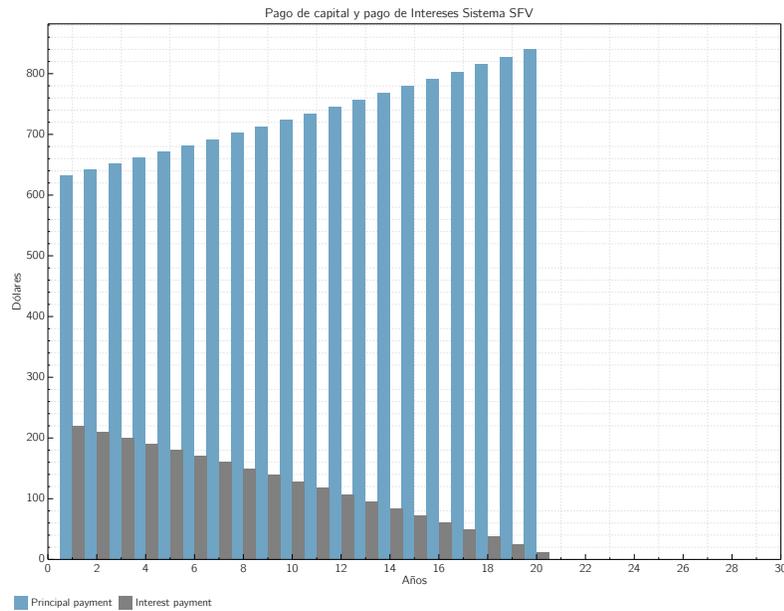


Figura 7-17: Pago de la Deuda y los Intereses para el Sistema SFV

8 Conclusiones y Trabajo Futuro

8.1. Conclusiones

- En el presente trabajo se expuso una simulación tecno-económica de un sistema híbrido de energía renovable (HRES) mediante la utilización de un software de simulación denominado SAM (System Advisor Model), el cual permite realizar una simulación real a partir del perfil meteorológico de la ubicación elegida, que para este caso en particular es la ciudad de Bogotá D.C, el cual a partir de este escenario de ubicación, accede a las condiciones climáticas y la disponibilidad de recursos para la generación de la simulación, arrojando las características técnicas, económicas y el modelado estadístico de cada uno de los sistemas, así como también trabaja con datos reales como el costo, características técnicas y físicas de cada uno de los principales componentes de los sistemas planteados (eólico, solar fotovoltaico y banco de baterías), como lo son las turbinas eólicas, los paneles solares, el inversor del sistema fotovoltaico y las baterías del banco para la simulación de cada sistema.
- Se muestran aspectos económicos como el costo nivelado de energía, los períodos de recuperación simples, costo de capital neto y valores actuales. Todos los precios se justifican de acuerdo con los procedimientos técnicos y los datos oficiales para lograr un escenario de simulación realista que haga posible un marco de referencia de prefactibilidad para este tipo de proyectos que buscan una posible certificación LEED para un edificio educativo con un perfil conocido de carga eléctrica.
- Para la elección de la ubicación de los sistemas planteados en el proyecto, se eligió la sede P, que es uno de los edificios más modernos de la Universidad ECCI, el cual permite adaptar los sistemas de energía renovable debido a su infraestructura y permite la adaptación para una conversión a ser un edificio con características LEED. El área elegida es la terraza del edificio en mención, esta tiene un área total de $55m^2$ que permite la distribución de los diferentes componentes de los sistemas eólico, fotovoltaico y el banco de baterías a través de su estructura; adicional, se aprovecha la altura del edificio para la ubicación de las turbinas eólicas, ya que a mayor altura del edificio la velocidad del viento es mayor.
- Para la caracterización del sistema de energía renovable que se simuló en SAM, se parte inicialmente del conocimiento del consumo de carga eléctrica que requiere la sede P, los

cálculos fueron descritos en el Capítulo 2, los cuales fueron ingresados en el software de simulación para la caracterización de cada uno de los sistemas, el valor tomado como el de referencia es el del mes de Junio del año 2017, donde se encontró mayor consumo y así la potencia máxima que debe suministrar el HRES para que edificio pueda funcionar. El sistema de energía eólica tiene 30 kW de potencia nominal, en CA, el sistema fotovoltaico solar tiene una potencia de 12 kW de CA, el almacenamiento de energía de la baterías tiene 12 kW . Se tiene entonces una potencia total de 54 kW , que básicamente está limitada por las áreas disponibles elegidas para instalar estos sistemas en la estructura del edificio de la Sede P.

