



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
CIENCIAS E INGENIERÍA

ANÁLISIS NUMÉRICO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE
MICRORREDES AISLADAS FOTOVOLTAICAS-EÓLICAS-
ALMACENAMIENTO MEDIANTE DISEÑO DE
EXPERIMENTOS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA
PRESENTA:
GISELA MEZA LUGO

DIRECTOR: DR. ALEXIS ACUÑA RAMÍREZ

CO-DIRECTOR: DR. PEDRO FRANCISCO ROSALES
ESCOBEDO

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO 2019

DEDICATORIAS

“For those who will not read it”

Gordo, Lola, Chuky & RMJA

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a mi director y co-director de tesis, que debido a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo. A los Profesores que me han orientado en todo este proceso, gracias a sus conocimientos hoy puedo sentirme dichosa y contenta. A las personas de los departamentos administrativos, docentes, mantenimiento, seguridad, biblioteca, etc. por su excelente trato y asistencia. Y finalmente agradezco a mi familia por su comprensión y estímulo constante, además de su apoyo incondicional.

RESUMEN

En nuestro país como en otras partes del mundo existe un porcentaje de la población que carece del servicio eléctrico y eso causa que las posibilidades de desarrollo, acceso a servicios, educación, comunicación, etc. se vean afectados. Generalmente como solución al problema se suele extender la red convencional, sin embargo con el auge de las energías renovables ha surgido el paradigma de la microrred eléctrica que según los investigadores en energía, será el sistema energético del futuro y es ampliamente estudiado en alrededor del mundo.

Este tipo de sistemas tienen áreas de oportunidad que pueden ser consideradas desde el diseño y de eso trata este estudio, de mejorar la estabilidad de una microrred eólica-fotovoltaica-almacenamiento probando diversas propuestas (variando la cantidad y posicionamiento) de las tecnologías de generación distribuida para anticipar su comportamiento y evitar en lo posible cortes de electricidad, sobrecarga o descarga excesiva (esto para no dañar el almacenamiento), así como un dimensionamiento excesivo.

En la prueba de la metodología se seleccionó una demanda característica de un estudio donde se analizaron los hábitos de consumo en viviendas de interés social en Mexicali, Baja California, y debido a las particularidades de la carga se seleccionaron 10 localidades alrededor del país cuyas características climatológicas fuesen similares (específicamente zonas secas), y además carecieran del servicio eléctrico. El dimensionamiento se desarrolló tomando en cuenta los meses de verano debido a que en esa época la demanda de electricidad presenta un alza por uso de los sistemas de refrigeración en los hogares.

En el trabajo se utilizaron bases de datos climatológicas además de simuladores para emular la mencionada red y realizar la experimentación (Gracias a la investigación del estado del arte se seleccionaron los parámetros a utilizar).

El diseño de experimentos nos permitió verificar los factores más significativos en el dimensionamiento y con ello se seleccionaron la altura, curva de potencia, orientación e

inclinación que generasen mayor cantidad de energía durante el verano. En el caso del aerogenerador se determinó que la mejor opción era utilizar el aerogenerador de baja potencia HLD a 20 metros de altura (en todas las zonas) mientras que en el caso de los sistemas fotovoltaicos la orientación e inclinación tuvieron ligeras variaciones dependiendo de la zona (orientación=0 e inclinación= 0,15 grados).

Se notó además que el aerogenerador de baja potencia tiene mejor comportamiento y suele complementar al sistema fotovoltaico cuando su velocidad media anual es mayor o igual a los 3.4 m/s, por debajo de ese límite la generación no aporta significativamente al sistema.

Finalmente esta investigación proporciona alternativas a tomar en cuenta al momento de dimensionar microrredes que solamente utilizan tecnologías de generación distribuida renovables puesto que la experimentación nos brinda información de los factores más significativos y se descarta tomar decisiones en base solamente al criterio y pericia del responsable.

ÍNDICE

DEDICATORIAS	i
AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
ÍNDICE	iv
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.1.1 Formulación del Problema y Justificación.....	1
1.2 Hipótesis	4
1.3 Objetivos de la Investigación.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 Alcance	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	7
1.5 Industria eléctrica	7
1.6 Generación distribuida	11
1.7 Tecnología de generación de energía eólica:	12
1.8 Tecnología solar fotovoltaica.....	14
1.8.1 Celdas fotovoltaicas	14
1.8.2 Sistemas fotovoltaicos y redes eléctricas	15
1.9 Almacenamiento	16
1.10 El paradigma de las microrredes eléctricas	20
1.10.1 Estructura básica y componentes de las microrredes	23

1.10.2	Desventajas de la microrred de corriente alterna:	25
1.10.3	Sistema de corriente directa en microrredes	25
1.10.4	Estabilidad de las microrredes	26
1.11	Herramientas de modelado.....	27
1.11.1	Trnsys	27
1.11.2	Meteonorm	27
1.12	Diseño de experimentos	30
1.12.1	Breve historia	30
1.12.2	Clasificación de los diseños experimentales	32
1.12.3	Diseños factoriales	33
CAPÍTULO III: MARCO CONTEXTUAL		37
1.13	Sistema eléctrico en México	37
1.14	Microrredes en el país	39
1.15	Clima en la república mexicana	41
1.16	Metodología	42
1.17	Definiendo el perfil de carga	44
1.18	Selección de las localidades	47
1.18.1	Zonas sin electricidad.....	48
CAPÍTULO IV: DESARROLLO Y RESULTADOS		51
1.19	Ejido Laguna Salada, Baja California.....	53
1.20	La Ahuja, Aguascalientes	83
1.21	El Saucito, Baja California Sur	92
1.22	Ojos Calientes, Chihuahua	104
1.23	Venustiano Carranza, Coahuila	119
1.24	La Flor, Durango	134

1.25	Pozo Hondo, Guanajuato.....	143
1.26	San Isidro, Nuevo León	152
1.27	Cerro Prieto, Sinaloa.....	161
1.28	El Colorado, Sonora.....	170
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES		179
CAPÍTULO V: RECOMENDACIONES		184
BIBLIOGRAFÍAS		185
LISTADO DE TABLAS		193
LISTADO DE FIGURAS		195
ANEXOS		200

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

1.1.1 Formulación del Problema y Justificación

El crecimiento económico y social en nuestro país está intrínsecamente ligado con el avance del sector energético, ya que la energía es insumo en todos los sectores de la economía, como por ejemplo:

- El transporte de personas y mercancías, la producción de manufacturas
- El funcionamiento de establecimientos comerciales, de servicios, fábricas y hogares.

La importancia que tiene en las finanzas públicas y en el comercio exterior también lo convierte en una instancia estratégica.

La Agencia Internacional de Energía (IEA) define el acceso a la electricidad como [1]:

“Una primera conexión de suministro a un hogar y luego un nivel creciente de consumo de electricidad para alcanzar el promedio regional”.

Este punto de vista pone de manifiesto el hecho de que el exterminio de la pobreza energética es un esfuerzo a largo plazo.

Siguiendo la definición de la IEA 1267 millones de personas en todo el mundo no tenían acceso a electricidad en 2010. Esta cifra aumentó a 1285 millones en 2012, lo que implica que el aumento de la población superó el número de nuevas conexiones eléctricas. Más del 95% de la población sin acceso a la electricidad vive en África subsahariana en desarrollo, Asia y América Latina.

De acuerdo con el Balance Nacional de Energía publicado en 2010 por la Secretaría de Energía, México presenta una fuerte relación entre el crecimiento económico y el uso de energía, con un coeficiente de correlación lineal de 0.96 entre el 2000-2010.

Tal valor demuestra una marcada sensibilidad del sector energético [2] ante posibles variaciones en el crecimiento económico del país.

Según datos recabados en 2005 por INEGI, *en México había un total de 24 006 357 hogares, de los cuales 588 864 no disponían de energía eléctrica. Los estados con mayor porcentaje sin servicio eléctrico eran: Veracruz con 13.9%, Oaxaca 9.7%, Chiapas 8.4%, Guerrero 6.85%, San Luis Potosí 5.24%, Chihuahua 5.14% y México 4.99%.*

Las causas principales por las que se carece del servicio:

1. Se trata de zonas alejadas de los centros urbanos y/o en lugares de difícil acceso
2. El gobierno se topa con dificultades logísticas, técnicas y constructivas en topografías accidentadas
3. Implica un gasto exorbitante.

Como solución al desabasto eléctrico en zonas rurales o aisladas nace el paradigma de las microrredes [3] definidas como *sistemas eléctricos constituidos por generadores distribuidos e interconectados, cargas y unidades distribuidas de almacenamiento de energía eléctrica que cooperan entre sí comportándose colectivamente como un único sistema consumidor o productor.*

Estos sistemas están siendo ampliamente estudiados ya que representan una solución a la problemática de abastecimiento y las tecnologías generalmente utilizadas tienden a ser menos contaminantes que las plantas de generación convencionales.

Cuando se trabaja en redes eléctricas aisladas cuya energía es suministrada por sistemas de generación distribuida (fotovoltaicos, eólicos, etc) la optimización de estos cumple gran importancia ya que un mal diseño resultaría en uso ineficiente del equipo y probable daño al sistema de almacenamiento, además de que el usuario pueda llegar a sufrir apagones.

En zonas donde se tienen temperaturas por encima de los 35-40 °C el dimensionamiento cumple un papel más importante ya que el gasto eléctrico llega a duplicarse o triplicarse en temporadas de verano en comparación con lo requerido en invierno, y al subdimensionar el usuario podría quedarse sin electricidad por un tiempo y dañar el almacenamiento.

En resumen, uno de los retos más importantes a los que se enfrenta el sector eléctrico mexicano es incrementar la eficiencia, disponibilidad, confiabilidad y seguridad de los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica (según expresa la secretaría de gobierno en el Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables [4]). Con lo cual este proyecto brindaría más información para mejorar el aprovechamiento de las tecnologías de generación distribuida y almacenamiento en la microrredes de forma que aumentará la confianza y viabilidad de su uso.

1.2 Hipótesis

Las variables de dimensionamiento de microrredes del tipo fotovoltaicas-eólicas-almacenamiento; orientación e inclinación del sistema fotovoltaico, curva de potencia y altura del aerogenerador influyen de manera significativa en el estado de carga del sistema de almacenamiento específicamente en zonas aisladas con climas secos, secos extremos y cálidos en México.

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 *Objetivo General*

Analizar numéricamente distintos parámetros de diseño de microrredes, aplicando técnicas estadísticas de diferentes escenarios de operación, para contrastar la generación, demanda y su efecto en el almacenamiento y determinar las condiciones óptimas de diseño de microrredes aisladas fotovoltaicas-eólicas-almacenamiento en zonas aisladas con climas secos, secos extremos y cálidos en México.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Realizar una revisión bibliográfica sobre microrredes, sus características, tecnologías de generación distribuida, tecnologías fotovoltaicas, tecnologías de generación eólicas y almacenamiento.
- Investigar sobre las zonas de oportunidad en el país para realizar el estudio en diferentes climas y verificar la viabilidad de la propuesta.
- Diseñar simuladores para realizar pruebas de dimensionamiento.
- Estudiar y obtener los archivos climatológicos típicos de Meteonorm para realizar los experimentos.

- Estudiar las distintas herramientas estadísticas para realizar el estudio paramétrico
- Analizar numéricamente el dimensionamiento

Con esto se desea proponer una metodología para aprovechar más eficientemente los recursos energéticos en microrredes aisladas y aumentar la vida útil del acumulador.

1.4 Alcance

Actualmente existen diversas propuestas para brindarle estabilidad a una microrred eléctrica y esta puede ser considerada inclusive antes de ser instalada, tomando en cuenta esta premisa se propone una metodología para diseño óptimo del mencionado sistema eléctrico de manera que se logre un uso adecuado del almacenamiento utilizando lo siguiente:

- Herramientas estadísticas.
- Simulador del sistema.
- Bases de datos con demandas de viviendas de interés social.

En este estudio no se pretende:

- Llevar a cabo el proyecto en físico.
- Profundizar en detalles técnicos de instalación eléctrica y/o mecánica.
- Incluir estudio de mercado ni económico.

Por otro lado se desea probar la metodología en al menos “10” lugares en la república mexicana con características similares a la carga obtenida.

Finalmente se desea proponer un nuevo criterio para determinar el tamaño de las instalaciones de una microrred aislada tomando en cuenta:

- La demanda.
- La disponibilidad de los recursos (Eólico y solar).
- La generación eléctrica.
- El uso de dos tecnologías de generación distribuida.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

1.5 Industria eléctrica

El sistema de suministro eléctrico está conformado [5] por los elementos necesarios para la generación, el transporte y la distribución de la energía eléctrica, además de los mecanismos de control, seguridad y protección.

A continuación se describe brevemente cada una de las etapas del sistema.

1. Generación

La electricidad se genera en las centrales eléctricas (generalmente de potencias elevadas debido a que no se tiene la capacidad para almacenarla y debe consumirse en el momento que se produce).

2. Transporte

La red de transporte es la encargada de vincular las centrales con las redes de distribución, (une las centrales con las subestaciones de transformación).

Se denominan también redes de alta tensión. Las líneas de la red de transporte pueden ser aéreas o subterráneas.

3. Subestaciones de transformación

Tienen como función principal reducir la tensión (voltaje) de la electricidad desde la tensión de transporte a la de distribución.

4. Distribución

La red de distribución está compuesta por las líneas que van desde las subestaciones hasta los centros de transformación y pueden ser aéreas o subterráneas.

5. Centros de transformación

Realizan la última transformación, reduciendo del voltaje de distribución al voltaje de utilización (denominado también de baja tensión). El voltaje de utilización es de 380 V (en tres fases), en el caso de uso doméstico, y de entre 3 y 6 kV, en el de uso industrial.

Una vez generada, la electricidad emprende su viaje por los tendidos de las líneas de alta, media y baja tensión. Finalmente llega hasta los centros de consumo.

Las centrales eléctricas son instalaciones de gran escala que establecen el principio del suministro y se clasifican dependiendo de la fuente de energía primaria utilizada. Se clasifican en centrales convencionales o renovables.

Las centrales convencionales se dividen en: térmicas, ciclo combinado, cogeneración y nucleares.

Centrales térmicas: Convierte la energía química de un combustible en energía eléctrica. [5] Según el combustible utilizado se las denomina centrales térmicas de carbón, de fuel o de gas.

Centrales de ciclo combinado: Son un tipo de central que basa su funcionamiento en el acoplamiento de dos ciclos diferentes de producción de energía, uno con turbina de vapor y otro con turbina de gas [5].

Centrales de cogeneración: Los sistemas de cogeneración son sistemas de producción simultánea de electricidad y calor, partiendo de un único combustible [5].

La ganancia global de este tipo de centrales puede alcanzar el 70%.

Centrales nucleares: Son las que se utilizan en la actualidad, es la que emplea para la generación de energía eléctrica elementos químicos pesados, como el uranio o el plutonio, los cuales mediante una reacción nuclear, proporcionan calor [5]. Este calor se emplea para producir vapor y, a partir de este punto, el resto de los procesos en la central son análogos a los de una central térmica convencional.

Como ejemplos de las centrales renovables tenemos las siguientes:

Parques eólicos: La energía eólica no es más que la energía cinética de una masa de aire en movimiento. [6] El aprovechamiento de esta fuente energética es su conversión directa en energía mecánica a través del giro del eje de la turbina eólica con una cierta potencia.

Esta energía mecánica puede transformarse posteriormente en energía potencial (bombeo) o energía eléctrica (por accionamiento de un generador eléctrico acoplado al eje de la turbina).

Centrales solares fotovoltaicas: Los paneles solares fotovoltaicos transforman la radiación solar directamente en electricidad [6]. Las plantas o centrales solares fotovoltaicas están constituidas por una serie de paneles fotovoltaicos conectados en serie y/o en paralelo, que vierten la electricidad producida a la red eléctrica. Además operan con un centro de carga donde se encuentran los inversores, dispositivos de control, etc. y regularmente se cuenta con una estación meteorológica y radiométrica.

Centrales solares térmicas de alta temperatura: Utilizan el calor de la radiación solar para calentar un fluido y producir vapor para mover un generador [6], como en una central térmica convencional, pero en la que el combustible es el Sol.

Centrales marinas: Dentro de las centrales que se instalan en el mar podemos distinguir: las centrales mareomotrices, las de olas y las que aprovechan las corrientes marinas [6]. Las centrales mareomotrices aprovechan los cambios de altura de las mareas para mover las turbinas, mientras que las de olas utilizan el movimiento de éstas con el mismo fin.

Centrales geotérmicas: La energía geotérmica es la que procede del calor interno de la Tierra [6]. Existe una gran diferencia entre la temperatura de la superficie terrestre y la de su interior. El calor concentrado en el interior tiende a escapar de forma natural como ocurre en las fuentes hidrotermales o en los géiseres. También se puede extraer a partir de perforaciones en yacimientos localizados en el subsuelo.

Centrales mini hidráulicas: Son las centrales hidráulicas cuya potencia es de 10 MW o menos. En el aspecto medioambiental todas ellas poseen las ventajas de las energías renovables (energía limpia, autóctona e imperecedera)

Centrales reversibles o de bombeo: Representan el sistema de almacenamiento de electricidad más desarrollado y empleado. Las centrales hidroeléctricas reversibles consumen electricidad cuando bombean (de noche) y producen electricidad cuando se deja caer el agua (de día). Estas centrales hidroeléctricas son capaces de aprovechar la

energía eléctrica sobrante que se produce durante las horas valle (demanda baja, de noche). Para ello disponen de un embalse situado en una cota inferior al embalse superior o principal. Durante las horas punta (demanda alta, de día), el agua del embalse superior se deja caer, produciendo así electricidad la central hidroeléctrica; esta agua se almacena en el embalse inferior. Durante las horas valle, la electricidad excedentaria (que sobra tras realizar el consumo) producida por las centrales térmicas o nucleares se envía a la central de bombeo para elevar el agua. Ésta queda almacenada en el embalse superior, lista para ser usada en las próximas horas punta.

Hidroeléctricas: Son centrales que generan electricidad mediante el aprovechamiento de la energía potencial del agua embalsada en una presa. La energía hidráulica posee dos ventajas principales respecto a los combustibles de origen fósil y nuclear: una de ellas es que el agua (que es el combustible) no se consume ni empeora la calidad, únicamente es explotada; y otra de las ventajas es que no tiene problemas de producción de desechos. [5][6]

1.6 Generación distribuida

Se define como el establecimiento y operación de pequeñas tecnologías modulares de generación que se pueden incorporar con sistemas de acumulación y administración de energía [7]. Estos sistemas pueden (o no) ser parte de la red eléctrica. Se utilizan cerca del usuario final para mejorar las operaciones de los sistemas de abastecimiento de electricidad.

En la siguiente figura se muestran algunos ejemplos tecnologías de generación distribuida (tanto renovables como las que utilizan combustibles fósiles).

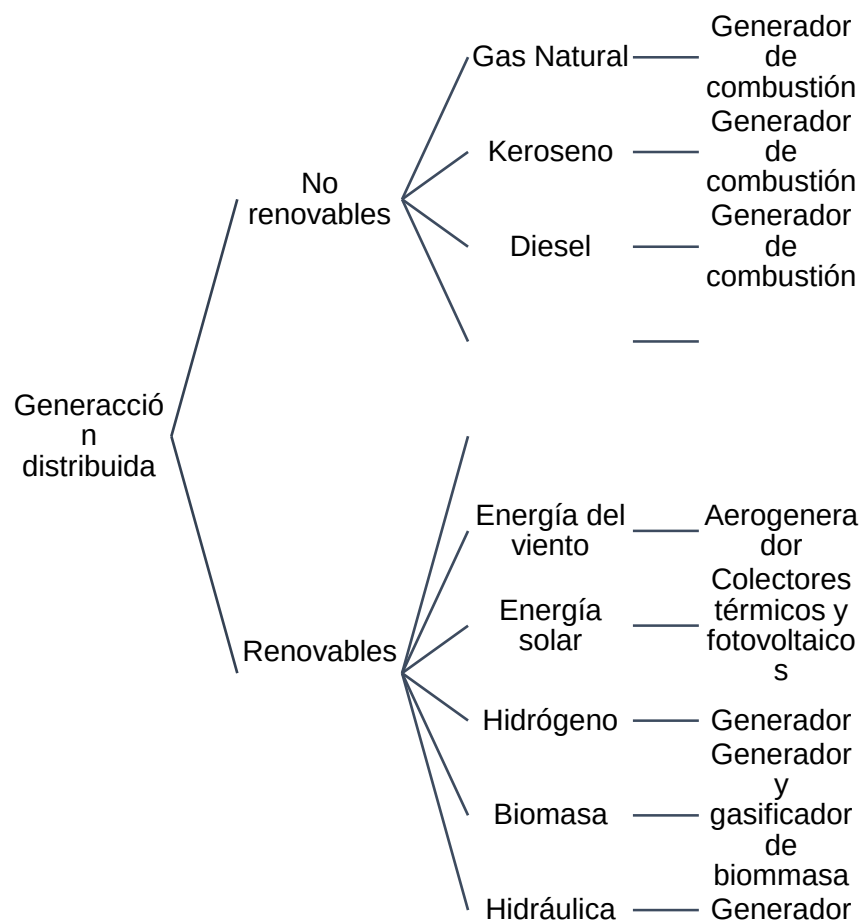


Figura 1 Tecnologías de generación distribuida

A continuación se dará una breve descripción a la generación de energía eólica y la solar fotovoltaica puesto que son el área de investigación actual y las principales tendencias de avance en ingeniería eléctrica [7]

1.7 Tecnología de generación de energía eólica:

La tecnología de energía eólica es una de las tecnologías renovables emergentes más importantes. Comenzó en la década de 1980 con unas pocas decenas de kW de potencia de producción hasta hoy con instalaciones de varios MW.

El aerogenerador es una máquina capaz de tomar la energía cinética del viento y transformarla en energía eléctrica o mecánica para realizar un trabajo.

En [8] se habla que existen dos clasificaciones predominantes en la literatura:

1. Por capacidad de generación que varía desde los W hasta MW

Turbinas de baja potencia o pequeña escala: Su potencia varía desde los 0.025 kW a los 10 kW y necesitan velocidades promedio anuales del viento entre los 2.5 a 5 m/s para empezar a funcionar.

Turbinas de escala media: Necesitan una velocidad media anual de 4-5 m/s para producir energía. El rango de salida de potencia es de 10-100 kW.

Turbinas de gran escala: Se necesita una velocidad de viento promedio anual mayor a los 5 m/s, y la salida de potencia es mayor a los 100 kW.

2. Por la posición de los ejes de rotación: Horizontales y verticales.

Horizontales: En esta posición el viento golpea a la pala antes que a la torre y el eje del generador se coloca horizontalmente.

Verticales: En esta posición las cuchillas (álaves) apuntan hacia arriba con el generador colocado verticalmente (generalmente montado en el suelo o en una torre corta).

Existe literatura que además de clasificar por capacidad y posición de los ejes también considera la localización de las mismas [8] como: “onshore” que son las que se posicionan en tierra, u “offshore” o aquellos aerogeneradores que se localizan en el mar abierto.

En el caso de los offshores existen algunas ventajas ya que trabajan a mayores velocidades y cantidad de viento y tienden a mostrar más eficiencia.

Los aerogeneradores pueden operar a partir de un amplio rango de velocidades desde los 3 a 4 m/s hasta los 25 m/s [9]. La mayor parte de los modelos de diseño de los aerogeneradores actuales cambian el ángulo de los álabes a través del “pitch control” para aprovechar mejor el recurso. Al poder operar en velocidades variables la turbina incrementa su habilidad para armonizar en la operación de la red completa.

Los avances en la tecnología aplicados en los aerogeneradores les permiten operar de manera efectiva en una extensa variedad de lugares como el desierto y zonas extremadamente heladas (ártico)

El peso es un factor importante a la hora de diseñar y fabricar los álabes, por lo que la tendencia gira en torno al uso de materiales compuestos. Reducir las cargas aumenta la confiabilidad, se mejora el control y asegura una mejor compatibilidad en la red.

Los componentes básicos de un aerogenerador son los siguientes [8]: La góndola, palas, freno, generador, torre, base y controlador (entre otros).

Revisando la ruta de desarrollo rápido de la generación de energía eólica global en los últimos años, la última tendencia de desarrollo y progreso de la investigación son los siguientes [10]: mayor potencia nominal, paso de pala variable, frecuencia constante de velocidad variable (VSCF), sin caja de engranajes), convertidor de potencia completo conectado a la red, recorrido de baja tensión (LVRT), control inteligente para la generación de energía eólica, sistema de monitoreo de parques eólicos de redes inalámbricas remotas, y más.

1.8 Tecnología solar fotovoltaica

La tecnología solar fotovoltaica convierte directamente la energía solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico del material semiconductor. El sistema de generación fotovoltaica es dividido en sistemas fotovoltaicos aislados y sistema fotovoltaico conectado a la red.

1.8.1 Celdas fotovoltaicas

El material semiconductor en una célula fotovoltaica absorbe la luz (fotones) y esto desplaza a los electrones para formar pares de electrones y orificios, que se guían en una dirección, creando una corriente [11]. El semiconductor está dopado para ser una unión p-n con una diferencia de potencial, que impulsará el flujo de corriente verticalmente a través de la celda en una dirección, por lo que se puede generar electricidad.

Las celdas fotovoltaicas están hechas de diferentes semiconductores, como el germanio (Ge), el silicio (Si), el arseniuro de indio el arseniuro de galio (GaAs), y galio (InGaAs), etc. Sin embargo, es considerable que casi el 90% de las celdas fotovoltaicas están hechas de Si, un material abundante en la corteza terrestre.

Gracias a las grandes sumas de silicio aprovechables y al progreso tecnológico, los paneles fotovoltaicos presentan precios más bajos y se vuelven asequibles para la inmensa mayoría de la población [12]. Tomando en cuenta el aumento de los costos y las bajas reservas de combustibles fósiles se recomienda implementar los mencionados sistemas

La literatura sobre tecnología de celdas solares fotovoltaicas considera tres generaciones.

Sistemas de primera generación (totalmente comerciales) que usan tecnología de silicio cristalino tanto en su forma cristalina simple como poli cristalina.

Sistemas de segunda generación que se basan en fotovoltaica delgada y generalmente incluyen tres familias principales: silicio amorfo, telurio de cadmio y seleniuro de cobre de indio, indio-diselenido de galio.

Sistemas de tercera generación que incluyen tecnologías de células fotovoltaicas orgánicas que aún se encuentran en fase de demostración o aún no se han comercializado ampliamente, así como nuevos conceptos en desarrollo.

1.8.2 Sistemas fotovoltaicos y redes eléctricas

Un sistema fotovoltaico está formado por un grupo de celdas solares que trabajan juntos para producir electricidad. Los sistemas se organizan de acuerdo con la aplicación particular que se está configurando y cableando como una estructura completa con inversores, reguladores de carga y baterías.

La tecnología solar fotovoltaica se puede utilizar como un sistema independiente o como una instalación conectada a la red [13]. La primera opción se usa generalmente en áreas remotas donde no hay red eléctrica; esto permite encender un televisor simple u otro equipo doméstico o vehículo de transporte.

Los sistemas solares fotovoltaicos (PV), son ahora una de las fuentes más comunes debido a sus avances técnicos graduales y a su costo en rápida disminución. Sin embargo, el despliegue y la integración de sistemas fotovoltaicos en redes eléctricas

convencionales tiene un impacto significativo en sus operaciones técnicas y no técnicas, lo que plantea nuevos desafíos para el despliegue masivo de energía fotovoltaica. Los sistemas fotovoltaicos se han denominado comúnmente como una "fuente de energía intermitente" en la literatura, pero estos sistemas también se pueden denominar como sistemas de generación de electricidad no controlados debido a sus características de generación variable.

La integración del sistema fotovoltaico en redes eléctricas remotas tiene impactos muy específicos y bien definidos, principalmente debido a las características únicas de los consumidores y la gestión operativa.

Además, el foco de la generación fotovoltaica se desplaza gradualmente hacia la investigación de componentes y el desarrollo de sistemas para el sistema de generación fotovoltaica conectado a la red [14], como un inversor conectado a la red, BIPV, estación fotovoltaica conectada a la red a gran escala y los sistemas de seguimiento automático de matrices fotovoltaicas.

1.9 Almacenamiento

Debido a que las tecnologías de generación distribuida renovables son intrínsecamente intermitentes es necesario un dispositivo que acumule energía cuando la generada es mayor que la consumida y la devuelva cuando la demanda supere la producción. [15]

Existe una variedad de tecnologías para almacenar energía y Hoda Akbari en su trabajo las clasifica en eléctrica, térmica y mecánica. A modo de mención se hará una lista de las primeras dos clasificaciones:

Tecnologías de almacenamiento eléctrico:

- Súper-capacitores: Los cuales poseen la capacidad para acumular concretamente la carga eléctrica en una interfaz de electrolito de superficie de electrodos de carbono con gran área de superficie
- Sistemas electroquímicos: Baterías

- Sistemas hidroeléctricos: Utilizando la energía potencial del agua a cierto nivel para pasarla a energía eléctrica mediante generadores.
- CAES: Almacenamiento de aire comprimido para crear una reserva potente
- Flywheels: Son dispositivos mecánicos que aprovechan la energía de rotación para entregar electricidad instantánea.

Tecnologías térmicas de almacenamiento las clasifica en 3 [16]:

- Almacenamiento de energía termoquímica
- Almacenamiento sensible al calor
- Almacenamiento de calor latente

El medio de almacenamiento se define dependiendo el uso final previsto, en los sistemas fotovoltaicos, cuyo uso final es en aplicaciones de corriente alterna o corriente directa generalmente se utilizan acumuladores electroquímicos: baterías recargables (salvo en sistemas fotovoltaicos de bombeo, donde la forma de almacenar energía es guardando agua bombeada a un almacén situado a nivel más elevado).

Según [17] una batería es un dispositivo que convierte la energía química contenida en sus materiales activos directamente en energía eléctrica mediante una reacción electroquímica de reducción de oxidación (redox). En el caso de un sistema recargable, la batería se recarga por una inversión del proceso. Este tipo de reacción implica la transferencia de electrones de un material a otro a través de un circuito eléctrico.

Además de cubrir la necesidad de acumular la energía suministrada por los paneles fotovoltaicos y los generadores eólicos para su utilización posterior, debido a que la distribución temporal del consumo no es totalmente coincidente con las horas de insolación, la batería puede cumplir otras dos importantes misiones:

Proveer potencia (y energía por tanto) en los periodos de tiempo en los que la demanda es superior. (Mencionado al principio del tema).

Mantener un nivel de tensión estable: La tensión de salida del panel varía en función de la intensidad radiante, lo cual puede no ser adecuado para el funcionamiento de los aparatos. La batería proporciona una tensión más estable y constante independiente de

las condiciones de incidencia luminosa. Y tratándose del aerogenerador con mayor razón ya que tiende a ser más intermitente que un sistema fotovoltaico. [17]

El almacenamiento de energía electroquímica es llamativo porque es compacto, fácil de efectuar y aporta una respuesta prácticamente instantánea hacia la entrada de la batería y la salida de la red a la batería. [18]

Las baterías proporcionan los siguientes beneficios las redes que usan tecnología de generación distribuida:

- Estabilización del flujo de electricidad
- Reducir el entorpecimiento en los sistemas de transmisión y distribución
- Control de las fluctuaciones de voltaje local
- Reduce los costos de electricidad al utilizar políticas favorables (tarifas particulares, medición neta, etc.)
- Compensar la obtención de generadores más costosos

Actualmente se utiliza una diversidad de baterías para aplicación en microrredes y a continuación se mencionarán algunas:

Baterías de Flujo: ZnBr, VRB o PSB, se utilizan para ciclos de vida prolongados y tiempo de respuesta rápidos.

Baterías Sodio Azufre (NaS): Se requiere una fuente de calor y deben funcionar a alta temperatura pero se reduce parcialmente el rendimiento de la misma.

Baterías de iones de litio: El cátodo está compuesto de compuestos a base de litio (por ejemplo, LiCoO_2 , LiMnO_2 , LiFePO_4) y el ánodo está hecho de carbono grafitico (C). El electrolito es normalmente una mezcla de solvente orgánico líquido no acuoso con sales de litio disueltas. Se han implementado en múltiples aplicaciones de almacenamiento.

Baterías Níquel Cadmio: Usan hidróxido de níquel y cadmio metálico como los dos electrodos y una solución acuosa alcalina como el electrolito. Proporcionan una vida útil prolongada.

Baterías Plomo-Ácido: Es una de las tecnologías más conocidas y tienen un costo competitivo, pero tienen un ciclo de vida limitado.

Metal-Aire: Consisten en un ánodo hecho de metal puro y el cátodo se conecta a un suministro de aire.

Este estudio se enfocará en el uso de las baterías Plomo-Ácido debido a que son los dispositivos recargables más antiguos y utilizados.

Las baterías de plomo-ácido fueron inventadas en 1859, consisten en electrodos de plomo-metal y óxido en un electrolito de ácido sulfúrico (con un porcentaje aproximado al 37%) [19]. Son de carga lenta y poseen un rendimiento bajo a temperaturas bajas, por lo que requieren un sistema de gestión térmica. No es recomendable descargarlas completamente ya que su vida útil depende de la profundidad de descarga por lo que es necesario aumentar el banco de baterías para mantener constante la vida útil. Si no se cuenta con el debido mantenimiento los costos se elevan. Estas baterías tienen un bajo costo (en comparación con las demás).

Actualmente estas baterías se han convertido en la fuente de energía portátil más exitosa [20] debido principalmente a su precio pero además son fáciles de usar, de reciclar, cuentan con más confiabilidad y su uso se ha extendido en industrias. Cuentan con recursos ilimitados para su fabricación ya que el 95% de su material es reciclable y son las que dominan el mercado recargable por volúmenes de ventas anuales (Al menos en los Estados Unidos).

A pesar de las ventajas mencionadas, este tipo de baterías tienen varios factores [21] que pueden afectar su comportamiento:

Ciclos de carga y descarga: La carga y descarga continua de la batería hace que pierda capacidad ya que se va perdiendo material activo. Se llega a la muerte de la misma cuando la capacidad se ha reducido al 80% de la nominal.

Influencia de la temperatura: Las temperaturas bajas retardan las reacciones químicas por lo que se provoca una caída en la tensión. Por el contrario si la temperatura es demasiado alta la reacción química se acelera demasiado y la vida se acorta.

Punto de congelación: Cuando el electrolito alcanza los 0 grados centígrados se recomienda tener la batería completamente cargada o de lo contrario, la cantidad de agua en la solución electrolítica será mayor por lo que existe la posibilidad de que se congele, pudiendo dañar las celdas o quebrar la caja.

Gasificación: Cuando una batería plomo ácido está próxima a alcanzar el 100% y se excede continuamente el oxígeno originado como consecuencia comienza a oxidar los sostenes de plomo de las celdas pudiendo causar el derrumbe de los mismos. Una gasificación excesiva arrastra parte del electrolito pudiendo dañar los terminales de salida y disminuyendo la cantidad de ácido en la parte interna.

Sulfatación: Si la batería permanece descargada por debajo del mínimo permisible se reduce la superficie activa del electrodo, reduciendo así la materia activa y con ello la capacidad de la misma pudiendo dejarla inservible. El sobre-descarga muy pronunciada puede llegar a una situación peligrosa de agotamiento pudiendo causar serios daños a la batería. Por ende este trabajo se centrará en realizar el dimensionamiento tratando de mantener la batería en condiciones óptimas.

1.10 El paradigma de las microrredes eléctricas

Se ha desarrollado un nuevo concepto de red eléctrica gracias al aumento exponencial de la demanda así como los requisitos de calidad en el suministro, que son cada vez más exigentes. En este nuevo paradigma (redes inteligentes) se comprende no solamente a los sistemas de transmisión y distribución, sino a los generadores y usuarios. Otra diferencia importante es la combinación de tecnología digital de forma tal que exista un flujo de datos bidireccionales entre generadores y usuarios reduciéndose así los costos de generación y transmisión, perfeccionando al mismo tiempo la eficiencia y la seguridad.

Según [22] las microrredes son sistemas inteligentes de optimización de energía que utilizan recursos energéticos, fósiles y renovables para generar electricidad. Tienen diferentes aplicaciones según las condiciones del lugar donde van a estar ubicadas, y según la magnitud de personas a las que va a beneficiar, desde microrredes para un pequeño pueblo o una vivienda utilizando corriente alterna e incluso comunidades totalmente independientes mediante corriente continua.

En la actualidad son ampliamente estudiadas alrededor del mundo [22] y las ven como la solución al problema de abastecimiento eléctrico en zonas remotas, universidades, y como una solución al uso de fuentes de generación contaminantes.

A continuación se hablará más detalladamente sobre ellas partiendo desde el concepto mismo:

El Consorcio para la Solución de Tecnología de Confiabilidad Eléctrica (CERTS) de los Estados Unidos de América fue el primero en proponer el concepto de una microrred y lo define como [23]:

Una agregación de cargas y microgeneradores que funcionan como un solo sistema que proporciona energía, refrigeración y calefacción. Además, estipula que los microcursos deben estar basados en electrónica de potencia para proporcionar la flexibilidad requerida, lo que garantiza el funcionamiento como un único sistema agregado. La fuente de alimentación interna de la microrred está controlada por los convertidores electrónicos de potencia que son responsables de las conversiones de energía. La flexibilidad de control de la microrred es lo que le permite presentarse al sistema de energía a granel como una sola unidad controlada para satisfacer las necesidades locales de calidad de energía, confiabilidad y seguridad. En situaciones donde el sistema de potencia masiva desarrolla una falla, la microrred, en su totalidad, debe tener la capacidad de operar en modo isla porque tiene su propio suministro interno de energía, y solo se vuelve a conectar al sistema de potencia cuando se restablece la energía.

La Unión Europea (UE) por otro lado ve la microrred como:

Un sistema que emplea micro fuentes de energía renovable incontrolables que está equipado con un sistema de almacenamiento de energía, y hace uso de convertidores

electrónicos de potencia para controlar, ajustar e implementar Refrigeración, Calefacción y Energía Combinados.

Una de las principales universidades de Japón, la Universidad de Tokio, describe la microrred como:

Un sistema compuesto de micro fuentes distribuidas, generalmente conectadas a la red eléctrica a granel a través de la línea de enlace. Si hay un desequilibrio entre la fuente de alimentación y la demanda, la microrred puede seleccionar inteligentemente si operar en modo conectado a la red o en modo aislado (o isla).

Mitsubishi Company de Japón define la microrred como:

Un sistema de suministro de energía a pequeña escala que consiste en pequeñas instalaciones de energía eléctrica y calor con cargas conectadas, y sus controladores, que los administran como un grupo y tienen una conexión con el sistema de alimentación principal.

La comprensión general de China de la microrred es que se trata de un sistema de distribución micro-eléctrico compuesto por múltiples fuentes distribuidas, sistema de almacenamiento de energía, dispositivos de conversión de energía, sistema de control de carga y dispositivos de protección que están dispuestos a controlarse, protegerse y administrarse de forma autónoma cuando funcionan en paralelo o en aislamiento con la red principal.

Además de los mencionados anteriormente, en la literatura [24-30] se encuentran otras definiciones atribuidas a expertos.

1.10.1 Estructura básica y componentes de las microrredes

En base a las concepciones anteriores y la información de [31], una microrred incluye un sistema de recursos múltiples que consiste en:

- Sistemas de generador distribuido: podrían ser fuentes de energías renovables y convencionales. Esta característica permite explotar adecuadamente los recursos disponibles en cada ubicación (viento, sol, biomasa, etc.)
- Sistemas de almacenamiento: el uso de estos mejora la estabilidad, la calidad de la energía, la fiabilidad del suministro y el rendimiento general de una microrred.
- Cargas controlables: hay una amplia gama de cargas (residencial, industrial, etc.)

Además de los elementos antes mencionados, las microrredes requieren otras infraestructuras [31]:

- Punto de acoplamiento común: las microrredes pueden operar conectadas o desconectadas de la red eléctrica. PCC constituye la puerta de enlace entre ambas redes. Esta conexión se puede realizar a través de conmutadores y convertidores de potencia.
- Distribución: los elementos principales de una microrred (DER y cargas) están interconectados con líneas de distribución. Mientras tanto, las microrredes de CA utilizan líneas monofásicas o trifásicas, la distribución en microrredes de CC es monopolar, homopolar o bipolar
- Protecciones: las microrredes, conectadas o desconectadas a la red eléctrica, deben tener mecanismos de protección que garanticen un funcionamiento seguro. Estos elementos de protección deben diseñarse siguiendo diferentes principios y parámetros.
- Monitoreo: hay muchos parámetros en una microrred como voltaje, frecuencia y calidad de energía que deben supervisarse continuamente por medio de un sistema de monitoreo.
- Convertidores de potencia: los DER y las cargas generalmente se conectan a las líneas de distribución de la microrred a través de convertidores de potencia. Adaptan los niveles

de corrientes y voltajes de la microrred a las unidades conectadas. De acuerdo con el tipo de microrred, se usan diferentes tipos de convertidores de potencia.

- Control: en una microrred, existen diferentes fuentes y mecanismos disponibles para recopilar información. Esta información requiere un procesamiento adicional, lo que eventualmente implica que ciertas tareas deben ser realizadas y coordinadas, tales como la carga compartida, el control del nivel de voltaje y la generación eléctrica. Ambas microrredes de CA y CC tienen un sistema de control jerárquico que lleva a cabo tales tareas.

Una Microrred es más que un agregador de pequeños generadores, o un proveedor de servicios de red [32], o un controlador de carga, o un regulador de emisiones: desempeña todas estas funcionalidades y cumple múltiples objetivos económicos, técnicos y ambientales.

En base al párrafo anterior, un sistema eléctrico que carezca de sinergia entre cada uno de sus componentes o la ausencia de alguno no puede ser considerado MG.

Las microrredes pueden trabajar en dos modos de operación: isla (generando, distribuyendo y suministrando energía a las cargas) e interconectado a la red eléctrica. Por otro lado pueden conectarse a distintos buses dependiendo de los siguientes modos de trabajo: alterna o directa.

La mayoría de las cargas eléctricas desde el siglo pasado han sido operadas con energía de CA (Corriente alterna). Por lo tanto, la opción estándar para sistemas de energía comercial es, en última instancia, un sistema de distribución de CA.

Comúnmente, un sistema de microrred de CA está conectado con una línea de distribución de voltaje medio en el punto de acoplamiento común. Las generaciones distribuidas, los dispositivos de almacenamiento y las cargas se conectan con una base de bus común en las redes de distribución.

Durante el modo conectado a la red, las redes de suministro mantienen el voltaje y la frecuencia del sistema, mientras que los dispositivos de almacenamiento de energía,

generadores distribuidos no renovables y cargas ajustables con técnicas de control ayudan a mantener el voltaje y el nivel de frecuencia estándar durante el modo isla.

1.10.2 Desventajas de la microrred de corriente alterna:

Cada generación distribuida y par de red de servicios públicos debe sincronizarse para la microrred de CA.

Tiene un gran efecto en la calidad de la energía; por ejemplo, en la corriente de prisa generalmente se produce por transformadores y la máquina de inducción. Existe una preocupación sobre el desequilibrio de tres fases, como el sistema fotovoltaico (cargas monofásicas, generadores monofásicos). [33]

1.10.3 Sistema de corriente directa en microrredes

Dado que una microrred suele incluir fuentes renovables y baterías [34-37]. Al mismo tiempo, los sistemas de corriente directa no requieren sincronización [38], y los problemas causados por la potencia reactiva y los armónicos desaparecen.

