

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN EL COSTO ELÉCTRICO
DE LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN EL SECTOR
RESIDENCIAL DE MEXICALI, BAJA CALIFORNIA”**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

Presentado por:

Ing. Francisco Javier Euyoqui Aréchiga

Director de tesis:

Dr. José Alejandro Suástegui Macías.

Mexicali, Baja California, 22 de junio de 2020

A mis padres:

Virginia (Q.E.P.D.) y Francisco

A mis hijas:

Juliana y Danya

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento, para mi director de tesis el Dr. José Alejandro Suástegui Macías por toda la confianza depositada en mi persona, durante esta investigación, por brindarme su apoyo en todos los sentidos, desde el académico hasta en lo personal; el presente trabajo de investigación nunca hubiera llegado a su conclusión sin su visión y orientación, por lo cual le expreso una vez más mi agradecimiento y admiración.

A mis padres por su educación proporcionada basada en valores y principios, por sus esfuerzos a lo largo de los años apoyándome siempre a cumplir mis metas.

A mis hijas por ser siempre mi mayor motivación, que me mueven a lograr siempre algo más.

A los directivos y personal del programa ASI por el interés mostrado desde el principio de la presente investigación y por la retroalimentación durante las reuniones efectuadas, especialmente a la Delegada C. P. Ana Aida Castaño Meneses por su apoyo y atenciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para la realización de la presente investigación.

A todos los profesores de las materias cursadas durante el periodo de esta investigación y a los miembros del SACC de energía por transmitir su conocimiento, por su guía y por crear en mí una nueva perspectiva.

A los estudiantes pertenecientes al grupo de eficiencia energética, por aceptarme como uno más, especialmente a los que colaboraron directamente en la realización de este proyecto, al ahora ingeniero Luis Enrique Bray Miranda y al próximo ingeniero Ricardo Cachu.

A mi familia, amigos y compañeros que no es posible mencionar individualmente pero que contribuyeron en algún momento con su apoyo y aliento para el cumplimiento de esta meta.

RESUMEN

Este trabajo de investigación pretende valorar y cuantificar el ahorro económico por energía eléctrica en el sector residencial de la ciudad de Mexicali, Baja California al incorporar generación eléctrica a partir de fuentes renovables, en este caso se estudia el impacto que tiene en el ahorro económico para las familias de la ciudad de esta ciudad al instalar un sistema solar fotovoltaico. Los resultados de esta investigación aportan información a los programas gubernamentales orientados a apoyar el ahorro energético y a incentivar el uso de energías renovables, se espera que dicha información sirva como apoyo al momento de decidir a qué sectores de la población o usuarios dirigir sus campañas y acciones de tal manera que se logre ampliar los resultados de los diferentes programas y así apoyar a la difusión de dicha tecnología.

Se lleva a cabo un análisis estadístico, basado en información de consumos reales, usando el simulador SAM para obtener la generación fotovoltaica se utilizaron diferentes configuraciones variando entre sí, el tipo de módulo, el tipo de inversor, la inclinación y la orientación, para después ingresar esta información en el simulador tarifario 1F y lograr obtener los ahorros económicos al utilizar SFV interconectados a la red.

Los resultados se validaron estadísticamente con diseños de experimentos factoriales 2^4 se efectuó un análisis para cada rango de consumo y se utilizaron sistemas fotovoltaicos con capacidades de generación de 1 kWp, 2 kWp, 3 kWp, 4 kWp y 5 kWp. Se encontró que de manera general la configuración que proporciona mayor ahorro

económico en el costo eléctrico, para la ciudad de Mexicali B. C. para su uso en el sector residencial es utilizar un sistema fotovoltaico con módulos policristalinos, con micro inversores, orientado al sur y con una inclinación a 32° , solo para los usuarios del rango de consumo intermedio bajo que al utilizar un SFV de 2 kWp resultó que la inclinación óptima debe ser a 20° . Se determinó que para los usuarios dentro del rango de consumo básico que al utilizar SFV con capacidad de generación de 2 kWp en adelante no aplica la metodología, de igual manera para los usuarios de consumo intermedio bajo que utilicen SFV con capacidad de 4 kWp y 5 kWp no aplica esta metodología ya que la generación es mayor que el consumo.

Se determinó que la diferencia en ahorro económico por facturación del consumo eléctrico de variar el tipo de módulo de policristalino a monocristalino representa una reducción de menos del 1%, en cada una de las capacidades y en para cada rango de consumo.

Por otro lado, cambiar la inclinación de 32° a 20° representa un decremento en el ahorro económico menor al 2%, solo para los usuarios del rango intermedio alto con un SFV de 2 kWp representa una disminución del 2.4% y para los usuarios del rango de consumo intermedio bajo con un SFV de 2 kWp, para los cuales el análisis determinó una inclinación óptima a 20° el cambiar está a 32° representa una disminución menor al 1% en los ahorros económicos.

Acrónimos y siglas

°C: Grado Celsius

ANOVA: Análisis de la varianza

ASI: Programa de Ahorro Sistemático Integral

B. C. : Baja California

CFE: Comisión Federal de Electricidad

CO₂: Bióxido de carbono

CONAVI: Comisión Nacional de la Vivienda

COP: Conferencia de las Partes

DOE: Design of Experiment

DOF: Diario Oficial de la Federación

FIDE: Fideicomiso Para el Ahorro de Energía Eléctrica

FIPATERM: Fideicomiso Para el Aislamiento

GEI: Gases de efecto invernadero

GWh: Giga Watt-hora

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

IRENA: International Renewable Energy Agency

kWh: Kilo Watt hora

kWp: Kilo Watts de potencia

MW: Mega Watts

ONU: Organización de las Naciones Unidas

RPS: Renewable portfolio standard

SAM: System Advisor Model

SENER: secretaría de Energía

SFV: Sistema fotovoltaico

UABC: Universidad Autónoma de Baja California

UE: Unión Europea

ÍNDICE

CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación y usos de resultados.....	4
1.3. Objetivos	6
1.4. Hipótesis	6
1.5. Antecedentes	7
1.5.1. Recurso solar en México.....	9
1.5.2. Ubicación de este caso de estudio.....	14
1.5.3. Tipo de clima en la ciudad de Mexicali.....	14
1.5.4. Precipitación pluvial en la ciudad de Mexicali	14
CAPÍTULO 2.....	17
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1. El cambio climático	17
2.2. Energía solar.....	22
2.2.1. Radiación solar	23
2.2.2. Constante solar	23
2.2.3. Factor masa de aire (AM).....	24
2.2.4. Radiación directa:	25