- Los costos del sistema fotovoltaico, están dentro de las categorías rentables de este sistema para hacer la sostenibilidad y el manejo en el edificio de la Universidad ECCI, la energía anual que producirá este sistema es de 23999 kWh , lo que da una capacidad de 15,8%; según los resultados, la producción no es constante a lo largo del año, sino que depende de los meses más soleados del año. A lo largo de la vida útil del sistema se disminuye la producción debido a que la capacidad de acumulación de energía de las baterías y los paneles SFV disminuye por su funcionamiento durante los años posteriores. Los resultados económicos indican que la reducción del costo en la factura es de USD \$ 1887 indicando que el periodo simple de devolución es de un año y 9 meses.
- Para los costos del sistema eólico, se encuentra que el costo de una turbina es aproximadamente de USD \$ 0,56 por kW y el balance del sistema es de USD \$ 7950 por kW ; el total de costos para el sistema es de USD \$ 31010, con un total instalación de USD \$ 202526 y el costo de instalación por kW es de USD \$ 6750 por kW ; a diferencia del sistema fotovoltaico, la producción mensual de energía a lo largo del año es más estable aunque existen meses de vientos más fuertes que otros. Según la simulación obtenida en el primer año de implementación del sistema eólico, se obtuvo una producción superior a los 131000 kWh y a partir del año 20 se observa una disminución en la producción por la vida útil de los equipos que constituyen el sistema. El ahorro de la factura eléctrica con sistema es de un valor de USD \$ 11294, lo que conlleva a un ahorro neto de USD \$ 15827 con el sistema en un periodo de un año, y como valor diferenciador con entradas de efectivo de USD \$ 1018318 que representa un costo capital de USD \$ 201477, y una deuda de 60443 con un periodo de recuperación de un año y 4 meses.
- El sistema de baterías, cuenta con una eficiencia del 89,03% con un LCOE nominal de 7,72 kWh y un LCOE real de 5,95 kWh ; en costos totales instalados equivale a USD \$ 5537931 lo que genera un costo de USD \$ 3,20 por W_{DC}

8.2. Trabajos Futuros

- Implementación de un manual de SAM, como ayuda para el uso del software y determinar usos y aplicaciones para futuras simulaciones de proyectos, debido a que es un programa muy completo para realizar montajes de sistemas de energías renovables.
- Como futuro trabajo se podría realizar una reestructuración o mejoramiento en el despacho de las baterías del sistema del banco de baterías, para una mejor optimización en el momento de que se realiza la carga y la descarga de esta misma.
- Realizar una reestructuración o adecuación en la estructura de la sede para poder instalar estos sistemas, dado que en el momento que se estaba realizando el levantamiento de los planos se evidencia que el piso de la sortea es de drywall, por ende, el peso de estos sistemas podría llegar afectar este techo.

Bibliografía

- [1] W. S. Technologies, “Sistema híbrido de energías renovables.” url <https://www.windstream-inc.com/resources/why-hybrid/>.
- [2] J. S. Solís-Chaves, *Controle Preditivo Generalizado com Horizonte Deslizante e Controle Direto de Potência Deadbeat Aplicados em Sistemas Eólicos Baseados no Gerador de Indução de Rotor Bobinado*. PhD thesis, Universidade Federal do ABC, 2017.
- [3] J. T. Pinho and M. A. Galdino, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. CEPEL – CRESESB, 2014.
- [4] D. L. Covarrubias, *Manual práctico de iluminación*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Facultad de Arquitectura, Diseño y . . . , 2018.
- [5] M. Sengupta, A. Habte, S. Kurtz, A. Dobos, S. Wilbert, E. Lorenz, T. Stoffel, D. Renné, C. A. Gueymard, D. Myers, *et al.*, “Best practices handbook for the collection and use of solar resource data for solar energy applications,” 2015.
- [6] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Elsevier Inc., 2014.
- [7] K. Energy, “Panel solar.” url <https://es-la.facebook.com/PanelesSolaresKDS/posts/conoce-las-partes-que-componen-un-panel-solar-cada-una-es-imprescindible-para-su/1859390450796883/>.
- [8] L. Quevedo, J. S. Morales, and C. Cabral, “Resonant investor in spwm switching, used for a solar photovoltaic installation connected to the network,” *Brazil*, pp. 3–7, 2015.
- [9] P. Gillman, *SAM Photovoltaic Model Technical Reference*. National Renewable Energy Laboratory - NREL, U.S. Department Of Energy, 1 ed., 05 2015.
- [10] Akuval, “Baterías gel PV bloc powersafe enersys,” 2019.
- [11] D. Linden, *Linden’s Handbook of Batteries*. Mc Graw Hill, 4 ed., 2012.
- [12] NREL - National Renewable Energy Laboratory, *Manual Release SAM Version 2018.11*. Alliance for Sustainable Energy, LLC, U.S. Department Of Energy, 1 ed., 11 2018.
- [13] R. Perez, P. Ineichen, M. Kmiecik, K. Moore, D. Renne, and R. George, “Producing satellite-derived irradiances in complex arid terrain,” *Solar Energy*, vol. 77, no. 4, pp. 367 – 371, 2004. The American Solar Energy Society’s Solar 2003 Special Issue.
- [14] A. Thorne, B. Mark, and T. Parnell, *Renewable energy sources for buildings*, vol. 38.