En una microrred de corriente directa, el almacenamiento de energía y un gran porcentaje de las fuentes y las cargas se interconectan a través de uno o más buses de corriente continua.

Además, siempre que la corriente alterna se use para la distribución [39-41], la microrred de corriente directa se conectará en algún momento a la red de alterna. Por lo tanto, se sugiere que en las microrredes de corriente continua junto con los buses de alterna, se deben considerar como dos partes de una microrred mixta de CA / CC, que se acopla a la red de alterna a través del punto de PCC.

1.10.4 Estabilidad de las microrredes

En [42] se comenta que la estabilidad en los sistemas eléctricos es la capacidad de conservar el equilibrio entre consumo y generación tras haber cierta perturbación y en [43] van más allá clasificando los problemas de estabilidad ya que existe una diversidad de perturbaciones que consiguen alterar múltiples variables del sistema, seccionándolos en tres grupos principales: estabilidad del ángulo del rotor, estabilidad de frecuencia y estabilidad de tensión.

En la literatura existe una amplia variedad de artículos que aportan soluciones a los problemas de estabilidad partiendo de las causas mismas que desequilibran la red, un ejemplo de ello lo vemos plasmado en [44] que se enfoca en la optimización mediante el uso de controladores y en [45] se realiza una revisión del estado del arte bastante completa sobre los problemas de estabilidad de acuerdo a la naturaleza de sus causas (desde problemas eléctricos y sistemas de control hasta el posicionamiento y estrategias de dimensionamiento). En el texto se enfatiza que la estabilidad futura se puede considerar desde antes de su instalación por medio del uso de simuladores tomando en cuenta la posición de los generadores, analizando los flujos de potencia.

Para efecto de este estudio se considerará la estabilidad como el equilibrio entre la energía generada y consumida.

1.11 Herramientas de modelado

1.11.1 Trnsys

Es un entorno de simulación completo y ampliable para el modelado transitorio de sistemas, incluidos edificios multizona [46].

Es ampliamente utilizado tanto en el ámbito profesional como educativo alrededor del mundo para realizar experimentación, análisis y validación de nuevos conceptos de energía. Los proyectos incluyen desde sistemas de calentamiento de agua hasta el diseño, la simulación de dispositivos y edificios en los que se incluyen estrategias de control, además de añadir sistemas de energía alternativa, etc.

Para una simulación efectiva, la organización modular de Trnsys solicita la caracterización de los dispositivos del sistema. Los componentes en Trnsys se conocen como TYPES. Cada TYPE tiene un conjunto de parámetros independientes del tiempo, así como entradas variables en el tiempo que permiten la estimación de las salidas coincidentes.

1.11.2 Meteonorm

La base de datos climatológicos mundial Meteonorm (www.meteonorm.com) a menudo se usa para planificar de sistemas o edificios de energía solar. La base de datos fue iniciada por la Federación Suiza Oficina de Energía en 1985.

Meteonorm entrega parámetros de radiación en planos horizontales e inclinados [47,48]. Aparte de esto muchos otros parámetros meteorológicos como temperatura, temperatura del punto de rocío o viento la velocidad está incluida. Los valores se presentan en forma de medio mensual y anual a largo plazo así como series temporales generadas estocásticamente en resolución de tiempo por hora y minuto, que corresponden a años típicos.

Meteonorm no es solo un conjunto de bases de datos, sino que está compuesto por una gran cantidad de modelos computacionales desarrollados en programas de investigación internacionales.

Meteonorm es principalmente un método para el cálculo de la radiación solar en superficies arbitrariamente orientadas en cualquier ubicación deseada. El método se basa en bases de datos y algoritmos acoplados de acuerdo con un esquema predeterminado. Comienza con el usuario especificando una ubicación particular para la cual se requieren datos meteorológicos, y finaliza con la entrega de datos de la estructura deseada y en el formato requerido.

Dependiendo de sus requisitos específicos, el usuario debe elegir el método más adecuado entre los numerosos procedimientos disponibles.

A continuación se muestra la secuencia en la que los modelos de computadora se acoplan para generar datos de radiación por hora en una superficie orientada arbitrariamente en un sitio para el que no hay mediciones disponibles:

- 1) Interpolación con el modelo de valor promedio mensual
- 2) Generador de valores por hora y minuto
- 3) Resolución de radiación
- 4) Radiación en una superficie inclinada con efecto de horizonte, modelo de valor por hora y minuto [NORTE]

Para nuestro proyecto utilizó como base los datos de una estación meteorológica en Chula Vista, EU, la tabla 1 muestra los parámetros seleccionados según nuestra necesidad y las metodologías con las que se hicieron los cálculos.

Tabla 1 Parámetros y metodología utilizada por el software según la necesidad

<i>Parámetro</i>	<i>Metodología de cálculo</i>
Modelo de irradiancia	Por Hora
Modelo de radiación difusa	Modelo Perez
Modelo de temperatura	Hora
Modelo de irradiación inclinada	Modelo de Perez
Sistema de tiempo	Legal

Temperaturas (valores mensuales extremos de 10 años, verano e invierno)	
Pro-medias (valor de partida)	
Radiación (valores mensuales extremos de 10 años, verano e invierno)	
Formato de salida	TMY2

Se pueden encontrar los datos teóricos de las metodologías de cálculo y más información en [48].

1.12 Diseño de experimentos

1.12.1 Breve historia

Es una metodología introducida por Ronald A. Fisher a principios del siglo XX en Inglaterra y se ha utilizado para conseguir un aprendizaje acelerado. En su trabajo aportó métodos para evaluar resultados de experimentos con muestras pequeñas e influyó en la investigación agrícola de su tiempo (1935). George E.P. Box encabezó los desarrollos posteriores incluyendo la metodología de superficie de respuestas (1951).

Entre 1950 y 1980 DDE (Diseño de experimentos) se convirtió en una herramienta ampliamente aplicada en la investigación y desarrollo. A partir de 1980 se dio un gran impulso al conocimiento y aplicación del DDE en industrias debido al éxito al movimiento de la calidad (introducida por japoneses), y destaca el trabajo de Genichi Taguchi. Como respuesta a la mejora de procesos y sistemas de calidad se empezó a dar entrenamiento de diseño de experimentos a los ingenieros.

El diseño de experimentos [49] es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender mejor situaciones complejas de relación causa-efecto.

Para que un estudio experimental sea exitoso es necesario realizar, por etapas, diferentes actividades. En este sentido, la etapa más importante y a la que se le debe dedicar mayor tiempo es la planeación. A continuación se muestra una figura que describe cada paso a seguir:

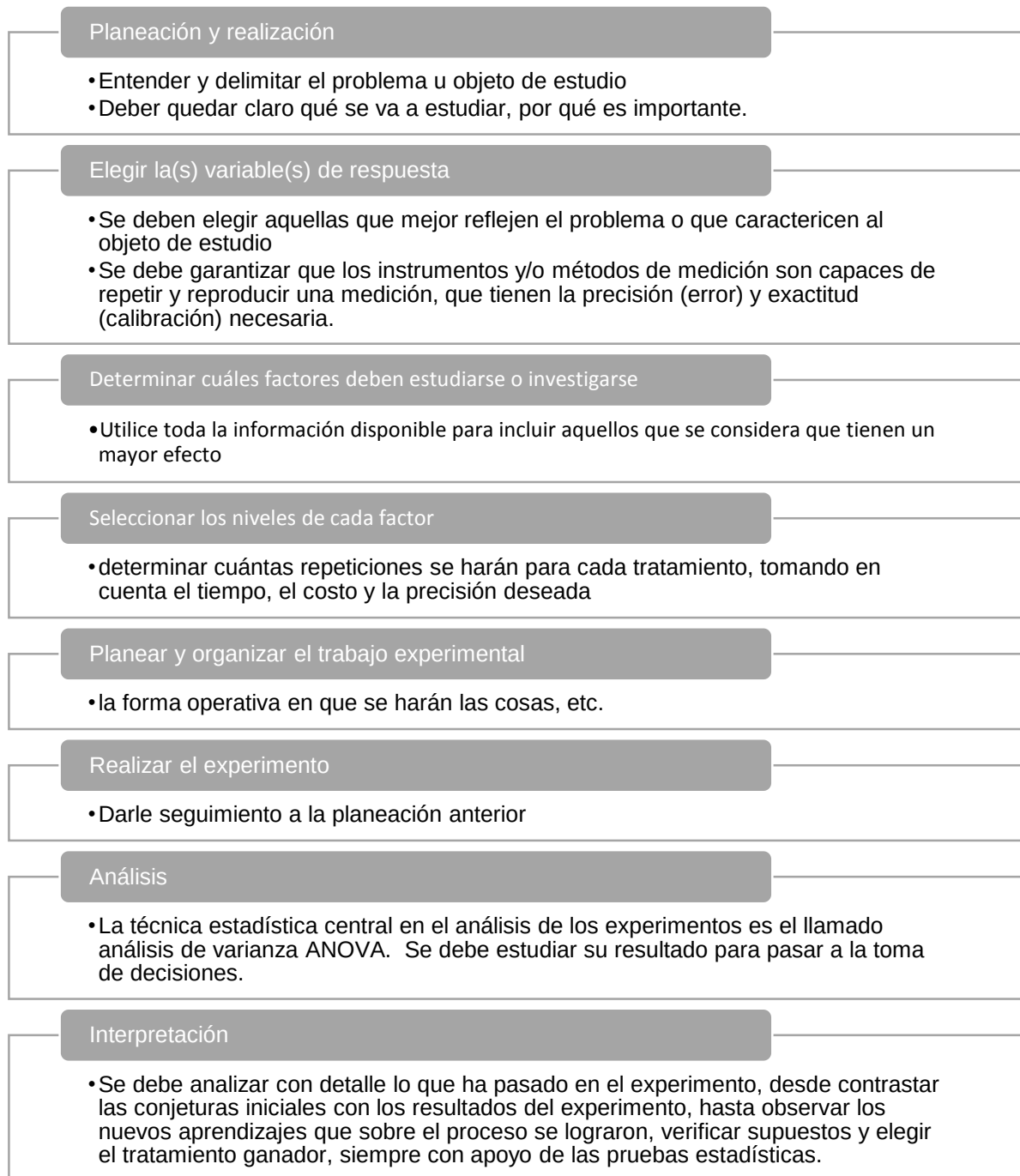


Figura 2 Etapas del diseño experimental

1.12.2 Clasificación de los diseños experimentales

Existe una variedad de diseños experimentales para estudiar determinados problemas o situaciones que ocurren en la práctica, lo que hace ineludible saber seleccionar el indicado para nuestra necesidad [49].

Los cinco aspectos que determinan la selección de un estudio se describen a continuación:

1. El objetivo de la experimentación
2. La cantidad de factores a estudiar
3. El número de niveles a probar por cada factor
4. Los efectos a investigar
5. El costo, tiempo y precisión deseada en el experimento

A manera de criterio general el objetivo del experimento es utilizado para clasificar los diseños experimentales como se muestra a continuación:

1. Diseños para comparar dos o más tratamientos:
 - Diseño completamente al azar
 - Diseño de bloques completos al azar
 - Diseño de cuadros latinos y grecolatino
2. Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre una o más variables de respuesta:
 - Diseños factoriales 2^k
 - Diseños factoriales 3^k
 - Diseños factoriales fraccionados 2^{k-p}
 - Diseños anidados
 - Diseño en parcelas divididas
3. Diseños para la optimización de procesos:
 - Diseños para el modelo del primer orden
 - Diseños factoriales fraccionados 2^k y 2^{k-p}
 - Diseño de Plakett-Burman
 - Diseño Simplex
4. Diseños robustos:
 - Arreglos ortogonales (diseños factoriales)
 - Diseño con arreglos interno y externo
5. Diseño de mezclas
 - Diseño simplex-reticular
 - Diseño simplex con centroide

- Diseño con restricciones
- Diseño axial [49]

1.12.3 Diseños factoriales

Este tipo de diseño experimental se utiliza cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. El propósito del mismo es examinar el efecto de varios factores sobre una o diversas respuestas.

Los factores pueden ser de tipo cuantitativo o cualitativo y para estudiar la forma en que cada factor actúa sobre la variable de respuesta es preciso elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos. Al; realizar el diseño factorial completo deben correrse aleatoriamente todas las posibles combinaciones (factores- niveles).

Es común que en gran variedad de experimentos intervenga el estudio de dos o más factores (y sus efectos), en general, los diseños factoriales son los más recomendados para este tipo de experimentos.

A continuación se muestra la familia de diseños factoriales existentes:

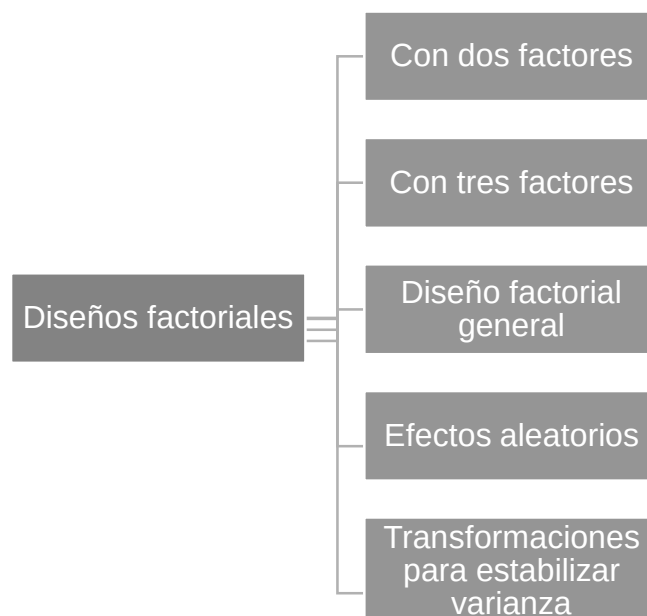


Figura 3 Tipos de diseños factoriales

Los más simples incluyen únicamente dos factores o conjuntos de tratamientos. En ellos existen “a” niveles del factor A y “b” niveles del factor B, los cuales se disponen en un diseño que contiene las “ab” combinaciones de los tratamientos. En general, hay n réplicas.

A continuación se muestra la tabla de ANOVA para el diseño A x B.

Tabla 2 ANOVA para el diseño factorial a x b

<i>Fuente de variabilidad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F</i>	<i>P-valor</i>
<i>Efecto A</i>	SC_A	$a - 1$	CM_A	$\frac{CM_A}{CM_E}$	$P(F > F_0^A)$
<i>Efecto B</i>	SC_B	$b - 1$	CM_B	$\frac{CM_B}{CM_E}$	$P(F > F_0^B)$
<i>Efecto AB</i>	SC_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	CM_{AB}	$\frac{CM_{AB}}{CM_E}$	$P(F > F_0^{AB})$
<i>Error</i>	SC_E	$ab(n - 1)$	CM_E		
<i>Total</i>	SC_T	$abn - 1$			

El modelo estadístico es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

La hipótesis de interés:

$$i = 1, 2, 3 \dots \alpha;$$

$$j = 1, 2, \dots b;$$

$$k = 1, 2, \dots n;$$

Donde

μ = *Media general*

α_i = *Es el efecto debido al i – ésimo nivel del factor A*

b_j = Es el efecto debido al j – ésimo nivel del factor B

$a\beta_{ij}$ = Representa el efecto de interacción debido al ij

ε_{ijk} = Es el error aleatorio

Las hipótesis de interés para los 3 efectos del modelo anterior son:

$H_0 = \text{Efecto de } A = 0$

$H_1 = \text{Efecto de } A \neq 0$

$H_0 = \text{Efecto de } B = 0$

$H_1 = \text{Efecto de } B \neq 0$

$H_0 = \text{Efecto de } AB = 0$

$H_1 = \text{Efecto de } AB \neq 0$

Ventajas de los diseños factoriales

- Se estudia la influencia que tiene el factor individual y la interacción con varios factores
- Se pueden aumentar para crear diseños compuestos
- Pueden utilizarse en combinación de otros diseños de experimentos
- Se pueden correr fracciones de diseños factoriales (útiles cuando se involucran demasiadas corridas)
- La interpretación y el cálculo se pueden hacer con aritmética elemental.

Cuando se quiere investigar la influencia de 2- x factores sobre una o más variables de respuesta se puede construir un arreglo factorial.

Entre los arreglos más utilizados se encuentran: las factoriales $2^k = 2^2, 2^3$ y los factoriales mixtos con no más de 4 niveles de los factores. [49][50]

Al aumentar el número de factores en el diseño de 2^k aumenta el número de tratamiento por lo que las corridas se hacen extensas. En esos casos se consumen muchos recursos por lo que el en cargado del diseño tiene que adecuar las réplicas de acuerdo a la

cantidad de factores y niveles, para ello *Humberto Gutiérrez* recomienda utilizar la siguiente tabla:

Tabla 3 Réplicas o corridas en diseños 2^k

<i>Diseño</i>	<i>Réplicas recomendadas</i>	<i>Número de corridas</i>
2^2	3-4	12,16
2^3	2	16
2^4	1 o 2	16,32
2^5	Fracción 2^{5-1} o 1	16,32
2^6	Fracción 2^{6-2} o 2^{6-1}	16,32
2^7	Fracción 2^{7-3} o 2^{7-2}	16,32

Para llevar a cabo este tipo de estudios se hace uso de herramientas computacionales como las siguientes: Excel, SPSS, Minitab, etc.

El último [51] es ampliamente utilizado tanto en empresas como en el ámbito educativo alrededor del mundo gracias a su facilidad de uso y su amplia gama de herramientas de análisis estadístico y mejora de procesos.

CAPÍTULO III: MARCO CONTEXTUAL

1.13 Sistema eléctrico en México

A continuación se muestra una lista de viñetas en donde se describe el avance histórico anual del sistema eléctrico en el país [52,53]:



Figura 4 Avances importantes en materia de generación eléctrica en México

Para 2016 se tenían ubicadas 45 centrales eólicas cuya capacidad instalada alcanzaba los 4199 MW que representa el 6% de la capacidad total. Y mencionados parques aportaron un 3 % de la generación total nacional.

La mayor concentración se localiza en zonas estratégicas de Oaxaca y en el país se estima un potencial de al menos 15000 MW en las siguientes zonas: Oaxaca, Baja California, Sonora y Tamaulipas en las cuales la velocidad del viento alcanza hasta los 12 m/s de enero-marzo y noviembre y diciembre.

México se encuentra ubicado en el hemisferio norte dentro de una franja latitudinal que va de los 14° a los 33° [53]. Los mayores niveles de irradiación solar global se presentan en los estados del norte como Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Zacatecas, Durango, centro de San Luis Potosí, la llanura costera de Sinaloa, Sonora y la península de Baja California en su parte norte con valores diarios promedio mensual entre los 25 a los $29 \frac{MJ}{m^2}$ durante los meses de abril a junio. En invierno los estados de menor incidencia de irradiación solar global corresponden a Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y Campeche con valores entre los 11 a $13 \frac{MJ}{m^2}$ ya que los fenómenos meteorológicos tienen una presencia importante en esta estación del año [53]. El valor diario promedio anual en la República Mexicana es del orden de los $20 \frac{MJ}{m^2}$.

Para 2016 [52] el país contaba con 23 centrales fotovoltaicas en operación las cuales representan el 0.4% de la capacidad total. El 75% de la capacidad instalada se ubica en: Baja California Sur, Durango, Chihuahua, y Estado de México. Y en ese mismo año se inició la construcción del primer proyecto termo-solar en Agua Prieta, Sonora con una capacidad de 14 MW.

1.14 Microrredes en el país

Una microrred considera todos aquellos mecanismos necesarios para la generación, transmisión, despacho, consumo, administración y operación energética (generalmente a pequeña escala o proyectos de baja tensión).

Se ha trabajado con micro redes híbridas solar-eólicas para electrificación rural a partir de 1991 y han sido instaladas en diferentes comunidades. Los pioneros en el desarrollo de estas instalaciones en el país fueron científicos del instituto de investigaciones eléctricas (IEE), que es un centro de investigación dedicado a las áreas de energía eléctrica y energética de México. Su objetivo principal es la investigación aplicada, eficiencia energética, desarrollo tecnológico, etc. [54]

A continuación se muestra una tabla con información de los sistemas instalados en el país:

Tabla 4 Microrredes instaladas en México [54]

Ubicación	Año	Fotovoltaico (kW)	Eólico (kW)	Diésel (kW)	Población
Ma. Magdalena	1991	4.3	5	18	168
Nva. Victoria	1991	8.6	-	28	355
Oyamello	1991	0.76	5	4	-
X-Calak	1992	11.2	60	125	232
El Junco	1992	1.6	10	-	250
La Gruñidora	1992	1.2	10	-	230
I. Allende	1992	0.8	10	-	140
Calabazal	1992	0.8	10	-	130
Agua Bendita	1993	12.4	10	48	250
Villas Carrusel	1995	0.15	20	-	-
Isla Margarita	1997	2.25	0.5	60	200

San Juanico	1999	17	15	85	400
Pachuca	2000	2.7	2.5	6.4	-
Mexicali	2014	8.9	0.55	5	-
Puertecitos	2015	55	5	75	75

A pesar de todo el avance que se ha tenido en materia de energía aún existen zonas sin electrificación debido a los altos costos que se generarían al tener que prolongar la red principal a zonas remotas [54]. Se mencionarán algunas localidades en la parte de selección de zonas sin electricidad para el desarrollo de este proyecto.

1.15 Clima en la república mexicana

México cuenta con una variedad de climas a lo largo y ancho del territorio nacional [56], esto debido a factores como: la ubicación geográfica (latitud y longitud), el nivel del mar, distribuciones entre agua y tierra, condiciones atmosféricas, etc.

Éstos se clasifican de la siguiente manera:

Por humedad existente: Húmedos, sub húmedos y secos

Por temperatura: Cálidos y templados

A continuación se muestra una tabla con las características de los climas (subdivisiones):

Tabla 5 Relación entre clima, temperatura media de la zona y precipitaciones anuales

Clima	Temperatura media anual	Precipitaciones anuales
Muy Seco	18-22 hasta 26 °C	100-300 mm
Seco y Semi-seco	22-26 y 18-22 °C	300-600 mm
Sub-Húmedo	22-26 °C	1000-2000 mm
Húmedo	22-26 °C	2000-4000 mm
Templado	10-22 °C	2000-4000 mm

Los climas secos extremos predominan en las Zonas: Norte, Noroeste y Noreste del país en los siguientes estados: Aguascalientes, Baja California Norte, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Durango, San Luis Potosí, Nuevo León, Sonora, Sinaloa y Zacatecas.

Mientras que los climas secos se pueden encontrar en:

Baja California (Norte y Sur), Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Tamaulipas, Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Estado de México, Michoacán, Guerrero, Puebla, Oaxaca, Guerrero y Yucatán.

1.16 Metodología

A continuación se desglosarán los pasos para llevar a cabo el análisis y diseño de la microrred (Se basó en la literatura, especialmente en [54] y propuesta propia):

1. Se determina el hogar (comunidad) objetivo

- Se define la carga (Se tratan de bases de datos con demandas de viviendas de interés social).
- Se identifica el clima de la demanda
- Se investigan las zonas sin servicio eléctrico (La base de datos abierta del gobierno brinda información de los sectores y cantidad de hogares que carecen del servicio eléctrico en el país)
- Seleccionar las localidades según su criterio o necesidad (En este caso comunidades aisladas sin acceso a electricidad, cuyo clima sea equiparable al de la demanda elegida).

2. Recopilación de la información

- Se estudian los recursos disponibles de la comunidad para verificar la viabilidad del uso de paneles fotovoltaicos y aerogeneradores (se podrá corroborar la misma en el siguiente paso con el estudio de los factores).
- Se indaga sobre la información climatológica (obtener bases de datos a partir de software como Meteonorm)
- Se realiza una investigación sobre los parámetros, factores o características (inclusive se pueden seleccionar marcas) que afectan más el comportamiento de las tecnologías y así poder elegir los más significativos para su manipulación.
- En el caso de querer indagar sobre el efecto de ciertos parámetros (son demasiados) se realiza una simulación previa contemplando todos éstos para seleccionar 2 niveles de ese factor posteriormente.
- Finalmente se realiza una toma de decisiones para la optimización de la microrred

3. Realizar el diseño de experimentos - simulación

- Seleccionar el diseño experimental que mejor se adapte al objetivo de la investigación.
 - Realizar la experimentación (Para este trabajo será solamente por simulación y se recomienda el método de factorial no replicado).
 - Determinar los factores más significativos y realizar las modificaciones pertinentes para mejora del proyecto (Para esta tesis se seleccionó la mejor orientación e inclinación para los paneles y elegir la marca y altura en caso del eólico)
4. El resultado de la experimentación ayudará a realizar la simulación final con la cual se propondrán las mejores opciones para dimensionar dependiendo de la zona, generación y carga por medio del uso de herramientas estadísticas.
5. Con la simulación lista se proponen porcentajes de instalación por tecnología (Aerogenerador, sistema fotovoltaico y acumuladores) tomando en cuenta la demanda promedio diaria y la generación promedio diaria de las tecnologías en temporada de verano (puesto que es cuando hay más exigencia de energía en la zona).
6. Se definen los límites a respetar (20%-80%) para que el almacenamiento no sufra daños (Evitar la descarga por debajo del 20% ya que se produce la sulfatación o la sobrecarga por encima del 100% para no producir gasificación). Se dimensionan los porcentajes propuestos en el punto pasado y la desviación estándar nos dice qué tan distribuidos están los datos respecto a la media, si los datos sobrepasan los límites referenciados se descarta el uso de ese diseño, también se obtienen los mínimos, máximos y se contabilizan los datos, con lo que se puede determinar las horas en las que la carga careció del servicio eléctrico.

1.17 Definiendo el perfil de carga

El dimensionamiento se lleva a cabo a través de:

- La demanda (carga) energética a cubrir.
- El recurso del que dispone la zona.

El recurso lo proveerá la simulación en Trnsys-meteonorm y el perfil de demanda se obtuvo del artículo titulado “Assessment of electrical saving from energy efficiency programs in the residential sector in Mexicali, Mexico” [55], cuyo objetivo principal se enfocó en la recopilación de indicadores de energía para recomendar acciones de reducción en el consumo de viviendas unifamiliares en la ciudad de Mexicali, Baja California. En él se estudió una muestra de 300 residentes y se analizaron aspectos como: el consumo eléctrico, estatus socioeconómico, el dimensionamiento de los equipos de aire acondicionado, etc.

La residencia elegida consta de una sola planta con losa de concreto, viga y bovedilla con 2 o 3 pulgadas de poli estireno, tiene equipo central de paquete con una capacidad instalada de 3 toneladas y 50 metros cuadrados de área climatizada, en ella habitan 4 personas.

En invierno presenta una demanda máxima de 1.33 kW al medio día y en verano se quintuplica debido a las condiciones climatológicas que prevalecen en la zona.

En la figura 5 se muestra el listado de equipos electrónicos de la vivienda considerada, se puede apreciar que de en total suman 16588 watts.

A EQUIPO		Potencia				
DESCRIPCION	CANT	W	S-Bus	L-Bus	FACTOR	TOTAL
Ventilador pedestal	0	65	133		0.6	0
Ventilador de techo	0	65	67		0.3	0
Refrigerador 21 ft3 usado	0	500	853		0.5	0
Refrigerador 18 ft3 usado	0	400	478		0.4	0
Refrigerador mediano (13-15 ft3) i	0	295	302		0.3	0
Refrigerador chico usado	0	300	512		0.5	0
Refrigerador 21 ft3 nuevo	0	375	384		0.3	0
Refrigerador 18 ft3 nuevo	0	350	418		0.4	0
Refrigerador mediano (13-15ft3) r	1	290	297		0.3	7126
Refrigerador chico nuevo	0	128	131		0.3	0
TV Plasma 43-50 pulg	0	80	273		1.0	0
TV color 32-43 pulg	0	150	358		0.7	0
tv color 24-29 pulg	2	120	287		0.7	8601
TV color 19-21 pulg	0	90	307		1.0	0
Impresora color	0	100	341		1.0	0
Secadora de pelo	1	500	17		0.0	34
rr	0		0			0
rr	0		0			0
Radio	0	40	14		0.1	0
Plancha	1	1000	171		0.1	341
Lavadora	1	400	68		0.1	137
Microondas	0	1200	123		0.0	0
Cafetera	0	750	256		0.1	0
Estufa	0	1500	1024		0.2	0
Secadora de ropa	0	3000	512		0.1	0
Boiler eléctrico	0	3000	1536		0.2	0
Computadora	1	300	205		0.2	2662
Impresora	0	90	31		0.1	0
Calentador eléctrico	0	1500	512		0.1	0
Motor 2	0				1.0	0
Motor 3	0				1.0	0
Motor 4	0				1.0	0
Motor 5	0				1.0	0
Motor 6	0				1.0	0
TOTAL		16588	9509	0	14	18901

Figura 5 Impresión de pantalla del simulador utilizado y el listado de equipos de la residencia

En la tabla 5 se muestran los perfiles de consumo diarios para las temporadas de verano e invierno, en zonas de climas secos se puede apreciar una diferencia notable en cada periodo, en este caso la carga diaria de verano equivale a 4.94 veces la de invierno [55]:

Tabla 6 Perfiles de verano e invierno [55]

Consumo Eléctrico En Casa De Interés Social en Mexicali Baja California		
Hora	Consumo en Verano (W)	Consumo en Invierno(W)
1	2637	297
2	2387	297
3	2177	297
4	2027	297
5	1937	297
6	1964	314
7	2117	297
8	3000	870
9	3420	870
10	4243	1143
11	4846	1246
12	5145	1331
13	5535	1075
14	5835	1075
15	6005	1075
16	6035	1075
17	5915	1075
18	5655	1075
19	5235	1075
20	4905	1075
21	4595	1075
22	4295	1075
23	3217	297
24	2917	297

1.18 Selección de las localidades

En el capítulo anterior se seleccionó un perfil de carga en una residencia de interés social perteneciente al municipio de Mexicali, Baja California y se describieron las características de mismo [55]. Una de las peculiaridades del estudio es que se trata de una zona con clima seco extremo, en donde las condiciones climatológicas afectan negativamente al consumo, y en las conclusiones se menciona que en verano los consumos dependen del área acondicionada (hábitos de uso de los equipos de refrigeración).

El autor de [56] en su trabajo titulado “Metodología para caracterización climatológica de la república mexicana con propósitos de análisis y evaluación de acciones de ahorro y uso eficiente de la energía” utiliza la técnica de “horas grado” para:

- Estimar la capacidad de climatización de las edificaciones sin importar la zona donde se ubique
- Determinar los consumos de energía eléctrica mediante la relación zona-clima y periodo de tiempo o estación

Grados hora: Las ubicaciones geográficas de las ciudades de México presentan un comportamiento de temperatura y humedad relativa todo el año esto permite caracterizar climatológicamente una región. La temperatura de una región se registra hora por hora para poder encontrarse. Mientras más se aleje la temperatura de las condiciones de confort, mayor es la necesidad de climatización, es decir, puede requerir enfriamiento en climas cálidos o calefacción en los fríos.

Representan el efecto combinado de la temperatura ambiente y la duración de ésta a lo largo de un periodo de tiempo.

En el estudio indica que el clima y la temperatura son factores importantes en los hábitos de consumo de energía eléctrica. A menor temperatura ambiente el tiempo de funcionamiento de los equipos de refrigeración será menor y viceversa.

Algunas ciudades con climas distintos como los secos y cálidos tienen un comportamiento térmico similar en ciertos periodos como en verano, sin embargo, las temperaturas máximas y mínimas no definen por completo el comportamiento energético, si dos ciudades tienen el mismo rango de temperaturas pero la duración anual varía, su comportamiento energético será diferente. [56]

Debido a los datos presentados anteriormente se decidió utilizar la metodología que se está desarrollando en el presente trabajo en zonas de clima seco y seco extremo (tomando en cuenta la zona del perfil de demanda) para que no haya discordancia demanda-clima-zona. De modo que el siguiente paso será analizar el clima que prevalece en el país.

1.18.1 Zonas sin electricidad

En el capítulo 2 y 3 se introdujo al tema de la electricidad en México, según datos del “Mexico Energy Outlook 2016” publicado en la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), la demanda en el país se ha incrementado al doble en los últimos 20 años (2014) y el 99% de la población tiene acceso a la electricidad [57]. El 1% restante corresponde a zonas de difícil acceso que hace que resulte complicado y costoso aumentar la red principal.

En 2015 la Secretaría de Energía publicó una base de datos de un censo en donde aparecía la lista de regiones sin abasto eléctrico, dicho archivo contiene la siguiente información: estado, municipio, localidad, total de habitantes, total de habitantes beneficiados con el servicio y grado de avance.

De 237,353 familias sin energía sólo 22,235 se vieron beneficiadas para entonces [58] y en todos los estados de república había zonas sin electrificar.

A partir de la lista antes mencionada y de los datos climatológicos obtenidos en la sección pasada se seleccionaron 10 localidades en la parte Norte, Noreste y Noroeste de México principalmente, las cuales se describen a continuación:

Tabla 7 Localidades elegidas (Zonas Secas y Muy secas)

Estado	Municipio	Localidad	Clima
Aguascalientes	Aguascalientes	La aguja	Seco
Baja California	Mexicali	Ejido Laguna Salada	Muy Seco
Baja California	Ensenada	San Gregorio	Muy Seco
Baja California Sur	Loreto	El Saucito	Muy Seco
Chihuahua	Guadalupe	Ojos Calientes	Muy Seco
Coahuila de Zaragoza	Acuña	Venustiano Carranza	Seco
Durango	Tlahualilo	La Flor	Muy Seco
Guanajuato	San Diego De La Unión	Pozo Hondo	Seco
Nuevo León	Bustamante	San Isidro	Seco
Sinaloa	Ahome	Cerro Prieto	Muy Seco
Sonora	Hermosillo	El Colorado	Muy Seco

El mapa de la figura 6 muestra los climas en las diferentes regiones del país, su división política y las localidades para realizar el estudio:



Figura 6 Mapa de la república mexicana con división política, climas y localidades elegidas para estudio (Elaboración propia con datos de INEGI [59][60])

CAPÍTULO IV: DESARROLLO Y RESULTADOS

En este capítulo se presentarán las deducciones de la metodología propuesta para el dimensionamiento de una microrred utilizando herramientas estadísticas como apoyo para la toma de decisiones.

Cabe mencionar que en el primer sitio de estudio se muestra el proceso completo por pasos y en los siguientes lugares simplemente se da una breve descripción de la zona y se mostrarán los resultados más trascendentes además de las interpretaciones.

El siguiente diagrama describe el proceso que se llevará a cabo:



Figura 7 Proceso de diseño

Para el último punto de la figura 7 (Uso de estadística para dimensionamiento) se realizó el procedimiento mencionado en la figura 8:

Cálculo de demanda	•Se obtiene la demanda total en los meses críticos (En caso de México, zona norte Junio-Septiembre)
Generación Aerogenerador y Fotovoltaico	•Se mide la generación de un aerogenerador y un sistema fotovoltaico de 1kW durante los meses críticos
Promedio diario	•Se obtiene el promedio diario de demanda y generación
Propuestas	•Se proponen porcentajes de instalación (FV-EO-Almacenamiento). Las propuestas también giran en torno a la influencia que tuvieron las tecnologías.
Elección del sistema idóneo	•Elegimos el sistema de acuerdo al porcentaje del estado de carga de la batería (20-80%). Éste nos indica si está sobrado o falta almacenamiento.

Figura 8 Procedimiento para optimización final en base a valores estadísticos

1.19 Ejido Laguna Salada, Baja California

Recopilación de la información

Se localiza en el municipio de Mexicali en el estado de Baja California, México.

Sus coordenadas son

Latitud: 32.181111

Longitud: -115.662778

Se encuentra a una altura media de 25 m sobre el nivel del mar y según la información obtenida en los datos abiertos de la secretaría de energía [58] la localidad tiene 5 habitantes y ninguna vivienda cuenta con electricidad.



Figura 9 Mapa Satelital De Ejido Laguna Salada (Fuente: INEGI, Google Earth [59, 61])

Según comenta Compean, G en [60], esta región presenta un clima catalogado como BW basados en la clasificación de Koppen, que significa calor seco con invierno fresco además de lluvias durante el verano y los meses de invierno. Se tienen vientos de

noroeste a sureste de diciembre a abril, y vientos de sureste a noroeste de junio a octubre.

La mayoría de las plantas se pueden clasificar como arbustos “xerophyte” (típica de ambientes áridos y semiáridos).

Uso de Meteonorm para recopilar datos climatológicos del área de estudio

Se inicia por buscar la zona de interés (en caso de no encontrarla se puede dar de alta con las coordenadas de la misma).

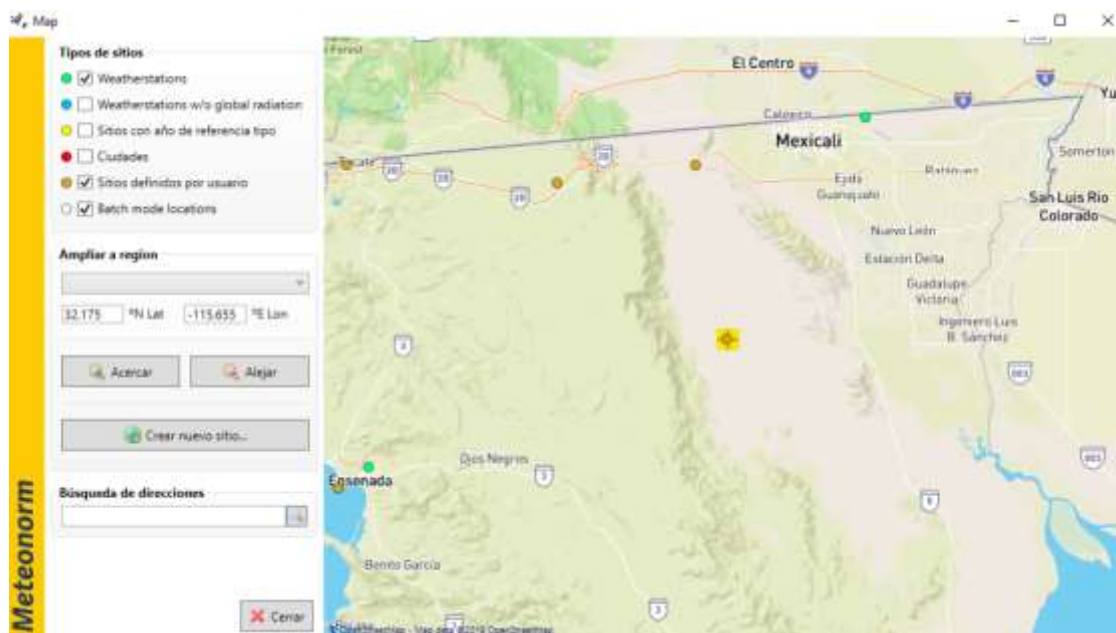


Figura 10 Ingresando coordenadas a Meteonorm

Posteriormente se seleccionaron las bases de datos a utilizar como se muestra en la figura:

Figura 11 Seleccionando los datos a utilizar

El siguiente paso consiste en seleccionar un formato de salida válido para poder utilizar la información en Trnsys, por lo que se eligió el TMY2 (como verá en la figura 11).

Figura 12 Seleccionando el formato para trabajar en Trnsys

Por último nos genera el archivo climatológico de la zona y nos muestra gráficas con los datos obtenidos, como por ejemplo: la radiación (Figura 12), temperatura (Figura 13), precipitación, duración de la insolación, etc. Cabe mencionar que no aparecen los datos de la velocidad de viento sin embargo se calcularon y cuenta con una media anual de 3.4 m/s.

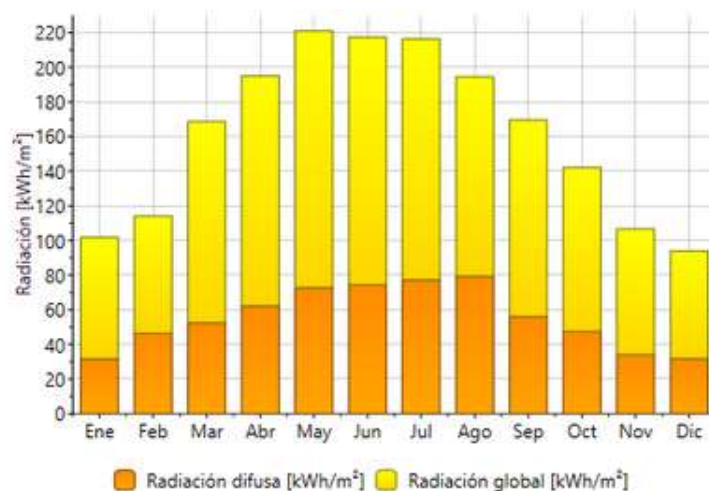


Figura 13 Radiación difusa y global en Ejido Laguna Salada durante el año

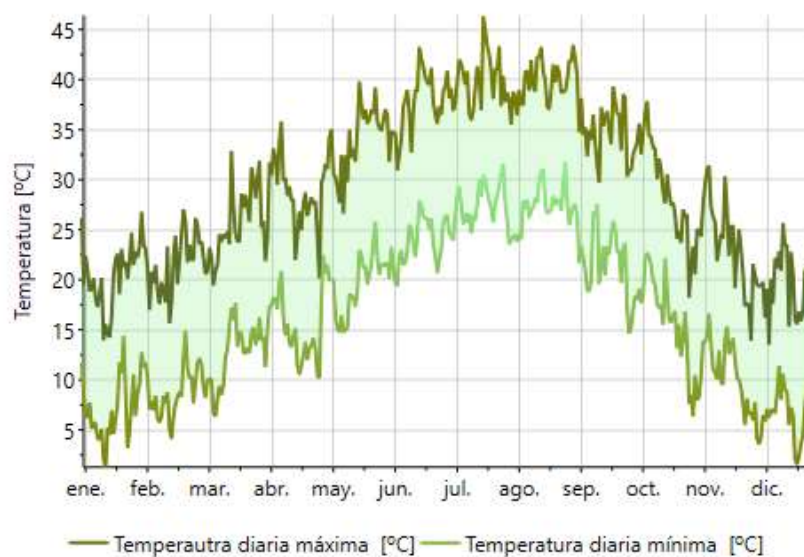


Figura 14 Temperaturas máxima y mínima durante un año

Posteriormente se guardan los resultados y se deben de seleccionar datos horarios, diarios, mensuales, etc. Para efectos de este estudio fue necesario elegir datos horarios como se puede apreciar en la siguiente figura:

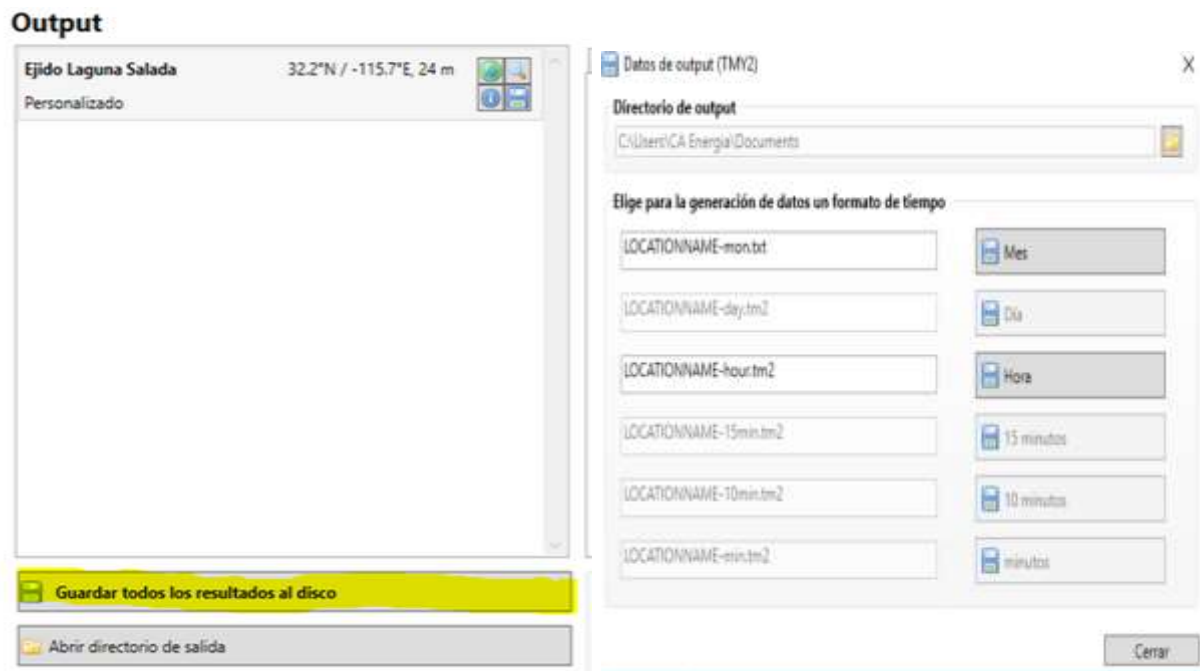


Figura 15 Guardando el archivo en formato horario

Realizar el diseño de experimentos (Simulación)

Como se mencionó anteriormente, este proceso sirve para identificar los parámetros o factores que afectan más al sistema, de manera que en respuesta podremos modificar ciertas características de la microrred para optimizar su funcionamiento.