2.2.5. Radiación Difusa:	25
2.2.6. Radiación de albedo:	25
2.2.7. La radiación global:	25
2.3. Incidencia de la energía solar sobre la tierra.	26
2.3.1. Movimiento de rotación	26
2.3.2. Ángulo de inclinación de la tierra.....	28
2.4. Coordenadas geográficas de la tierra	28
2.4.1. Latitud Φ :	29
2.4.2. Longitud:	29
2.5. Posicionamiento del Sol respecto a la superficie terrestre.....	29
2.5.1. Altitud solar α	30
2.5.2. Ángulo azimutal ψ	30
2.5.3. El ángulo de declinación δ	31
2.6. El efecto fotovoltaico	32
2.7. El Módulo fotovoltaico	35
2.8. Micro inversores.....	38
CAPÍTULO 3.....	40
3. METODOLOGÍA.....	40
3.1. Obtención de la muestra representativa	43
3.2. Simulador SAM (System Advisor Model)	44

3.3. Descripción del simulador de tarifa eléctrica 1F.....	50
3.4. Diseño de Experimentos	55
3.4.1. Diseño factorial completo 2^k	56
3.4.2. Descripción de factores y niveles.....	60
3.4.3. Definición de la variable de respuesta.	61
3.4.4. Réplicas	61
3.5. Clasificación de rangos de consumo eléctrico	63
CAPÍTULO 4.....	65
4. Análisis de resultados.....	65
4.1. Análisis y resultados para capacidad de 1 kWp.....	65
4.1.1. Consumo básico con SFV de 1 kWp.....	65
4.1.2. Consumo intermedio bajo con SFV de 1 kWp.....	68
4.1.3. Consumo intermedio alto con un SFV de 1 kWp.....	70
4.1.4. Consumo excedente con un SFV de 1 kWp.....	72
4.2. Análisis y resultados para capacidad de 2 kWp.....	75
4.2.1. Consumo intermedio bajo con SFV de 2 kWp.....	76
4.2.2. Consumo intermedio alto con un SFV de 2 kWp.....	78
4.2.3. Consumo excedente con SFV instalado de 2 kWp.	80
4.3. Análisis y resultados para SFV de capacidad de 3 kWp.....	82
4.3.1. Consumo Intermedio bajo con un SFV de 3 kWp.	82

4.3.2.	Consumo intermedio alto kWh con un SFV de 3 kWp.	84
4.3.3.	Consumo excedente con un SFV de 3 kWp de capacidad.	86
4.4.	Análisis y resultados para SFV de capacidad de 4 kWp	88
4.4.1.	Consumo intermedio alto un SFV con una capacidad de 4 kWp. ...	88
4.4.2.	Consumo excedente con un SFV con una capacidad de 4 kWp.....	90
4.5.	Análisis y resultados para SFV de capacidad de 5 kWp	92
4.5.1.	Consumo intermedio alto con un SFV de 5 kWp.....	92
4.5.2.	Consumo excedente con un SFV de 5 kWp.....	94
CAPÍTULO 5.....		98
5.	CONCLUSIONES	98
REFERENCIAS		102

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: USUARIOS Y VENTAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL SECTOR RESIDENCIAL	1
FIGURA 2: CONSUMO ELÉCTRICO RESIDENCIAL POR TIPO DE CLIMA.....	2
FIGURA 3: PAÍSES CON MAYOR CAPACIDAD INSTALADA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA	7
FIGURA 4: COSTOS DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS 2010-2015.....	8
FIGURA 5: COORDENADAS EXTREMAS DE MÉXICO	9
FIGURA 6: POTENCIAL FOTOVOLTAICO DE MÉXICO.....	10
FIGURA 7: CAPACIDAD INSTALADA EN MÉXICO.....	12
FIGURA 8: RADIACIÓN	25
FIGURA 9: MOVIMIENTO DE ROTACIÓN DE LA TIERRA.....	27
FIGURA 10: MOVIMIENTO DE TRANSLACIÓN DE LA TIERRA	28
FIGURA 11: MERIDIANOS Y PARALELOS.....	29
FIGURA 12: MOVIMIENTO APARENTE DEL SOL.....	30
FIGURA 13: INCLINACIÓN DE LA TIERRA	31
FIGURA 14: EFICIENCIA DE LAS CELDAS SOLARES.	34
FIGURA 15: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE RESULTADOS.....	42
FIGURA 16: ALGORITMO BÁSICO DE SAM PARA SFV	49
FIGURA 17: ALGORITMO PARA LA SELECCIÓN DEL VALOR DE LA GENERACIÓN	51
FIGURA 18: ALGORITMO PARA FACTURACIÓN EN INVIERNO.....	52
FIGURA 19: ALGORITMO PARA LA FACTURACIÓN EN VERANO	53
FIGURA 20: ALGORITMO BANCO DE ENERGÍA	54
FIGURA 21: PASOS PARA LLEGAR AL ANOVA EN UN DISEÑO FACTORIAL 2^k	56
FIGURA 22: DIAGRAMA DE PARETO CONSUMO BÁSICO 1 KWP	66
FIGURA 23: EFECTOS PRINCIPALES CONSUMO BÁSICO 1 KWP	66
FIGURA 24: GRÁFICA DE CUBO CONSUMO BÁSICO 1 KWP.....	67
FIGURA 25: DIAGRAMA DE PARETO INTERMEDIO BAJO 1 KWP	68