- Chartered Institution of Building Services Engineers, 2006.
- [15] S. H. Obata, F. Agostinho, C. M. Almeida, and B. F. Giannetti, “Leed certification as booster for sustainable buildings: Insights for a brazilian context,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 145, pp. 170 – 178, 2019.
- [16] C. W. Gellings, *Saving Energy and Reducing CO2 Emissions with Electricity Lighting for High Performance Buildings*. The Fairmont Press, 2011.
- [17] Y. Zou, “Certifying green buildings in china: Leed vs. 3-star,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 208, pp. 880 – 888, 2019.
- [18] J. Lian, Y. Zhang, C. Ma, Y. Yang, and E. Chaima, “A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems,” *Energy Conversion and Management*, vol. 199, p. 112027, 2019.
- [19] Ministerio de Minas y Energía (MME), “Official site.” web, 11 2019.
- [20] Energy Information Administration, *Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants*. U.S. Department of Energy Washington, DC 20585, 2016.
- [21] W. Short, D. J. Packey, and T. Holt, *A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies*. National Renewable Energy Laboratory - NREL, U.S. Department Of Energy, 1 ed., 03 1995.
- [22] NREL, “National solar radiation database.” web, 11 2019.
- [23] E. A. G. Pesca and G. F. T. Ardila, “Análisis aerodinámico de una microturbina eólica de eje vertical para la generación de energía eléctrica en una zona urbana de bogotá, colombia,” Master’s thesis, Universidad Libre, Facultad de Ingeniería Mecánica, 2004.
- [24] L. F. Villamarán Guerrero, M. A. Mayorga Betancourt, M. A.-a. C. Amaris Mendoza, M. Herrera Martínez, and D. R. Sánchez Tachack, “Evaluation of the Microlocal Wind Power Potential for the Operation of a University Wind Turbine,” *Tecciencia*, vol. 12, pp. 1 – 8, 12 2017.
- [25] P. Veers, K. Dykes, and et. al, “Grand challenges in the science of wind energy,” *Science*, vol. 366, no. 6464, 2019.
- [26] D. .M, “Turbinas eólicas de eje vertical: historia, tecnología y aplicaciones,” Master’s thesis, 2010.
- [27] J. Freeman, J. Jorgenson, P. Gilman, and T. Ferguson, *Reference Manual for the System Advisor Model’s Wind Power Performance Model*. National Renewable Energy Laboratory - NREL, U.S. Department Of Energy, 1 ed., 08 2014.
- [28] G. Johnson, *Wind Energy Systems*. Manhattan, 2001.
- [29] IDEAM, “Radiación solar.” url <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar>.

-
- [30] G. Tiwari, A. Tiwari, *et al.*, “Handbook of solar energy,” *Singapore: Springer*, 2017.
- [31] R. Perez, P. Ineichen, K. Moore, M. Kmiecik, C. Chain, R. George, and F. Vignola, “A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation,” *Solar Energy*, vol. 73, no. 5, pp. 307 – 317, 2002.
- [32] J. Kleissl, *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*. 2013.
- [33] C. o. d. i. telecomunicación, “Energía solar fotovoltaica,” tech. rep., 2007.
- [34] M. D. Archer and H. R., *Clean Electricity from Fotovoltaics*, vol. 1 of *Series on Photo-conversion of Solar Energy*. Imperial College Press, 2001.
- [35] F. André, L. Lejarriaga, and E. Cerdá, “Las energías renovables en el ámbito internacional,” *Cuadernos Económicos ICE*, no. 3, pp. 11–12,, 2017.
- [36] M. D. Archer and H. R., *Clean Electricity from Fotovoltaics*, vol. 1 of *Series on Photo-conversion of Solar Energy*. Imperial College Press, 2001.
- [37] E. Delgadillo Trujillo, *Diseño de una instalación y alimentación eléctrica de un comedor industrial por medio de generación distribuida*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Facultad de Arquitectura, Diseño y
- [38] J. T. Pinho and M. A. Galdino, “Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos,” *Rio de Janeiro*, vol. 1, pp. 47–499, 2014.
- [39] M. A. Abella, “Sistemas fotovoltaicos,” *SAPT Publicaciones Técnicas, SL*, 2005.
- [40] N. DiOrio, A. Dobos, S. Janzou, A. Nelson, and B. Lundstrom, *Technoeconomic Modeling of Battery Energy Storage in SAM*. U.S. Department of Energy Washington, DC 20585, 2015.
- [41] “U.s solar photovoltaic system costs benchmark,” 2018.
- [42] M. Bolinger and J. Seel, “Utility scale solar,” *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2018.