Para realizar el diseño de experimentos se necesita:

1. Delimitar la problemática
 2. Identificar los factores que afectan al sistema y pueden estudiarse mediante experimentación
 3. Identificar los niveles de cada factor a estudiar
 4. Identificar la respuesta
 5. Seleccionar el diseño experimental más adecuado
 6. Realizar el experimento
- I. Se requiere realizar el diseño óptimo de una microrred FV-EO-Almacenamiento por lo que se desea recurrir al DOE para optimizar.
 - II. En este estudio existe la limitante de que se realizará el experimento sólo por simulación y se seleccionaron los factores mencionados en la figura de acuerdo al estudio de la siguiente literatura [17][62][63][64][65]:

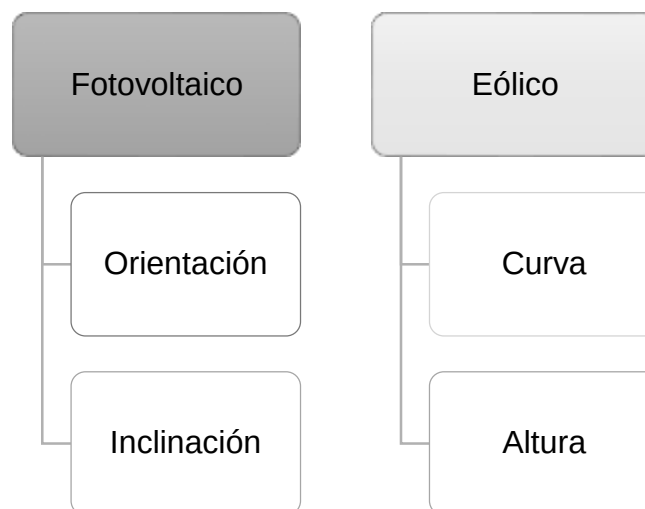


Figura 16 Factores seleccionados por tecnología

Para efecto del análisis fotovoltaico los parámetros más importantes fueron la orientación e inclinación, además de que en Trnsys son fácilmente manipulables.

En el caso del aerogenerador la generación energética depende mayormente de la curva de potencia y en segundo lugar de la altura ya que de esta depende la velocidad del viento.

III. Para cada factor se determinaron dos niveles:

En el caso del aerogenerador se seleccionaron dos curvas distintas (marcas) de aerogeneradores con 1 kW de potencia nominal de salida. Al momento de instalación la altura puede variar desde los 7 metros de altura como mínimo (según se especifica en los manuales de usuario de los mismos) por lo que ese factor se tomó en cuenta para el diseño

En el caso del sistema fotovoltaico se pueden proponer dos orientaciones e inclinaciones pero se decidió llevar a cabo un diseño de experimentos factorial general previo (para justificar la elección) que constaba de dos factores, siete niveles (Orientación: 0, 30, 60, 90, 270, 300, 330, inclinación: 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90) y dos réplicas (se tomaron en cuenta datos de dos semanas típicas, una en junio y la otra en agosto para llevar a cabo el experimento), de manera que como se muestra en la siguiente figura de interacción, los niveles seleccionados fueron, en el caso de la inclinación: 0, 15 y la orientación: 0, 30 debido a que presentaban mayor generación. Este estudio se realizó en todas las zonas seleccionadas pero solamente se mostrarán los resultados y no se ahondará en el proceso ya que como comentaba anteriormente, se pueden realizar propuestas dependiendo del criterio del diseñador.

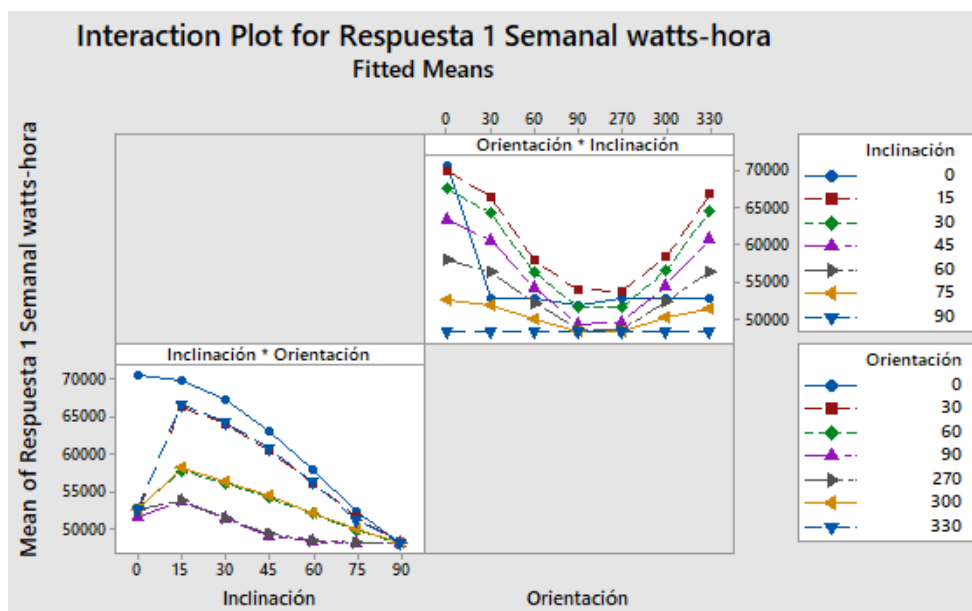


Figura 17 Interacciones dobles para seleccionar niveles de experimentación fotovoltaica

Tabla 8 Factores y niveles seleccionados por tecnología

Nivel/Factor	Orientación	Inclinación	Curva	Altura
Bajo	0	0	Whisper	7
Alto	30	15	HLD	20

- IV. La respuesta será la energía captada en Wh o kWh
- V. Debido a que solamente se puede tener una réplica (por ser simulación) se recomienda el uso de diseño de experimentos por factorial no replicado.
- VI. Realización del experimento:

Para el último paso se hará uso de Trnsys como software de simulación y minitab para diseño de experimentos.

A continuación se muestra el simulador desarrollado para hacer las pruebas:

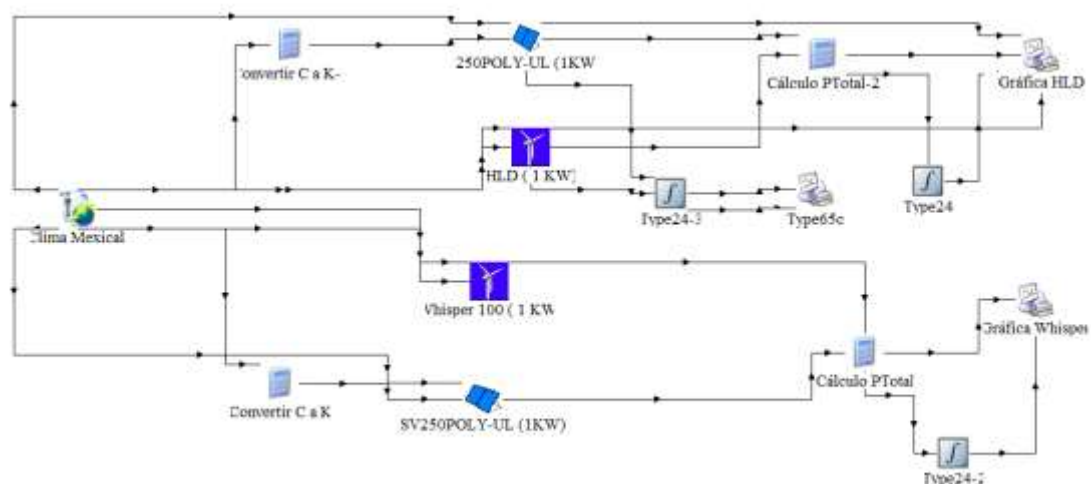


Figura 18 Simulador para DOE

En él se muestran los paneles fotovoltaicos y aerogeneradores, se variarán los datos según se requiera en el experimento.

Los datos climatológicos se dan de alta en el type 109 como se muestra en la figura 18:

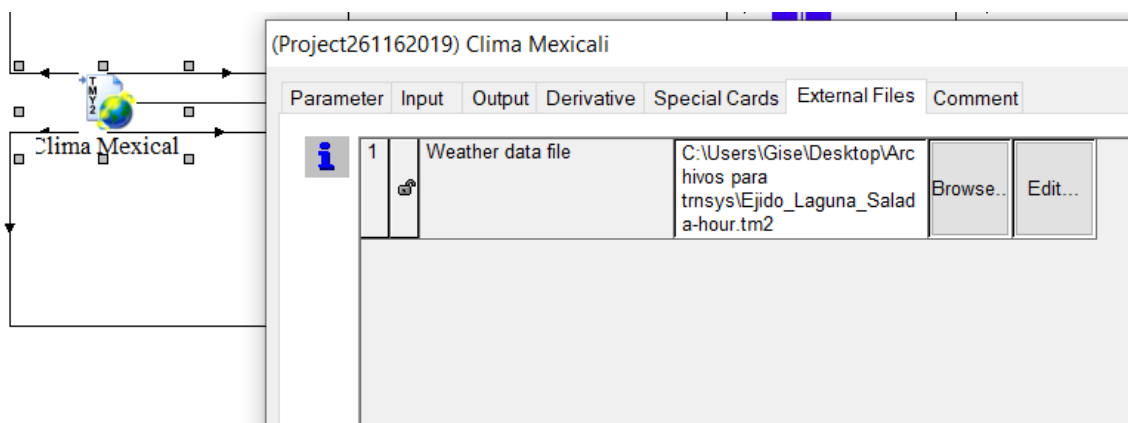


Figura 19 Carga de archivo climatológico horario del Ejido Laguna Salada

Para dar de alta los datos del aerogenerador se trabaja con un archivo externo en formato “.dat”, en él se definen las características del mismo y se carga la curva de potencia mediante una serie de puntos, en la figura podrá apreciar el formato descrito:

```

Whisper102: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
MECS_Type Bonus 10M (60)
MECS_REF www.bonus.dk
Len_Unit m
Spd_Unit m/s
Pwr_Unit kW
Ctl_mode P
Rotor_Ht 6.00
Rotor_Dl 2.10
Sensor_Ht 10.00
Shear_exp 0.16
Turb_Int 0.10
Air_Dens 1.225
Pwr_Ratd 0.900
Spd_Ratd 12.5
Num_Pair 26
0 0.00
1 0.00
1.5 0.00
2 0.00
2.5 0.00
3 0.00
3.5 0.03
4 0.05
4.5 0.05
5 0.08
5.5 0.1
6 0.15
6.5 0.18
7 0.20
7.5 0.30
8 0.35
8.5 0.38
9 0.40
9.5 0.45
10 0.50
10.5 0.50
11 0.64
11.5 0.05
12 0.05
12.5 0.90
13 0.90

! Wind Turbine type --- NOTE: This is the NEW Type 90 data file format (HYDROGENS Type 190 format)
! Data source
! Length unit, must be m (do NOT edit)
! Speed unit, must be m/s (do NOT edit)
! Power unit, must be m (do NOT edit)
! Control mode: S=stall; P=pitch; V=variable speed !! EXACTLY 1 SPACE BEFORE THE 'S', 'P' or 'V' character !!
! Rotor center height, meters
! Rotor diameter, meters
! Sensor Height for data pairs given here below, meters (often rotor center height)
! Power-law exponent for vertical wind profile
! Turbulence intensity valid for this curve
! Power curve air density, kg/m3
! Rated power of the turbine, kW
! Rated wind speed, m/s
! Number of (wind speed, power) data pairs in the file
! First data pair (wind speed, power) - Free format - ALWAYS START AT 0.0 !!!

! Second data pair - Free format
! ...

! ...
! Use Maximum 100 data pairs !!!
! ...

! Last data pair - Free format

```

Figura 20 Carga de los datos del aerogenerador (Datasheet)

Para tener un 1 kW de instalación fotovoltaica se trabajó con cuatro paneles en serie de 250 W. Se seleccionó un panel policristalino de venta en el mercado y se dieron de alta sus características en el type 94 como se muestra en la figura 20.

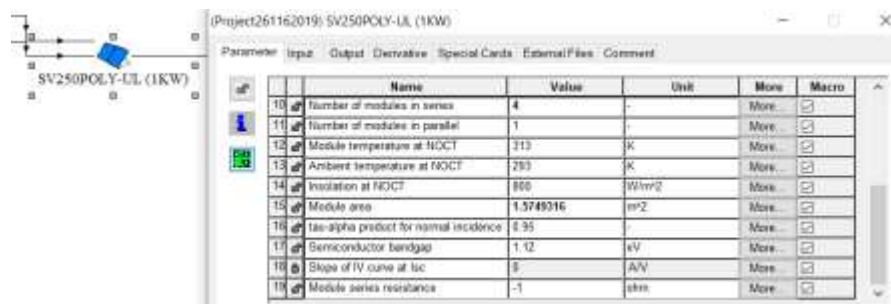


Figura 21 Carga de datos del sistema FV

El integrador nos dará la suma de la energía captada por el sistema durante 24 horas (experimento por 1 día típico), en la siguiente figura se muestra el periodo de integración

Una vez listo el simulador y obtenidos los datos se hizo una tabla para dar de alta los mismos y posteriormente cargarlos a Minitab.

Tabla 9 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano

Inclinación (Grados)	Orientación (Grados)	Altura (m)	Marca o curva del aerogenerador	Respuesta Energía (Wh)
0	0	7	HLD	8709
15	0	7	HLD	8220
0	30	7	HLD	7833
15	30	7	HLD	7507
0	0	20	HLD	9734
15	0	20	HLD	9245
0	30	20	HLD	8858
15	30	20	HLD	8532
0	0	7	Whisper	7941
15	0	7	Whisper	7452
0	30	7	Whisper	7064
15	30	7	Whisper	6738
0	0	20	Whisper	8425
15	0	20	Whisper	7936
0	30	20	Whisper	7549
15	30	20	Whisper	7223

Diseño de experimentos factorial no replicado en minitab

En la ventana de creación se da de alta la información de acuerdo a la necesidad, en este caso se seleccionaron 4 factores, y el tipo de diseño fue factorial de dos niveles.

Se trabajó con un diseño factorial completo de una réplica sin bloques debido a la cantidad de factores a manejar (en la sección de marco teórico – diseños factoriales aparecen las recomendaciones dependiendo el tipo de diseño experimental a utilizar y los factores seleccionados). En la siguiente figura se muestra lo comentado anteriormente:

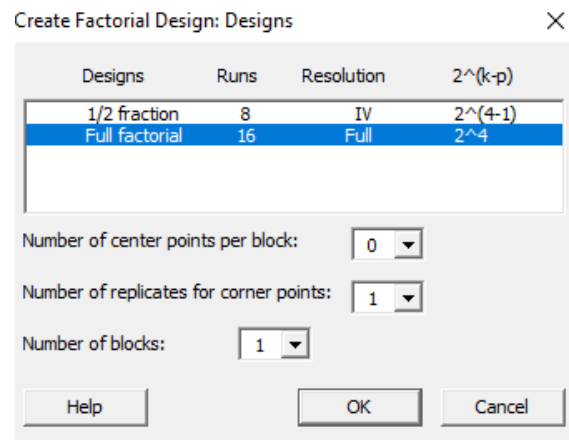


Figura 25 Factorial completo con 1 replica

Y se da de alta la información de los factores:

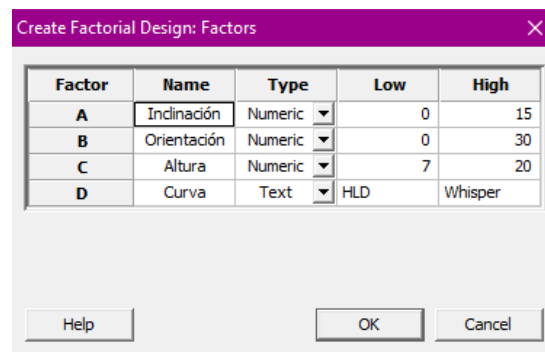


Figura 26 Se nombran los factores y definen los niveles

A continuación la figura muestra los datos dados de alta de manera aleatorizada:

Worksheet 1 ***									
↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8-T	C9
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Inclinación	Orientación	Altura	Curva	Respuesta (watts)
4	7	4	1	1	0	30	20	HLD	8343
5	11	5	1	1	0	30	7	Whisper	6546
6	1	6	1	1	0	0	7	HLD	8930
7	5	7	1	1	0	0	20	HLD	9836
8	3	8	1	1	0	30	7	HLD	7437
9	12	9	1	1	15	30	7	Whisper	7887
10	16	10	1	1	15	30	20	Whisper	8301
11	8	11	1	1	15	30	20	HLD	9685
12	9	12	1	1	0	0	7	Whisper	8039
13	10	13	1	1	15	0	7	Whisper	8170
14	15	14	1	1	0	30	20	Whisper	6960
15	6	15	1	1	15	0	20	HLD	9968
16	4	16	1	1	15	30	7	HLD	8778

Figura 27 Datos dados de alta

Se realiza el análisis del diseño factorial, como se muestra en la figura 27:

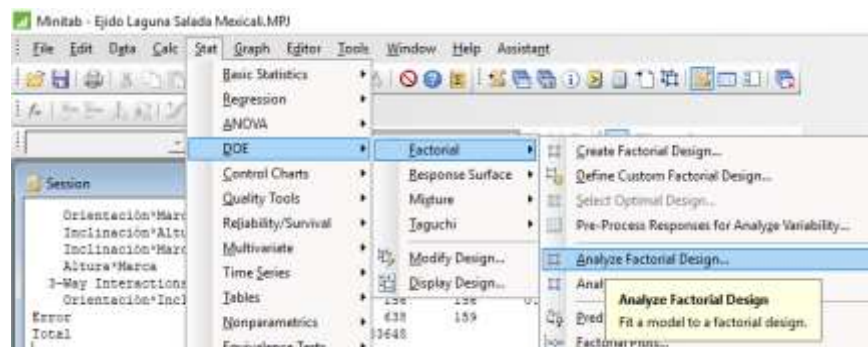


Figura 28 Análisis del diseño factorial

Se selecciona un nivel de confianza a 95%, las gráficas de Pareto y Normal además de gráficos 4 en 1. El Pareto y el diagrama de Daniel nos muestran claramente los factores que tienen más efectos significativos.

En el caso del diagrama de Pareto podemos observar que existen seis factores que afectan más al sistema (D, B, A, C, AB y CD).

En el diagrama de Daniel, los factores que se encuentren más alejados de la línea central representan los factores significativos y fueron los mismos que se mencionaron anteriormente.

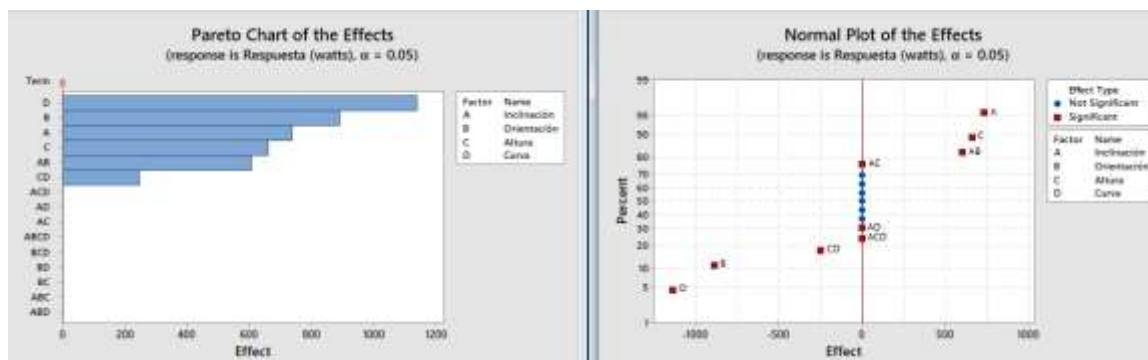


Figura 29 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho.

Sin embargo, al trabajar con una sola réplica el error se vuelve cero por lo que se procede a mandar las interacciones triples y dobles (excepto AC y CD) al error.

Y finalmente el análisis de varianza nos muestra como significativos: La orientación, inclinación, altura, marca, además de las interacciones dobles inclinación-orientación y altura-marca.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	13946159	2324360	27892318.00	0.000
Linear	4	12239503	3059876	36718508.25	0.000
Inclinación	1	2168256	2168256	26019075.00	0.000
Orientación	1	3154176	3154176	37850112.00	0.000
Altura	1	1743720	1743720	20924643.00	0.000
Curva	1	5173350	5173350	62080203.00	0.000
2-Way Interactions	2	1706656	853328	10239937.50	0.000
Inclinación*Orientación	1	1464100	1464100	17569200.00	0.000
Altura*Curva	1	242556	242556	2910675.00	0.000
Error	9	1	0		
Total	15	13946160			

Figura 30 Análisis de varianza final

Para poder determinar los niveles y factores que más afectan a la microrred se hizo uso de las gráficas de interacciones y de efectos principales

En la figura se observa la selección mencionada anteriormente:

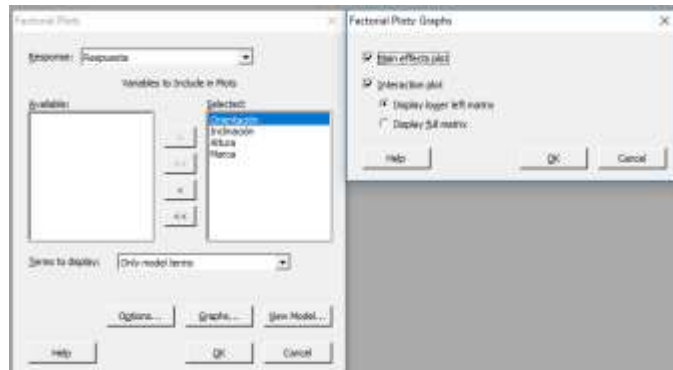


Figura 31 Selección de gráfico de efectos principales e interacciones

En el gráfico de efectos principales se observa el cambio observado en la variable de respuesta debido a un cambio de nivel de factor.

Basándonos en la figura 31 podemos observar que la curva que aporta mayor generación es la HLD debido a que alcanza valores máximos entre los 8750-9000 Wh mientras que el Whisper no llega a generar los 8000 Wh diarios y ambas curvas generan más a una altura de 20 metros.

En el caso del posicionamiento del fotovoltaico hay mejor comportamiento con una inclinación de 15° y aunque en el caso de la orientación no están significativo se muestra mejor respuesta a 0° .

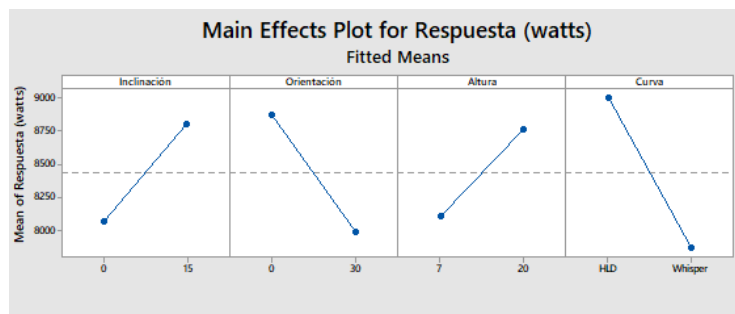


Figura 32 Gráfico de efectos principales

Según Gutierrez [66] dos factores interactúan de manera significativa sobre la variable de respuesta cuando el efecto de uno depende del nivel en que está el otro. La interpretación de la interacción es de vital importancia para entender cómo actúan los factores sobre la variable de respuesta y su interpretación tiene prioridad sobre los correspondientes efectos principales, aunque éstos también sean significativos. Esto se debe a que la interacción termina dominando el proceso.

Se realizó la cita para aclarar que le daremos prioridad a los efectos de las interacciones en todos los casos de estudio en las localidades.

En el caso de la gráfica de interacciones podemos notar el cambio de cada factor al momento de cambiar de nivel (figura 32).

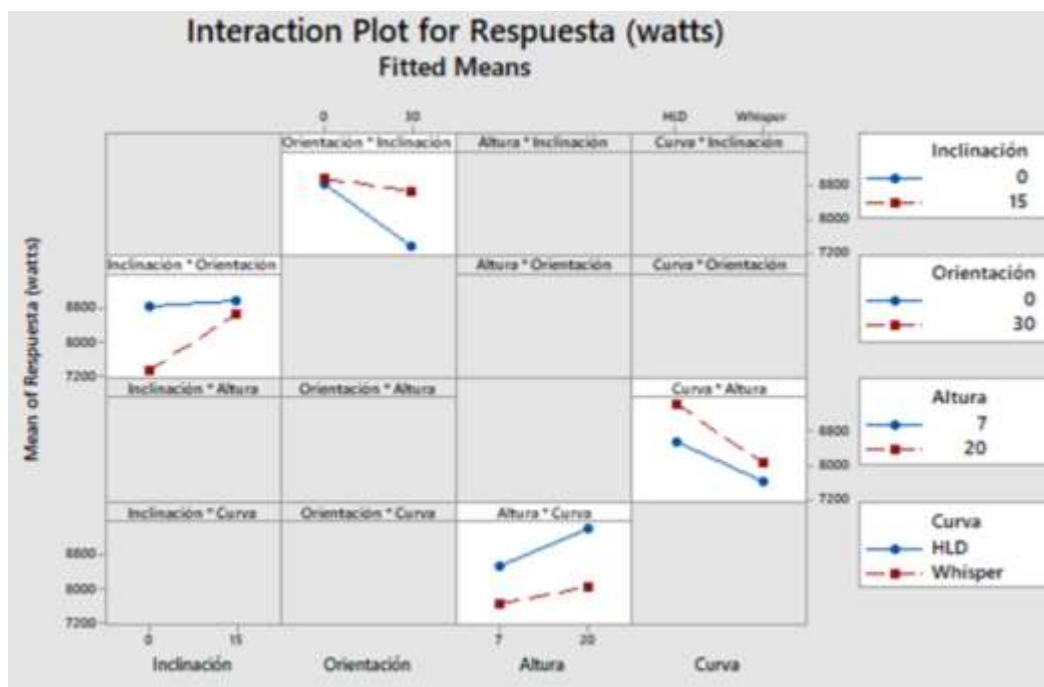


Figura 33 Gráfico de interacciones por respuesta

La fila base muestra la interacción de las curvas (marcas) al cambiar los niveles de la altura, inclinación y orientación.

Podemos apreciar que el Aerogenerador HLD a pesar de ser de la misma capacidad nominal que el Whisper genera más energía en los tres casos y es mucho más claro en el caso de la interacción marca-altura.

En el caso del sistema fotovoltaico podemos apreciar que la inclinación tiene más influencia en la generación.

Tomando en cuenta lo anterior se seleccionaron los siguientes datos para el dimensionamiento y pruebas finales:

- ✓ FV: Orientación de 0° e inclinación de 15°
- ✓ Aerogenerador: HLD a una altura de 20 metros

La simulación puede ser utilizada para todas las ciudades de análisis variando ciertos datos de entrada, al correrlo nos muestra seis pestañas como se aprecia en la figura:

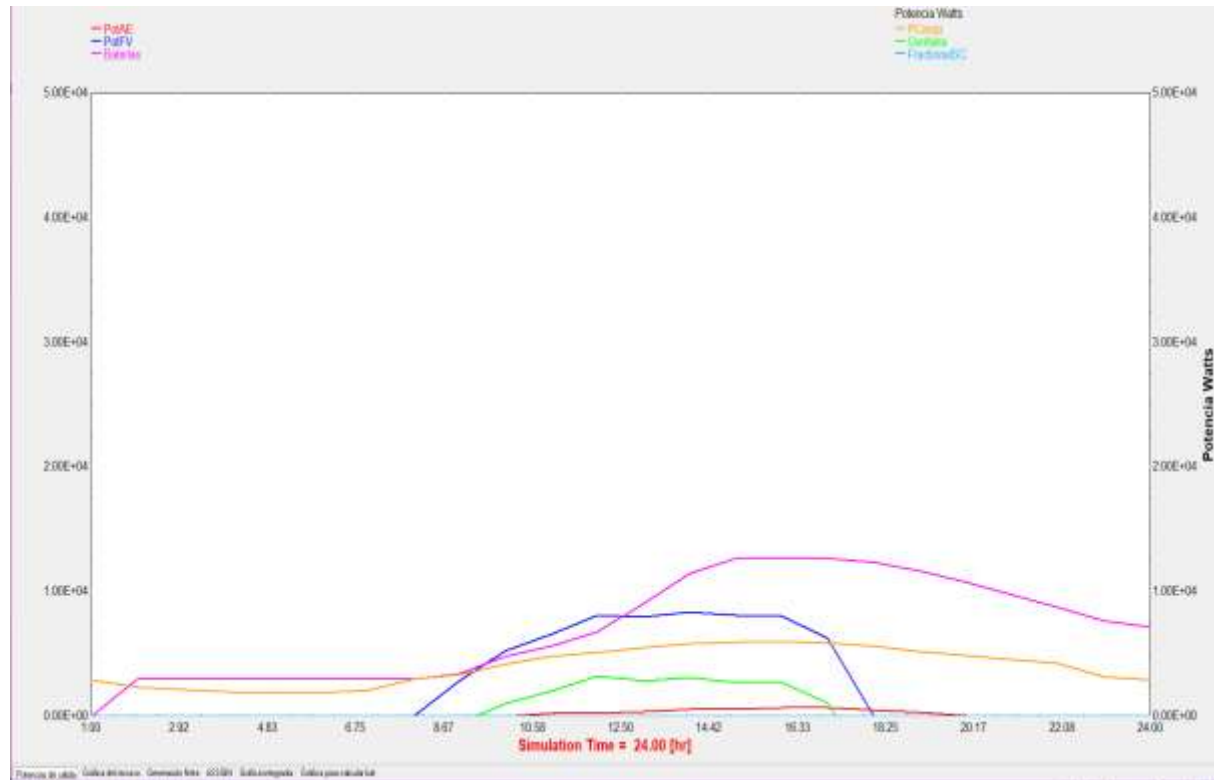


Figura 35 Resultados de la simulación por pestañas

Descripción de cada pestaña:

Potencias de Salida: Nos muestra el comportamiento de la microrred. Aparece la generación de cada tecnología, así como el comportamiento de la batería y el estado fraccionado de carga, además de la demanda. También se calculó la generación neta que corresponde a la generación menos la demanda y representa lo que puede ser almacenado en la batería.

La gráfica del recurso representa la radiación total de la zona (Kj hr m^2) y la velocidad del viento ($\frac{m}{s}$).

La pestaña de generación neta representa la generación menos la demanda (W) y la generación del aerogenerador (W).

La gráfica de la batería representa el comportamiento de la misma (se muestran todos sus parámetros).

La gráfica del integrador nos muestra la generación anual de cada tecnología (Fotovoltaico y Aerogenerador).

La gráfica para calcular la batería nos muestra el comportamiento de la microrred y además realiza el cálculo de la energía necesaria (ideal) para que el sistema permanezca abastecido en el lapso de tiempo simulado.

Dimensionamiento

Determinando cantidades según necesidad

Con la demanda representativa a los meses de verano se realizó la simulación (Junio-Septiembre) para obtener el total de MW necesarios para abastecerla y en total fueron 11.72 MWh.

Tomando en cuenta los datos que nos dio el diseño de experimentos se midió la generación de un aerogenerador HLD a 20 metros de altura durante los meses de verano y brindó 0.3689 MW.

Se realizó lo mismo con un panel solar en condiciones elegidas en el diseño de experimentos y nos brindó 1.038 MW.

Considerando que fueron 122 días, en promedio se necesita abastecer 96065.57 Wh aproximadamente.

Un aerogenerador puede abastecer en promedio 3023 W diarios y una instalación de 1 KW de potencia fotovoltaica brinda una media de 8508 W diarios.

Con estos datos se propusieron porcentajes de instalación de cada tecnología, por otro lado para dimensionar la batería se tomó en cuenta la información de [67] en donde se comenta que para electrificación rural se debe tener una autonomía mínima de 3 días de capacidad en el banco de baterías, además se tomó nota de los días de desabasto energético para dimensionar y en Junio (específicamente en las horas 4112-4280) hubo poca y nula generación, lo cual corresponde a 7 días de ese mes como se muestra en la figura 35:

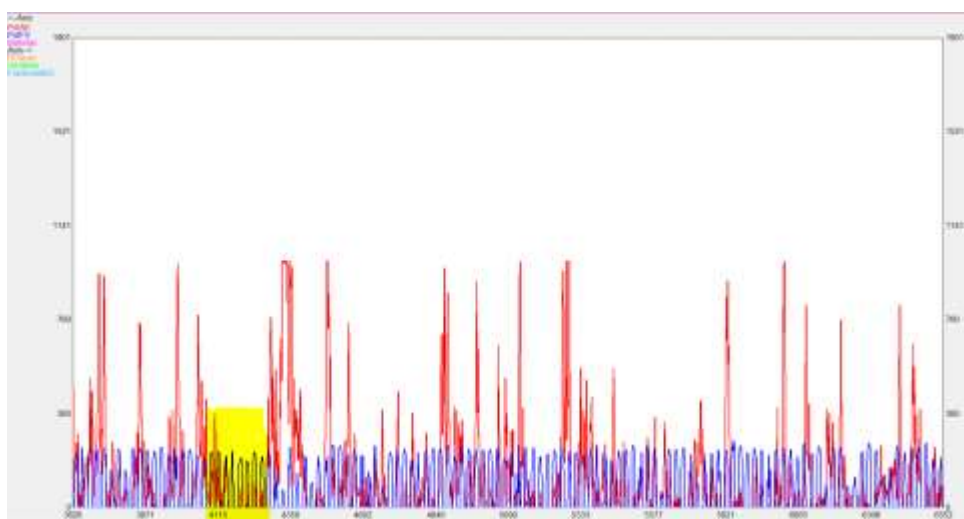


Figura 36 Generación FV-EO durante el mes de junio e indicación de semana sin electricidad en amarillo

Conforme se ha desarrollado el estudio y tras analizar los datos del diseño de experimentos más el estudio de generación en verano por tecnología se decidió trabajar con un porcentaje mayor de paneles fotovoltaicos que aerogeneradores puesto que presentan mayor ganancia energética, sin embargo no se desea descartar el aerogenerador puesto que se complementa (sirve de apoyo en las horas que no existe generación fotovoltaica).

A continuación se presenta la ganancia de energía total en el periodo de verano:

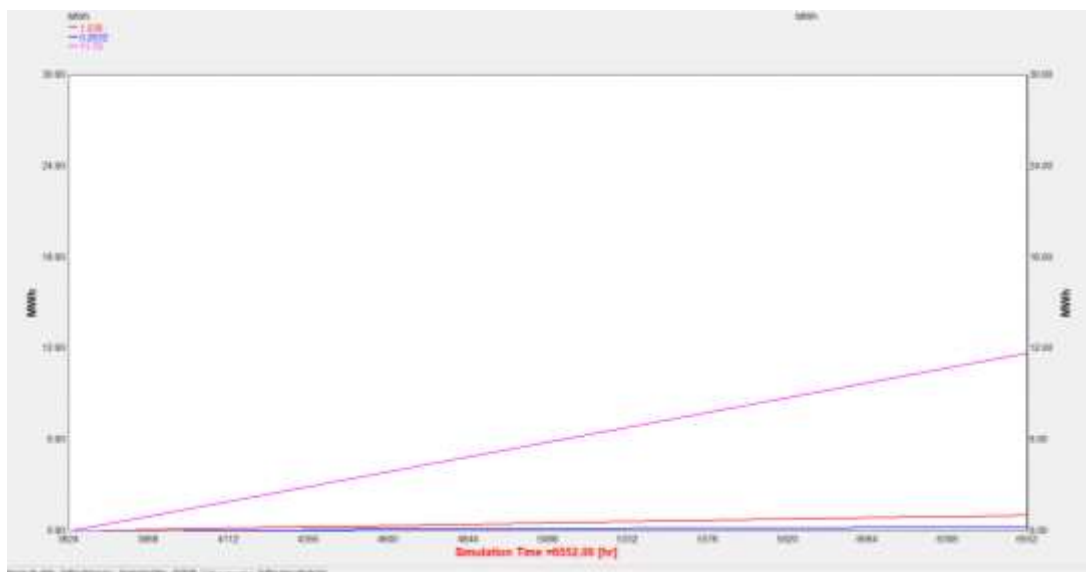


Figura 37 Ganancia del fotovoltaico (1 kW) y eólico (1kW) Vs la carga

A continuación la propuesta por porcentajes (tanto de tecnologías de generación como almacenamiento)

Tabla 10 Porcentajes de prueba sugeridos

Fotovoltaico		Eólico		Baterías		
Porcentaje	Cantidad de paneles 1 kW	Porcentaje	Cantidad de Aerogeneradores	de 12 horas de capacidad kWh	1 Día De capacidad kWh	3 Días según IDEA kWh
80%	9	20%	6	48	96	88
90%	10	10%	3			
100%	11	0%	0			

Para determinar si es una buena propuesta tomamos como base la desviación estándar de la batería utilizando el “SOC”, puesto que nos muestra la variabilidad del estado de carga, para que la batería funcione debidamente no debe permanecer mucho tiempo descargada (que baje del 20% de carga) para evitar la sulfatación [67]. Otro aspecto que debe de considerarse es la carga, si esta no es controlada y excede el 100% de su capacidad repetidamente se produce el fenómeno llamado gasificación (el exceso de oxígeno oxida los sostenes de plomo de las celdas, lo que puede causar el derrumbe de los mismos) [67], por lo que es recomendable que la batería maneje una carga máxima del 80% y mínima del 20%, al mantenerse en ese rango se evita daño prematuro.