FIGURA 26: GRÁFICA DE EFECTOS INTERMEDIO BAJO 1 KWP	69
FIGURA 27: GRÁFICA DE CUBO CONSUMO INTERMEDIO BAJO 1 KWP	69
FIGURA 28: DIAGRAMA DE PARETO CONSUMO INTERMEDIO ALTO 1 KWP.....	70
FIGURA 29: GRÁFICA DE EFECTOS CONSUMO INTERMEDIO ALTO 1 KWP.....	70
FIGURA 30: GRÁFICA DE CUBO CONSUMO INTERMEDIO ALTO 1 KWP	71
FIGURA 31: DIAGRAMA DE PARETO CONSUMO EXCEDENTE 1 KWP	72
FIGURA 32: GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES CONSUMO EXCEDENTE 1 KWP	73
FIGURA 33: GRÁFICA DE INTERACCIONES CONSUMO EXCEDENTE 1 KWP	73
FIGURA 34: GRÁFICA DE CUBO CONSUMO EXCEDENTE 1 KWP.....	74
FIGURA 35: DIAGRAMA DE PARETO CONSUMO INTERMEDIO BAJO 2 KWP.....	76
FIGURA 36: GRÁFICA DE EFECTOS CONSUMO INTERMEDIO BAJO 2 KWP	76
FIGURA 37: GRÁFICA DE CUBO CONSUMO INTERMEDIO BAJO 2KWP	77
FIGURA 38: DIAGRAMA DE PARETO INTERMEDIO ALTO 2 KWP	78
FIGURA 39: GRÁFICA DE EFECTOS CONSUMO INTERMEDIO ALTO 2 KWP.....	78
FIGURA 40: GRÁFICA DE CUBO CONSUMO INTERMEDIO ALTO 2 KWP	79
FIGURA 41: DIAGRAMA DE PARETO CONSUMO EXCEDENTE 2 KWP	80
FIGURA 42: GRÁFICA DE EFECTOS CONSUMO EXCEDENTE 2 KWP	80
FIGURA 43: GRÁFICA DE CUBO CONSUMO EXCEDENTE 2 KWP.....	81
FIGURA 44: DIAGRAMA DE PARETO CONSUMO INTERMEDIO BAJO 3 KWP.....	82
FIGURA 45: GRÁFICA DE CUBO CONSUMO INTERMEDIO BAJO 3 KWP	83
FIGURA 46: GRÁFICA DE EFECTOS CONSUMO INTERMEDIO BAJO 3 KWP.....	83
FIGURA 47: DIAGRAMA DE PARETO CONSUMO INTERMEDIO ALTO 3 KWP.....	84
FIGURA 48: GRÁFICA DE EFECTOS CONSUMO INTERMEDIO ALTO 3 KWP.....	84
FIGURA 49: GRÁFICA DE CUBO CONSUMO INTERMEDIO ALTO 3 KWP	85
FIGURA 50: DIAGRAMA DE PARETO CONSUMO EXCEDENTE 3 KWP	86
FIGURA 51: GRÁFICA DE EFECTOS CONSUMO EXCEDENTE 3 KWP	86

FIGURA 52: GRÁFICA DE CUBO CONSUMO EXCEDENTE 3 KWP.....	87
FIGURA 53: DIAGRAMA DE PARETO CONSUMO INTERMEDIO ALTO 4 KWP.....	88
FIGURA 54: GRÁFICA DE CUBO CONSUMO INTERMEDIO ALTO 4 KWP	89
FIGURA 55: GRÁFICA DE EFECTOS CONSUMO INTERMEDIO ALTO 4 KWP.....	89
FIGURA 56: DIAGRAMA DE PARETO CONSUMO EXCEDENTE 4 KWP	90
FIGURA 57: GRÁFICA DE EFECTOS CONSUMO EXCEDENTE 4 KWP	90
FIGURA 58: GRÁFICA DE CUBO CONSUMO EXCEDENTE 4 KWP	91
FIGURA 59: DIAGRAMA DE PARETO CONSUMO INTERMEDIO ALTO 5 KWP.....	92
FIGURA 60: GRÁFICA DE CUBO CONSUMO INTERMEDIO ALTO 5 KWP	93
FIGURA 61: GRÁFICA DE EFECTOS CONSUMO INTERMEDIO ALTO 5 KWP.....	93
FIGURA 62: DIAGRAMA DE PARETO CONSUMO EXCEDENTE 5 KWP	94
FIGURA 63; GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES CONSUMO EXCEDENTE 5 KWP	94
FIGURA 64: GRÁFICA DE CUBO AHORROS ANUALES CONSUMO EXCEDENTE 5 KWP	95

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: PROGRAMAS DE AHORRO DE ENERGÍA EN EL SECTOR RESIDENCIAL	5
TABLA 2: COMPARATIVO DE APROVECHAMIENTO SOLAR.....	11
TABLA 3: AVANCE HISTÓRICO REGIONAL	13
TABLA 4: NOTACIÓN DE YATES PARA UN DISEÑO FACTORIAL 2^4	57
TABLA 5: ANOVA GENERAL DISEÑO FACTORIAL 2^K	59
TABLA 6: FACTORES Y NIVELES	60
TABLA 7: MATRIZ DEL ARREGLO FACTORIAL 2^4	62
TABLA 8: RANGOS EN INVIERNO	64
TABLA 9: RANGOS EN VERANO	64
TABLA 10: RESULTADOS CONCENTRADOS SFV 1 KWP	75
TABLA 11: RESULTADOS CONCENTRADOS SFV 2 KWP	81
TABLA 12: RESULTADOS CONCENTRADOS SFV 3 KWP	87
TABLA 13: RESULTADOS CONCENTRADOS SFV 4 KWP	91
TABLA 14: RESULTADOS CONCENTRADOS SFV 5 KWP	95
TABLA 15: RESULTADOS CONCENTRADOS	96
TABLA 16: PORCENTAJES DE AHORRO ECONÓMICO ANUAL PROMEDIO	97

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

En México el número de usuarios del servicio eléctrico residencial se ha incrementado en los últimos años De Buen (2020) afirma que los usuarios de este sector aumentaron en 4.1 veces de 1982 al 2020 y la tendencia es que siga en aumento como se puede observar en la Figura 1.

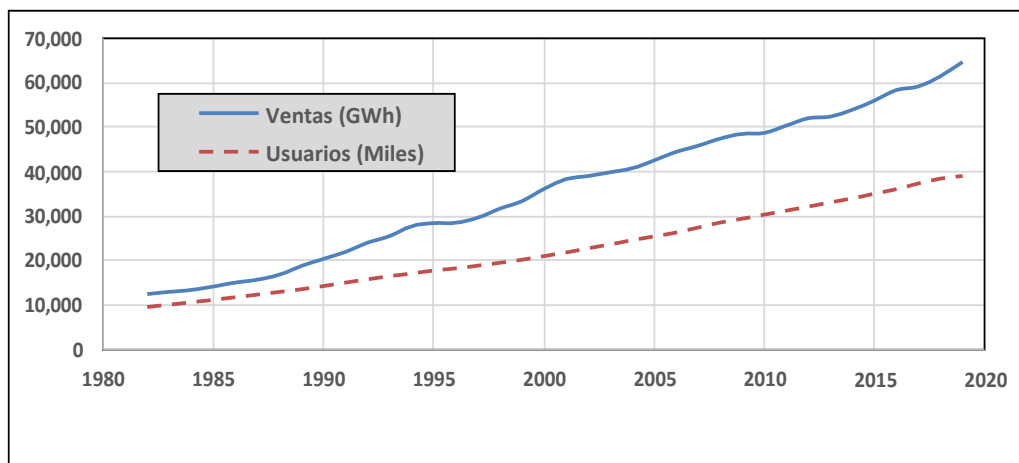


Figura 1: Usuarios y ventas de energía eléctrica del sector residencial (De Buen, 2020). Eficiencia energética en el confort térmico en viviendas de clima cálido en México. <https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno5nvociclo.pdf>

En este sentido clasificando a las ciudades de México de manera general por tipo ya sea cálido o templado, se ha notado un mayor incremento en el consumo en las ciudades de clima cálido con respecto a las de clima templado, De Buen, (2020) afirma que este incremento se le atribuye a la construcción de miles de vivienda en regiones de clima cálido y a que estas requieren aire acondicionado para lograr confort, la Figura 2 muestra la diferencia gráficamente.

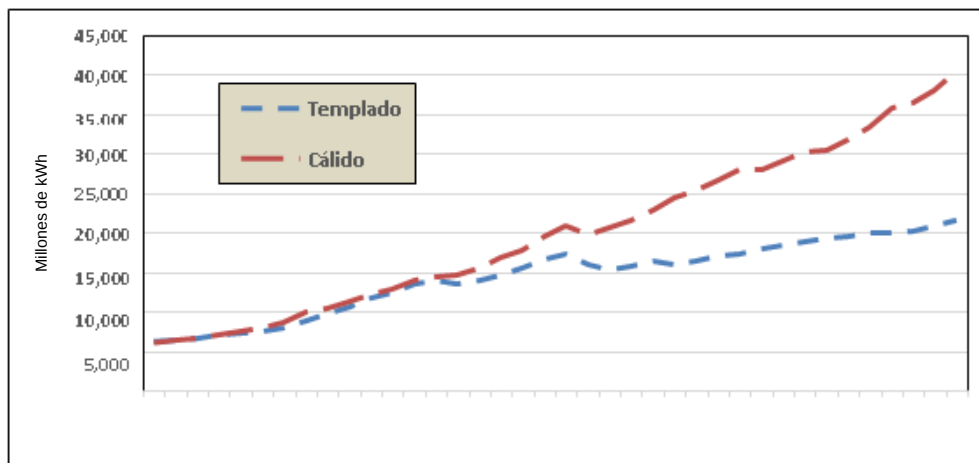


Figura 2: Consumo eléctrico residencial por tipo de clima
De Buen, (2020). Eficiencia energética en el confort térmico en viviendas de clima cálido en México.
<https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno5nvciclo.pdf>

En la ciudad de Mexicali, Baja California debido al tipo de clima cálido seco en los meses de verano y al contar esta ciudad con una temperatura por arriba de la media nacional y dado que las temperaturas en el verano son alrededor de los 40° y en algunos días en los meses de julio y agosto superan los 45°, la climatización artificial de los espacios utilizados por la población es indispensable para su confort térmico. Las acciones en busca del confort repercuten en altos consumos de energía eléctrica y por lo tanto la población destina una parte importante de sus ingresos económicos al pago de consumo de energía.

En un estudio realizado en base a este tema y en esta ciudad, Suastegui, (2014) determina que, la vivienda en Mexicali, B. C. consume anualmente 8,193 kWh, de los cuales el 73% es utilizada en los meses de verano, también afirma que el 65% de los usuarios del sector residencial destinan más del 6% de su ingreso económico al pago del servicio eléctrico.

En la actualidad, los programas gubernamentales orientados a la eficiencia energética, ahorro de energía y uso de energías renovables en el sector residencial incorporan 3 nuevas modalidades, (ASI,2018) tratando con esto de mantenerse actualizados y acorde con las nuevas tecnologías disponibles en el mercado. Estas nuevas modalidades consisten en la sustitución de luminaria incandescente o fluorescente por luminaria LED, sustitución de calentadores eléctricos de agua de servicio, por calentadores solares e instalación de sistemas solares fotovoltaicos generadores de energía eléctrica interconectados a la red de CFE.