Estudio de la desviación estándar por porcentaje

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la desviación estándar del estado de carga así como máximos y mínimos para la selección del dimensionamiento final:

Tabla 11 Análisis de los porcentajes de instalación

Fotovoltaico		Eólico		Baterías				
%	Nro Panel es 1 KW	%	Nro Aerogenerad ores 1kW	Capacidad de almacenami ento (kWh)	Soc Media	Soc Desviaci ón estándar	Min	Ma x
80%	9	20 %	6	48	0.585 96	0.19071	0.191 38	1
80%	9	20 %	6	96	0.663 33	0.12891	0. 24991	1
80%	9	20 %	6	288	0.762 12	0.05772	0.611 69	1
90%	10	10 %	3	48	0.631 58	0.16195	0.191 49	1
90%	10	10 %	3	96	0.707 86	0.09653	0.376 60	1
90%	10	10 %	3	288	0.773 87	0.04489	0.657 17	1
100 %	11	0%	0	48	0.615	0.1712	0.192 7	1
100 %	11	0%	0	96	0.687 3	0.12881	0.196 48	1
100 %	11	0%	0	288	0.763 7	0.0555	0.527 85	1

Resultados con gráficos estadísticos (histogramas)

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento 80 PV-20-EO

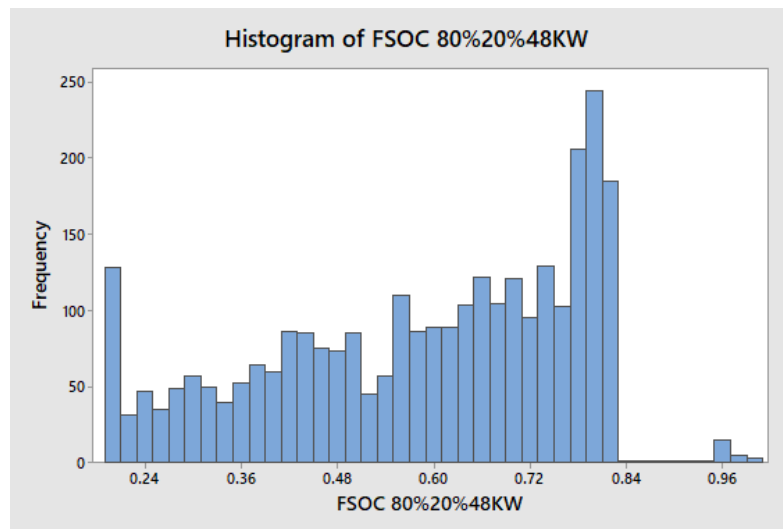


Figura 38 Histograma de comportamiento SOC 48 kWh (Medio día de autonomía)

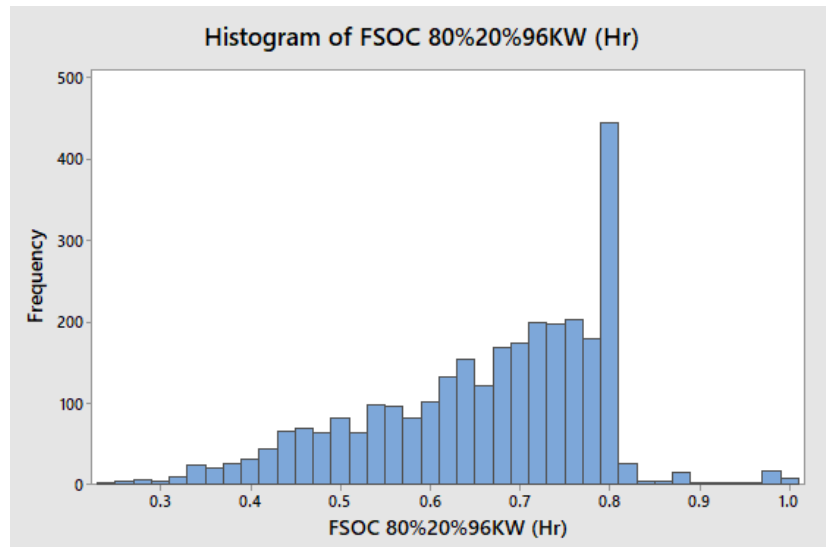


Figura 39 Histograma de comportamiento SOC 96 kWh (1 día de autonomía)

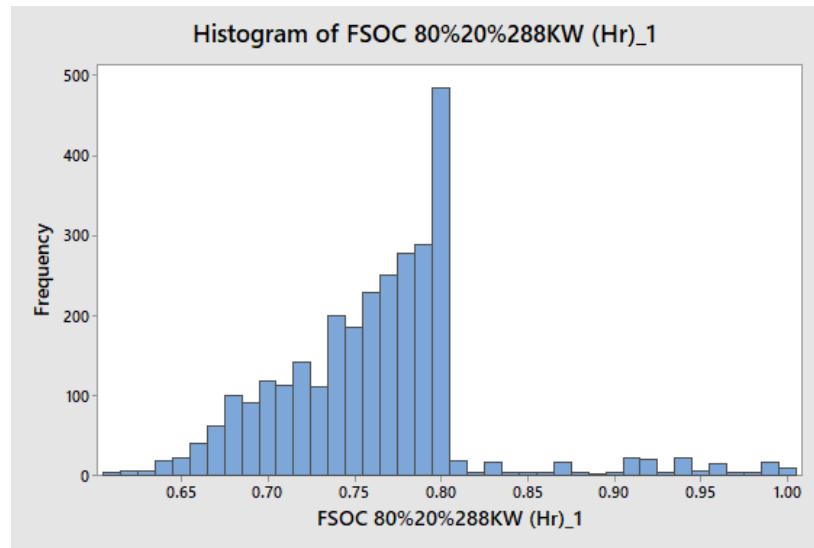


Figura 40 Histograma de comportamiento SOC 288 kWh (3 días de autonomía)
Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento 90 PV-10-EO

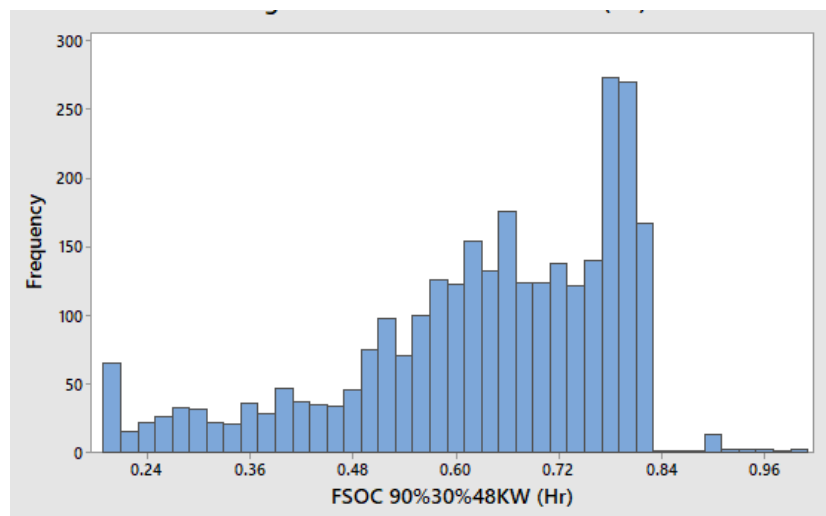


Figura 41 Histograma de comportamiento SOC 48 kWh (Medio día de autonomía)

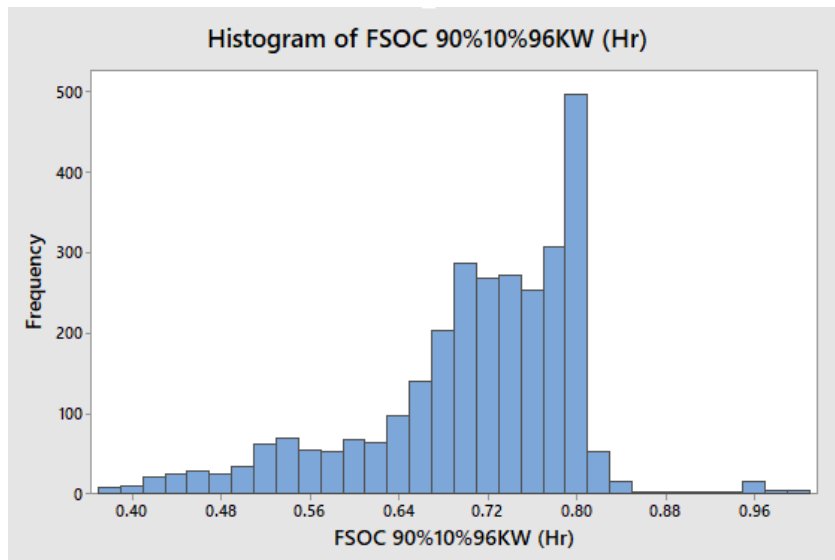


Figura 42 Histograma de comportamiento SOC 96 kWh (1 día de autonomía)

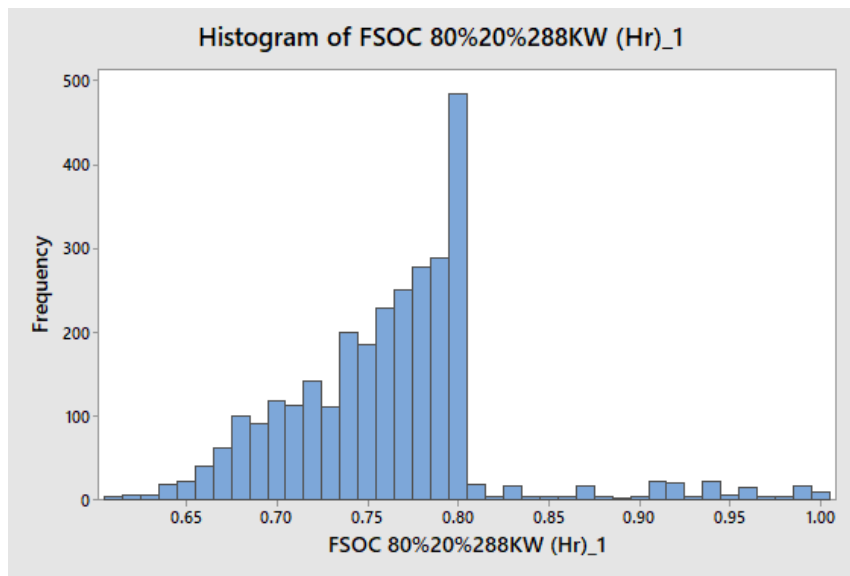


Figura 43 Histograma de comportamiento SOC 288 kWh (3 días de autonomía)

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento 100 PV-0-EO

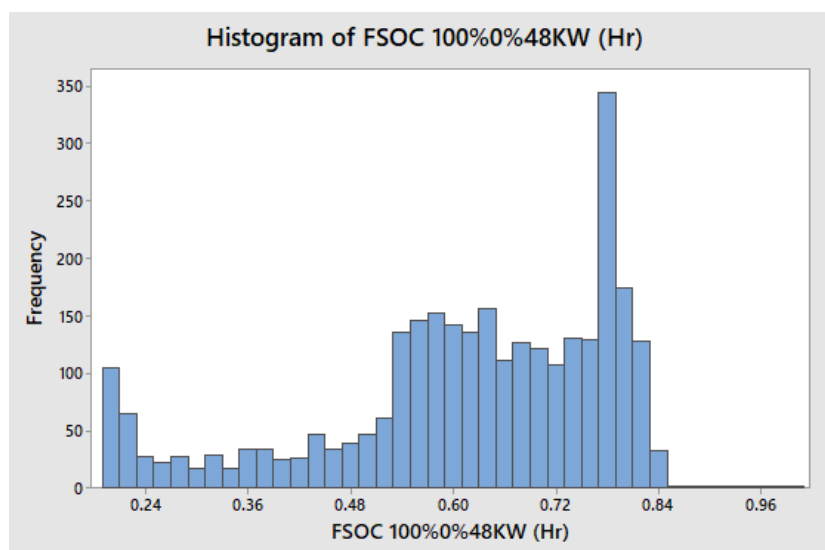


Figura 44 Histograma de comportamiento SOC 48 kWh (Medio día de autonomía)

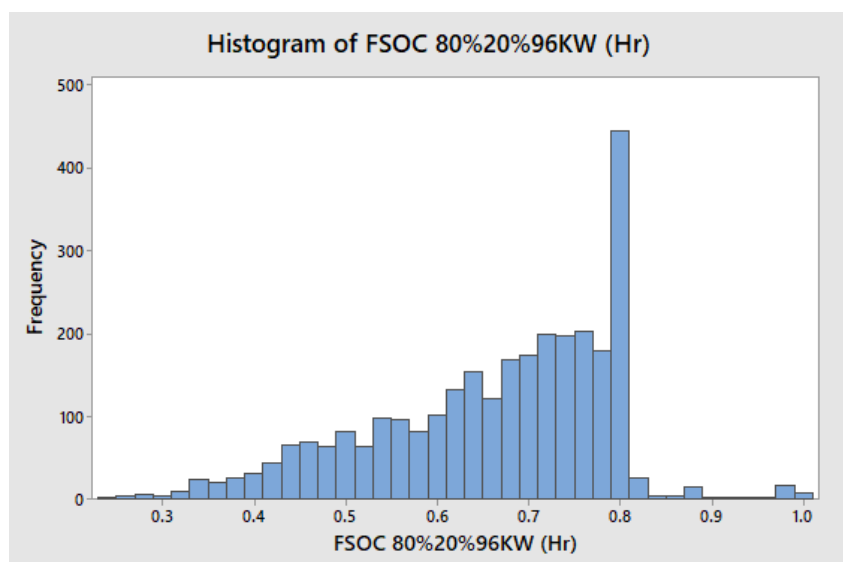


Figura 45 Histograma de comportamiento SOC 96 kWh (1 día de autonomía)

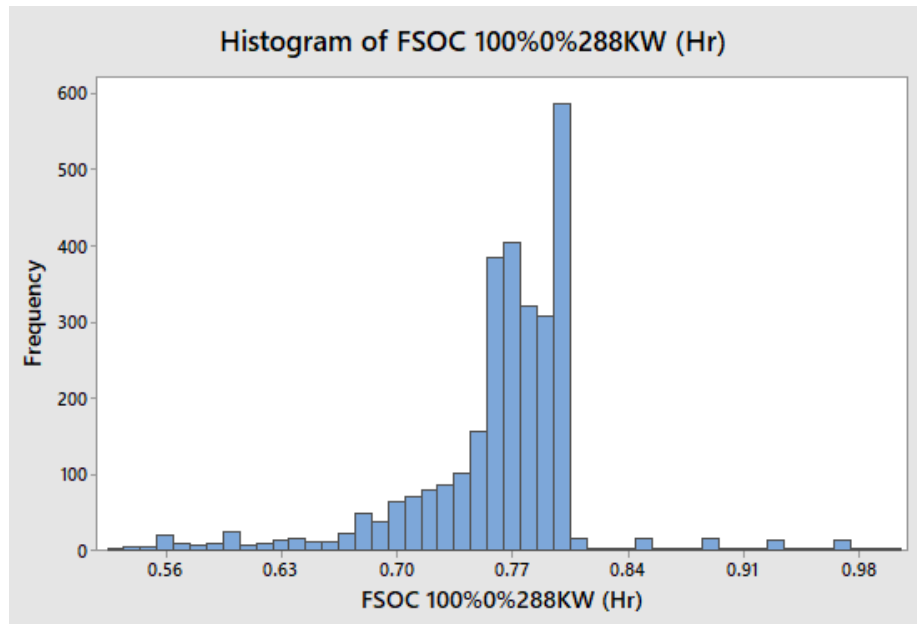


Figura 46 Histograma de comportamiento SOC 288 kWh (3 días de autonomía)

Al analizar el almacenamiento de 48 kWh (Medio día de autonomía) y en base a los resultados de las figuras 37, 40 y 43 es preocupante notar que el valor mínimo del estado de carga permaneció por debajo del 20%, sobre todo en el dimensionamiento de la figura 39 en donde podemos notar que la media fue menor y la desviación estándar mayor en comparación con las otras opciones. Según los datos, el que tuvo mejor comportamiento fue el dimensionamiento de la figura 40, sin embargo no es recomendable ninguno como diseño final.

En el caso de la figura 37 se obtuvo un 4.37% de horas (durante la temporada de verano) en donde la carga permaneció sin electricidad (128 horas exactamente), en el dimensionamiento de la figura 40 fue el 2.21% (65 horas), y en la tercera opción (figura 43) fue el 3.55% por permanecer debajo del límite inferior.

Al examinar las opciones de almacenamiento de 96 kWh (1 día de autonomía) hubo dos opciones en los que el estado fraccionado de carga permanecían por encima del mínimo permisible (figuras 38 y 41), curiosamente el que permaneció por debajo del límite fue la propuesta donde se descartó el aerogenerador (figura 44 con 33 horas sin electricidad), y se demuestra que la instalación eólica en menor cantidad puede hacer la diferencia

cuando se carece de energía solar. Según la evidencia estadística el diseño de la figura 41 tuvo mejor comportamiento con una media ligeramente más alta que el dimensionamiento de la figura 38 y menor desviación estándar.

Al estudiar las instalaciones con 288 kWh de almacenamiento (3 días de autonomía) todas las propuestas se encuentran en el rango permisible, tanto las desviaciones estándar como las medias son muy similares.

En este caso es importante hacer notar que a partir de los 3.4 m/s de velocidad media anual el aerogenerador puede servir de apoyo al sistema en caso de carecer de energía solar.

1.20 La Ahuja, Aguascalientes

Recopilación de la información

Según los datos que nos proporcionó Meteonorm la población cuenta con abundante radiación solar que aumenta desde el mes de marzo hasta agosto y por ende las temperaturas máximas varían desde los 30-36 °C (las condiciones climatológicas cambian en comparación a Laguna Salada debido a que se trata de una zona seca). Por otro lado la media anual de la velocidad del viento es de $1.99 \frac{m}{s}$.

En la siguiente figura se muestran los rangos de temperaturas máximas y mínimos durante todo el año:

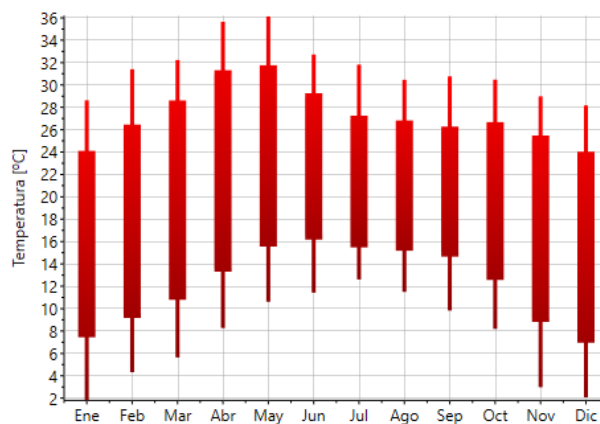


Figura 47 Rangos de temperatura por año

Realización del diseño de experimentos (Simulación)

Para llevar a cabo el análisis experimental se utilizó el simulador de la figura 19.

Los niveles del sistema fotovoltaico se seleccionaron por medio de un análisis experimental previo donde se compararon los datos de generación de dos factores con siete niveles cada uno. Las propuestas de acuerdo a los resultados más significativos fueron $0^\circ - 15^\circ$ en el caso de la inclinación, y 0 – 30 en el caso de la orientación.

Para el aerogenerador se seleccionaron las mismas curvas y alturas que en el caso de Laguna Salada. Finalmente se eligieron los siguientes factores para el diseño de experimentos final no replicado (tabla 12):

Tabla 12 Factores y niveles seleccionados por tecnología

Nivel/Factor	Orientación	Inclinación	Curva	Altura
Bajo	0	0	HLD	7
Alto	30	15	Whisper	20

Una vez hecha la variación de parámetros en el simulador se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 13 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano

Inclinación	Orientación	Altura	Curva	Respuesta 1 día típico (W)
0	0	7	HLD	6207
15	0	7	HLD	6163
0	30	7	HLD	5367
15	30	7	HLD	5983
0	0	20	HLD	6452
15	0	20	HLD	6409
0	30	20	HLD	5613
15	30	20	HLD	6228

0	0	7	Whisper	6001
15	0	7	Whisper	5958
0	30	7	Whisper	5162
15	30	7	Whisper	5777
0	0	20	Whisper	6131
15	0	20	Whisper	6087
0	30	20	Whisper	5291
15	30	20	Whisper	5907

Posteriormente se dio de alta toda la información en minitab y se obtuvieron los siguientes resultados:

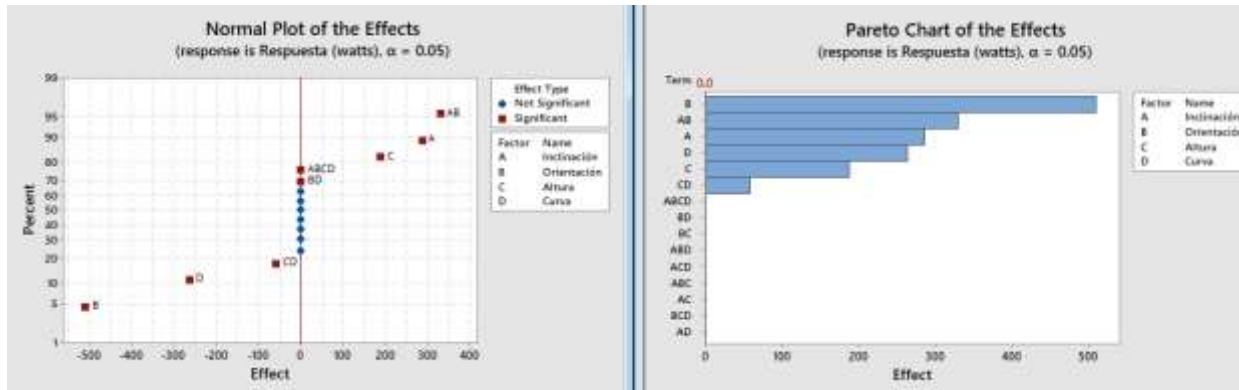


Figura 48 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho.

Se puede apreciar claramente que todos los factores principales tienen efecto significativo y el que resalta más en este caso es la orientación del sistema fotovoltaico. Las interacciones dobles que también presentaron efecto importante en el sistema fueron altura-curva y orientación-inclinación.

Para obtener la tabla de análisis de varianza se mandan al error los datos que no fueron significativos. Una vez hecho lo comentado resultó lo siguiente:

El análisis de varianza comprobó que hay efecto significativo en los factores inclinación, orientación, altura, curva e interacciones dobles inclinación-orientación y altura-curva puesto que el valor P en todos los casos mencionados fue de 0.000 siendo menor que el nivel de significancia (0.05).

El gráfico de efectos principales (figura 48) nos muestra el comportamiento de cada factor según el nivel en el que se encuentra y el de interacción nos muestra cómo dos factores interactúan de manera significativa sobre la variable de respuesta, aquí podemos deducir que las mejores opciones a elegir si quiero obtener la mayor captación de energía posible es: Orientación=0°, inclinación=0° curva=HLD y altura=20 m.

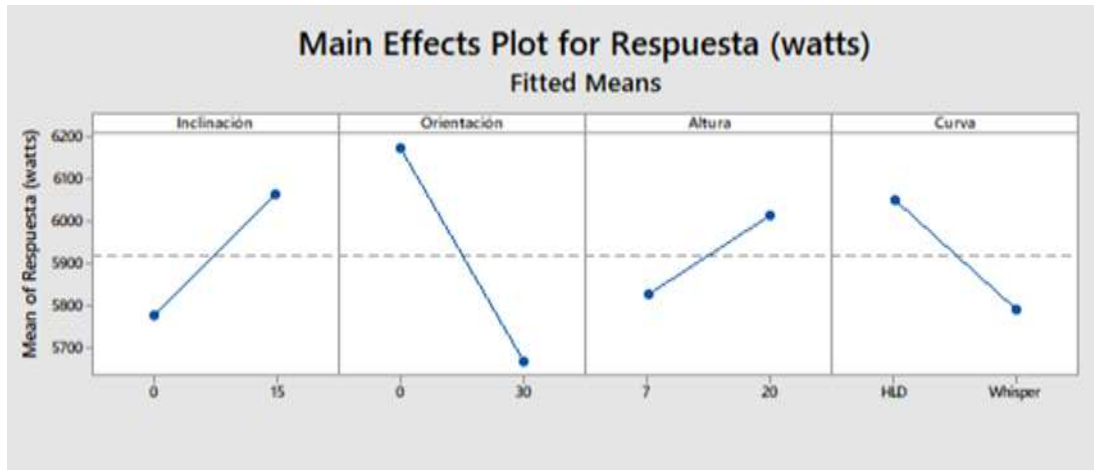


Figura 49 Gráfico de efectos principales

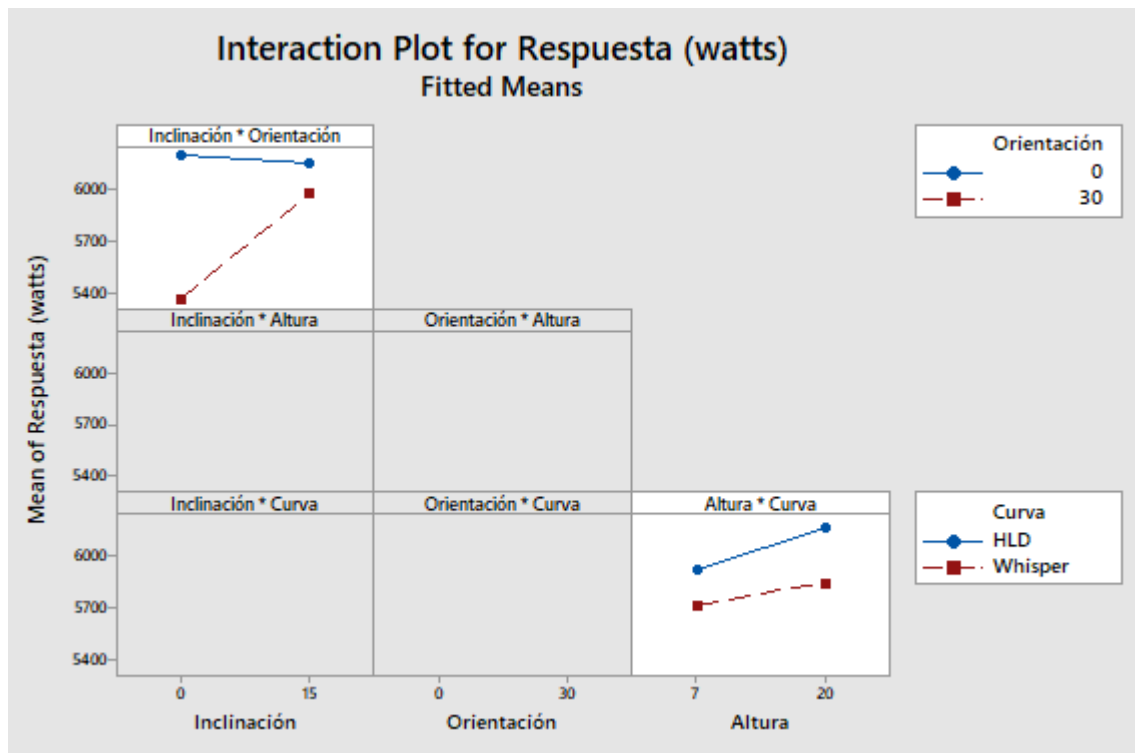


Figura 50 Gráfico de interacciones por respuesta

La figura 49 muestra el gráfico de interacciones (Este tiene prioridad en comparación al de efectos principales) en donde podemos observar los mismos resultados del gráfico anterior.

Tras elegir los factores y niveles idóneos para el dimensionamiento utilizamos la simulación de la figura 33 para el dimensionamiento final del cual se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 14 Datos obtenidos de la simulación en verano para la toma de decisiones

Demanda total en verano=	11.72 MWh	Energía promedio de demanda	diaria 96065.57 W
Generación total en verano AE (1 kW) de instalación=	0.04368 MWh	Energía promedio que provee el AE	diaria 358.0327 W
Generación total en verano FV (1 kW) de instalación=	0.9338 MWh	Energía promedio que provee el FV	diaria 7654.08 W
Según DOE ¿se descartó el uso de alguna tecnología de generación?	No	Según simulación final, sistema que tuvo más influencia	FV
<i>-Debido a que el sistema fotovoltaico brinda mayor energía al sistema se le dará prioridad en los porcentajes.</i>			
<i>-Tomando en cuenta que el instalar un aerogenerador de baja potencia (1 kW) en esa zona no nos brinda ni la mitad de la energía diaria necesaria se puede descartar su uso.</i>			

A continuación se muestran las propuestas por porcentaje:

Tabla 15 Porcentajes propuestos para las pruebas de desviación estándar

Fotovoltaico		Eólico		Baterías		
Porcentaje	Cantidad de paneles 1 kW	Porcentaje	Cantidad de Aerogeneradores 1 kW	12 horas de capacidad	1 Día	3 Días según IDEA
90%	11	10%	26.831	48 kWh	96kW	288kW
100%	13	0%	0		h	h

Debido que es más viable instalar 2 kW de paneles fotovoltaicos que 26 kW (o 26 piezas) de aerogeneradores se hará el estudio de porcentajes al 100% de fotovoltaico.

Resultados obtenidos al realizar el estudio

Tabla 16 Propuestas finales de instalación

Fotovoltaico		Eólico		Baterías				
%	Nro Panel es 1 KW	%	Nro Aerogeneradores 1KW	Capacidad de almacenamiento	Soc Media	Soc Desviación estándar	Min	Max
100 %	13	0 %	0	48 KWh	0.5868	0.1899	0.1899	0.99
100 %	13	0 %	0	96 KWh	0.66986	0.12578	0.19728	0.99
100 %	13	0 %	0	288 KWh	0.7637	0.0555	0.52785	1

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento

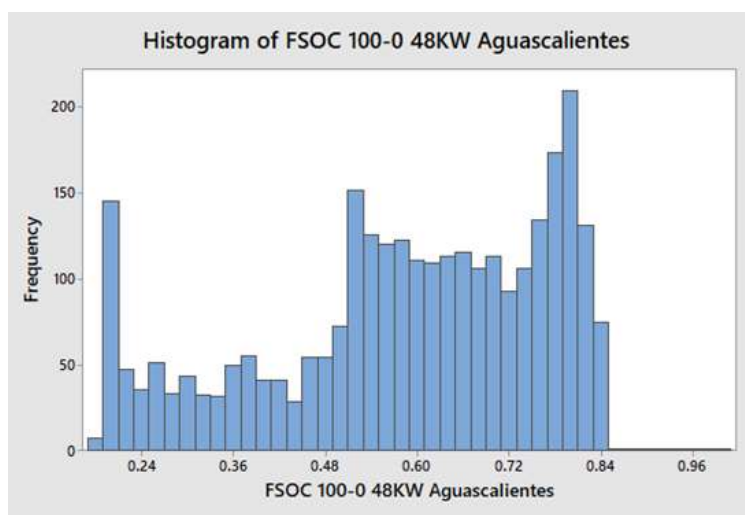


Figura 51 Histograma de comportamiento SOC 48KW (Medio día de autonomía)

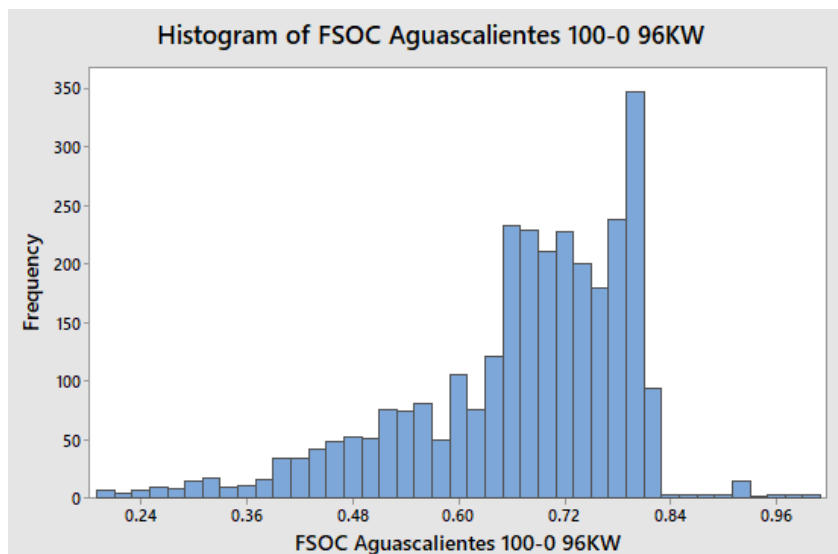


Figura 52 Histograma de comportamiento SOC 96KW (Un día de autonomía)

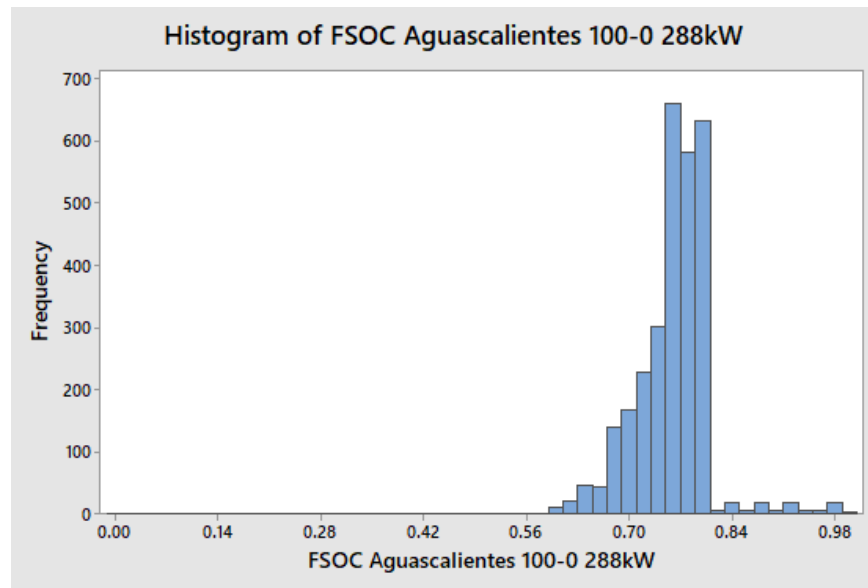


Figura 53 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)

Al analizar las propuestas de las figuras 50, 51, 52 se opta por recomendar el último diseño debido a que fue el único en el que se respetaron los límites mínimos y máximos del almacenamiento.

Utilizando la propuesta de la figura 50 no hubo electricidad el 5.12%, mientras que usando la 51 la zona corre el riesgo de quedarse sin electricidad el 0.2048 % de las horas totales del verano. Utilizando el dimensionamiento de la figura 52 no se sobrepasaron los límites.

Claramente se descartó el aerogenerador debido a que es inviable instalar 26 turbinas de 1 KW de potencia en lugar de 1 sistema fotovoltaico.

1.21 El Saucito, Baja California Sur

La localidad presenta un clima seco extremo en el que existe poca precipitación y cuenta con abundante radiación solar en los meses de mayo- agosto como podemos apreciar en la figura 53.

Radiación global y difusa anual:

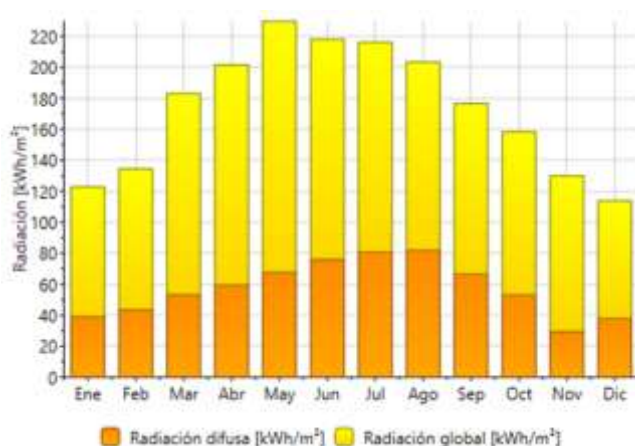


Figura 54 Radiación difusa y global

Datos adicionales de la zona

	Gh kWh/m²	Dh kWh/m²	Bn kWh/m²	Ta °C	Td °C	FF m/s
Enero	123	39	162	19.0	10.4	3.4
Febrero	134	44	159	20.4	10.2	3.3
Marzo	163	53	203	22.2	11	3.5
Abril	202	60	203	24.2	12.4	3.2
Mayo	230	68	229	27.5	15.2	2.8
Junio	218	76	201	30	18.9	2.7
Julio	216	81	190	31.7	22	2.9
Agosto	203	82	167	32.1	23.1	2.9
Setiembre	176	67	164	31.2	22.4	2.6
Octubre	158	53	171	28.1	18.6	3
Noviembre	130	29	192	24.3	14.8	3.2
Diciembre	114	38	152	20.4	11.5	3.6
Año	2086	689	2194	26	15.9	3.1

Figura 55 Parámetros de la zona

La figura 54 muestra características climatológicas de la zona como la radiación global horizontal (Gh), radiación difusa horizontal (Dh), radiación directa (Bm), Temperatura (Ta), promedio diario de temperatura (Td) y velocidad de viento(FF), etc. En el lugar se alcanzan temperaturas máximas entre los 27.5 – 32 °C durante el verano, y otro dato importante es que tiene una velocidad de viento media anual de $3.1 \frac{m}{s}$.

Realización del diseño de experimentos (Simulación)

Se utilizó el simulador de la figura 17 para este estudio. Por otro lado se desarrolló un estudio experimenta previo para la elección de los niveles del sistema fotovoltaico dando como resultado los datos mostrados en la tabla 17.

Se seleccionaron las mismas curvas y alturas (en el caso del aerogenerador). Por lo que a continuación se despliegan los datos que se utilizarán para experimentar:

Tabla 17 Factores y niveles propuestos por tecnología

Nivel/Factor	Orientación	Inclinación	Curva	Altura
Bajo	0	0	HLD	7
Alto	30	15	Whisper	20

Una vez hecha la variación de parámetros en el simulador se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 18 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano

Inclinación	Orientación	Altura	Curva	Respuesta 1 día típico (W)
0	0	7	HLD	8550
15	0	7	HLD	8586
0	30	7	HLD	7242
15	30	7	HLD	8354
0	0	20	HLD	9284
15	0	20	HLD	9320
0	30	20	HLD	7975
15	30	20	HLD	9088
0	0	7	Whisper	7783
15	0	7	Whisper	7819
0	30	7	Whisper	6475
15	30	7	Whisper	7587
0	0	20	Whisper	8149
15	0	20	Whisper	8185
0	30	20	Whisper	6840
15	30	20	Whisper	7952

Al capturar la información anterior en minitab se obtuvieron los siguientes resultados:

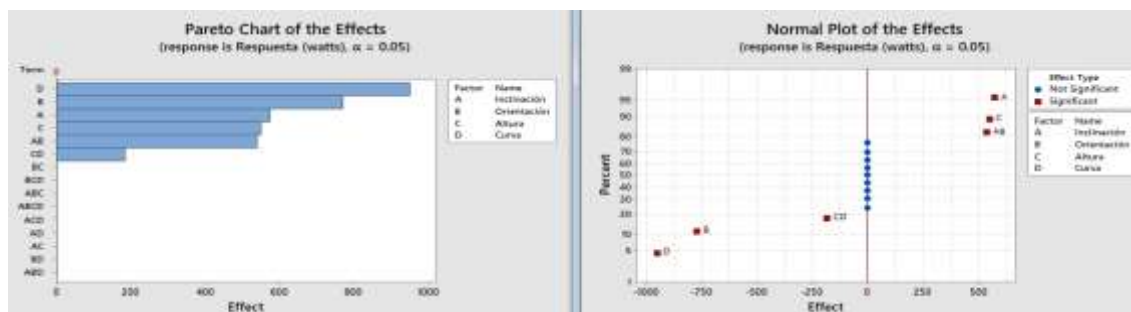


Figura 56 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho

Los factores principales tienen efecto significativo y los que sobresalen en este caso son la curva del aerogenerador y la orientación. Las interacciones dobles que también se encuentran activas (inclinación-orientación y curva-altura).

Para obtener la tabla de análisis de varianza se mandan al error los datos que no fueron significativos. Una vez hecho lo comentado resultó lo siguiente:

El análisis de varianza mostró que hay efecto significativo en los factores antes mencionados puesto que el valor-P fueron menores (0.0000) que el nivel de significancia (0.05).

El gráfico de efectos principales nos muestra el comportamiento de cada factor según el nivel en el que se encuentra y el de interacción nos muestra cómo dos factores interactúan de manera significativa sobre la variable de respuesta, aquí podemos deducir que las mejores opciones a elegir si quiero aumentar la generación es: Orientación=0, inclinación=15 curva=HLD y altura=20.

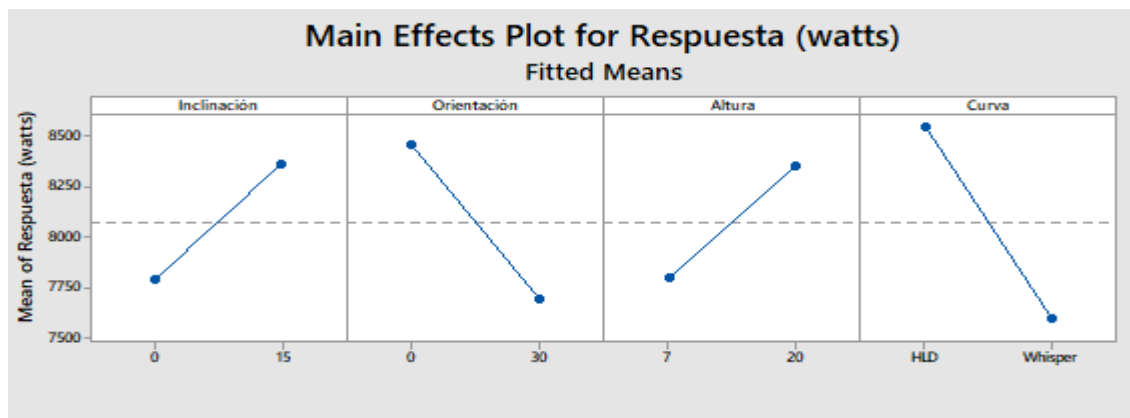


Figura 57 Gráfico de efectos principales

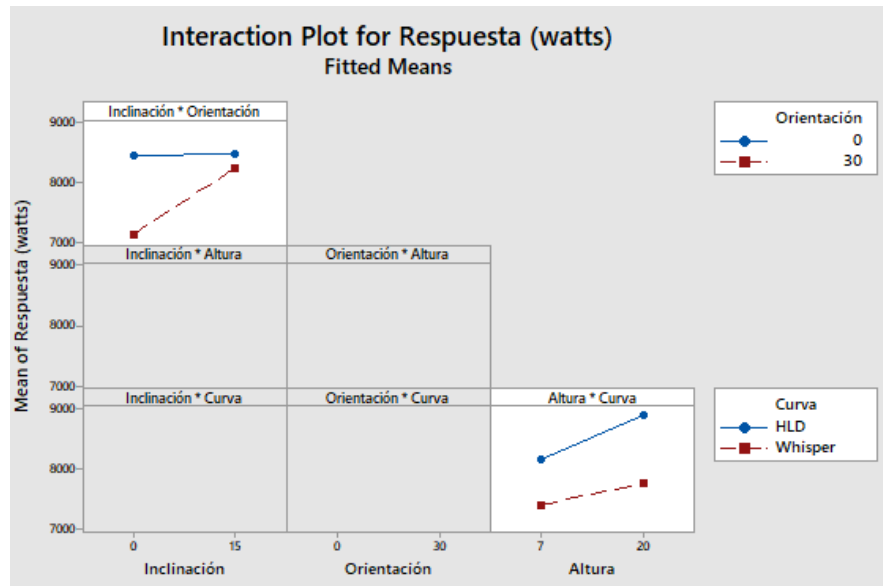


Figura 58 Gráfico de interacciones

El gráfico de interacciones mostró que las mejores opciones a elegir para generar mayor cantidad de energía son: inclinación 15 y orientación 0 en el caso del sistema fotovoltaico. Para el aerogenerador las mejores opciones fueron curva HLD a una altura de 20 metros.

A partir de los datos anteriores se realizó la simulación de la figura 33 y se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 19 Datos obtenidos a partir de la simulación para la toma de decisiones

Demanda total en verano=	11.72 MWh	Energía promedio de demanda	diaria 96065.57 W
Generación total en verano AE (1 kW) de instalación=	0.1554 MWh	Energía promedio que provee el AE	diaria 1273.77 W
Generación total en verano FV (1 kW) de instalación=	1.048.9338 MWh	Energía promedio que provee el FV	diaria 8590.16W
Según DOE ¿se descartó el uso de alguna tecnología de generación?	No	Según simulación final, sistema que tuvo más influencia	FV
<i>-Debido a que el sistema fotovoltaico brinda mayor energía al sistema se le dará prioridad en los porcentajes.</i>			
<i>-Tomando en cuenta que el instalar un aerogenerador de baja potencia (1 kW) no nos brinda ni un cuarto de la energía diaria necesaria, se puede descartar su uso.</i>			

A continuación se muestran las propuestas por porcentaje:

Tabla 20 Porcentajes de prueba finales

Fotovoltaico		Eólico		Baterías		
Porcentaje	Cantidad de paneles 1 kW	Porcentaje	Cantidad de Aerogeneradores 1 kW	12 horas de capacidad	1 Día	3 Días según IDEA
90%	10	10%	7	48KWh	96KW	288KW
100%	11	0%	0			

A pesar de que el aerogenerador no brinda ni 2 kW diarios se decidió agregarlo al análisis para verificar si se complementa, aunque es preferible instalar 1 kW de fotovoltaicos a 7 kW de aerogeneradores.