La generación de energía eléctrica a partir de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red depende de diversos factores entre los que destaca la ubicación geográfica del sistema, inclinación de los módulos, orientación, tipo de módulo e inversor. En la actualidad no se ha definido la configuración óptima de estos factores que logren obtener los mayores ahorros económicos en el costo eléctrico de los usuarios residenciales de la ciudad de Mexicali, B. C. Por lo antes expuesto, se establecen las siguientes preguntas a investigación.

¿Cuáles es la configuración de un SFV que logra los mayores ahorros en el costo eléctrico en el sector residencial de Mexicali, B. C. ?.

¿Qué porcentaje de ahorro obtienen los usuarios del servicio eléctrico del sector residencial de Mexicali, B. C. en sus costos eléctricos al aplicar sistemas fotovoltaicos de 1, 2, 3, 4 y 5 kWp de capacidad de generación? .

1.2. Justificación y usos de resultados

Los resultados de esta investigación están orientados a proporcionar información a los diferentes programas gubernamentales dirigidos a promover el uso de energías renovables en el sector residencial, este trabajo pretende colaborar a determinar a qué sector de población es más factible la aplicación de estos programas de apoyo. La información proporcionada estará basada en análisis estadísticos y evaluaciones económicas y se sugiere su uso como apoyo al dirigir campañas de convencimiento a sectores específico de usuarios del servicio eléctrico residencial y de esta manera coadyuvar a aumentar la eficiencia de los diferentes programas. De igual manera al usuario se le podrá presentar evidencia sobre los beneficios de la implementación de dicho programa y sus acciones y de esta manera alentar la utilización de energías renovables, así como el uso eficiente de la energía eléctrica para el beneficio de la sociedad y del medio ambiente.

La importancia de la implementación de programas gubernamentales orientados a hacer más eficiente el consumo eléctrico en el sector residencial queda demostrado con el análisis efectuado sobre el impacto en el ahorro de energía que tienen las diferentes políticas pública en el sector residencial, en dicho análisis De buen (2019) determina que solamente en 2018 se evitó el consumo de 26,400 GWh, también plantea que el ahorro acumulado de energía del 2001 al 2018 es de 212,000 GWh, lo cual representa un ahorro económico para los usuario de 212 mil millones de pesos y de 424 mil millones para hacienda pública en la Tabla 1 se muestran los programas gubernamentales que han tenido mayor efecto en el ahorro de energía en el sector residencial.

Tabla 1: Programas de ahorro de energía en el sector residencial

No	Programa	Descripción	Alcance
1	FIPATERM	Aislamiento térmico de viviendas	Desde 1990 se han realizado más de 100 mil acciones, fundamentalmente en Mexicali, BC
2	ILUMEX	Cambio de lámparas incandescentes por fluorescentes compactas	Entre 1993 y 1996, se cambiaron más de 2.3 millones de lámparas en Guadalajara y Monterrey
3	Programa del FIDE	Cambio de lámparas incandescentes por fluorescentes compactas	Entre 1996 y 2006, se cambiaron más de 10 millones de lámparas en las zonas de operación de CFE
5	Normas Oficiales mexicanas	Características obligatorias de desempeño energético para equipos eléctricos que se usan en las viviendas	A partir de 1996, han entrado en vigor 10 NOM que se aplican a equipos de refrigeración, iluminación, acondicionamiento de aire, bombeo de agua, lavado de ropa y energía en espera
6	Tarifa Doméstica de Alto Consumo	Tarifa sin subsidio a usuarios del sector residencial	A partir de 2002, entró en vigor y se aplica a más de medio millón de usuarios domésticos en todo el país
7	Hipoteca Verde	Financiamiento para medidas de ahorro de energía en vivienda nueva	Desde 2008 ha venido aplicándose con medidas como lámparas fluorescentes compactas y aislamiento térmico de envolvente
8	Luz Sustentable	Cambio de lámparas incandescentes por fluorescentes compactas	Entre 2011 y 2012, se regalaron en todo el país cerca de 46 millones de lámparas fluorescentes compactas
9	Programa de Sustitución de Equipos Electrodomésticos	Cambio de refrigeradores y equipos de aire acondicionado	Entre 2009 y 2014, se cambiaron en todo el país cerca de 1.9 millones de equipos, principalmente refrigeradores
10	Ahórrate una Luz	Cambio de lámparas incandescentes por fluorescentes compactas	Entre 2014 y 2017, se regalaron en todo el país cerca de 39.8 millones de lámparas fluorescentes compactas

Nota. De Buen. (2018). Análisis de la evolución del consumo eléctrico del sector residencial entre 1982 y 2018 e impactos de ahorro de energía por políticas públicas. CONUEE

1.3. Objetivos

Como objetivo principal se tiene:

Determinar el ahorro económico en el costo eléctrico al implementar programas gubernamentales para el uso de sistemas solares fotovoltaicos en el sector residencial de Mexicali, B. C.

Esta investigación tiene los siguientes objetivos específicos:

- 1.- Identificar los factores de los sistemas solares fotovoltaicos que más impactan en el ahorro económico por consumo eléctrico.
- 2.- Diagnosticar si los factores de los sistemas fotovoltaicos tienen el mismo impacto en los diferentes rangos de consumo eléctrico.
- 3.- Proponer los factores y niveles más adecuados para obtener mayores ahorros en el costo eléctrico a un número más amplio de usuarios en el sector residencial de Mexicali B. C.

1.4. Hipótesis

En este trabajo de investigación se plantea la hipótesis de que los tipos de módulos, inversores, ángulo de inclinación y orientación de los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red instalados en usuarios residenciales de la ciudad de Mexicali B. C. impactan en el costo eléctrico además que la configuración óptima es un instalación para los sistemas fotovoltaicos para esta ciudad es utilizar módulos policristalinos, orientados hacia el sur con micro inversor y con una inclinación de 32°.