Tabla 21 Resultados de la desviación estándar de acuerdo a los porcentajes de instalación propuestos

Fotovoltaico		Eólico		Baterías				
%	Nro Panel es 1 kW	%	Nro Aerogenerad ores 1kW	Capacidad de almacenami ento	Soc Media	Soc Desviac ión estándar	Min	Max
90 %	10	10 %	7	48 kWh	0.650 4	0.15015	0.191 87	0.993 07
90 %	10	10 %	7	96 kWh	0.718 66	0.08915	0.286 29	1
90 %	10	10 %	7	288 kWh	0.778 38	0.04140	0.629 35	1

100 %	11	0%	0	48 kWh	0.641 81	0.15206	0.193 41	1
100 %	11	0%	0	96 kWh	0.714 40	0.09602	0.238 64	1
100 %	11	0%	0	288 kWh	0.775 05	0.04178	0.612 75	1

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento

A continuación se muestran los datos de la instalación con 90% fotovoltaico y 10% Eólico variando el almacenamiento

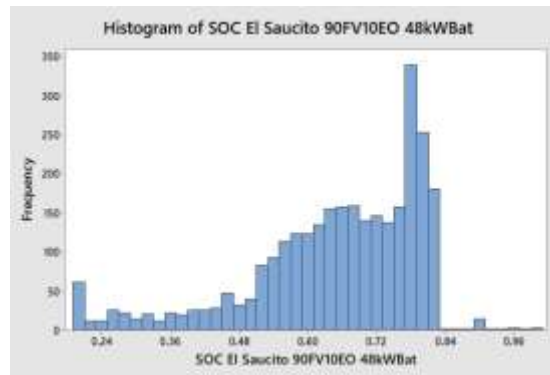


Figura 59 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía)

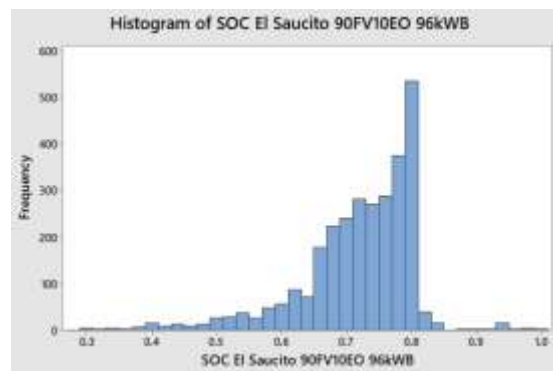
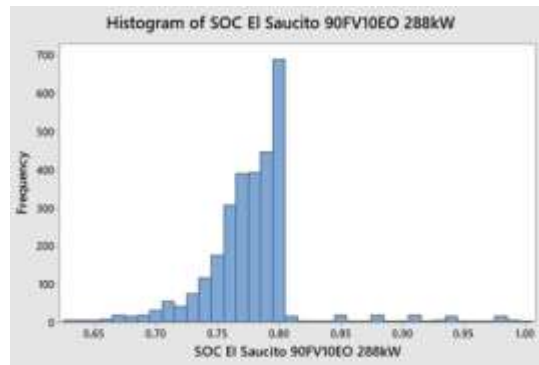


Figura 60 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía)



*Figura 61 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)+
Resultados de los datos de instalación con 100% fotovoltaico y 0% Eólico variando el
almacenamiento.*

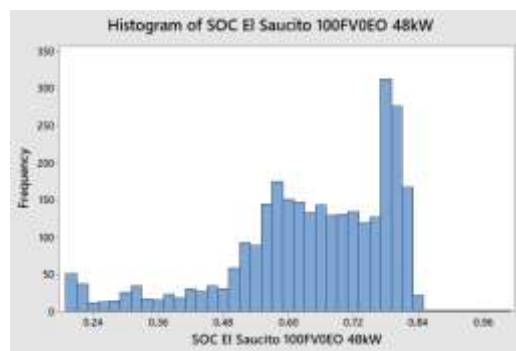


Figura 62 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía)

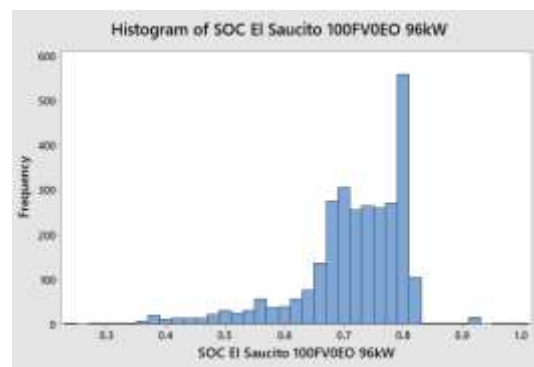


Figura 63 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía)

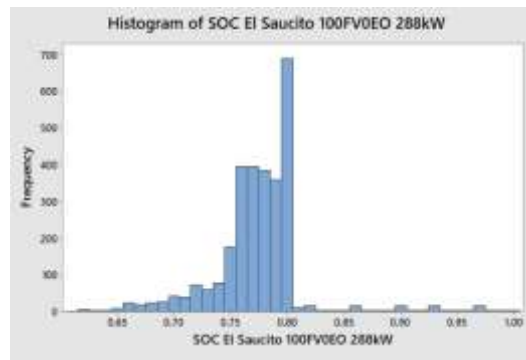


Figura 64 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)

En los dos casos (FV 90,100 y EO 10,0) con 48 kW de almacenamiento el valor mínimo del FSOC permaneció por debajo del 20%. No es recomendable ninguno como diseño final.

En base a las figuras 58 y 61 además de los resultados de la desviación estándar que representan las instalaciones con medio día de almacenamiento se pueden descartar esos diseños ya que el límite inferior (20%) se rebasó en numerosas ocasiones (más de 50 horas de desabasto en ambos).

Analizando los resultados con 96 kW de almacenamiento (1 día de autonomía): En los dos casos (figuras 59 y 62) el valor mínimo del FSOC permaneció por encima del 20%. El ingeniero de diseño debe de decidir qué tan conveniente sería instalar 7 aerogeneradores de baja potencia en lugar de más paneles fotovoltaicos.

Las desviaciones estándar de las instalaciones con 288 kW de almacenamiento (3 días de autonomía) como las medias son muy similares, y permanecen en por encima de los límites.

En base a los datos obtenidos el que muestra mejor desempeño con menos inversión es el de 11 sistemas fotovoltaicos de 1 kW y 96 kW de almacenamiento (figura 62) ya que la media del SOC se encuentra en 0.71441 y la desviación estándar es de aproximadamente 0.10 con una descarga mínima que permanece por encima del 20% en todo el verano.

1.22 Ojos Calientes, Chihuahua

Como se puede apreciar en la figura 64, durante los meses de abril a agosto la zona recibe la mayor cantidad de energía proveniente del sol, lo que genera temperaturas máximas que llegan a sobrepasar los 40 °C (como se aprecia en el mes de julio de la figura 65). La localidad posee un clima característico de zonas secas extremas (como el caso de Laguna Salada Mexicali).

Radiación anual:

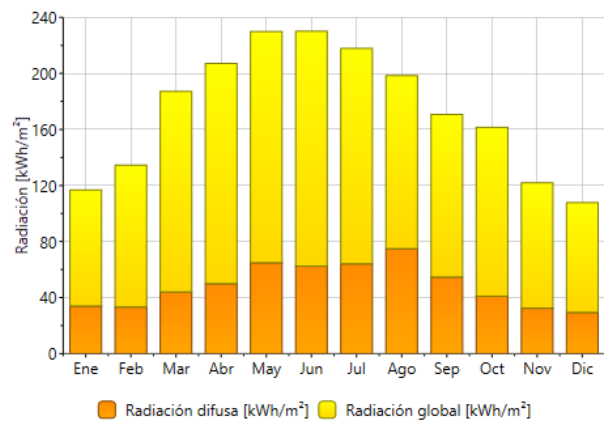


Figura 65 Radiación difusa y global

Temperaturas anuales

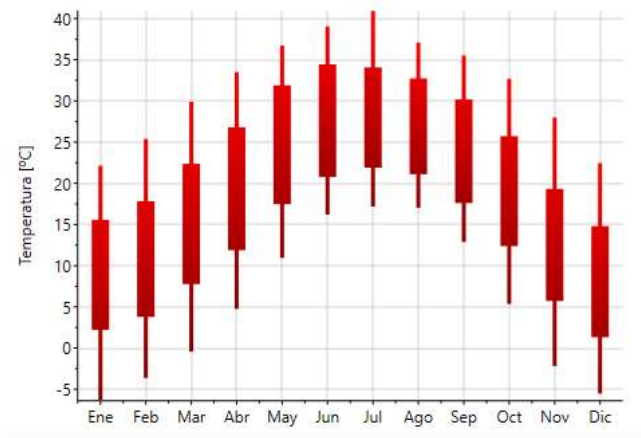


Figura 66 Rangos de temperatura por año

A partir de datos mostrados en la figura 66 el sitio alcanzará una velocidad media anual de 4.2 m/s.

	Gh kWh/m ²	Dh kWh/m ²	Bn kWh/m ²	Ta °C	Td °C	FF m/s
Enero	117	34	179	8.5	-3.4	4
Febrero	134	33	190	10.6	-3.4	4.6
Marzo	187	44	237	14.8	-2.3	5
Abril	207	50	242	19.6	-0.8	5.3
Mayo	230	65	236	24.7	3.5	4.8
Junio	230	62	238	28.1	8.7	4.3
Julio	218	64	222	28	13	3.8
Agosto	198	75	185	26.8	13.7	3.6
Setiembre	171	55	191	24	10.9	3.7
Octubre	161	41	212	18.7	6.6	3.8
Noviembre	122	32	187	12.3	0	3.9
Diciembre	108	29	176	7.5	-3.8	3.9
Año	2083	585	2496	18.6	3.6	4.2

Figura 67 Otros datos meteorológicos de la zona

Puesta en marcha del diseño de experimentos (Simulación)

En este diseño de experimentos se utilizó el simulador de la figura 17. Para justificar las propuestas del posicionamiento fotovoltaico se llevó a cabo un análisis experimental previo donde se determinaron los niveles de las orientaciones e inclinaciones que se muestran en la tabla 22.

En el caso del aerogenerador se trabaja con las mismas curvas y alturas (HLD, Whisper, y 7 - 20 metros).

Finalmente se seleccionaron los siguientes factores para diseño de experimentos no replicado:

Tabla 22 Factores y niveles seleccionados por tecnología

Nivel/Factor	Orientación	Inclinación	Curva	Altura
Bajo	0	15	HLD	7
Alto	330	30	Whisper	20

Una vez hecha la variación de parámetros en el simulador se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 23 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano

Inclinación	Orientación	Altura	Curva	Respuesta 1 día típico (W)
15	0	7	HLD	11026
30	0	7	HLD	10886
15	330	7	HLD	10592
30	330	7	HLD	10463
15	0	20	HLD	12251
30	0	20	HLD	12111
15	330	20	HLD	11817
30	330	20	HLD	11687
15	0	7	Whisper	9886
30	0	7	Whisper	9746
15	330	7	Whisper	9452
30	330	7	Whisper	9322
15	0	20	Whisper	10345
30	0	20	Whisper	10204
15	330	20	Whisper	9910
30	330	20	Whisper	9781

Posteriormente se dio de alta en minitab y se obtuvieron los siguientes resultados:

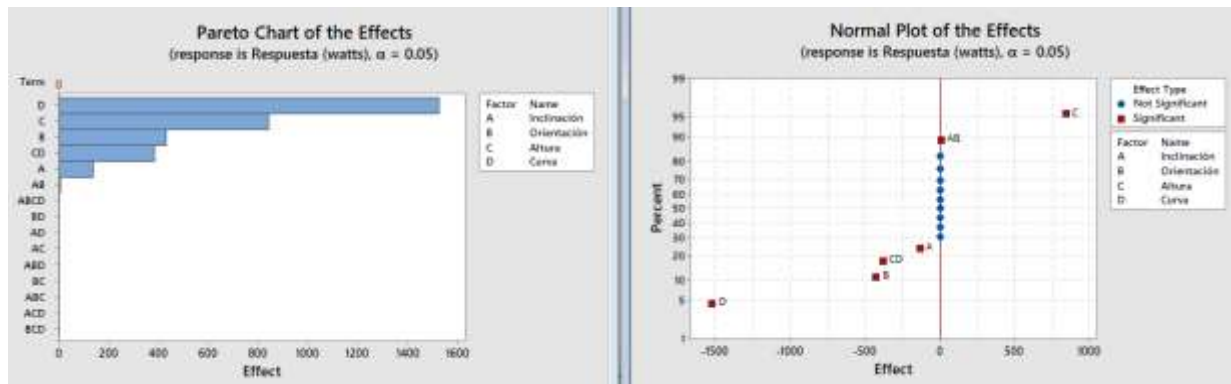


Figura 68 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho

En este caso los factores principales resultaron significativos y la interacción de la altura-curva, sin embargo se muestra que la interacción entre la orientación-inclinación tienen un efecto casi despreciable. Para aclarar la situación nos basaremos en la tabla de ANOVA.

Para obtener la tabla de análisis de varianza se mandan al error los datos que no fueron significativos. Una vez hecho lo comentado resultó lo siguiente:

Al analizar el ANOVA los factores antes mencionados estaban activos puesto que el valor-P era menor que el nivel de significancia (0.05) y en el caso de la interacción orientación-inclinación mostró que tiene efecto significativo, sin embargo, en comparación con los otros factores es mínimo.

Tanto en el gráfico de efectos principales (figura 68) como en el de interacción (figura 69) las mejores opciones a elegir (si quiero obtener la mayor captación de energía posible) fueron: Orientación=0°, inclinación=15° curva=HLD y altura=20 m.

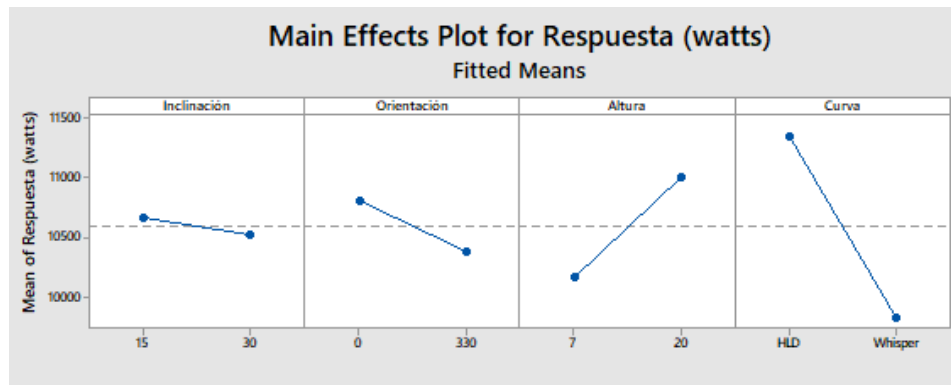


Figura 69 Gráfico de efectos principales

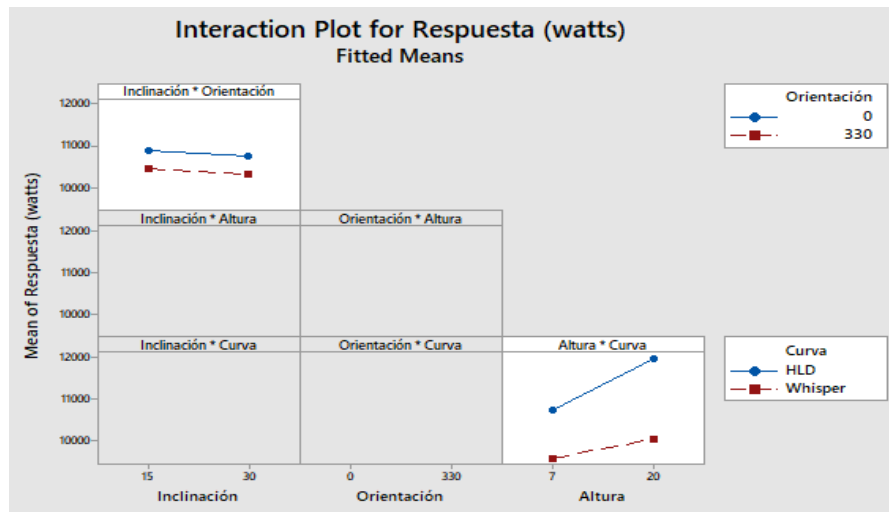


Figura 70 Gráfico interacción

Utilizando el simulador de la figura 35 se midió el comportamiento de los generadores en un día promedio de verano para realizar el dimensionamiento, en la tabla 24 observaremos los datos obtenidos:

Tabla 24 Datos de simulación y toma de decisiones

Demanda total en verano=	11.72 MWh	Energía promedio de demanda	diaria 96065.57 W
Generación total en verano AE (1 kW) de instalación=	0.3793 MWh	Energía promedio provee el AE	diaria 3109.01 W
Generación total en verano FV (1 kW) de instalación=	1.102 MWh	Energía promedio provee el FV	diaria 9032.78 W
Según DOE ¿se descartó el uso de alguna tecnología de generación?	No	Según simulación final, sistema que tuvo más influencia	FV
<i>-Debido a que el sistema fotovoltaico brinda mayor energía al sistema se le dará prioridad en los porcentajes.</i>			

Con la información anterior se propusieron los siguientes porcentajes de prueba:

Tabla 25 Porcentajes de prueba propuestos

Fotovoltaico		Eólico		Baterías		
Porcentaje	Cantidad de paneles 1 kW	Porcentaje	Cantidad de Aerogeneradores 1 kW	12 horas de capacidad	1 Día	3 Días según IDEA
80%	8	20%	6	48 kWh	96 kWh	288
90%	9	10%	3			kWh
100%	10	0%	0			

Al simular las propuestas se obtuvieron los estados de carga del almacenamiento para la toma de decisiones, así como los valores mínimos y máximos.

Si el SOC estuvo por debajo del límite inferior repetidamente, la demanda careció de energía eléctrica durante ese periodo.

Tabla 26 Desviaciones estándar resultantes al aplicar los porcentajes de diseño en la simulación

Fotovoltaico		Eólico		Baterías				
%	Nro	%	Nro	Capacidad	Soc	Soc	Min	Ma
	Panel		Aerogenerad	de	Media	Desviaci		x
	es		ores	almacenami		ón		
	1 kW		1kW	ento (kWh)		estándar		
80%	9	20	6	48	0.643	0.18259	0.189	1
		%			74		36	
80%	9	20	6	96	0.697	0.13710	0.197	1
		%			2		74	
80%	9	20	6	288	0.774	0.06013	0.607	1
		%			89		32	
90%	10	10	3	48	0.649	0.16441	0.193	1
		%			14		58	
90%	10	10	3	96	0.708	0.11437	0.272	1
		%			63		09	
90%	10	10	3	288	0.775	0.05228	0.624	1
		%			97		04	
100	11	0%	0	48	0.620	0.16958	0.190	1
%					33		18	
100	11	0%	0	96	0.691	0.12038	0.223	1
%					72		32	
100	11	0%	0	288	0.768	0.04836	0.608	1
%					46		00	

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento 80 PV-20-EO

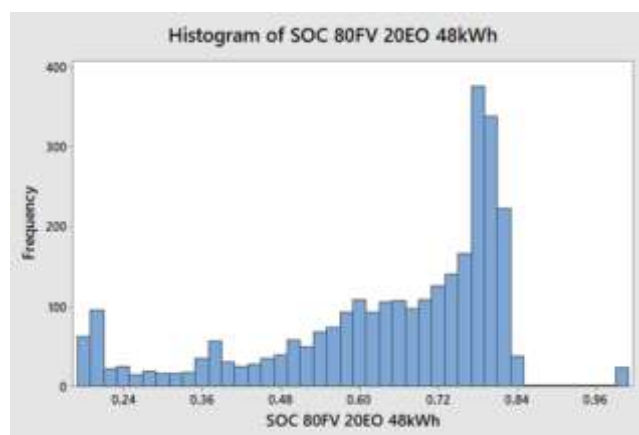


Figura 71 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía)

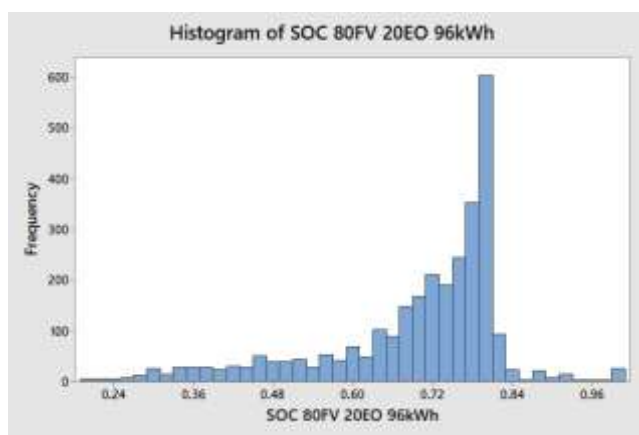


Figura 72 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía)

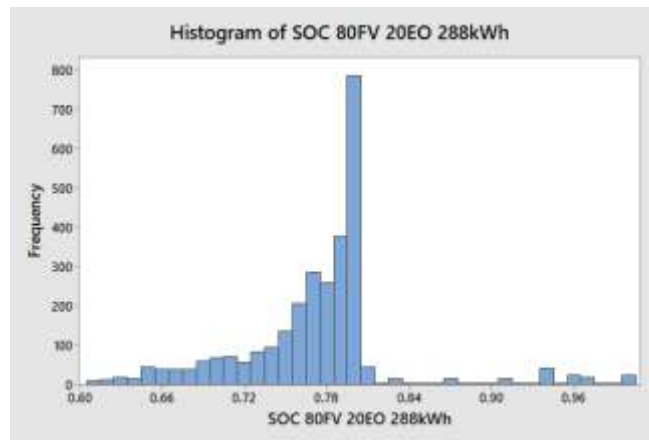


Figura 73 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento 90 PV-10-EO

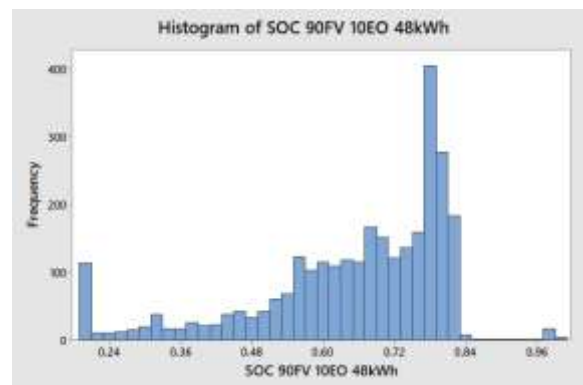


Figura 74 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía)

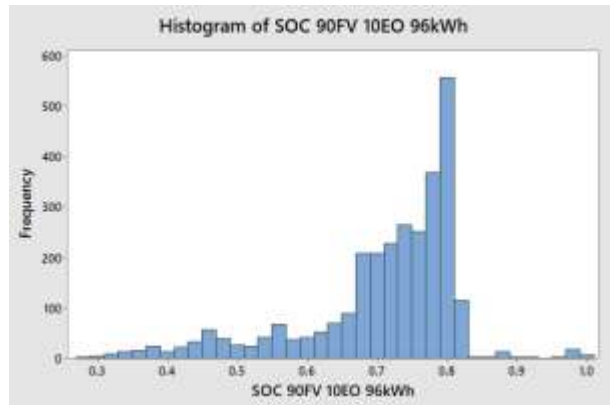


Figura 75 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (1 día de autonomía)

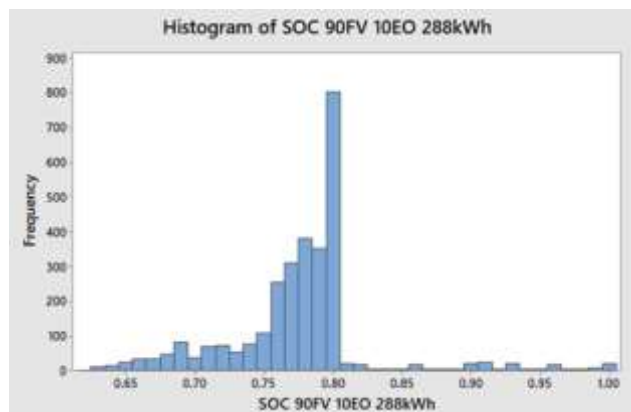


Figura 76 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (3 días de autonomía)

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento 100 PV-0-EO

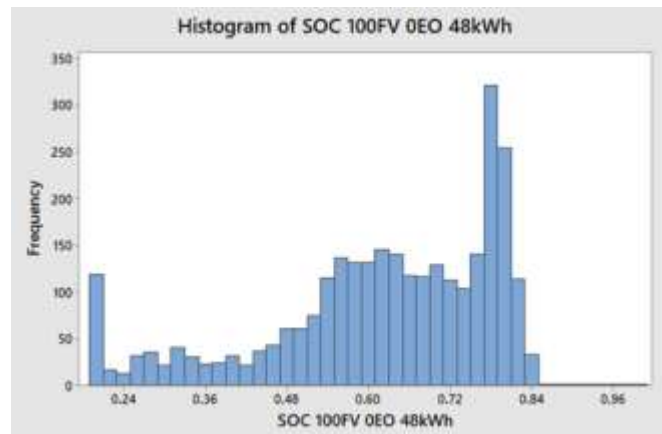


Figura 77 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía)

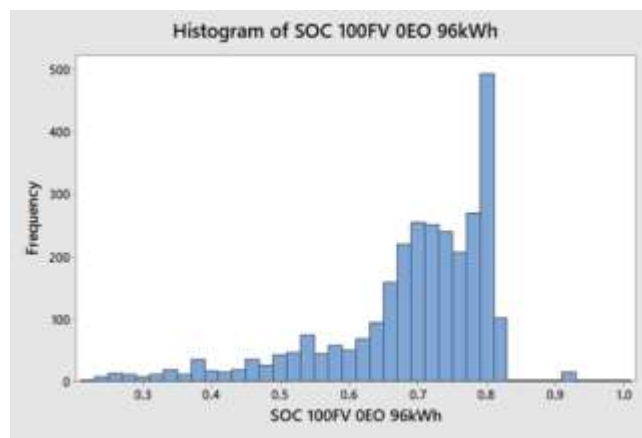


Figura 78 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía)

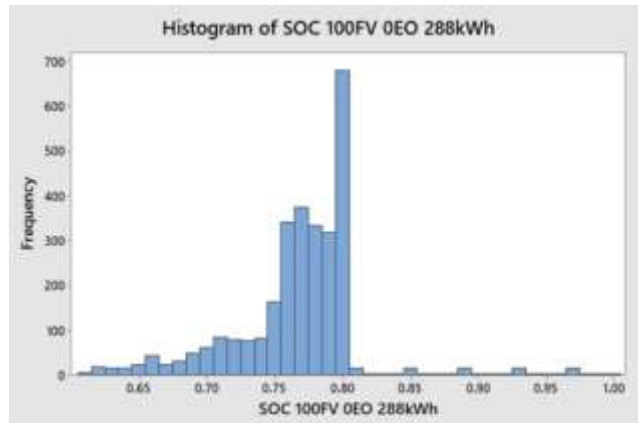


Figura 79 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Un día de autonomía)

Análisis de los diseños con 48 kW de almacenamiento (Medio día de autonomía): En los tres casos el estado de carga permaneció por debajo del 20%, en numerosas ocasiones sobre todo en el dimensionamiento de la figura 70, en donde podemos notar que la media fue menor y la desviación estándar mayor en comparación con las otras opciones y hubo un 5.39% de horas sin electricidad equivalente a 158 durante todo el verano, en los casos de las figuras 72 y 76 hubo un porcentaje de 3.89% y 4.06% (más de 114 horas) .

Según los datos, el que tuvo mejor comportamiento fue el 90% fotovoltaico 10 % eólico (figura 73), sin embargo no es recomendable ninguno como diseño final.

Análisis de los dimensionamientos con 96 kW de almacenamiento (1 día de autonomía): En estos casos hubo dos opciones en los que el estado fraccionado de carga permanecían por encima del mínimo (figuras 74 y 77). Según la evidencia estadística el diseño de la figura 74 tuvo un mejor comportamiento con una media ligeramente más alta que el de la figura 77 y menor desviación estándar con 0.13% o 4 horas sin electricidad en todo el verano.

Análisis de las instalaciones con 288 kW de almacenamiento (3 días de autonomía): En el último caso todos se encuentran en el rango permisible, tanto las desviaciones estándar como las medias son muy similares.

De no ser posible llevar a cabo una instalación con 3 días de autonomía se recomendaría tomar en cuenta los diseños con 96 kW de almacenamiento, y dentro de esos el caso donde el aerogenerador tiene un efecto favorable disminuyendo la posibilidad de descarga hasta su límite permisible, sin embargo, el ingeniero tiene que calcular la factibilidad de utilizar tres aerogeneradores en lugar de un kW de fotovoltaicos.

1.23 Venustiano Carranza, Coahuila

Recopilación de la información

La climatología de la zona es similar al caso de Mexicali ya que la radiación global máxima en verano alcanza los $220 \frac{kWh}{m^2}$ y la mayor cantidad de radiación se presenta de marzo- agosto como se puede apreciar en la figura 79, por ende alcanza temperaturas máximas que sobrepasan los $35^{\circ}C$ durante esa época del año (figura 80).

Radiación anual:

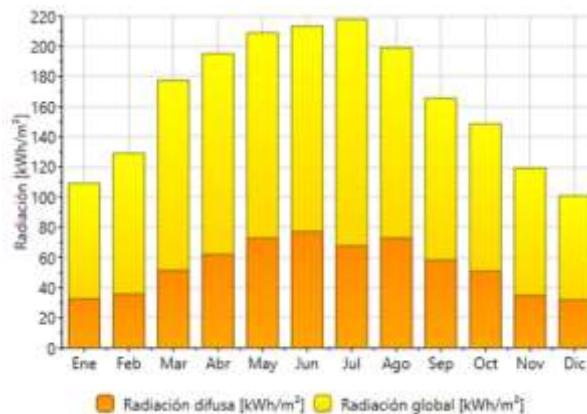


Figura 80 Radiación difusa y global

Temperaturas anuales



Figura 81 Rangos de temperatura por año

Otro factor importante que podemos apreciar gracias a la información obtenida en Meteonorm es que la media anual de velocidad del viento es de $3.8 \frac{m}{s}$, esta localidad es una de las que presenta mayor cantidad de viento en el estudio.

	Gh kWh/m ²	Dh kWh/m ²	Bn kWh/m ²	Ta °C	Td °C	FF m/s	
Enero	109	33	166	9.7	0.8	3.3	
Febrero	129	36	173	12	2.1	3.6	
Marzo	177	51	202	16.2	6.1	4.2	
Abril	195	62	202	20.4	9.8	4.5	
Mayo	209	73	196	24.4	14.5	4.5	
Junio	213	77	196	27.2	17	4.5	
Julio	218	68	210	27.5	17.4	4.1	
Agosto	199	73	185	27.8	17.4	3.8	
Setiembre	166	58	167	24.5	15.6	3.3	
Octubre	149	51	175	19.9	12.5	3.6	
Noviembre	119	35	165	14	6.1	3.2	
Diciembre	101	32	149	9	0.7	3.2	
Año	1984	649	2187	19.4	10	3.8	

Figura 82 Datos de resultado

Realización de la experimentación (Simulación)

Para llevar a cabo el análisis experimental se utilizó el simulador de la figura x con los datos obtenidos en la sección de la influencia del posicionamiento en la localidad (para el sistema fotovoltaico) y las mismas curvas y alturas (para el aerogenerador). Por lo que se seleccionaron los siguientes factores para DOE no replicado:

Tabla 27 Factores y niveles seleccionados por tecnología

Nivel/Factor	Orientación	Inclinación	Curva	Altura
Bajo	0	0	HLD	7
Alto	30	15	Whisper	20

Una vez hecha la variación de parámetros en el simulador se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 28 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano

Inclinación	Orientación	Altura	Curva	Respuesta 1 día típico (W)
0	0	7	HLD	13121
15	0	7	HLD	12659
0	30	7	HLD	9394
15	30	7	HLD	12631
0	0	20	HLD	14525
15	0	20	HLD	14064
0	30	20	HLD	10798
15	30	20	HLD	14036
0	0	7	Whisper	11814
15	0	7	Whisper	11353
0	30	7	Whisper	8087

15	30	7	Whisper	11324
0	0	20	Whisper	12322
15	0	20	Whisper	11861
0	30	20	Whisper	8595
15	30	20	Whisper	11832

Posteriormente se dio de alta en Minitab y se obtuvieron los siguientes resultados:

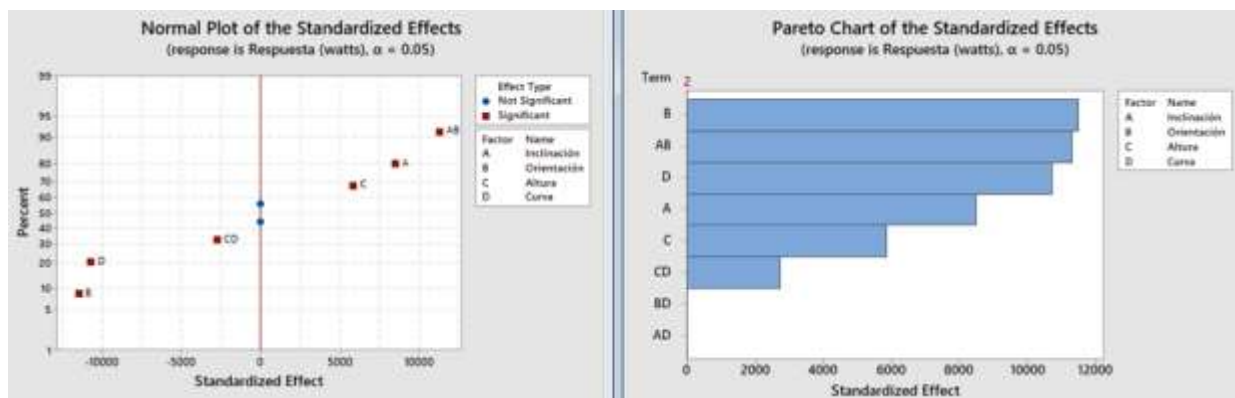


Figura 83 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho

En este caso existe influencia significativa de los factores principales, las interacciones dobles orientación-inclinación, altura-marca.

Para obtener la tabla de análisis de varianza se mandan al error los datos que no fueron significativos.

Una vez hecho lo comentado resultó lo siguiente:

El análisis de varianza nos comprueba nuevamente que hay efecto significativo en los factores antes mencionados puesto que el valor-P es menor que el nivel de significancia (0.05).

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	52270327	6533791	60982048.46	0.000
Linear	4	37787712	9446928	88171329.17	0.000
Inclinación	1	7706176	7706176	71924309.33	0.000
Orientación	1	14103780	14103780	1.31635E+08	0.000
Altura	1	3657656	3657656	34138125.00	0.000
Curva	1	12320100	12320100	1.14988E+08	0.000
2-Way Interactions	4	14482615	3620654	33792767.75	0.000
Inclinación*Orientación	1	13678902	13678902	1.27670E+08	0.000
Inclinación*Curva	1	0	0	0.00	1.000
Orientación*Curva	1	0	0	2.33	0.170
Altura*Curva	1	803712	803712	7501314.33	0.000
Error	7	1	0		
Total	15	52270328			

Figura 84 Análisis de varianza

El gráfico de efectos principales nos muestra el comportamiento de cada factor según el nivel en el que se encuentra y el de interacción nos muestra cómo dos factores interactúan de manera significativa sobre la variable de respuesta, aquí podemos deducir que las mejores opciones a elegir si quiero obtener la mayor captación de energía posible es: Orientación=0, inclinación=0 curva=HLD y altura=20.

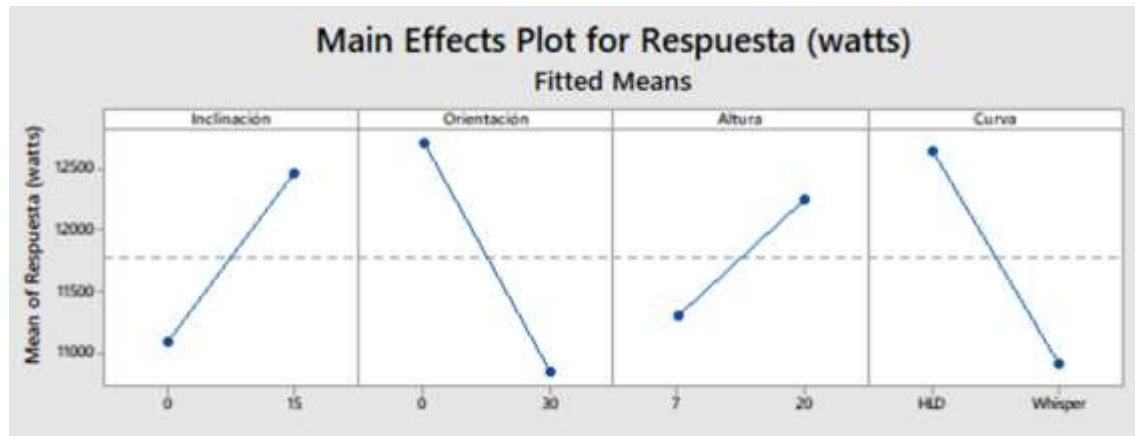


Figura 85 Gráfico de efectos principales

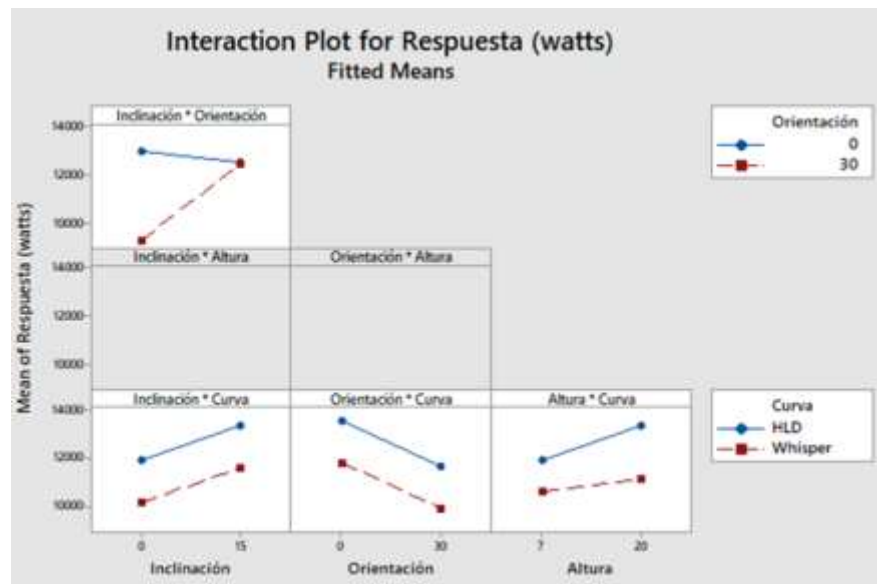


Figura 86 Gráfico de efectos principales

Dimensionamiento

Dando seguimiento a la metodología seguida en los casos anteriores se describe el proceso a seguir:

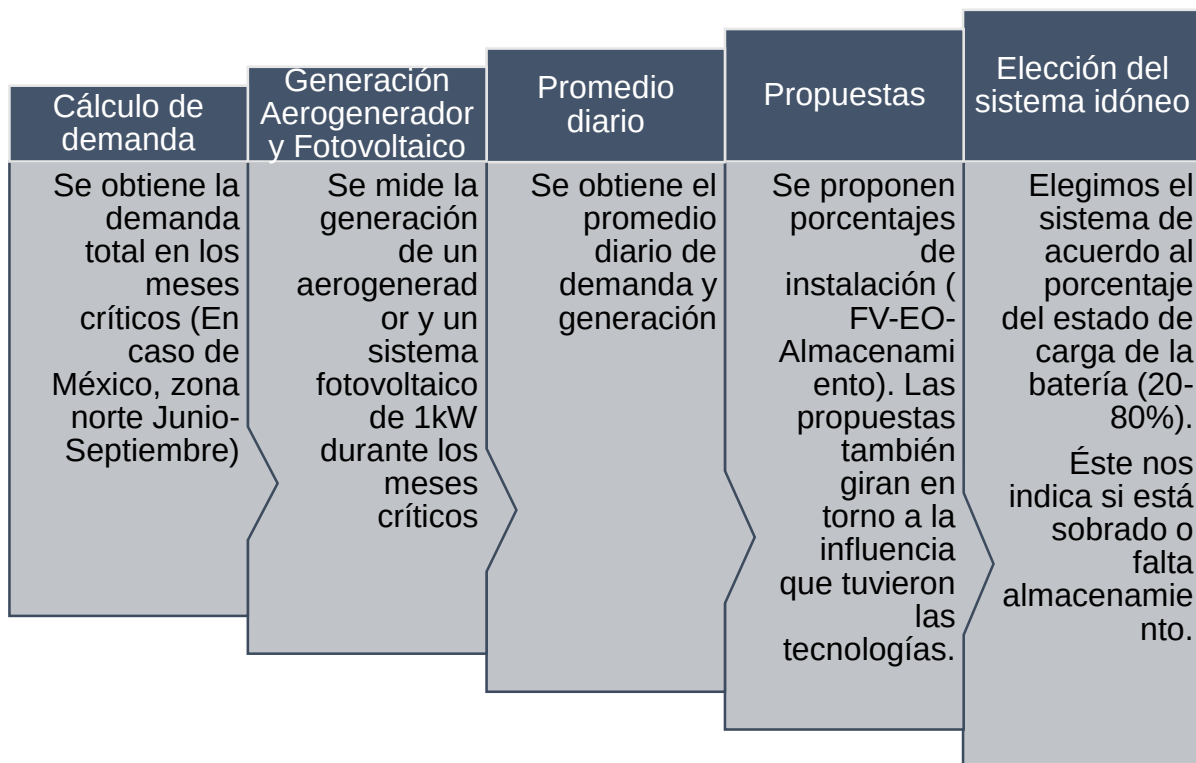


Figura 87 Gráfico de interacciones por respuesta

A partir de la figura anterior se generaron los siguientes datos:

Demanda total en verano=	11.72 MWh	Energía promedio diaria de demanda	96065.57 W
Generación total en verano AE (1 kW) de instalación=	0.4015 MWh	Energía promedio que provee el AE	3290.98
Generación total en verano FV (1 kW) de instalación=	1.093 MWh	Energía promedio que provee el FV	8959.01
Según DOE ¿se descartó el uso de alguna tecnología de generación?	No	Según simulación final, sistema que tuvo más influencia	FV
<i>-Debido a que el sistema fotovoltaico brinda mayor energía al sistema se le dará prioridad en los porcentajes.</i>			

Tabla 29 Datos de simulación y toma de decisiones

Fotovoltaico		Eólico		Baterías		
Porcentaje	Cantidad de paneles 1 kW	Porcentaje	Cantidad de Aerogeneradores 1 kW	12 horas de capacidad	1 Día	3 Días según IDEA
80%	9	20%	6	48 kWh	96	288 kWh
90%	10	10%	3		kWh	
100%	11	0%	0			

Tabla 30 Porcentajes de tecnologías

A continuación se muestran las propuestas por porcentaje:

Tabla 31 Tabla de porcentajes de prueba

Fotovoltaico		Eólico		Baterías				
%	Nro	%	Nro	Capacidad	Soc	Soc	Min	Ma
	Panel		Aerogenerad	de	Media	Desviaci		x
	es		ores	almacenami		ón		
	1 KW		1KW	ento		estándar		
80%	9	20	6	48 kWh	0.326	0.16019	0.192	1
		%			4		21	
80%	9	20	6	96 kWh	0.721	0.08913	0.427	1
		%			26		46	
80%	9	20	6	288 kWh	0.782	0.05116	0.675	1
		%			09		68	
90%	10	10	3	48 kWh	0.630	0.1464	0.192	1
		%			5		24	
90%	10	10	3	96 kWh	0.719	0.0801	0.421	1
		%			5		4	
90%	10	10	3	288 kWh	0.779	0.0438	0.673	1
		%			6		7	
100	11	0%	0	48 kWh	0.603	0.1509	0.191	1
%					3		68	
100	11	0%	0	96 kWh	0.694	0.1012	0.265	1
%					48		3	
100	11	0%	0	288 kWh	0.768	0.0423	0.628	1
%					72		0	

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento 80 PV-20-EO

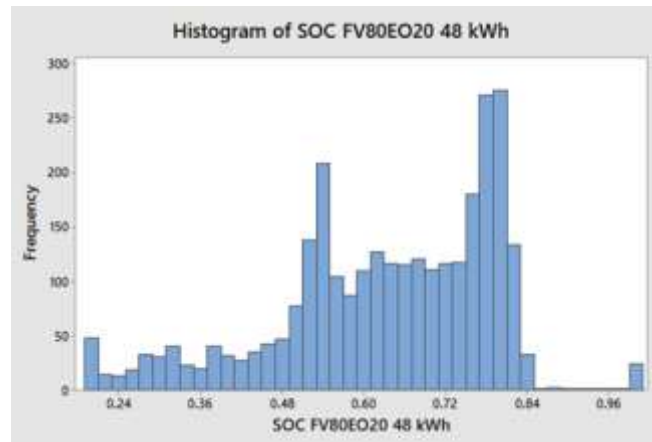


Figura 88 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía)

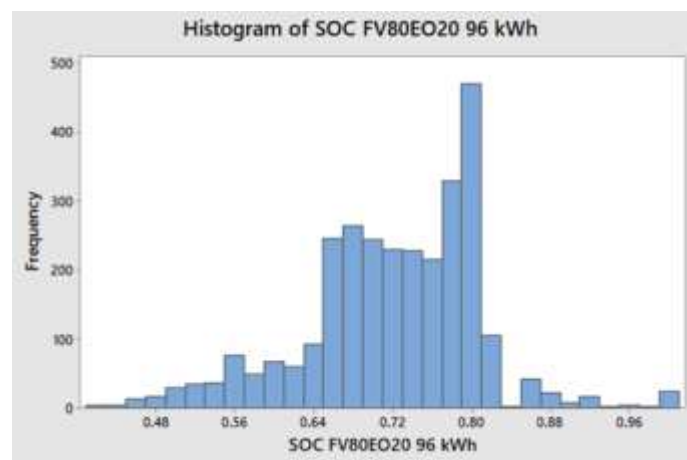


Figura 89 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía)

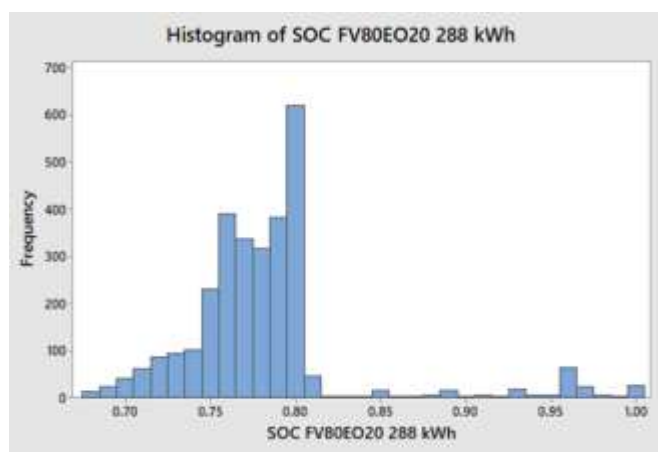


Figura 90 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento 90 PV-10-EO

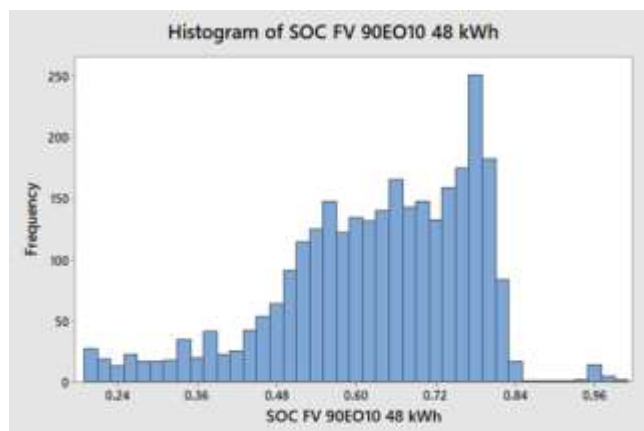


Figura 91 Histograma de comportamiento SOC 48kW (Medio día de autonomía)

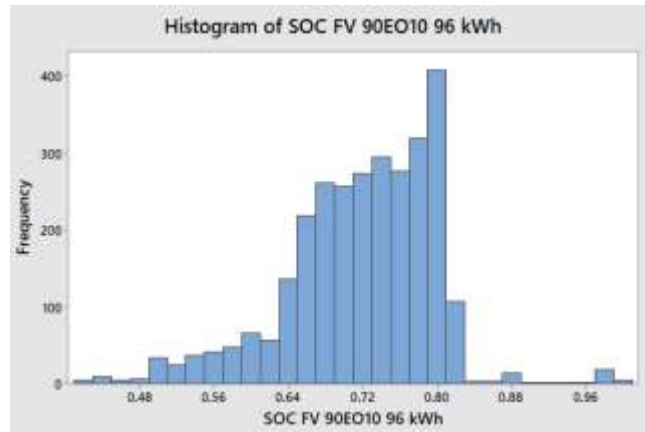


Figura 92 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía).

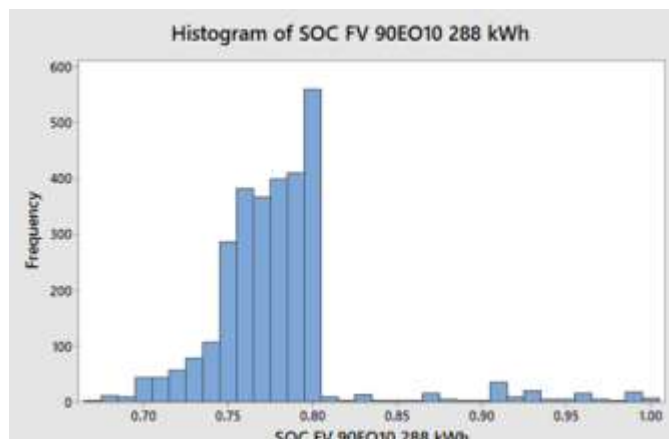


Figura 93 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento 100 PV-0-EO

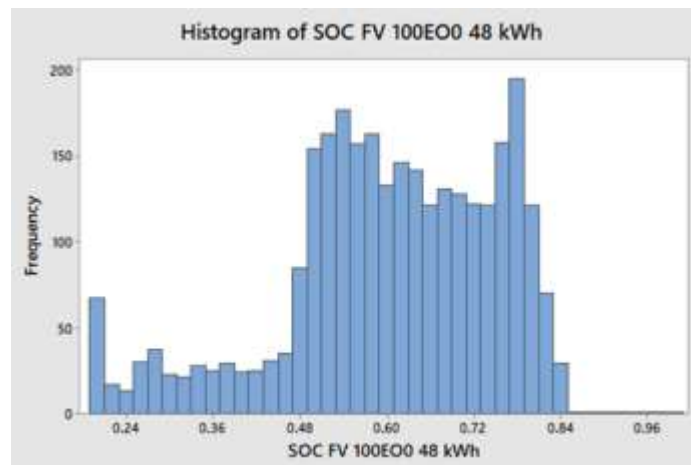


Figura 94 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía)

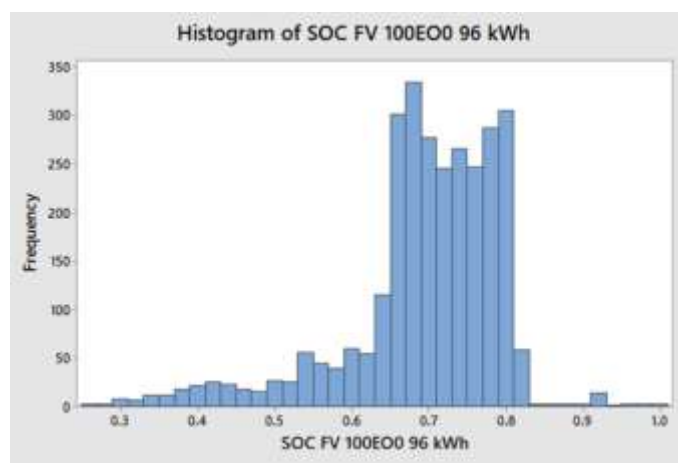


Figura 95 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía)

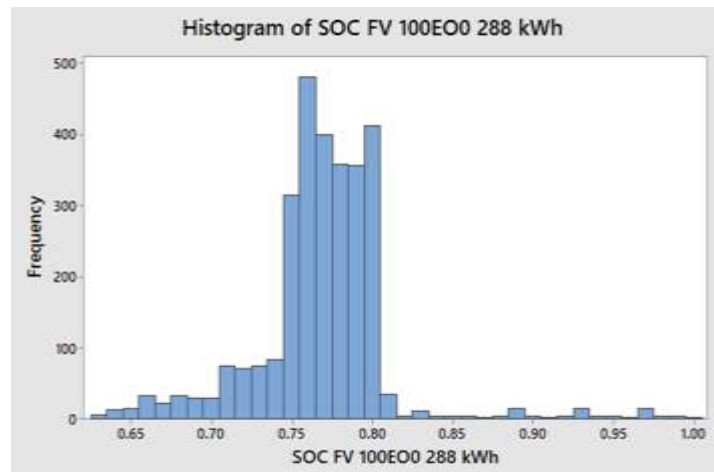


Figura 96 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Tres días de autonomía)

Análisis de los diseños con 48 kW de almacenamiento (Medio día de autonomía): En los tres casos el valor mínimo del SOC permaneció por debajo del 20%. No es recomendable ninguno como diseño final. En el caso de la figura 87 hubo 48 horas (1.63% de la temporada de verano) en las cuales la carga careció del servicio eléctrico. El dimensionamiento de la figura 90 no tuvieron electricidad por 27 horas y en el caso de la figura 93 fueron 67 horas sin servicio.

Análisis del dimensionamiento con 96 kW de acumuladores (1 día de autonomía): En este caso todas las opciones son viables, habría que analizar si la cantidad de aerogeneradores es factible (si conviene más utilizar 3 kW de turbinas eólicas en lugar de 1 kW de paneles fotovoltaicos o baterías).

Análisis de las propuestas utilizando 288 kW de almacenamiento (3 días de autonomía): En el último caso todos se encuentran en el rango permisible, tanto las desviaciones estándar como las medias son muy similares.

De no ser posible llevar a cabo una instalación con 3 días de autonomía se recomendaría tomar en cuenta el de 96 kW, y dentro de esos el fotovoltaico al 100% tiene un comportamiento que se acerca más al límite sin alcanzar a dañar la batería, el aerogenerador tiene un efecto favorable disminuyendo la posibilidad de descarga hasta su límite permisible (figura 91), y en el caso del diseño de la figura 88 el ingeniero tiene

que calcular la factibilidad de utilizar los aerogeneradores en lugar de uno o dos kW de instalación fotovoltaica.

1.24 La Flor, Durango

La localidad cuenta con clima muy seco y en verano se alcanza el pico de radiación solar global (aproximadamente $190 - 220 \frac{kWh}{m^2}$ de abril a agosto) según la figura 96, debido a ello las temperaturas máximas varían desde los 35- 45 °C (como se aprecia en la figura 97).

Radiación anual:

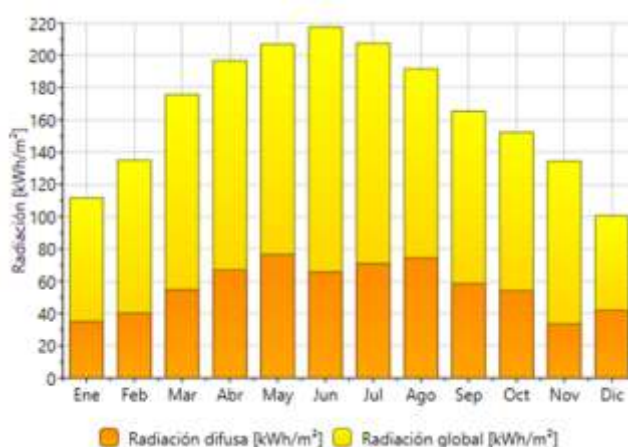


Figura 97 Radiación difusa y global

Temperaturas anuales

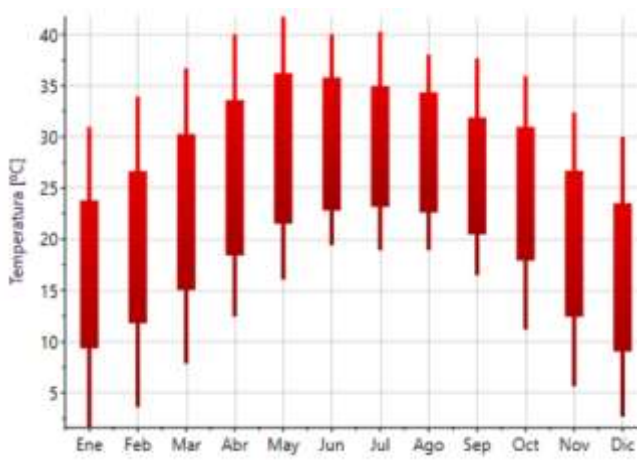


Figura 98 Rangos de temperatura por año

	Gh kWh/m ²	Dh kWh/m ²	Bn kWh/m ²	Ta °C	Td °C	FF m/s
Enero	112	35	159	16.1	3.7	1.5
Febrero	135	40	168	18.9	3.3	2
Marzo	176	55	190	22.3	4.6	2.4
Abril	197	67	198	26.3	7	2.3
Mayo	207	77	187	28.8	11.2	2.3
Junio	217	66	210	29.7	14.2	2.4
Julio	208	71	194	29	14.8	2.4
Agosto	192	75	171	28.4	15.8	2.1
Setiembre	165	59	165	26.4	15.2	1.9
Octubre	152	54	168	24	12.3	1.7
Noviembre	134	34	190	19.3	7.2	1.6
Diciembre	101	42	126	15.7	3.5	1.6
Año	1996	674	2126	23.7	9.4	2

Figura 99 Datos

Otro dato importante es que cuenta con una velocidad media anual de 2 m/s.

Resultados del diseño de experimentos

Para llevar a cabo el análisis experimental se utilizó el simulador de la figura 17. Se hizo un diseño de experimentos previo para seleccionar los niveles idóneos de generación máxima durante el verano y se pueden observar los resultados en la tabla 33. Por otra parte se utilizaron las mismas curvas y alturas (para el aerogenerador).

Finalmente se seleccionaron los siguientes factores para DOE no replicado:

Tabla 32 Factores y niveles propuestos por tecnología

Nivel/Factor	Orientación	Inclinación	Curva	Altura
Bajo	0	0	HLD	7
Alto	330	15	Whisper	20

Una vez hecha la variación de parámetros en el simulador (figura 33) se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 33 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano

Inclinación	Orientación	Altura	Curva	Respuesta 1 día típico (W)
0	0	7	HLD	5236
15	0	7	HLD	5229
0	330	7	HLD	4819
15	330	7	HLD	5116
0	0	20	HLD	5508
15	0	20	HLD	5501
0	330	20	HLD	5092
15	330	20	HLD	5388
0	0	7	Whisper	5061
15	0	7	Whisper	5054
0	330	7	Whisper	4644

15	330	7	Whisper	4941
0	0	20	Whisper	5154
15	0	20	Whisper	5147
0	330	20	Whisper	4737
15	330	20	Whisper	5033

Posteriormente se dio de alta en Minitab y se obtuvieron los siguientes resultados:

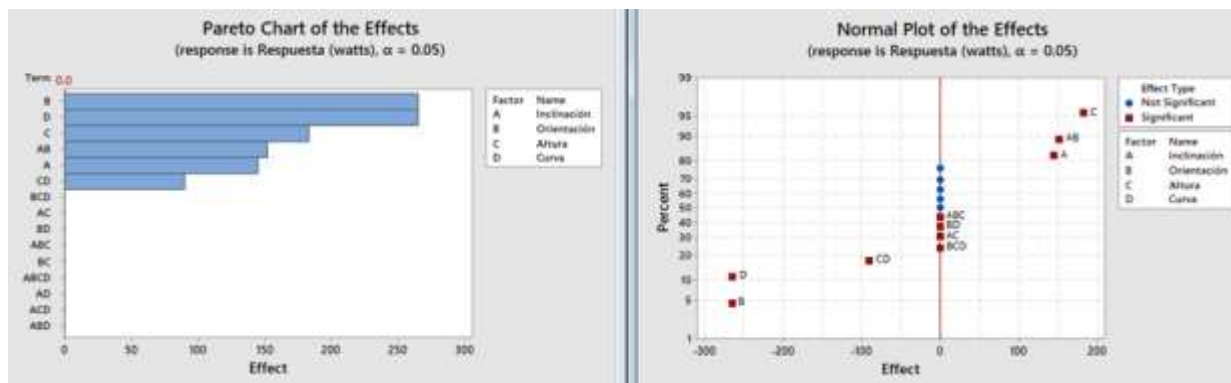


Figura 100 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho.

Se puede apreciar claramente que todos los factores principales tienen efecto significativo y el que resalta más en este caso es la curva del aerogenerador. Las interacciones dobles que también presentaron efecto importante en el sistema fueron altura-curva y orientación-inclinación.

Para obtener la tabla de análisis de varianza se mandan al error los datos que no fueron significativos. Una vez hecho lo comentado resultó lo siguiente:

El análisis de varianza demostró finalmente que hay efecto significativo en los factores antes mencionados puesto que el valor-P fue menor (en todos 0.0000) que el nivel de significancia (0.05).

El gráfico de efectos principales (figura 100) nos muestra el comportamiento de cada factor según el nivel en el que se encuentra y el de interacción (figura 101) nos muestra cómo dos factores interactúan de manera significativa sobre la variable de respuesta, aquí podemos deducir que las mejores opciones a elegir si quiero obtener la mayor captación de energía posible es: Orientación=0, inclinación=0 curva=HLD y altura=20.

Se le dio prioridad al gráfico de interacciones.

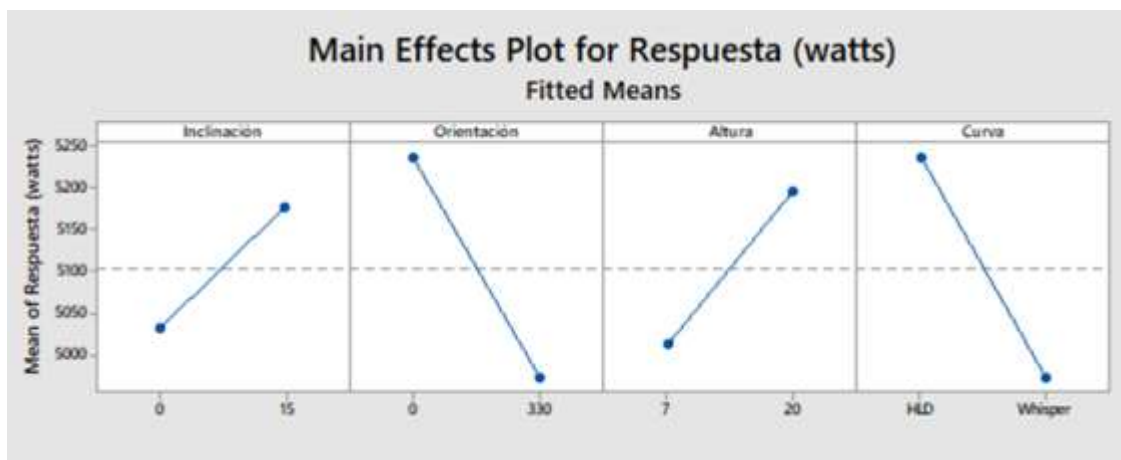


Figura 101 Gráfico de efectos principales

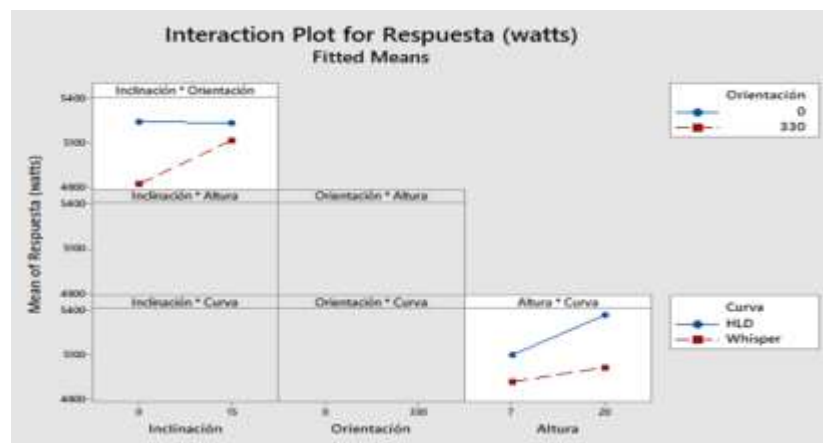


Figura 102 Gráfico de efectos principales

Para realizar el último estudio con la desviación estándar se hizo una prueba de generación durante el verano con un aerogenerador y un panel fotovoltaico, y se obtuvo el valor medio para dimensionar:

La tabla 34 muestra la información que proporcionó dicha simulación:

Tabla 34 Datos de simulación y toma de decisiones

Demanda total en verano=	11.72 MWh	Energía promedio de demanda	diaria 96065.57 W
Generación total en verano AE (1 kW) de instalación=	0.07812 MWh	Energía promedio provee el AE	diaria 640.32
Generación total en verano FV (1 kW) de instalación=	1.013 MWh	Energía promedio provee el FV	diaria 8303.27
Según DOE ¿se descartó el uso de alguna tecnología de generación?	No	Según simulación final, sistema que tuvo más influencia	FV
<i>-Debido a que el sistema fotovoltaico brinda mayor energía al sistema se le dará prioridad en los porcentajes.</i>			
<i>-Tomando en cuenta que el instalar un aerogenerador de baja potencia (1 kW) no nos brinda ni un cuarto de la energía diaria necesaria, se puede descartar su uso.</i>			

A continuación se muestran las propuestas por porcentaje:

Tabla 35 Porcentajes de prueba propuestos

Fotovoltaico		Eólico		Baterías		
Porcentaje	Cantidad de paneles 1 kW	Porcentaje	Cantidad de Aerogeneradores 1 kW	12 horas de capacidad	1 Día	3 Días según IDEA
90%	11	10%	15	48kWh	96kW	288kW
100%	12	0%	0			

Finalmente se decidió eliminar el uso del aerogenerador puesto que es inviable instalar 15 aerogeneradores de 1 kW para abastecer el 10% de la demanda. Por lo que finalmente se variará el uso fotovoltaico con diferentes capacidades de almacenamiento a continuación:

Tabla 36 Porcentajes de prueba final

Fotovoltaico		Eólico		Baterías				
%	Nro Panel es 1 kW	%	Nro Aerogenerad ores 1 kW	Capacidad de almacenamie nto	Soc Media	Soc Desviaci ón estándar	Min	Ma x
100 %	12	0 %	0	48 kWh	0.587 1	0.1867	0.189 1	1
100 %	12	0 %	0	96 kWh	0.669 91	0.13025	0.203 98	1
100 %	12	0 %	0	288 kWh	0.759 88	0.05199	0.592 3	1

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento

Se mostrarán los datos de la instalación con 100% fotovoltaico y 0% Eólico variando el almacenamiento.

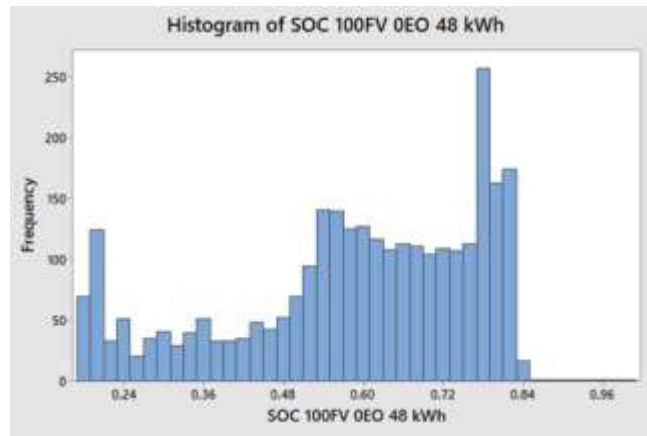


Figura 103 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía)

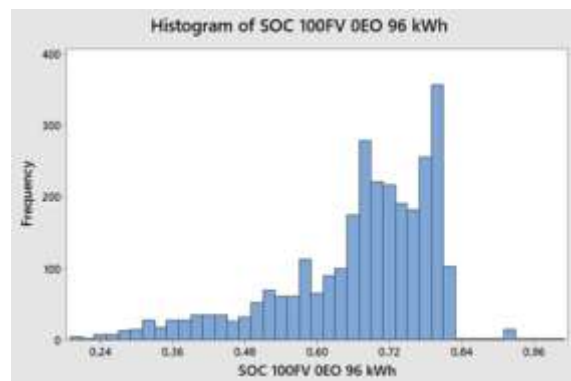


Figura 104 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía)

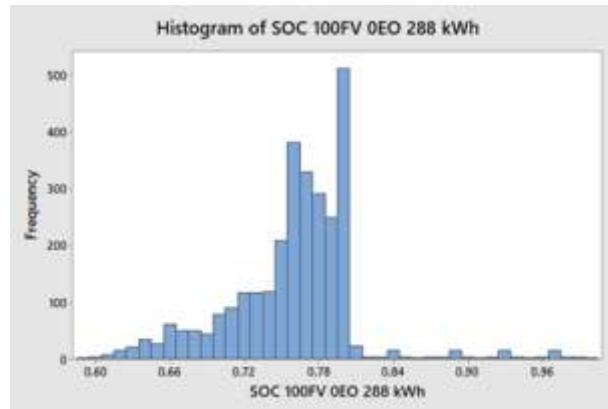


Figura 105 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)

Debido a que los análisis en donde se utilizan los almacenamientos de 48 – 96 kWh no evitan que la batería se descargue excesivamente, la mejor propuesta es 100% Fotovoltaico y tres días de autonomía del almacenamiento.

Otro detalle a tomar en cuenta es que a velocidad promedio anual de 2 m/s se debe descartar el uso del aerogenerador.

1.25 Pozo Hondo, Guanajuato

La población cuenta con un clima seco, se puede apreciar en la figura 105 que a partir de marzo aumenta la radiación global y se mantiene entre los 190- 210 $\frac{kWh}{m^2}$ hasta el mes de agosto. Durante ese periodo las temperaturas varían entre 30-40 °C (figura 117).

Radiación anual:

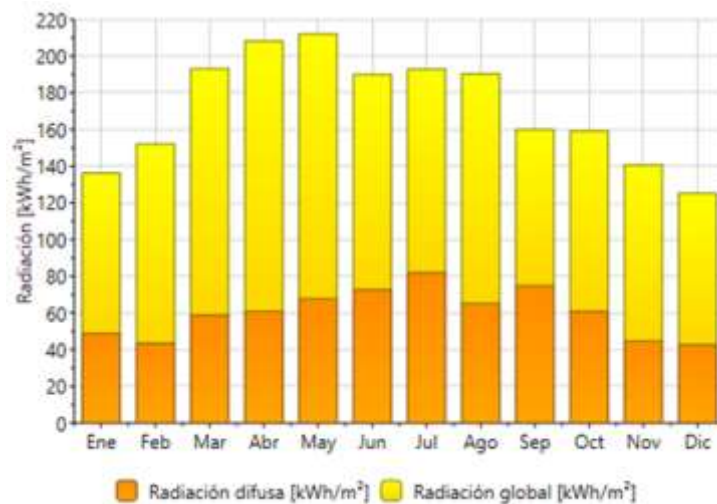


Figura 106 Radiación difusa y global

Temperaturas anuales

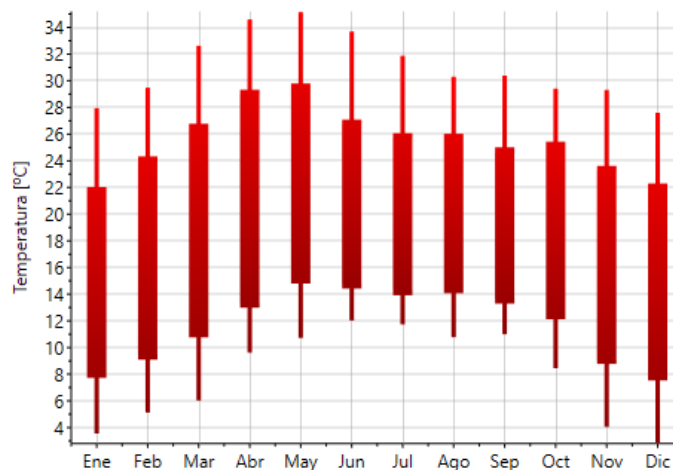


Figura 107 Rangos de temperatura por año

	Gh kWh/m ²	Dh kWh/m ²	Bn kWh/m ²	Ta °C	Td °C	FF m/s
Enero	136	49	164	14.4	6.7	0.8
Febrero	152	44	175	16.4	6.6	0.9
Marzo	193	59	203	18.5	7.9	1.1
Abril	208	61	216	21.3	10.1	1
Mayo	212	68	207	22.1	12	1
Junio	190	73	164	21	14	1
Julio	193	82	160	19.8	14.5	0.9
Agosto	190	65	182	19.9	14.4	0.9
Setiembre	160	75	127	19.3	13.8	0.9
Octubre	159	61	164	18.4	11.9	0.8
Noviembre	141	45	171	15.9	8.8	0.8
Diciembre	125	43	155	14.3	6.8	0.7
Año	2060	724	2089	18.4	10.6	0.9

Figura 108 Otros datos meteorológicos

El lugar tiene una velocidad de viento media anual de 0.9 m/s según se aprecia en la figura 107 (es la zona con menor cantidad de viento en este estudio).

Resultados del diseño de experimentos (Simulación)

Para llevar a cabo el análisis experimental se utilizó el simulador de la figura 17 y a partir de un diseño de experimentos previo se seleccionaron dos propuestas de niveles para el sistema fotovoltaico (tabla 37), además se utilizarán las mismas curvas y alturas de los otros sitios (para el aerogenerador). Por lo que se seleccionaron los siguientes factores para el diseño de experimentos no replicado:

Tabla 37 Factores y niveles seleccionados por tecnología

Nivel/Factor	Orientación	Inclinación	Curva	Altura
Bajo	0	0	HLD	7
Alto	30	15	Whisper	20

Una vez hecha la variación de parámetros en el simulador se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 38 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano

Inclinación	Orientación	Altura	Curva	Respuesta 1 día típico (W)
0	0	7	HLD	11701
15	0	7	HLD	11613
0	30	7	HLD	8261
15	30	7	HLD	11001
0	0	20	HLD	11701
15	0	20	HLD	11613
0	30	20	HLD	8261
15	30	20	HLD	11001
0	0	7	Whisper	11701
15	0	7	Whisper	11613
0	30	7	Whisper	8261
15	30	7	Whisper	11001

0	0	20	Whisper	11701
15	0	20	Whisper	11613
0	30	20	Whisper	8261
15	30	20	Whisper	11001

Posteriormente se dio de alta en Minitab y se obtuvieron los siguientes resultados:

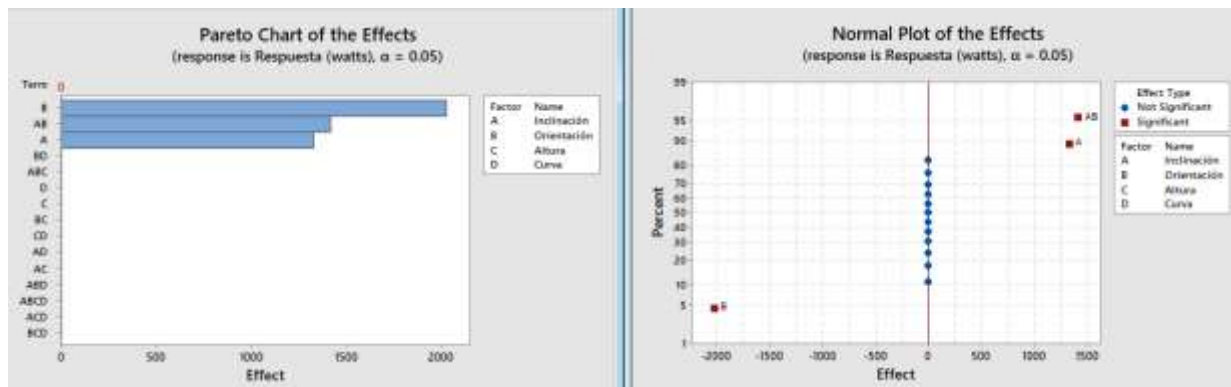


Figura 109 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho.

En este caso se aprecia que no existe influencia significativa por parte del aerogenerador y es lógico tomando en cuenta que la velocidad media anual es 0.9, ya no hay necesidad de mostrar el ANOVA debido a la claridad de las gráficas.

El gráfico de efectos principales nos muestra el comportamiento de cada factor según el nivel en el que se encuentra y el de interacción nos muestra cómo dos factores interactúan de manera significativa sobre la variable de respuesta, y en este caso existe suficiente evidencia estadística para considerar el uso de un sistema fotovoltaico con los siguientes factores y niveles para obtener la mayor generación energética posible: Orientación=0 e inclinación=0 (no se sugiere el uso del aerogenerador) y si es posible se debe considerar el uso de otro micro-generador de respaldo para abastecer a la localidad (además del almacenamiento).

A continuación se muestran las gráficas de efectos principales y de interacciones:

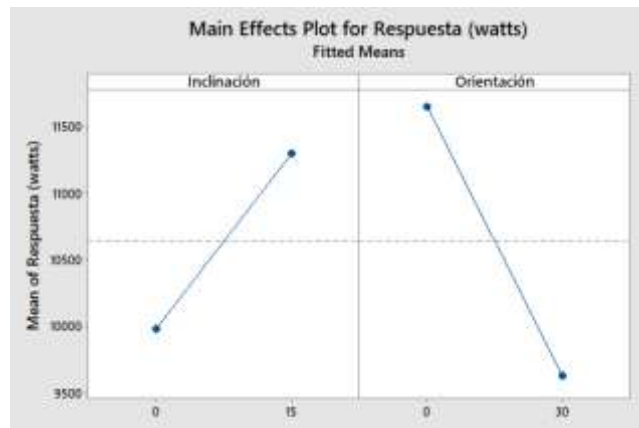


Figura 110 Gráfico de efectos principales

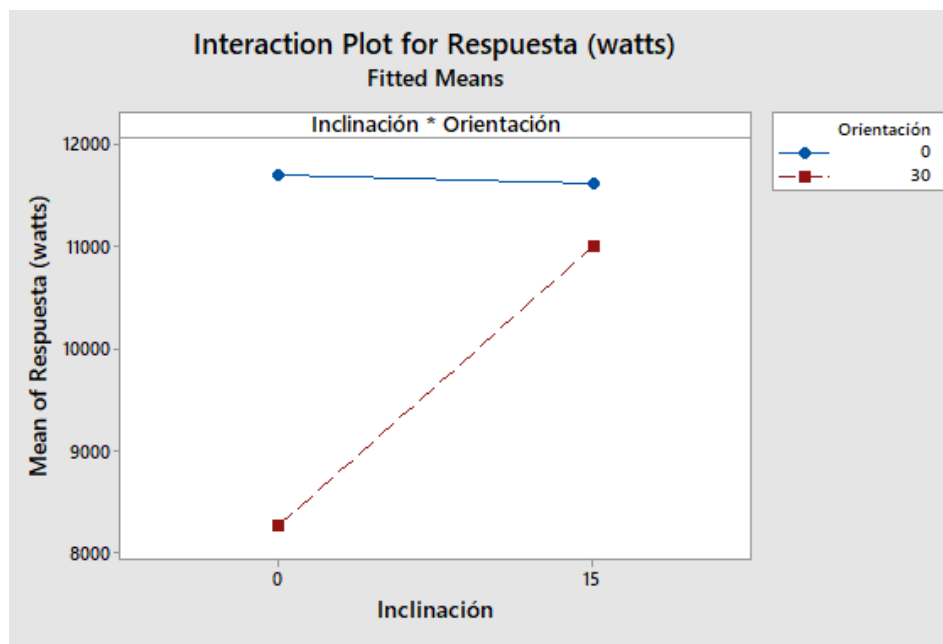


Figura 111 Gráfico de interacción

Para realizar el último estudio con la desviación estándar se hizo una prueba de generación durante el verano con un aerogenerador y un sistema fotovoltaico de 1 kW, y se obtuvo el valor medio para dimensionar:

La tabla 39 muestra la información que proporcionó dicha simulación:

Tabla 39 Datos de simulación y toma de decisiones

Demanda total en verano=	11.72 MWh	Energía promedio diaria de demanda	96065.57 W
Generación total en verano AE (1 kW) de instalación=	0.002629 MWh	Energía promedio diaria que provee el AE	21.549
Generación total en verano FV (1 kW) de instalación=	0.9405 MWh	Energía promedio diaria que provee el FV	7709.016
Según DOE ¿se descartó el uso de alguna tecnología de generación?	Sí	Según simulación final, sistema que tuvo más influencia	FV
<i>-Debido a que el sistema fotovoltaico brinda mayor energía al sistema se le dará prioridad en los porcentajes.</i>			
<i>-Tomando en cuenta que el instalar un aerogenerador de baja potencia (1 kW) no nos brinda ni una décima parte de la energía diaria necesaria, se puede descartar su uso.</i>			

A continuación se muestran las propuestas por porcentaje:

Fotovoltaico		Eólico		Baterías		
Porcentaje	Cantidad de paneles 1 kW	Porcentaje	Cantidad de Aerogeneradores 1 kW	12 horas de capacidad	1 Día	3 Días según IDEA
90%	11	10%	445	48 kWh	96 kW	288
100%	13	0%	0			kW

Se decidió eliminar el uso del aerogenerador puesto que no es viable instalar 445 aerogeneradores de 1 kW para abastecer el 10% de la demanda. Por lo que finalmente se variará el uso fotovoltaico con diferentes capacidades de almacenamiento a continuación:

Tabla 40 Porcentajes de prueba

Fotovoltaico		Eólico		Baterías				
%	Nro Panel es 1 KW	%	Nro Aerogeneradores 1KW	Capacidad de almacenamie nto	Soc Medi a	Soc Desviaci ón estándar	Min	Ma x
100 %	13	0 %	0	48 kWh	0.564 6	0.1968	0.189 34	1
100 %	13	0 %	0	96 kWh	0.647 4	0.1374	0.203 4	1
100 %	13	0 %	0	288 kWh	0.752 2	0.0551	0.585 6	1

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento

Se mostrarán los datos de la instalación con 100% fotovoltaico y 0% Eólico variando el almacenamiento.

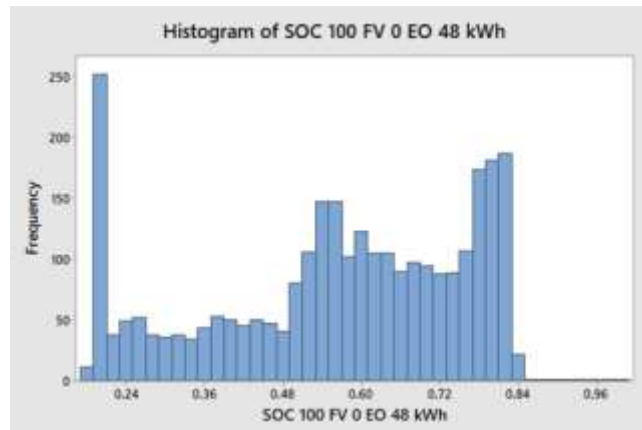


Figura 112 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía)

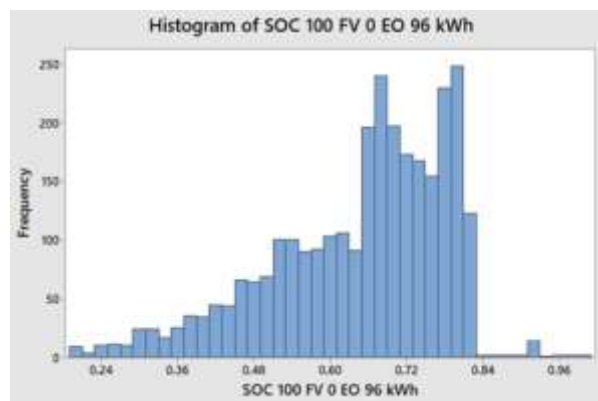


Figura 113 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía)

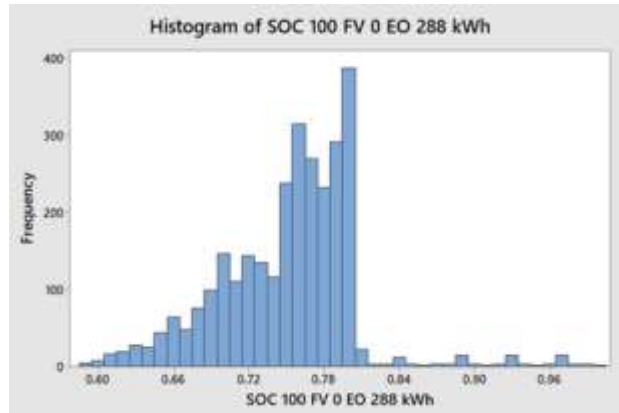


Figura 114 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)

Debido a que los análisis en donde se utilizan los almacenamientos de 48 – 96 kWh no evitan que la batería se descargue excesivamente, la mejor propuesta es 100% Fotovoltaico y tres días de autonomía del almacenamiento.

En el caso de la figura 111 hubo desabasto por 263 horas en el verano (8.9%) y en el caso de la figura 112 no hubo electricidad durante 9 horas que equivalen al 0.3 %.

A velocidad promedio anual de 0.9 m/s se debe descartar el uso del aerogenerador.

1.26 San Isidro, Nuevo León

La localidad cuenta con clima seco cuyo nivel de radiación solar global en verano varía entre $190\text{-}220 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ (figura 114), las temperaturas máximas alcanzan los 40°C (Figura 115).

Radiación anual:

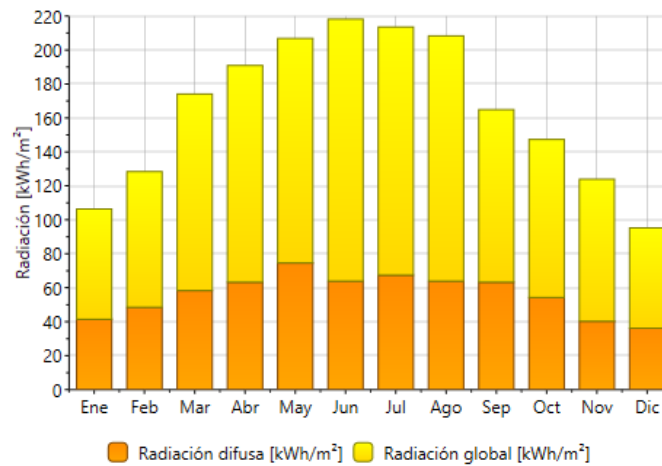


Figura 115 Radiación difusa y global

Temperaturas anuales

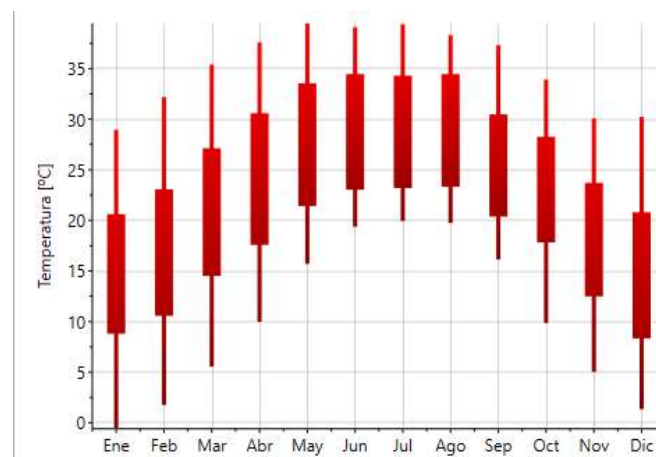


Figura 116 Temperatura anual por rangos mensuales

	Gh kWh/m ²	Dh kWh/m ²	Bn kWh/m ²	Ta °C	Td °C	FF m/s
Enero	106	41	132	14.2	6	2.2
Febrero	128	48	140	16.6	7.2	2.6
Marzo	174	58	181	20.5	9.9	2.8
Abril	191	63	187	24.3	12.9	2.9
Mayo	207	75	193	27.4	16	2.8
Junio	218	64	221	29.1	17.6	2.8
Julio	214	67	208	28.7	18.3	2.6
Agosto	208	64	211	28.8	18.1	2.3
Setiembre	165	63	154	25.8	17.3	2
Octubre	147	54	162	22.6	14.9	2.1
Noviembre	124	40	155	18	10.1	2.2
Diciembre	95	36	120	14.1	5.7	2.1
Año	1977	675	2065	22.5	12.8	2.5

Figura 117 Datos de otros resultados

La localidad tiene una velocidad de viento media anual de 2.5 m/s según los datos obtenidos en Meteonorm como se puede apreciar en la figura 116.