1.5. Antecedentes

En la actualidad la preocupación por el cambio climático, la volatilidad de los precios de los combustibles convencionales, el desarrollo de tecnología más eficiente en la generación de energía a partir de fuentes renovables, así como la disminución de los costos de estas ha logrado que sean una opción viable, debido a estos factores se ha logrado el aumento de su uso y aplicación. En el 2017 la generación eléctrica con energía renovable fue de 6,190,948 GWh a nivel mundial, con una capacidad instalada de 2,182,449 MW. La generación eléctrica en ese mismo año por medio de la energía solar fotovoltaica alcanzó la cantidad de 425,810 GWh con una capacidad instalada de 383,589 MW (IRENA, 2020). Como se puede observar la generación eléctrica a partir de la energía solar fotovoltaica es significativa a nivel mundial. Podemos observar en la Figura 3 a los países con mayor capacidad instalada de generación eléctrica fotovoltaica.

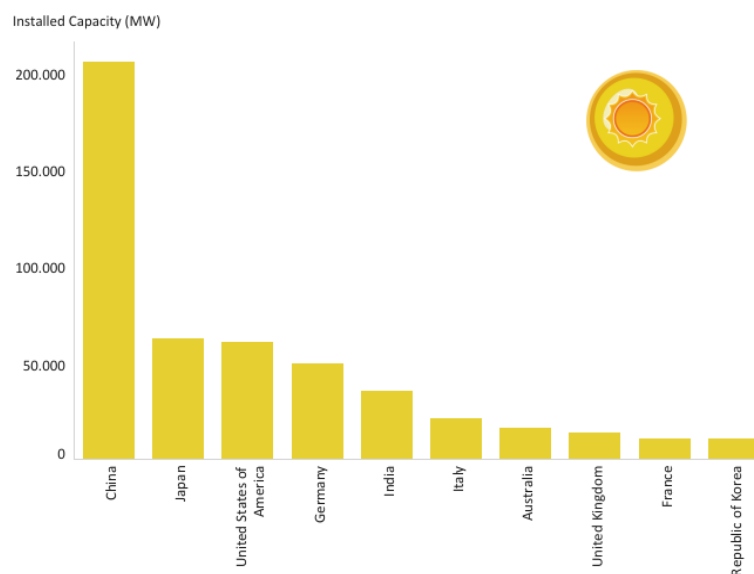


Figura 3: Países con mayor capacidad instalada de generación eléctrica
IRENA, (2020). <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>

Los costos de la tecnología para energía renovables han caído drásticamente en los años recientes, principalmente en lo que a generación eléctrica solar fotovoltaica se refiere, por ejemplo el precio de los módulos fotovoltaicos se redujo hasta en un 80% en 2014 en comparación con su precio en el 2009 en la Figura 4 se observa claramente esta disminución.

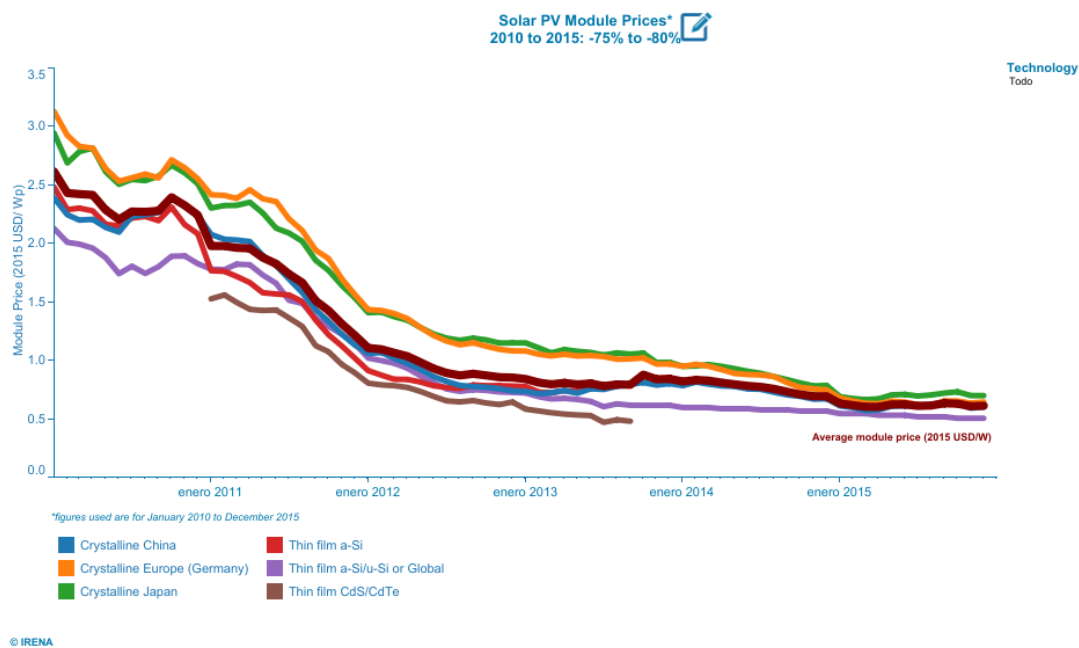


Figura 4: Costos de los Módulos Fotovoltaicos 2010-2015

IRENA, (2015). <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=3&subTopic=32>.

Con este escenario sin duda los SFV son una excelente opción ahora y en el futuro. En el sector residencial de igual manera se observa un incremento en la instalación de SFV, pero en México se considera muy atrás en comparación con otros países sobre todo para el gran potencial que tiene el país, pero poco a poco crece un interés en la población en general, además se observa un crecimiento de empresas que se dedican a este rubro lo que contribuye a difundir información ya que sus departamentos de ventas proporcionan información a clientes potenciales.

1.5.1. Recurso solar en México

La situación geográfica de México lo ponen como uno de los países más atractivos para la inversión en energía fotovoltaica en la Figura 5 se muestran las coordenadas geográficas del país.



Figura 5: Coordenadas Extremas de México

<http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/coordenadas.aspx?tema=T>

La manera de medir el potencial de energía solar que un territorio tiene es a través de la radiación solar. (IRENA, 2015). Según la International Renewable Energy Agency México se encuentra entre 15° y 35° de latitud, región considerada la más favorecida en recursos solares, donde se recibe diariamente, en promedio, 5.5 kWh/m² (la unidad de medición de radiación solar) (CIEP, 2018), la Figura 6 muestra el potencial fotovoltaico, del país y se puede observar que cuenta con gran amplitud del recurso solar.

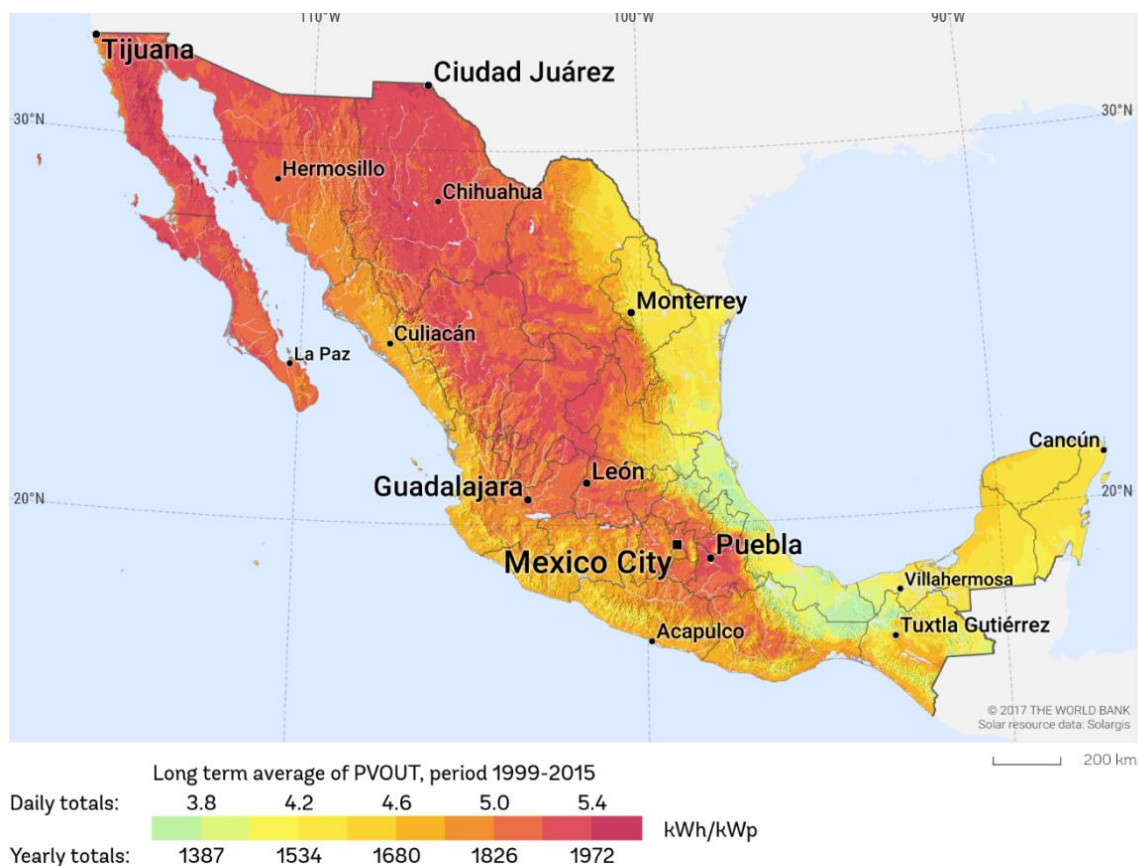


Figura 6: Potencial Fotovoltaico de México
<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/mexico>

También se puede ver que el noroeste del país es una de las regiones que cuenta con el mayor potencial en el país y la ciudad de este caso de estudio Mexicali, se encuentra en esta región.

A pesar de contar con este potencial la utilización de este recurso es de proporción baja en el país, países como Alemania o china que no cuentan con una posición tan favorable, tienen un mayor aprovechamiento solar como se muestra en la Tabla 2

Tabla 2: *Comparativo de aprovechamiento solar*

País	Tamaño del territorio (km²)	Radiación solar (kWh/m²)	Generación de energía solar (Gwh)
Alemania	357,376	1.1	5,047
China	9, 597,000	4.5	116,500
México	1,964.000	5.5	114.2

Nota: Comparativo de aprovechamiento solar entre países con menor recurso solar y México
Recuperado: <http://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/>.

De la tabla 2 se observa que, a pesar de que México tiene un territorio 5.5 veces mayor que Alemania y una radiación 5 veces mayor, la energía solar generada en el país europeo es 44.2 veces superior. (CIEP,2018).

En la actualidad en México se está dando un gran cambio en lo que a generación a partir de energías renovables se refiere, los diferentes cambios a nivel legislativo en materia de energía apoyados en la reforma energética impulsada por el presidente y por el congreso.

A partir de estas reformas, la energía solar fotovoltaica es una de las que está obteniendo un mayor crecimiento y de las cuales se vislumbra un futuro alentador, la Figura 7 muestra el aumento de la capacidad instalada de generación eléctrica a partir de la energía fotovoltaica en México en los últimos años.