Resultados del diseño de experimentos (Simulación)

Para llevar a cabo el análisis experimental se utilizó el simulador de la figura 17 y a partir de un diseño de experimentos previo se seleccionaron dos propuestas de niveles para el sistema fotovoltaico (tabla 41), además se utilizarán las mismas curvas y alturas de los otros sitios (para el aerogenerador). Por lo que se seleccionaron los siguientes factores para el diseño de experimentos no replicado:

Tabla 41 Factores y niveles seleccionados por tecnología

Nivel/Factor	Orientación	Inclinación	Curva	Altura
Bajo	0	0	HLD	7
Alto	330	15	Whisper	20

Una vez hecha la variación de parámetros en el simulador se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 42 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano

Inclinación	Orientación	Altura	Curva	Respuesta 1 día típico (W)
0	0	7	HLD	5811
15	0	7	HLD	5826
0	330	7	HLD	4548
15	330	7	HLD	5753
0	0	20	HLD	6148
15	0	20	HLD	6163
0	330	20	HLD	4885
15	330	20	HLD	6090
0	0	7	Whisper	5590
15	0	7	Whisper	5605
0	330	7	Whisper	4326
15	330	7	Whisper	5531
0	0	20	Whisper	5688

15	0	20	Whisper	5703
0	330	20	Whisper	4455
15	330	20	Whisper	5630

Posteriormente se dio de alta en minitab y se obtuvieron los siguientes resultados:

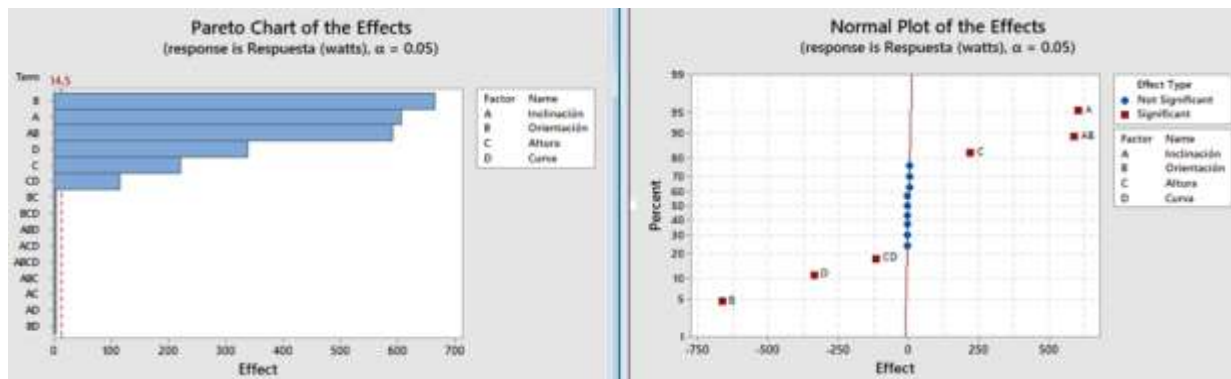


Figura 118 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho

Se puede apreciar claramente que todos los factores principales tienen efecto significativo y los más importantes son la inclinación y orientación. Las interacciones dobles Inclinación-orientación y altura-curva también se encuentran activas en el sistema.

Para obtener la tabla de análisis de varianza se mandan al error los datos que no fueron significativos. Una vez hecho lo comentado resultó lo siguiente:

El análisis de varianza evidenció que hay efecto significativo en los factores antes mencionados puesto que el valor-P es menor que el nivel de significancia (0.05).

El gráfico de efectos principales nos muestra el comportamiento de cada factor según el nivel en el que se encuentra y el de interacción nos muestra cómo dos factores interactúan de manera significativa sobre la variable de respuesta, aquí podemos deducir que las mejores opciones a elegir si quiero obtener la mayor captación de energía posible es: Orientación=0°, inclinación=15° curva=HLD y altura=20 m.

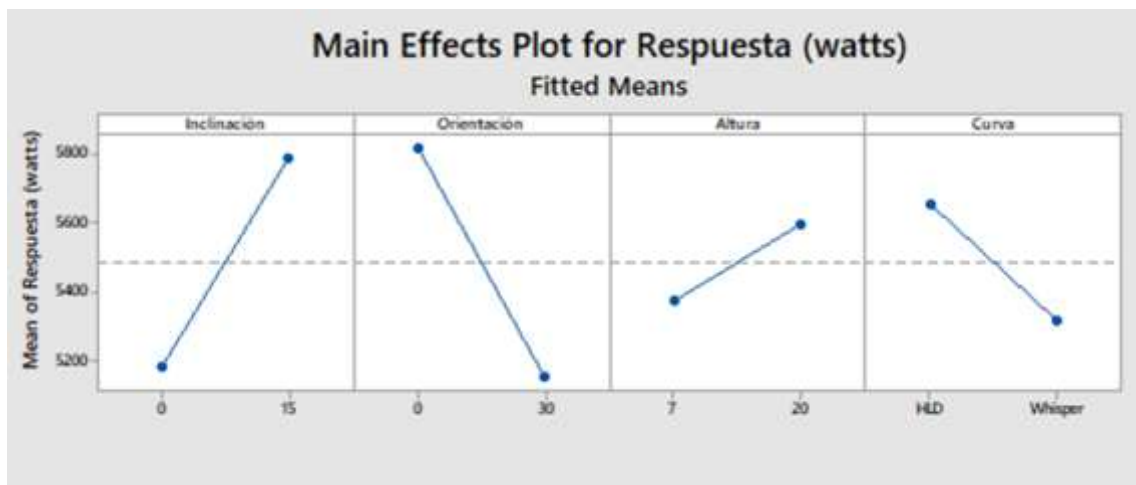


Figura 119 Gráfico de efectos principales

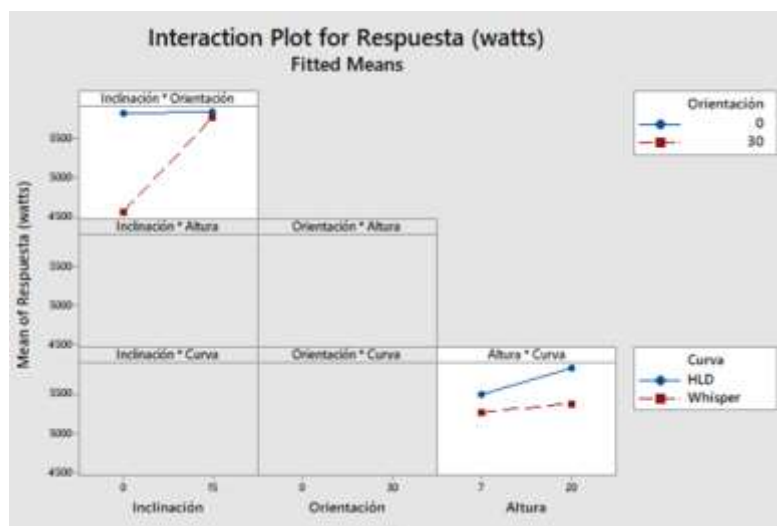


Figura 120 Gráfico de efectos principales

Para realizar el último estudio con la desviación estándar se hizo una prueba de generación durante el verano con un aerogenerador y un sistema fotovoltaico de 1 kW, y se obtuvo el valor medio para dimensionar:

La tabla 43 muestra la información que proporcionó dicha simulación:

Tabla 43 Datos de simulación y toma de decisiones

Demanda total en verano=	11.72 MWh	Energía promedio de demanda	diaria 96065.57 W
Generación total en verano AE (1 kW) de instalación=	0.1076 MWh	Energía promedio provee el AE	diaria 881.96 W
Generación total en verano FV (1 kW) de instalación=	1.058 MWh	Energía promedio provee el FV	diaria 8672.1211 W
Según DOE ¿se descartó el uso de alguna tecnología de generación?	No	Según simulación final, sistema que tuvo más influencia	FV

-Debido a que el sistema fotovoltaico brinda mayor energía al sistema se le dará prioridad en los porcentajes.

-Tomando en cuenta que el instalar un aerogenerador de baja potencia (1 kW) no nos brinda ni el 5% de la energía diaria necesaria, se puede descartar su uso.

Debido a que es más viable instalar 1 kW fotovoltaico que 10 aerogeneradores se descarta por completo su uso.

A continuación se muestran las propuestas por porcentaje:

Tabla 44 Porcentajes de prueba

Fotovoltaico		Eólico		Baterías		
Porcentaje	Cantidad de paneles 1 kW	Porcentaje	Cantidad de Aerogeneradores 1 kW	12 horas de capacidad	1 Día	3 Días según IDEA
90%	10	10%	10	48 kWh	96	288
100%	11	0%	0		kWh	kWh

A pesar de que el aerogenerador no brinda ni 2 kW diarios se decidió agregarlo al análisis para verificar si se complementa, aunque es preferible instalar 1 kW de fotovoltaicos a 7 kW de aerogeneradores.

Tabla 45 Porcentajes de prueba final

Fotovoltaico		Eólico		Baterías				
%	Nro Panel es 1 kW	%	Nro Aerogeneradores 1 kW	Capacidad de almacenamiento kWh	Soc Media	Soc Desviación estándar	Min	Max
100 %	11	0 %	0	48	0.5946	0.19156	0.19038	1
100 %	11	0 %	0	96	0.64738	0.1664	0.19517	1
100 %	11	0 %	0	288	0.7413	0.09525	0.42338	1

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento

Se mostrarán los datos de la instalación con 100% fotovoltaico y 0% Eólico variando el almacenamiento

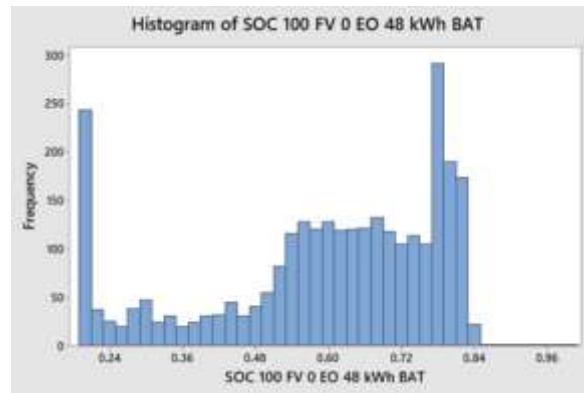


Figura 121 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía)

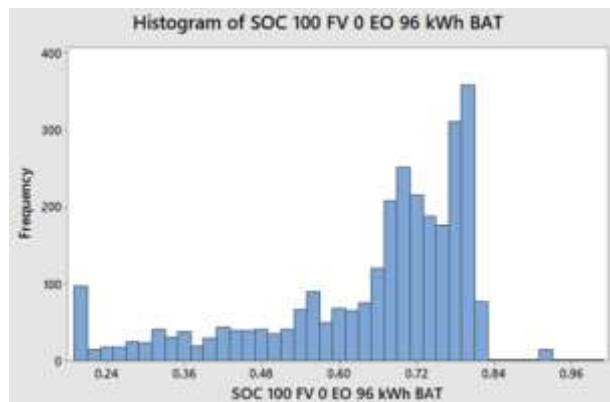


Figura 122 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía)

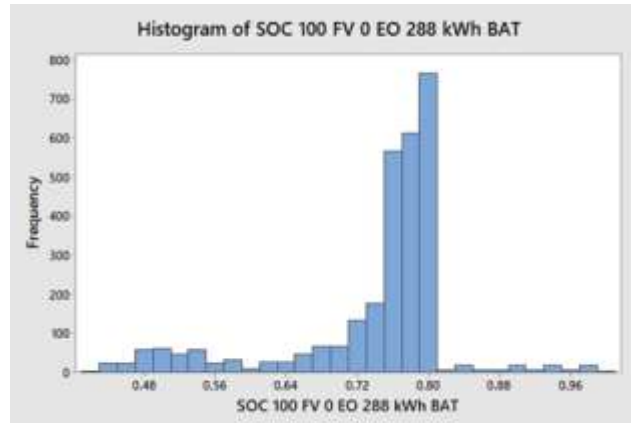


Figura 123 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)

Sólo el dimensionamiento con tres días de autonomía garantiza que la carga será abastecida completamente durante los meses de verano. En los otros dos casos el usuario tuvo entre 97 (Figura 121) y 263 (Figura 120) horas sin electricidad.

Se descarta el uso del aerogenerador a velocidad media anual de 2.5.

En estos casos es recomendable buscar una tercera opción de generación para eliminar posibilidad de fallas eléctricas.

1.27 Cerro Prieto, Sinaloa

Cerro prieto cuenta con características climatológicas de zonas muy secas y en el verano aumenta la cantidad de radiación solar global como se puede apreciar en la figura 123. Las temperaturas máximas alcanzan los 40°C

Radiación anual:

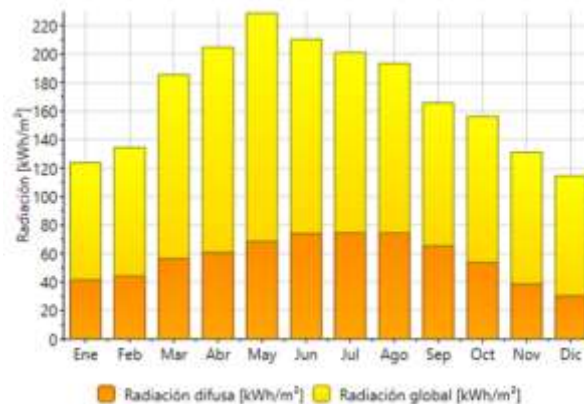


Figura 124 Radiación difusa y global

Temperaturas anuales

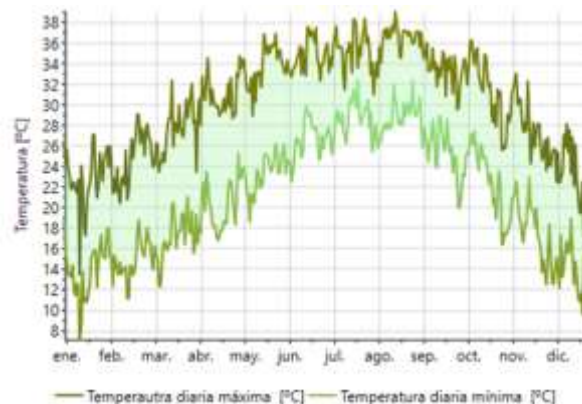


Figura 125 Rangos de temperatura por año

Otro dato obtenido de Meteonorm fue la velocidad de viento media anual que no sobrepasa los 2.77 m/s.

Resultados del diseño de experimentos (Simulación)

Para llevar a cabo el análisis experimental se utilizó el simulador de la figura 19 y a partir de un diseño de experimentos previo se seleccionaron dos propuestas de niveles para el sistema fotovoltaico (tabla 46), además se utilizarán las mismas curvas y alturas de los otros sitios (para el aerogenerador). Por lo que se seleccionaron los siguientes factores para el diseño de experimentos no replicado:

Tabla 46 Factores y niveles seleccionados por tecnología

Nivel/Factor	Orientación	Inclinación	Curva	Altura
Bajo	0	0	HLD	7
Alto	30	15	Whisper	20

Una vez hecha la variación de parámetros en el simulador se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 47 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano

Inclinación	Orientación	Altura	Curva	Respuesta 1 día típico (W)
0	0	7	HLD	11403
15	0	7	HLD	11453
0	330	7	HLD	8780
15	330	7	HLD	11014
0	0	20	HLD	12305
15	0	20	HLD	12354
0	330	20	HLD	9681
15	330	20	HLD	11916
0	0	7	Whisper	10524
15	0	7	Whisper	10574
0	330	7	Whisper	7901
15	330	7	Whisper	10135
0	0	20	Whisper	10925
15	0	20	Whisper	10975
0	330	20	Whisper	8302
15	330	20	Whisper	10536

Posteriormente se dio de alta en Minitab y se obtuvieron los siguientes resultados:

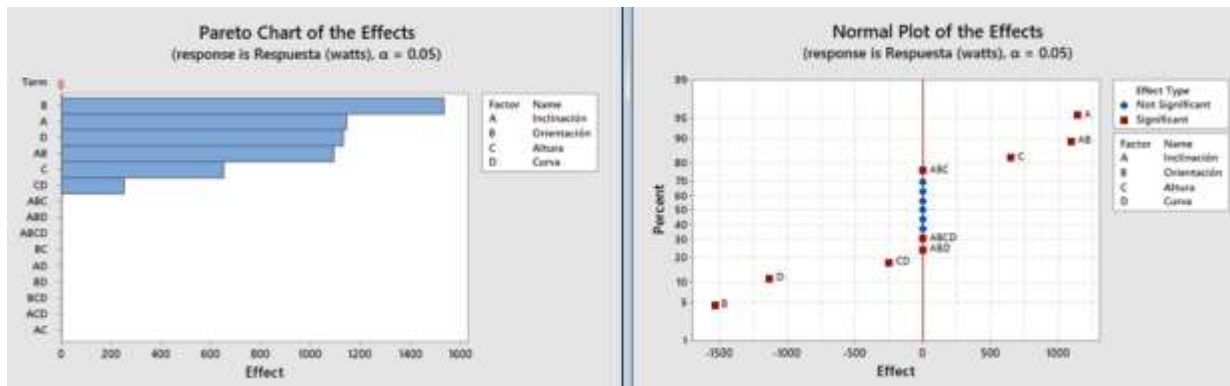


Figura 126 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho.

Se puede apreciar claramente que todos los factores principales tienen efecto significativo y el que resalta más en este caso es la orientación. Las interacciones dobles que también presentaron efecto importante en el sistema fueron altura-curva y orientación-inclinación.

Para obtener la tabla de análisis de varianza se mandan al error los datos que no fueron significativos.

Una vez hecho lo comentado resultó lo siguiente:

Según el ANOVA existe efecto significativo en los factores antes mencionados puesto que el valor-P fue menor que el nivel de significancia (0.05).

El gráfico de efectos principales (figura 126) nos muestra el comportamiento de cada factor según el nivel en el que se encuentra y el de interacción (figura 127) nos muestra cómo dos factores interactúan de manera significativa sobre la variable de respuesta, aquí podemos deducir que las mejores opciones a elegir si quiero obtener la mayor captación de energía posible es: Orientación=0°, inclinación=0° curva=HLD y altura=20 m.

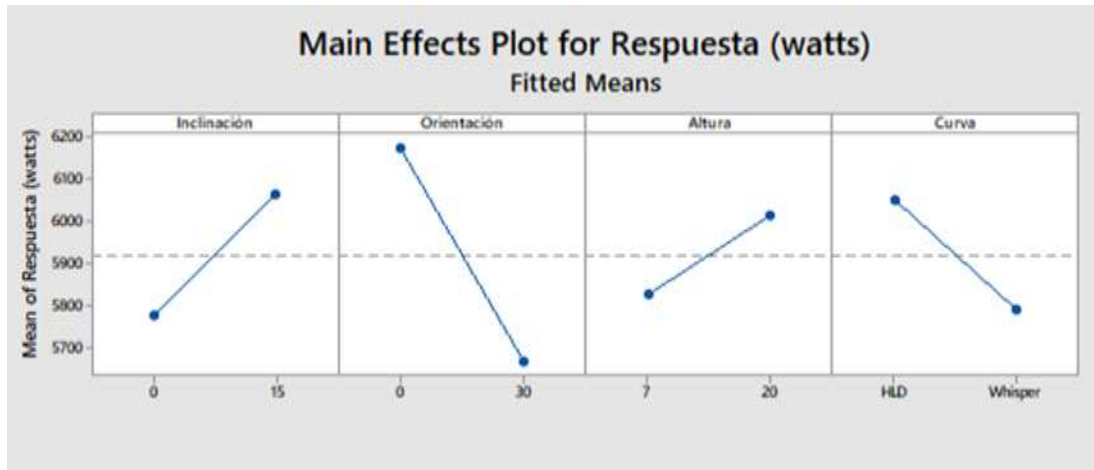


Figura 127 Gráfico de efectos principales

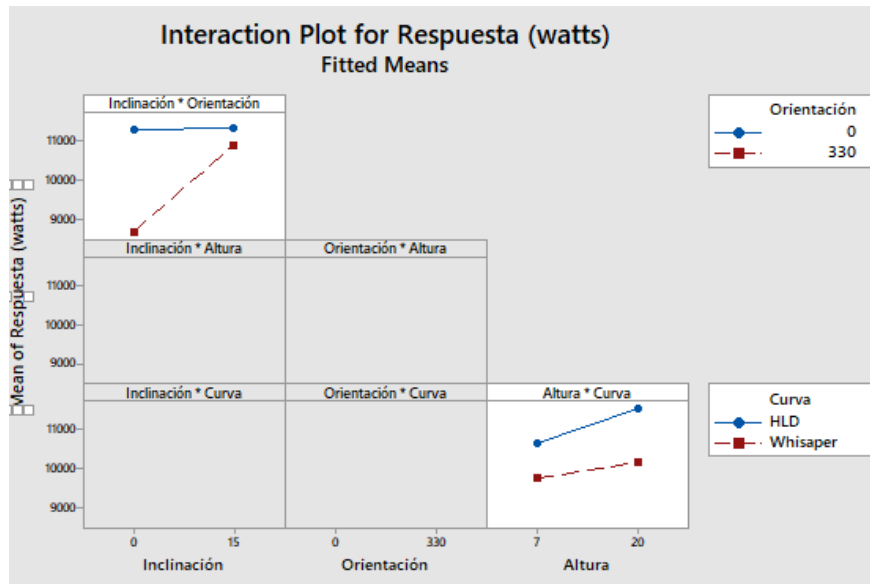


Figura 128 Gráfico de interacciones

Para realizar el último estudio con la desviación estándar se hizo una prueba de generación durante el verano con un aerogenerador y un sistema fotovoltaico de 1 kW, y se obtuvo el valor medio para dimensionar:

La tabla 48 muestra la información que proporcionó dicha simulación:

Tabla 48 Datos de simulación y toma de decisiones

Demanda total en verano=	11.72 MWh	Energía promedio diaria de demanda	96065.57 W
Generación total en verano AE (1 kW) de instalación=	0.2418 MWh	Energía promedio que provee el AE	8174.59 W
Generación total en verano FV (1 kW) de instalación=	0.9973 MWh	Energía promedio que provee el FV	1981.96 W
Según DOE ¿se descartó el uso de alguna tecnología de generación?	No	Según simulación final, sistema que tuvo más influencia	FV
<i>-El sistema fotovoltaico brinda mayor energía al sistema por lo que se le dará prioridad en los porcentajes.</i>			
<i>-Tomando en cuenta que el instalar un aerogenerador de baja potencia (1 kW) no nos brinda ni el 5% de la energía diaria necesaria, se puede descartar su uso.</i>			

Debido a que es más viable instalar 1 kW fotovoltaico que 5 aerogeneradores se descarta por completo su uso.

A continuación se muestran las propuestas por porcentaje:

Tabla 49 Porcentajes de prueba

Fotovoltaico		Eólico		Baterías		
Porcentaj e	Cantida d de paneles 1 kW	Porcentaj e	Cantidad de Aerogeneradore s 1 kW	12 horas de capacida d	1 Día	3 Días según IDEA
90%	11	10%	5	48KWh	96K	288K
100%	12	0%	0		W	W

A pesar de que el aerogenerador no brinda ni 2 kW diarios se decidió agregarlo al análisis para verificar si se complementa, aunque es preferible instalar 1 kW de fotovoltaicos a 5 kW de aerogeneradores.

Tabla 50 Porcentajes de prueba finales

Fotovoltaico		Eólico		Baterías				
%	Nro Panel es 1 kW	%	Nro Aerogenerad ores 1 kW	Capacidad de almacenamie nto kWh	Soc Media	Soc Desviaci ón estándar	Min	Ma x
100 %	12	0 %	0	48	0.621 76	0.17294	0.189 62	1
100 %	12	0 %	0	96	0.692 36	0.11585	0.201 71	1
100 %	12	0 %	0	288	0.768 28	0.04664	0.603 46	1

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento

Se mostrarán los datos de la instalación con 100% fotovoltaico y 0% Eólico variando el almacenamiento

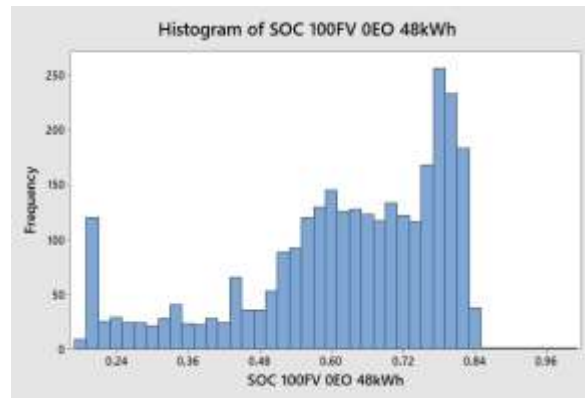


Figura 129 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía)

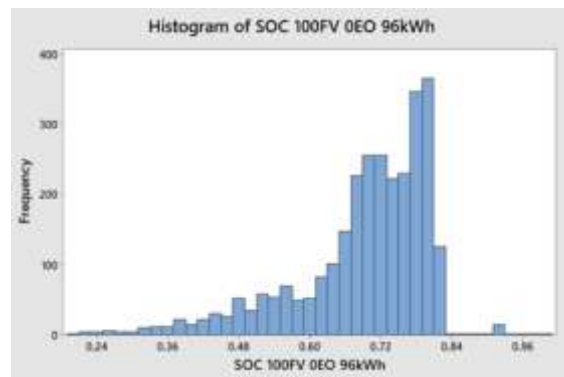


Figura 130 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía)

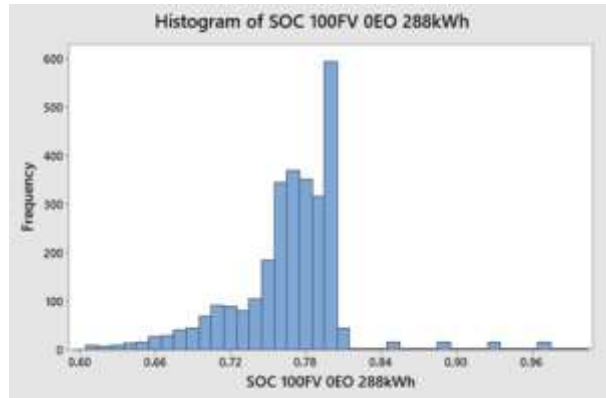


Figura 131 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)

Sólo el dimensionamiento con tres días de autonomía garantiza que la carga será abastecida completamente durante los meses de verano. En los otros dos casos el usuario tuvo entre 2 (Figura 129) y 129 (Figura 128) horas sin electricidad.

Se descarta el uso del aerogenerador a velocidad media anual de 2.77 m/s.

En estos casos es recomendable buscar una tercera opción de generación para eliminar posibilidad de cortes eléctricos.

1.28 El Colorado, Sonora

El Colorado cuenta con características climatológicas de zonas muy secas y en el verano aumenta la radiación solar global como se puede apreciar en la figura 131.

Además posee un promedio de velocidad de viento anual de 1.8 m/s (figura 132).

Radiación anual:

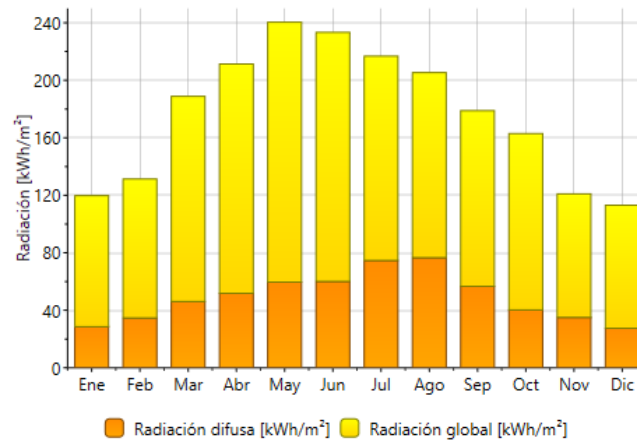


Figura 132 Radiación difusa y global

Datos adicionales

	Gh kWh/m²	Dh kWh/m²	Bn kWh/m²	Ta °C	Td °C	FF m/s
Enero	120	29	188	16.8	4.2	1.2
Febrero	131	35	175	18.2	4	1.4
Marzo	189	46	234	21.2	3.6	1.8
Abril	211	52	234	24.7	4.5	2.1
Mayo	240	60	263	29	6.9	2.4
Junio	233	60	247	32.5	13.4	2.6
Julio	217	75	206	33.1	19.9	2.5
Agosto	205	77	188	32.2	21	1.8
Setiembre	179	57	188	31.1	19.6	1.7
Octubre	163	40	209	26.2	12.9	1.4
Noviembre	121	35	174	21.1	7	1.3
Diciembre	113	27	184	16.2	3.7	1.1
Año	2121	591	2489	25.2	10.1	1.8

Figura 133 Datos meteorológicos adicionales de la zona

Resultados del diseño de experimentos (Simulación)

Para llevar a cabo el análisis experimental se utilizó el simulador de la figura 17 y a partir de un diseño de experimentos previo se seleccionaron dos propuestas de niveles para el sistema fotovoltaico (tabla 51), además se utilizarán las mismas curvas y alturas de los otros sitios (para el aerogenerador). Por lo que se seleccionaron los siguientes factores para el diseño de experimentos no replicado:

Tabla 51 Factores y niveles seleccionados por tecnología

Nivel/Factor	Orientación	Inclinación	Curva	Altura
Bajo	0	0	HLD	7
Alto	30	15	Whisper	20

Una vez hecha la variación de parámetros en el simulador se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 52 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano

Inclinación	Orientación	Altura	Curva	Respuesta 1 día típico (W)
0	0	7	HLD	10508
15	0	7	HLD	10620
0	30	7	HLD	7582
15	30	7	HLD	10111
0	0	20	HLD	10774
15	0	20	HLD	10886
0	30	20	HLD	7847
15	30	20	HLD	10377
0	0	7	Whisper	10303
15	0	7	Whisper	10406
0	30	7	Whisper	7377
15	30	7	Whisper	9907
0	0	20	Whisper	10409
15	0	20	Whisper	10521
0	30	20	Whisper	7483
15	30	20	Whisper	10012

Posteriormente se dio de alta en Minitab y se obtuvieron los siguientes resultados:

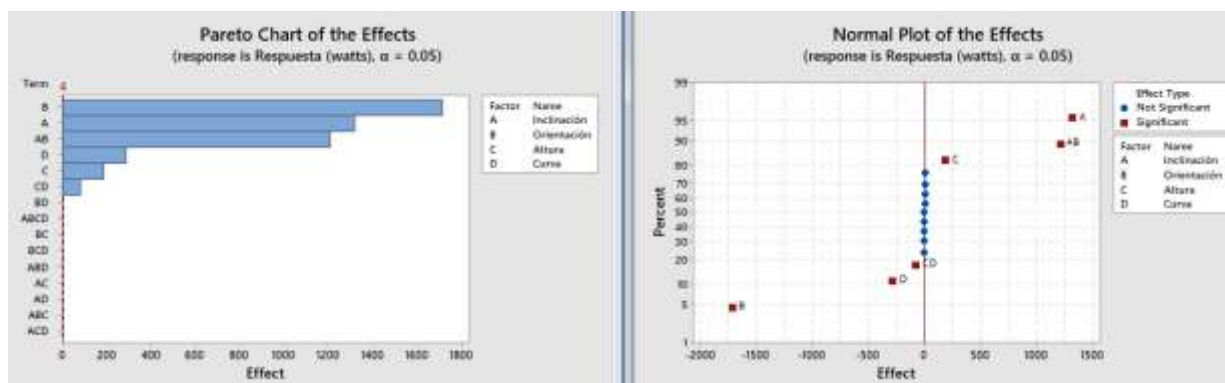


Figura 134 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho

Se puede apreciar claramente que todos los factores principales tienen efecto significativo y los más importantes son los del sistema fotovoltaico, al parecer la influencia del aerogenerador es significativa pero relativamente menor en comparación. Las interacciones dobles que también presentaron efecto importante en el sistema fueron altura-curva y orientación-inclinación.

Para obtener la tabla de análisis de varianza se mandan al error los datos que no fueron significativos.

Una vez hecho lo comentado resultó lo siguiente:

El análisis de varianza comprobó nuevamente que hay efecto significativo en los factores antes mencionados puesto que el valor-P es menor que el nivel de significancia (0.05).

El gráfico de efectos principales (figura 134) nos muestra el comportamiento de cada factor según el nivel en el que se encuentra y el de interacción (figura 135) nos muestra cómo dos factores interactúan de manera significativa sobre la variable de respuesta, aquí podemos deducir que las mejores opciones a elegir si quiero obtener la mayor captación de energía posible es: Orientación=0°, inclinación=15° curva=HLD y altura=20 m, también hay que tomar en cuenta que el nivel de significancia en el caso del aerogenerador es mínimo por lo que se puede presumir que no convendrá instalar un aerogenerador en la zona pero esa conclusión se dará en el siguiente análisis.

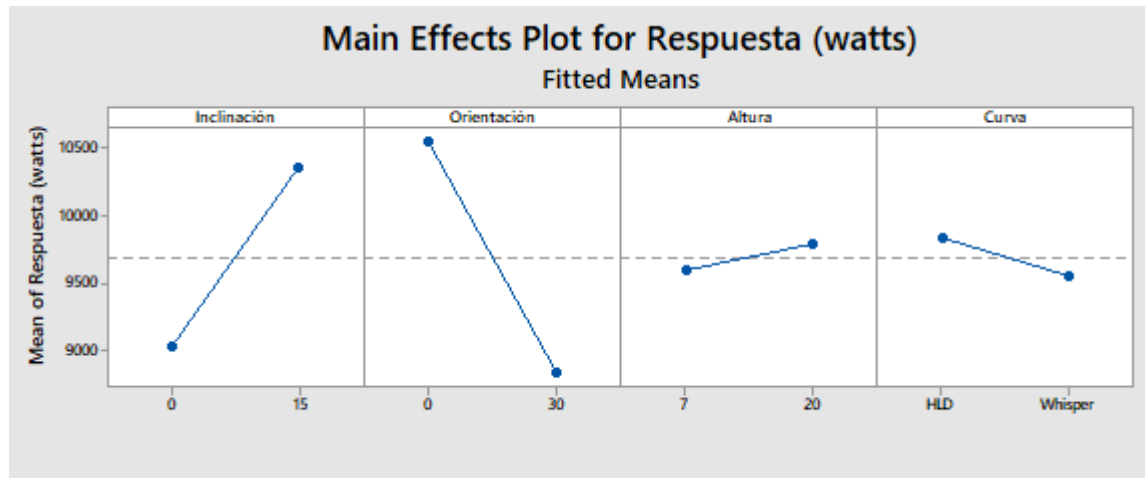


Figura 135 Gráfico de efectos principales

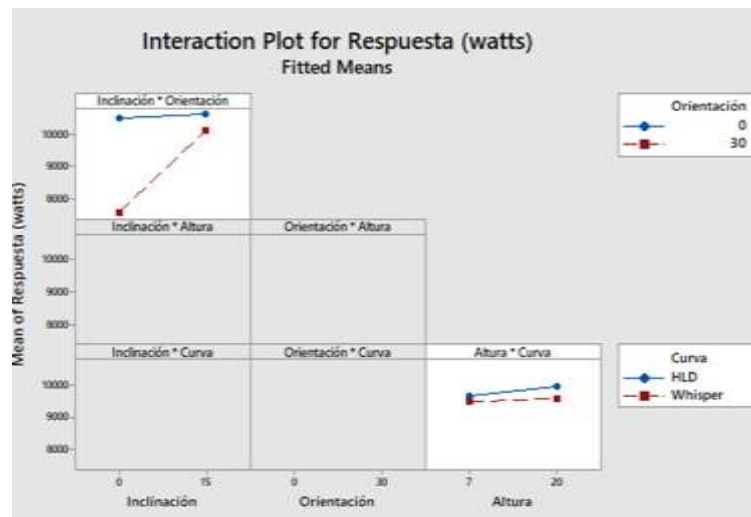


Figura 136 Gráfico de interacciones

Para realizar el último estudio con la desviación estándar se hizo una prueba de generación durante el verano con un aerogenerador y un sistema fotovoltaico de 1 kW, y se obtuvo el valor medio para dimensionar:

La tabla 53 muestra la información que proporcionó dicha simulación:

Tabla 53 Datos de simulación y toma de decisiones

Demanda total en verano=	11.72 MWh	Energía promedio de demanda	diaria 96065.57 W
Generación total en verano AE (1 kW) de instalación=	0.07665 MWh	Energía promedio provee el AE	diaria 628 W
Generación total en verano FV (1 kW) de instalación=	1.108 MWh	Energía promedio provee el FV	diaria 9081.96 W
Según DOE ¿se descartó el uso de alguna tecnología de generación?	No	Según simulación final, sistema que tuvo más influencia	FV
<i>-Debido a que el sistema fotovoltaico brinda mayor energía al sistema se le dará prioridad en los porcentajes.</i>			
<i>-Tomando en cuenta que el instalar un aerogenerador de baja potencia (1 kW) no nos brinda ni el 5% de la energía diaria necesaria, se puede descartar su uso.</i>			

Debido a que es más viable instalar 1 kW fotovoltaico que 10 aerogeneradores se descarta por completo su uso.

A continuación se muestran las propuestas por porcentaje:

Tabla 54 Propuestas para porcentajes de prueba

Fotovoltaico		Eólico		Baterías		
Porcentaje	Cantidad de paneles 1 kW	Porcentaje	Cantidad de Aerogeneradores 1 kW	12 horas de capacidad kWh	1 Día	3 Días según IDEA
90%	10	10%	15	48	96KW	288
100%	11	0%	0			kW

El aerogenerador no brinda ni 2 kW diarios por lo que se decidió descartarlo del análisis final, puesto es preferible instalar 1 kW de fotovoltaicos a 15 kW de aerogeneradores en el caso 90% FV 10% EO.

Tabla 55 Porcentajes de prueba

Fotovoltaico		Eólico		Baterías				
%	Nro Panel es 1 kW	%	Nro Aerogeneradores 1 kW	Capacidad de almacenamiento	Soc Media	Soc Desviación estándar	Min	Max
100 %	11	0 %	0	48 kWh	0.65233	0.14440	0.19277	1
100 %	11	0 %	0	96 kWh	0.72156	0.08347	0.35320	1
100 %	11	0 %	0	288 kWh	0.77808	0.03833	0.6477	1

Comportamiento del estado de carga tras el dimensionamiento

Se mostrarán los datos de la instalación con 100% fotovoltaico y 0% Eólico variando el almacenamiento

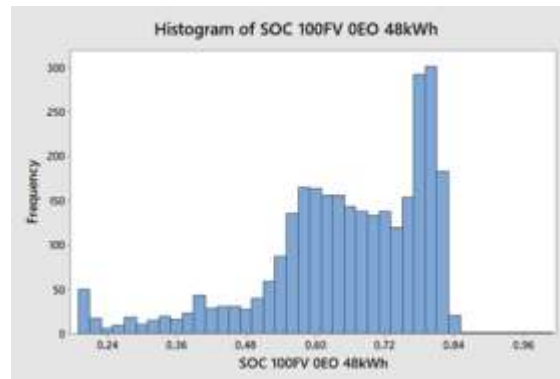


Figura 137 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía)

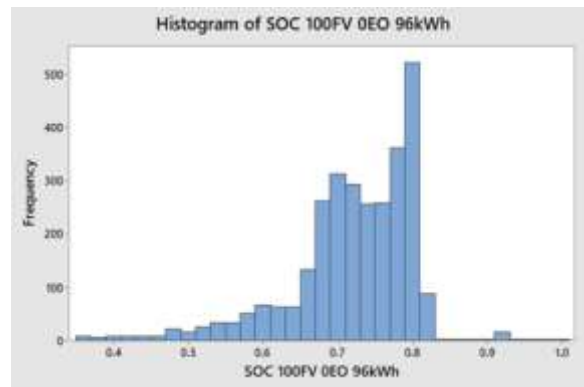


Figura 138 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía)

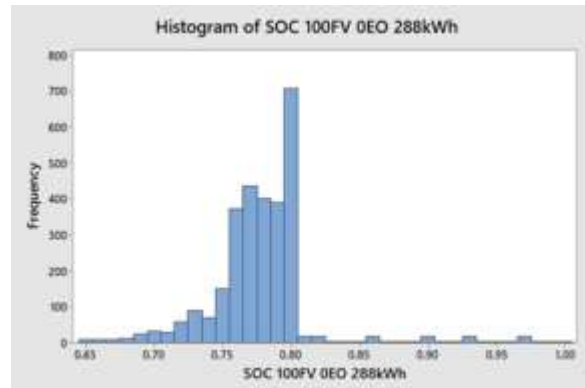


Figura 139 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)

Los dimensionamientos con uno y tres días de autonomía garantizan que la carga será abastecida completamente durante los meses de verano. En el otro caso (48 kWh de almacenamiento) el usuario tuvo 50 horas sin electricidad.

Se descarta el uso del aerogenerador a velocidad media anual de 1.8.

En estos casos es recomendable buscar una tercera opción de generación para eliminar posibilidad de fallas eléctricas.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

El presente proyecto de tesis analiza una metodología para el dimensionamiento de microrredes aisladas fotovoltaica-eólica-almacenamiento mediante el uso de herramientas estadísticas y diseño de experimentos.

En base a los resultados obtenidos podemos deducir que el aerogenerador de baja potencia solamente es funcional cuando la velocidad del viento media anual es mayor a los 3.4 m/s debido a los estudios del DOE y análisis numérico (estadístico) posterior.

En el diseño de experimentos (en todos los casos donde la velocidad ascendía a 3.4 m/s) se probó que existe suficiente evidencia estadística para concluir que los factores se encuentran activos en el sistema (influyen), o en otras palabras, las pruebas del diseño experimental factorial 2^4 con un nivel de confianza del 95% demostraron en el ANOVA que el valor-p fue menor que el valor de $\alpha = 0.05$ en dos de sus factores (marca= HLD y altura=20 metros) y los gráficos de interacciones (principales y dobles), diagramas de Daniel y Pareto también coincidieron.

El análisis estadístico, por su parte, demostró que el uso de los aerogeneradores era de gran ayuda para mantener un buen funcionamiento de la red (se respetaron los límites 20-100 del estado de carga de las baterías y la demanda no tuvo cortes eléctricos en el periodo estudiado).

En este estudio hubo tres localidades que presentaban esa característica (velocidades medias mayores a 3.4 m/s): Laguna Salada (Mexicali), Ojos Calientes (Chihuahua) y Carranza (Coahuila).

En el caso de los sistemas fotovoltaicos, el diseño de experimentos constató que los factores y niveles que influían más en el sistema coincidieron en dos grupos (debido a que en el ANOVA su valor-p fue menor que el valor de α y los gráficos de interacciones corroboraron lo antes mencionado): orientación e inclinación = 0 y orientación = 0 e inclinación =15. En seguida se indican las localidades:

Orientación 0 e inclinación 0 (Aguascalientes, Coahuila, Durango, Guanajuato y Sinaloa)

Orientación 0 e inclinación 15 (Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Nuevo León y Sonora).

A continuación se mencionan las conclusiones más trascendentes por zona:

En el caso de la Laguna Salada (Mexicali) se encontró que los factores más significativos fueron la curva de potencia y la orientación con una diferencia entre ambos del 21.91%. Una vez seleccionados los niveles más apropiados con DOE, el aerogenerador generó sólo el 35.53% de la energía con respecto a la generación del sistema fotovoltaico durante la temporada de verano. Tras analizar las propuestas de dimensionamiento, las instalaciones con 3 y 1 día de autonomía trabajaron en el rango permisible sin arriesgar los acumuladores ni la estabilidad de la red (Específicamente las instalaciones con 80% y 90% fotovoltaico – 20% y 10% eólico), ya que el resto presentó cortes eléctricos entre 33-128 horas pudiendo dañar el almacenamiento y dejando al usuario sin servicio.

En la Ahuja (Aguascalientes) el diseño de experimentos presentó como factores más significativos a la orientación seguida de la interacción doble inclinación-orientación, en este caso se puede apreciar que el aerogenerador no tendrá tanta influencia ya que sus interacciones dobles representan un 17.60% de la generación del sistema fotovoltaico. Una vez seleccionados los niveles más apropiados con DOE, el aerogenerador generó sólo el 4.67% de la energía con respecto a la generación del sistema fotovoltaico durante la temporada de verano. Al realizar las propuestas de instalación se descartó finalmente el uso del aerogenerador tomando en cuenta los porcentajes anteriores y tras obtener el promedio diario (que no alcanzó los 400 W) durante la temporada antes mencionada. Al analizar las propuestas, solamente las instalaciones con 3 días de autonomía trabajaron en el rango permisible sin arriesgar los acumuladores ni la estabilidad de la red, en los otros casos el usuario deja de recibir electricidad del 0.2048-5.12% de las horas en los meses de verano.

En el caso del Saucito (Baja California Sur) se encontró que los factores más significativos fueron la curva y la orientación con una diferencia entre ambas del 19%, sin embargo, las interacciones dobles apuntan a que el aerogenerador no tiene tanta influencia puesto que representan el 34.2% de la generación del fotovoltaico. Una vez seleccionados los niveles más apropiados con DOE, el aerogenerador generó el 14.82%

de la energía con respecto a la obtenida por el fotovoltaico durante la temporada de verano. Al analizar las propuestas de diseño se recomendó el uso de 11 kW de instalación fotovoltaica y 96 kW de almacenamiento ya que se cumplen los límites para mantener la estabilidad del sistema. Se aclara que se realizó el estudio donde se contempló el aerogenerador, sin embargo, y a menos que el costo avale su uso es inviable por la cantidad de turbinas a utilizar.

Ojos Calientes (Chihuahua) presenta una velocidad de viento promedio anual de 4.2 m/s, es uno de los lugares del estudio en los que el viento tuvo mayor influencia, según DOE el factor con más influencia fue la curva de potencia y en segundo lugar la altura (que representó el 44.79% en comparación). Una vez seleccionados los niveles más apropiados con DOE, el aerogenerador generó el 34.48% de la energía con respecto a la obtenida del fotovoltaico durante la temporada de verano. Tras analizar las propuestas de dimensionamiento, las instalaciones con 3 días de autonomía trabajaron en el rango permisible sin arriesgar los acumuladores ni la estabilidad de la red, así como las instalaciones 90-100% FV y 10% EO con 1 día de autonomía ya que los restantes representaban un riesgo para la estabilidad de la red pudiendo dejar al usuario sin electricidad durante 4-158 horas.

En Venustiano Carranza (Coahuila) los efectos más significativos fueron la orientación y la intersección doble inclinación-orientación con una diferencia entre ambas del 2.1%. Una vez seleccionados los niveles más apropiados con DOE, el aerogenerador generó el 36.73% de la energía con respecto a la obtenida por el fotovoltaico durante la temporada de verano. Tras analizar las propuestas de dimensionamiento, las instalaciones con 3 y 1 día de autonomía trabajaron en el rango permisible sin arriesgar los acumuladores ni la estabilidad de la red. Las propuestas de medio día de autonomía presentan cortes del servicio eléctrico entre 27 – 67 horas.

En La Flor (Durango) los efectos más significativos fueron la orientación y la altura de la turbina eólica con una diferencia entre ambas del 0.09%. Una vez seleccionados los niveles más apropiados con DOE, el aerogenerador generó el 7.69% de la energía con respecto a la obtenida por el fotovoltaico durante la temporada de verano. Tras analizar las propuestas de dimensionamiento, se decidió eliminar el uso del aerogenerador

debido a que no brinda ni el 25% de la energía solicitada por la carga y finalmente la única opción viable fue la propuesta del 100% fotovoltaico y almacenamiento con 3 días de autonomía (ya que respetó los límites fijados para conservar en buen estado las baterías y el usuario no perdió el servicio eléctrico).

Pozo Hondo (Guanajuato) fue el único caso en el que se descartó el uso del aerogenerador desde el estudio realizado en el diseño de experimentos, el ANOVA mostró que ninguno de sus factores tuvo influencia significativa en el sistema. En cuanto al sistema fotovoltaico, el factor más significativo fue la orientación seguido de la interacción doble orientación inclinación, con una diferencia entre ambas del 30.20%. Tras analizar las propuestas de dimensionamiento, la única opción viable fue la propuesta del 100% fotovoltaico y almacenamiento con 3 días de autonomía, puesto que en las otras opciones hubo un desabasto de 9-263 horas de servicio eléctrico.

En San Isidro (Nuevo León) los efectos más significativos fueron la orientación y la inclinación con una diferencia entre ambas del 8.57%. Una vez seleccionados los niveles más apropiados con DOE, el aerogenerador generó el 10.17% de la energía con respecto a la obtenida por el fotovoltaico durante la temporada de verano. Tomando en cuenta que el instalar un aerogenerador de baja potencia (1 kW) no brindó ni el 5% de la energía diaria necesaria se descartó su uso. Tras analizar las propuestas de dimensionamiento, la única opción viable fue la propuesta del 100% fotovoltaico y almacenamiento con días de autonomía, puesto que en las otras opciones hubo un desabasto de 97-263 horas de servicio eléctrico.

En Cerro Prieto (Sinaloa) los efectos más significativos fueron la orientación y la inclinación con una diferencia entre ambas del 25.4%. Una vez seleccionados los niveles más apropiados con DOE, el aerogenerador generó el 24.2% de la energía con respecto a la obtenida por el fotovoltaico durante la temporada de verano. Tras analizar las propuestas de dimensionamiento, se decidió eliminar el uso del aerogenerador debido a que no brinda ni el 5% de la energía diaria solicitada por la carga y finalmente la única opción viable fue la propuesta del 100% fotovoltaico y almacenamiento con 3 días de autonomía (ya que respetó los límites fijados para conservar en buen estado las baterías

y el usuario no perdió el servicio eléctrico). En las otras opciones se tuvieron cortes entre 2-129 horas del servicio eléctrico.

En El Colorado (Sonora) los efectos más significativos fueron la orientación y la inclinación con una diferencia entre ambas del 23.13%. Una vez seleccionados los niveles más apropiados con DOE, el aerogenerador generó el 6.9% de la energía con respecto a la obtenida por el fotovoltaico durante la temporada de verano. Tomando en cuenta que el instalar un aerogenerador de baja potencia (1 kW) no brindó ni el 5% de la energía diaria necesaria se descartó su uso. Tras analizar las propuestas de dimensionamiento, las opciones con 1 y 3 días de autonomía en el almacenamiento garantizan que la carga será abastecida completamente durante los meses de verano y en el caso restante el usuario tuvo 50 horas sin electricidad en ese periodo.

Finalmente 7 ciudades tuvieron como única opción viable la propuesta con 100% de instalación fotovoltaica y almacenamiento con 3 días de autonomía debido a la escasez de viento. En el caso de Laguna Salada, Venustiano Carranza y Ojos Calientes las instalaciones con 3 y 1 día de autonomía (almacenamiento) resultaron viables utilizando tanto el aerogenerador como el sistema fotovoltaico debido que la velocidad de viento media anual ascendió los 3.4 m/s.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

- Realizar el estudio añadiendo los datos económicos y técnicos faltantes para obtener resultados más puntuales en la optimización.
- Extender el estudio por distintas zonas del país analizando la factibilidad de uso de las siguientes tecnologías de generación distribuida: Generadores biodiesel, colectores térmicos, generadores hidráulicos, etc. (Dándole prioridad a los sistemas de generación tipo renovable).
- En los casos de las zonas donde el diseño de experimentos y el análisis estadístico muestren que las tecnologías renovables no son capaces de abastecer la carga y es posible dañar el almacenamiento, considerar el uso de tecnologías no renovables (Generadores diesel).
- Contemplar el uso de algoritmos genéticos para mejorar la estabilidad mediante el despacho del flujo energético (como un plus al dimensionamiento).
- Investigar y añadir el uso de programación mixta entera no lineal para mejorar la estabilidad mediante el despacho de energía.

BIBLIOGRAFÍAS

- [1] Panos, E., Densing, M., & Volkart, K. (2016). Access to electricity in the World Energy Council's global energy scenarios: An outlook for developing regions until 2030. *Energy Strategy Reviews*, 9, 28–49. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2015.11.003>
- [2] Edgar R. Sandoval García, Proyección sobre energía eléctrica en México mediante la Identidad de Kaya, *Economía Informa*, Volume 380, 2013, Pages 41-53, ISSN 0185-0849, [https://doi.org/10.1016/S0185-0849\(13\)71320-3](https://doi.org/10.1016/S0185-0849(13)71320-3).
- [3] Hernández, José Manuel. (2015, Octubre). La generación distribuida y el futuro de los sistemas de distribución. Universidad Autónoma de México, Tesis que para obtener el título de ingeniero eléctrico electrónico, Pp 132.
- [4] Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional. (2019). Retrieved from <http://base.energia.gob.mx/prodesen/PRODESEN2016/PRODESEN-2016-2030.pdf>
- [5] Schallenberg Rodríguez, J. (2008). Energías renovables y eficiencia energética. 1st ed. [Santa Cruz de Tenerife]: Instituto Tecnológico de Canarias, pp.28-38.
- [6] González, J. A. C., Pérez, R. C., Santos, A. C., & Gil, M. A. C. (2009). Centrales de energías renovables, 1ft ed., Pp 47
- [7] Bassam, N. El, Maegaard, P., & Schlichting, M. L. (n.d.). DISTRIBUTED RENEWABLE ENERGIES FOR OFF-GRID Strategies and Technologies toward. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397178-4.01001-X>
- [8] Rosales Escobedo, P. (2014). Estudio de un Aerogenerador de Baja Capacidad en Condiciones de Arranque (Doctorado). UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA.
- [9] Arreola Sánchez, E. (2016). ANALISIS DE LA VARIABILIDAD A CORTO PLAZO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO ENFOCADO A APLICACIONES EN AEROGENERADORES DE PEQUEÑA ESCALA EN MEXICALI, BAJA CALIFORNIA (Maestría). UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA.

- [10] Ali, M. (2012). Wind energy systems (1st ed., pp. 2-4). Boca Raton Florida: CRC Press.
- [11] A review of transparent solar photovoltaic technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 94, 2018, Pages 779-791, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.031>.
- [12] Sebastian Valeriu Hudişteanu, Cătălin George Popovici, Theodor Dorin Mateescu, Nelu-Cristian Cherecheş, Efficiency Analysis of BIPV Systems for Different Locations in Romania, Energy Procedia, Volume 112, March 2017, Pages 404-411, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1089>.
- [13] Julia Mundo-Hernández, Benito de Celis Alonso, Julia Hernández-Álvarez, Benito de Celis-Carrillo, An overview of solar photovoltaic energy in Mexico and Germany, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 31, March 2014, Pages 639-649, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.029>.
- [14] Zuo Sun, Xun-you Zhang, Advances on Distributed Generation Technology, Energy Procedia, Volume 17, Part A, 2012, Pages 32-38, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.058>.
- [15] Bayod Rujula, A. (2009). Sistemas fotovoltaicos. 1st ed. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, pp.114-115.
- [16] Maria C. Argyrou, Paul Christodoulides, Soteris A. Kalogirou, Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 94, 2018, Pages 804-821, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.044>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304817>)
- [17] Linden, D., & Reddy, T. (2002). Handbook of batteries (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- [18] Geoffrey J. May, Alistair Davidson, Boris Monahov, Lead batteries for utility energy storage: A review, Journal of Energy Storage, Volume 15, 2018, Pages 145-157, ISSN 2352-152X

- [19] Hoda Akbari, Maria C. Browne, Anita Ortega, Ming Jun Huang, Neil J. Hewitt, Brian Norton, Sarah J. McCormack, Efficient energy storage technologies for photovoltaic systems, *Solar Energy*, 2018, ISSN 0038-092X
- [20] Lead-acid Batteries: Science and Technology, Elsevier Science & Technology Books (2017), <https://books.google.com/books?id=Z0VBMQAACAAJl>. Dincer, H.S. Hamut, N. Javani Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems John Wiley & Sons (2017)
- [21] Bayod Rujula, A. (2009). Sistemas fotovoltaicos. 1st ed. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, pp.12-132
- [22] Salazar, J. (2018). Microgrids in Colombian universities, (October 2017), 0–12.
- [23] T. Greyard and W. Dongtao, "Research on control structure of microgrid system with grid-connected photovoltaic," 2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Chongqing, 2017, pp. 6971-6976. doi: 10.1109/CCDC.2017.7978438
- [24] M.S. Mahmoud, S. Azher Hussain, M.A. Abido, Modeling and control of microgrid: An overview, In *Journal of the Franklin Institute*, Volume 351, Issue 5, 2014, Pages 2822-2859, ISSN 0016-0032, <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.01.016>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003214000180>)
- [25] IEEE Standards Coordinating Committee 21, IEEE Std.1547.4-2011: IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems, Jul. 2011.
- [26] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, and J.-W. Jung, "Ac-microgrids versus dcmicrogrids with distributed energy resources: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 387 – 405, 2013.
- [27] E. Planas, J. Andreu, J. I. Grate, I. M. de Alegra, and E. Ibarra, "Ac and dc technology in microgrids: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 726 – 749, 2015
- [28] D. E. Olivares et al., "Trends in Microgrid Control," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919, July 2014. doi: 10.1109/TSG.2013.2295514

- [29] B. Zhao, X. Zhang and J. Chen, "Integrated Microgrid Laboratory System," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 4, pp. 2175-2185, Nov. 2012.doi: 10.1109/TPWRS.2012.2192140
- [30] Mohammad E. Khodayar, Rural electrification and expansion planning of off-grid microgrids, In The Electricity Journal, Volume 30, Issue 4, 2017, Pages 68-74, ISSN 1040-6190,
<https://doi.org/10.1016/j.tej.2017.04.004>.(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619017300672>)
- [31] T. Greyard and W. Dongtao, "Research on control structure of microgrid system with grid-connected photovoltaic," 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Chongqing, 2017, pp. 6971-6976.doi: 10.1109/CCDC.2017.7978438
- [32] Microgrids, M., & Project, S. T. (2009). Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids WPG. Evaluation of the system performance on power system operation.
- [33] Motahareh Pourbehzadi, Taher Niknam, Jamshid Aghaei, Geev Mokryani, Miadreza Shafie-khah, João P.S. Catalão, Optimal operation of hybrid AC/DC microgrids under uncertainty of renewable energy resources: A comprehensive review, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 109, 2019, Pages 139-159, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.025>.
- [34] D. Chen, XuF L. Autonomous DC voltage control of a DC microgrid with multiple slack terminals IEEE Trans. Power Syst., 27 (2012), pp. 1897–1905
- [35] M. Farhadi, O. Mohammed Realtime operation and harmonic analysis of isolated and non-isolated hybrid DC microgrid IEEE Trans. Ind. Appl., 50 (4) (2014), pp. 2900–2909
- [36] Control and operation of a DC microgrid with variable generation and energy storage IEEE Trans. Power Deliv., 26 (2011), pp. 2513–2522
- [37] Lu Xiaonan, J.M. Guerrero, Sun Kai, J.C. Vasquez, An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage

restoration and enhanced current sharing accuracy IEEE Trans. Power Electron., 29 (2014), pp. 1800–1812

[38] X. Lu, K. Sun, J.M. Guerrero, J.C. Vasquez, L. Huang, State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications, IEEE Trans. Ind. Electron., 61 (2014), pp. 2804–2815

[39] Ise Toshifumi. Power electronics toward the era of distributed generations. In: 2012 IEEE 13th workshop on control and modeling for power electronics (COMPEL), Kyoto. p. 1–8.

[40] Kamh MZ, Iravani R, El-Fouly THM. Realizing a smart microgrid — pioneer Canadian experience. In: 2012 IEEE power and energy society general meeting, 22–26 July 2012. p. 1, 8.

[41]] Sechilariu Manuela, Wang Bao Chao, Locment Fabrice, Jouglet Antoine. DC microgrid power flow optimization by multi-layer supervision control. Design and experimental validation. Energy Convers Manage 2014;82(June): 1–10

[42] Medina, Ricardo. (2014). Microrredes basadas en Electrónica de Potencia: Características, Operación y Estabilidad. INGENIUS. 15-23. 10.17163/ings.n12.2014.02.

[43] P. Kundur et al., “Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004.

[44] Carlos Bordons, Félix García-Torres, Luis Valverde, Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, Volume 12, Issue 2, 2015, Pages 117-132, ISSN 1697-7912, <https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.03.001>.

[45] Bastidas, J. (2017). Técnicas de análisis y control para la mejora de la estabilidad de microrredes eléctricas: revisión en la literatura. Simposio Internacional Sobre La Calidad De La Energía Eléctrica - SICEL, 9(2017), 1-10. doi: 2357-6618

[46] Reference Manual. (n.d.). Trnsys 17, 4. Trnsys 17. (n.d.), 2

- [47] Calidad de Meteonorm Versión 6.0. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/241491372_Quality_of_Meteonorm_Version_60 [consultado el 12 de junio de 2018]
- [48] Meteonorm.com. (2018). [online] Available at: http://www.meteonorm.com/images/uploads/downloads/mn72_theory7.2.pdf [Accessed 21 May 2018].
- [49] Gutiérrez Pulido, H., & Vara Salazar, R. (2012). Análisis y diseño de experimentos (3rd ed., pp. 2-6). México D.F.: McGraw-Hill.
- [50] HERNÁNDEZ CERVANTES, M. (2016). "DETERMINACIÓN DE FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL MAIZ BLANCO NACIONAL EN SU PROCESO DE SECADO ARTIFICIAL MEDIANTE DISEÑO DE EXPERIMENTOS" (Maestría). Instituto Politécnico Nacional.
- [51] Compañía | Minitab. (2019). Retrieved from <http://www.minitab.com/es-mx/company/>
- [52] Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional. (2018). (SENER) Retrieved from <http://base.energia.gob.mx/prodesen/PRODESEN2018/PRODESEN18.pdf>
- [53] PRESENTE Y FUTURO DE LA ENERGÍA SOLAR EN MÉXICO | Request PDF. Available from: https://www.researchgate.net/publication/286449054_PRESENTE_Y_FUTURO_DE_LA_ENERGIA_SOLAR_EN_MEXICO [accessed Sep 21 2018].
- [54]] Cota Soto, R. (2017). Estudio y evaluación de microrredes para comunidades aisladas (Maestría). Universidad Autónoma de Baja California Instituto de Ingeniería.
- [55] J.A. Suástegui Macías, C. Pérez Tello, A. Acuña Ramírez, A.A. Lambert Arista, H.D. Magaña Almaguer, P.F. Rosales Escobedo, A.H. Ruelas Puente, Assessment of electrical saving from energy efficiency programs in the residential sector in Mexicali, Mexico, Sustainable Cities and Society, Volume 38, 2018, Pages 795-805, ISSN 2210-6707, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.031>.

- [56]] Magaña Almaguer, D. (2019). Evaluación de temperaturas en la república mexicana para acciones de ahorro y uso eficiente de la energía (Maestría). Universidad Autónoma de Baja California.
- [57] WEO-2016 Special Report: Mexico Energy Outlook. (2016). Retrieved from <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/MexicoEnergyOutlook.pdf>
- [58] Regiones sin electricidad. (2019). Retrieved from <https://datos.gob.mx/busca/dataset/regiones-sin-electricidad> IEA
- [59] Mapas para imprimir. Cuéntame. (2019). Retrieved from <http://cuentame.inegi.org.mx/mapas/default.aspx?tema=M>
- [60] El clima de México a través de los mapas - Geografía Infinita. (2019). Retrieved from <https://www.geografiainfinita.com/2015/07/el-clima-de-mexico-a-traves-de-los-mapas/>
- [61]] (INEGI), I. (2019). Buscador Sitio INEGI. [online] Beta.inegi.org.mx. Available at: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/buscador/default.html?q=ejido+laguna+salada> [Accessed 27 Apr. 2019].
- [62] Bayod Rújula, A. (2009). Sistemas fotovoltaicos. 1st ed. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, p. 84-88, 114-115, 122-126, 291-293.
- [63] Trnsys Manual (Mathematical reference). (2019). Retrieved from <http://web.mit.edu/parmstr/Public/TRNSYS/04-MathematicalReference.pdf>
- [64] Rosales Escobedo, P. (2014). Estudio de un Aerogenerador de Baja Capacidad en Condiciones de Arranque (Doctorado). UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA, Pp 4-14.
- [65] Using the Simulation Studio. (2019). Retrieved from <http://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/02-SimulationStudio.pdf>
- [66] Gutiérrez Pulido, H., & Vara Salazar, R. (2012). Análisis y diseño de experimentos (3rd ed., pp. 117,119). México D.F.: McGraw-Hill.

[67] Bayod Rujula, A. (2009). Sistemas fotovoltaicos. 1st ed. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, pp.200-250.

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros y metodología utilizada por el software según la necesidad -----	28
Tabla 2 ANOVA para el diseño factorial a x b -----	34
Tabla 3 Réplicas o corridas en diseños 2^k -----	36
Tabla 4 Microrredes instaladas en México [54] -----	39
Tabla 6 Relación entre clima, temperatura media de la zona y precipitaciones anuales -----	41
Tabla 5 Perfiles de verano e invierno [55] -----	46
Tabla 7 Localidades elegidas (Zonas Secas y Muy secas) -----	49
Tabla 8 Factores y niveles seleccionados por tecnología -----	60
Tabla 9 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano -----	64
Tabla 10 Porcentajes de prueba sugeridos -----	74
Tabla 11 Análisis de los porcentajes de instalación -----	76
Tabla 12 Factores y niveles seleccionados por tecnología -----	84
Tabla 13 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano -----	84
Tabla 14 Datos obtenidos de la simulación en verano para la toma de decisiones -----	88
Tabla 15 Porcentajes propuestos para las pruebas de desviación estándar -----	89
Tabla 16 Propuestas finales de instalación -----	89
Tabla 17 Factores y niveles propuestos por tecnología -----	94
Tabla 18 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano -----	95
Tabla 19 Datos obtenidos a partir de la simulación para la toma de decisiones -----	98
Tabla 20 Porcentajes de prueba finales -----	99
Tabla 21 Resultados de la desviación estándar de acuerdo a los porcentajes de instalación propuestos -----	99
Tabla 22 Factores y niveles seleccionados por tecnología -----	106
Tabla 23 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano -----	107
Tabla 24 Datos de simulación y toma de decisiones -----	110
Tabla 25 Porcentajes de prueba propuestos -----	111
Tabla 26 Desviaciones estándar resultantes al aplicar los porcentajes de diseño en la simulación -----	112
Tabla 27 Factores y niveles seleccionados por tecnología -----	121

Tabla 28 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano -----	121
Tabla 29 Datos de simulación y toma de decisiones -----	126
Tabla 30 Porcentajes de tecnologías -----	126
Tabla 31 Tabla de porcentajes de prueba -----	127
Tabla 32 Factores y niveles propuestos por tecnología -----	136
Tabla 33 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano -----	136
Tabla 34 Datos de simulación y toma de decisiones -----	139
Tabla 35 Porcentajes de prueba propuestos -----	140
Tabla 36 Porcentajes de prueba final -----	140
Tabla 37 Factores y niveles seleccionados por tecnología -----	145
Tabla 38 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano -----	145
Tabla 39 Datos de simulación y toma de decisiones -----	148
Tabla 40 Porcentajes de prueba -----	149
Tabla 41 Factores y niveles seleccionados por tecnología -----	154
Tabla 42 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano -----	154
Tabla 43 Datos de simulación y toma de decisiones -----	157
Tabla 45 Porcentajes de prueba -----	158
Tabla 45 Porcentajes de prueba final -----	158
Tabla 46 Factores y niveles seleccionados por tecnología -----	162
Tabla 47 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano -----	163
Tabla 48 Datos de simulación y toma de decisiones -----	166
Tabla 49 Porcentajes de prueba -----	167
Tabla 50 Porcentajes de prueba finales -----	167
Tabla 51 Factores y niveles seleccionados por tecnología -----	171
Tabla 52 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de Verano -----	172
Tabla 53 Datos de simulación y toma de decisiones -----	175
Tabla 55 Propuestas para porcentajes de prueba -----	176
Tabla 56 Porcentajes de prueba -----	176

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Tecnologías de generación distribuida -----	11
<i>Figura 2 Etapas del diseño experimental</i> -----	31
Figura 3 Tipos de diseños factoriales -----	33
Figura 4 Avances importantes en materia de generación eléctrica en México -----	37
Figura 5 Impresión de pantalla del simulador utilizado y el listado de equipos de la residencia-----	45
Figura 6 Mapa de la república mexicana con división política, climas y localidades elegidas para estudio (Elaboración propia con datos de INEGI [59][60]) -----	50
Figura 7 Proceso de diseño -----	51
Figura 8 Procedimiento para optimización final en base a valores estadísticos-----	52
Figura 9 Mapa Satelital De Ejido Laguna Salada (Fuente: INEGI, Google Earth [59, 61]) -----	53
Figura 10 Ingresando coordenadas a Meteonorm-----	54
Figura 11 Seleccionando los datos a utilizar -----	55
Figura 12 Seleccionando el formato para trabajar en Trnsys -----	55
Figura 13 Radiación difusa y global en Ejido Laguna Salada durante el año -----	56
Figura 14 Temperaturas máxima y mínima durante un año -----	56
Figura 15 Guardando el archivo en formato horario -----	57
Figura 16 Factores seleccionados por tecnología-----	58
Figura 17 Interacciones dobles para seleccionar niveles de experimentación fotovoltaica -----	60
Figura 18 Simulador para DOE-----	61
Figura 19 Carga de archivo climatológico horario del Ejido Laguna Salada -----	61
Figura 20 Carga de los datos del aerogenerador (Datasheet) -----	62
Figura 21 Carga de datos del sistema FV -----	62
Figura 22 Datos del integrador -----	63
Figura 23 Graficadores y corridas por pestañas -----	63
Figura 24 Energía entregada por AE-FV en 1 día típico de verano-----	63
Figura 25 Factorial completo con 1 replica -----	65
Figura 26 Se nombran los factores y definen los niveles-----	65

Figura 27 Datos dados de alta-----	66
Figura 28 Análisis del diseño factorial -----	66
Figura 29 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho. -	67
Figura 30 Análisis de varianza final -----	67
Figura 31 Selección de gráfico de efectos principales e interacciones -----	68
Figura 32 Gráfico de efectos principales-----	68
Figura 33 Gráfico de interacciones por respuesta-----	69
Figura 34 Simulador diseñado en Trnsys-----	70
Figura 35 Resultados de la simulación por pestañas-----	71
Figura 36 Generación FV-EO durante el mes de junio e indicación de semana sin electricidad en amarillo -----	73
Figura 37 Ganancia del fotovoltaico (1 kW) y eólico (1kW) Vs la carga -----	74
Figura 38 Histograma de comportamiento SOC 48 kWh (Medio día de autonomía) --	77
Figura 39 Histograma de comportamiento SOC 96 kWh (1 día de autonomía) -----	77
Figura 40 Histograma de comportamiento SOC 288 kWh (3 días de autonomía) -----	78
Figura 41 Histograma de comportamiento SOC 48 kWh (Medio día de autonomía) --	78
Figura 42 Histograma de comportamiento SOC 96 kWh (1 día de autonomía) -----	79
Figura 43 Histograma de comportamiento SOC 288 kWh (3 días de autonomía) -----	79
Figura 44 Histograma de comportamiento SOC 48 kWh (Medio día de autonomía) --	80
Figura 45 Histograma de comportamiento SOC 96 kWh (1 día de autonomía) -----	80
Figura 46 Histograma de comportamiento SOC 288 kWh (3 días de autonomía) -----	81
Figura 47 Rangos de temperatura por año-----	83
Figura 48 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho. --	86
Figura 49 Gráfico de efectos principales-----	87
Figura 50 Gráfico de interacciones por respuesta-----	87
Figura 51 Histograma de comportamiento SOC 48KW (Medio día de autonomía)-----	90
Figura 52 Histograma de comportamiento SOC 96KW (Un día de autonomía)-----	90
Figura 53 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía) ---	91
Figura 54 Radiación difusa y global -----	92
Figura 55 Parámetros de la zona -----	92
Figura 56 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho---	95

Figura 57 Gráfico de efectos principales-----	96
Figura 58 Gráfico de interacciones -----	97
Figura 59 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía) ----	101
Figura 60 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía) -----	101
Figura 61 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)+ -	102
Figura 62 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía) ----	102
Figura 63 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía) -----	102
Figura 64 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía) ---	103
Figura 65 Radiación difusa y global -----	104
Figura 66 Rangos de temperatura por año-----	104
Figura 67 Otros datos meteorológicos de la zona-----	105
Figura 68 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho--	108
Figura 69 Gráfico de efectos principales-----	109
Figura 70 Gráfico interacción-----	109
Figura 71 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía) ----	113
Figura 72 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía) -----	113
Figura 73 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía) ---	114
Figura 74 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía) ----	114
Figura 75 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (1 día de autonomía)-----	115
Figura 76 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (3 días de autonomía) -----	115
Figura 77 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía) ----	116
Figura 78 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía)-----	116
Figura 79 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Un día de autonomía)-----	117
Figura 80 Radiación difusa y global -----	119
Figura 81 Rangos de temperatura por año-----	119
Figura 82 Datos de resultado -----	120
Figura 83 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho--	122
Figura 84 Análisis de varianza -----	123
Figura 85 Gráfico de efectos principales-----	124
Figura 86 Gráfico de efectos principales-----	124
Figura 87 Gráfico de interacciones por respuesta-----	125

Figura 88 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía) ----	128
Figura 89 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía) -----	128
Figura 90 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía) ---	129
Figura 91 Histograma de comportamiento SOC 48kW (Medio día de autonomía)-----	129
Figura 92 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía).-----	130
Figura 93 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía) --	130
Figura 94 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía) ----	131
Figura 95 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía) -----	131
Figura 96 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Tres días de autonomía)----	132
Figura 97 Radiación difusa y global -----	134
Figura 98 Rangos de temperatura por año-----	134
Figura 99 Datos-----	135
Figura 100 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho. -----	137
Figura 101 Gráfico de efectos principales -----	138
Figura 102 Gráfico de efectos principales -----	138
Figura 103 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía) --	141
Figura 104 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía)-----	141
Figura 105 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)-	142
Figura 106 Radiación difusa y global -----	143
Figura 107 Rangos de temperatura por año -----	143
Figura 108 Otros datos meteorológicos-----	144
Figura 109 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho. -----	146
Figura 110 Gráfico de efectos principales -----	147
Figura 111 Gráfico de interacción-----	147
Figura 112 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía) --	150
Figura 113 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía)-----	150
Figura 114 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)-	151
Figura 115 Radiación difusa y global -----	152
Figura 116 Temperatura anual por rangos mensuales-----	152

Figura 117 Datos de otros resultados	153
Figura 118 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho	155
Figura 119 Gráfico de efectos principales	156
Figura 120 Gráfico de efectos principales	156
Figura 121 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía) --	159
Figura 122 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía) -----	159
Figura 123 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía) -	160
Figura 124 Radiación difusa y global	161
Figura 125 Rangos de temperatura por año	161
Figura 126 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho.	164
Figura 127 Gráfico de efectos principales	165
Figura 128 Gráfico de interacciones	165
Figura 129 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía) --	168
Figura 130 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía) -----	168
Figura 131 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía) -	169
Figura 132 Radiación difusa y global	170
Figura 133 Datos meteorológicos adicionales de la zona	170
Figura 134 Diagrama de Pareto a la izquierda y diagrama de Daniel al lado derecho	173
Figura 135 Gráfico de efectos principales	174
Figura 136 Gráfico de interacciones	174
Figura 137 Histograma de comportamiento SOC 48 kW (Medio día de autonomía) --	177
Figura 138 Histograma de comportamiento SOC 96 kW (Un día de autonomía) -----	177
Figura 139 Histograma de comportamiento SOC 288 kW (Tres días de autonomía)-	178

ANEXOS

Hoja de datos del panel solar utilizado en la simulación



COMPORTAMIENTO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR DE PRUEBA (STC*)

		SW 250
Potencia en el punto de máx. potencia	P_{max}	250 Wp
Tensión en vacío	U_{oc}	37,6 V
Tensión a potencia máxima	U_{mp}	30,8 V
Corriente de cortocircuito	I_{sc}	8,64 A
Corriente a potencia máxima	I_{mp}	8,12 A

*STC: 1000W/m², 25°C, AM 1.5

COMPORTAMIENTO A 800 W/m², NOCT, AM 1.5

		SW 250
Potencia en el punto de máx. potencia	P_{max}	180,4 Wp
Tensión en vacío	U_{oc}	33,9 V
Tensión a potencia máxima	U_{mp}	27,8 V
Corriente de cortocircuito	I_{sc}	6,96 A
Corriente a potencia máxima	I_{mp}	6,50 A

Ligera reducción de la eficiencia en el comportamiento con carga parcial a 25°C: A 200 W/m² se alcanza el 95 % (+/- 3 %) de la eficiencia bajo condiciones estándar de prueba (1000 W/m²).

MATERIALES EMPLEADOS

Células por módulo	60
Tipo de célula	poli cristalino
Medidas de la célula	156 mm x 156 mm
Parte anterior	vidrio reforzado (EN 12150)

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS PARA LA INTEGRACIÓN ÓPTIMA EN EL SISTEMA

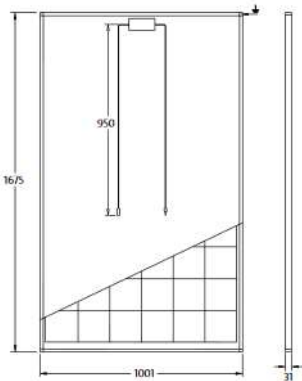
Tensión máxima del sistema clase II	1000 V
Carga máxima de corriente inversa	16 A
Resistencia a las cargas según IEC 61215	5,4 kN/m²
Cantidad de diodos de bypass	3

PARÁMETROS TÉRMICOS CARACTERÍSTICOS

NOCT	46 °C
TC I_{sc}	0,034 %/K
TC U_{oc}	-0,34 %/K
TC P_{mp}	-0,48 %/K

OTROS DATOS

Tolerancia de medida	+/- 3 %
Caja de conexión	IP65
Conector	MC4
Clasificación "Plus" de SolarWorld®	$P_{flash} \geq P_{max}$



1) La potencia real del módulo (P_{real}) se encuentra siempre por encima de la potencia nominal (P_{nom}) del módulo.
2) Según el mercado de comercialización.
SolarWorld AG se reserva el derecho de cambiar las especificaciones. Esta hoja de datos satisface las exigencias de la norma EN 50380. Esta hoja de datos también está disponible en inglés.

23.09.2011 ES

Hoja de datos de aerogenerador Whisper



Reliable Remote Power

Whisper 100 provides dependable energy for remote homes, telecommunication sites and rural applications in moderate to extreme environments. Reliable operation by thousands of customers makes Whisper 100 the top selling small wind turbine in its class. Assuming a 12 mph (5.4 m/s) average wind, a Whisper 100 will produce 100 kWh per month. Best for moderate to high wind – 9 mph (4 m/s) and above.

The versatile Whisper 200 powers applications from remote homes to water pumping. The Whisper 200's 9-foot (2.7 m) blade has almost twice the swept area of the Whisper 100, yielding twice the energy. A high voltage model is available for transmission over long distances. Best for low to moderate wind – 7 mph (3 m/s) and above.

Technical Specifications

WHISPER 100

Rotor Diameter	7 ft (2.1 m)
Weight	47 lb (21 kg) box: 74 lb (22.56 kg)
Shipping Dimensions	51 x 20 x 13 in (1295 x 508 x 330 mm)
Mount	2.5 in schedule 40 (6.35 cm) pipe
Start-Up Wind Speed	7.5 mph (3.4 m/s)
Voltage	12, 24, 36, 48 VDC
Rated Power	900 watts at 28 mph (12.5 m/s)
Turbine Controller	Whisper controller
Body	Cast aluminum/marine option
Blades	3-Carbon reinforced fiberglass
Overspeed Protection	Patented side-furling
Kilowatt Hours Per Month	100 kWh/mo at 12 mph (5.4 m/s)
Survival Wind Speed	120 mph (55 m/s)
Warranty	5 year limited warranty

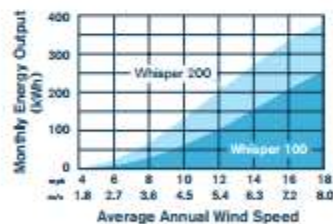
WHISPER 200

Rotor Diameter	9 feet (2.7 m)
Weight	65 lb (30 kg) box: 87 lb (39.46 kg)
Shipping Dimensions	51 x 20 x 13 in (1295 x 508 x 330 mm)
Mount	2.5 in schedule 40 (6.35 cm) pipe
Start-Up Wind Speed	7 mph (3.1 m/s)
Voltage	24, 36, 48 VDC (4V available)
Rated Power	1000 watts at 26 mph (11.6 m/s)
Turbine Controller	Whisper controller
Body	Cast aluminum/marine option
Blades	3-Carbon reinforced fiberglass
Overspeed Protection	Patented side-furling
Kilowatt Hours Per Month	200 kWh/mo at 12 mph (5.4 m/s)
Survival Wind Speed	120 mph (55 m/s)
Warranty	5 year limited warranty

POWER



MONTHLY ENERGY



FIVE YEAR WARRANTY

Southwest Windpower

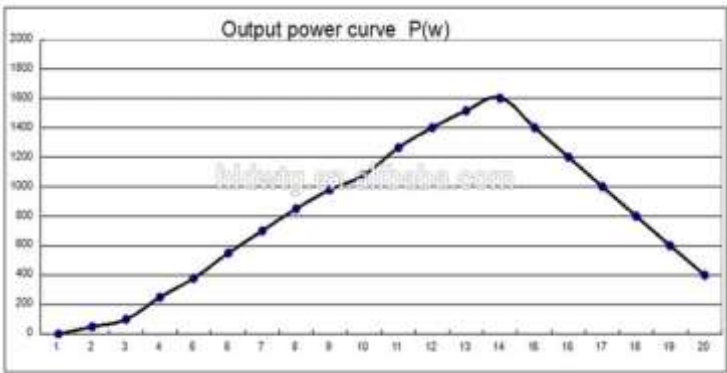
1801 W. Route 66 928.779.9463
Flagstaff, AZ 86001 USA www.windenergy.com

Makers of Skystream 3.7* / AIR / Whisper

♻️ Printed on recycled paper using vegetable inks.

SCAL7-1389-01 REV F 1006

Datos técnicos de aerogenerador HLD utilizado en simulación



Model	FD2.8-1K
Rated Power	1000W
Max Power	1500W
Blades Rotor Diameter	2.8m (9.18 ft.)
Blade Quantity &Material	3 Pcs / FRP
Rated Rotate Speed	380(r/min)
Start Torque	0.4(N.M)
Generator Type	PMG AC Direct Drive
Generator Material	Aluminum body+Copper wire+Nd-Fe-B
Normal Output voltage	24v 48v 120v 240v 300v 360v 500v provide customized service
Optional Output voltage(DC)	24-500v
Start Wind Speed	2 m/s
Rated Wind Speed	9m/s
Working Wind Speed	3-25m/s (6.73-56 mph)
MAX Design Wind Speed	40m/s (89.6mph)
Tower Height	6m(19.68ft)higher available
Top Weight	65kg
Protection method	yaw + auto brake

Datos técnicos de acumulador utilizado en simulación



DATA SHEET

J185H-AC

MODEL J185H-AC with Bayonet Cap
VOLTAGE 12
MATERIAL Polypropylene
DIMENSIONS Inches (mm)
BATTERY Deep-Cycle Flooded/Wet Lead-Acid Battery
COLOR Maroon
WATERING Single-Point Watering Kit



12V

Polyon™ Case

PRODUCT + PHYSICAL SPECIFICATIONS

ICI Group Size	Type	Voltage	Cells	Terminal Type ¹	Dimensions ² Inches (mm)			Weight lbs. (kg)
921	J185H-AC*	12	6	6	Length	Width	Height ³	123 (56)
					14.97 (380)	6.91 (176)	14.67 (373)	

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Cranking Performance		Capacity* Minutes		Capacity* Amp Hours (AH)				Energy (kWh)	Internal Resistance (mΩ)	Short Circuit Current (amps)
CCA ¹ @ 0°F (-18°C)	CCA ¹ @ 32°F (0°C)	@ 25 Amps	@ 75 Amps	5-hr	10-hr	20-hr	100-hr	100-hr	—	—
—	—	440	121	185	207	225	240	2.90		

CHARGING INSTRUCTIONS

Charger Voltage Settings (at 77°F/25°C)				
System Voltage	17V	24V	32V	48V
Bulk Charge	14.82	29.64	44.46	59.28
Float Charge	13.50	27.00	40.50	54.00
Equalize Charge	16.20	32.40	48.60	64.80

Do not install or charge batteries in a sealed or non-ventilated compartment. Constant smoke or over-heating will damage the battery and shorten its life as with any battery.

CHARGING TEMPERATURE COMPENSATION

Add	Subtract
0.005 volt per cell for every 1°C below 25°C 0.0028 volt per cell for every 1°F below 77°F	0.005 volt per cell for every 1°C above 25°C 0.0028 volt per cell for every 1°F above 77°F

OPERATIONAL DATA

Operating Temperature	Self Discharge
-4°F to 113°F (-20°C to +45°C). At temperatures below 32°F (0°C) maintain a state of charge greater than 60%.	5 – 15% per month depending on storage temperature conditions.

STATE OF CHARGE MEASURE OF OPEN-CIRCUIT VOLTAGE

Percentage Charge	Specific Gravity	Cell	12 Volt
100	1.277	2.122	12.73
90	1.258	2.103	12.62
80	1.238	2.083	12.50
70	1.217	2.062	12.37
60	1.195	2.040	12.24
50	1.172	2.017	12.10
40	1.148	1.993	11.96
30	1.124	1.969	11.81
20	1.098	1.943	11.66
10	1.073	1.918	11.51



Designed in compliance with applicable IEC, DIN, BS and IEC standards.
Tested in compliance to IEC and IEC standards.