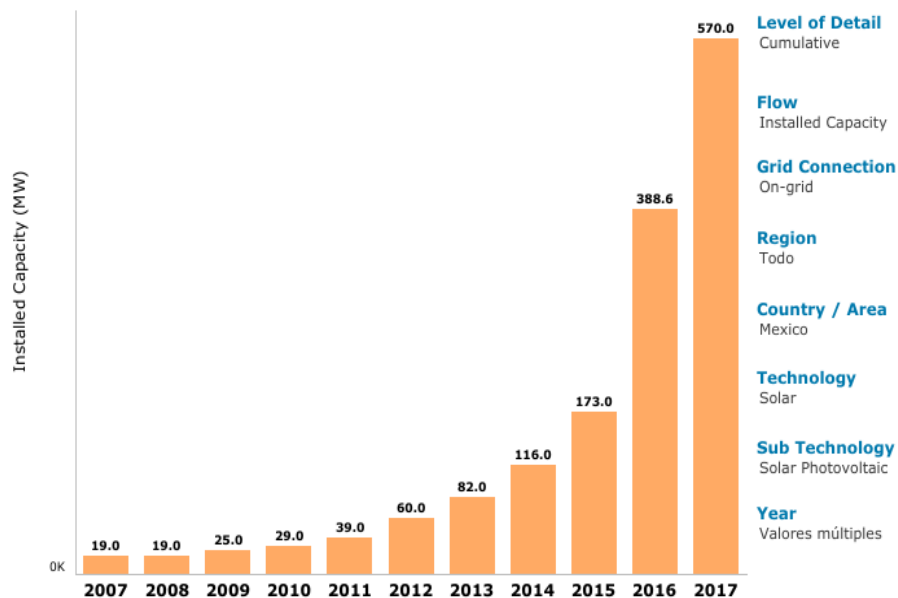


Figura 7: Capacidad Instalada en México
IRENA,(2018) capacidad instalada de generación de energía a partir de energía fotovoltaica
<https://www.irena.org/solar>

“El 2017 fue un año en el que la energía fotovoltaica tuvo un crecimiento sin precedentes, al alcanzar una generación de 1,149.6 GWh (934.81 GWh más que en 2016) y un crecimiento en capacidad instalada de 285.13 MW (73.73%). El factor más importante del crecimiento en este sector fue el incremento de sistemas de generación distribuida”. (SENER, 2017. p. 5)

En algunos países los gobiernos locales y estatales y las compañías proveedoras de electricidad ofrecen una gran cantidad de incentivos a los consumidores residenciales con el propósito de que instalen sistemas fotovoltaicos, sumando además los incentivos federales. Los apoyos van desde incentivos fiscales, créditos, dinero en efectivo, apoyo para la instalación, así como el portafolio estándar de energía renovable (RPS) (Matisoff,2017). Estos tipos de incentivos son determinantes, para el crecimiento de las instalaciones de SFV en el sector residencial, en México aún no se cuenta con grandes

incentivos a nivel residencial, los programa ASI, CONAVI y el FIDE son la única referencia en este rubro y los apoyos en este momento solo se limitan a otorgar créditos. El programa ASI ya ha demostrado su eficacia en sus anteriores modalidades. Desde sus inicios con lo aplicación de aislamiento térmico en las viviendas, continuando con la sustitución de aires acondicionados, refrigeradores y luminarias en la Tabla 3 se muestran el número histórico de acciones aplicadas por dicho programa.

Tabla 3: *Avance Histórico Regional*

MODALIDAD DEL PROGRAMA ASI	NUMERO DE ACCIONES
Aislamiento Térmico (desde 1991)	96864
Sustitución de Aire acondicionado (desde 1997)	162229
Iluminación (desde 1997).	461676
Refrigeradores (desde 2003)	125205

Nota: Avance histórico de acciones del programa ASI hasta marzo del 2018

Recuperado de <http://programaasibc.com.mx/nosotros.php>

En un estudio realizado sobre los resultados de dicho programa Suástegui et al. (2018) afirma que la acción con mayor impacto tuvo fue la sustitución del equipo de aire acondicionado instalado por equipos de mayor eficiencia representando esta sola acción un 32% de ahorro en el consumo. Desde los inicios de este programa hasta hoy, la importancia de sumar la generación de energía a partir de sistemas solares fotovoltaicos a las modalidades del programa es algo que representará a mediano y largo plazo una de las medidas más importantes y de mayor repercusión de dicho programa.

1.5.2. Ubicación de este caso de estudio

Esta investigación está limitada a la ciudad de Mexicali, pero existe la posibilidad que se pudieran tomar algunas de las consideraciones hechas en este estudio para ser aplicadas en algunas otras ciudades que compartan algunas de las características climatológicas, regionales o tipológicas similares a las de esta ciudad.

1.5.3. Tipo de clima en la ciudad de Mexicali

El municipio de Mexicali presenta cuatro climas diferentes dentro del grupo de secos-áridos, con escasa precipitación. El clima cálido seco que comprende a la ciudad de Mexicali, su valle y San Felipe, este clima predomina en el 47% del territorio municipal, aproximadamente. El clima semicálido seco abarca el 37% del territorio y se manifiesta en la parte central del municipio. Por su parte, el clima templado seco sólo cubre una pequeña parte del oeste del municipio y representa el 6% del área municipal. El 10% del territorio es de clima templado semiseco y se localiza en la zona central oeste, comprendiendo parte de las sierras de Juárez y San Pedro Mártir. (GARCÍA, et al,2011).

1.5.4. Precipitación pluvial en la ciudad de Mexicali

El municipio de Mexicali tiene uno de los registros de precipitación total anual más baja de todo el país, pues es menor a los 50 mm (INEGI,2018) lo que también favorece al no tener gran cantidad de días nublados que pudieran restar eficiencia a los SFV.

Sin embargo, el hecho de contar con un clima árido también tiene sus desventajas, la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos decrece cuando la temperatura ambiental aumenta, la mayoría de los fabricantes de paneles solares manejan una temperatura ideal de 25°C de la cual a partir de ella cada grado que aumenta representa una pérdida

en la eficiencia por calentamiento de 0.1-0.5 % lo que resulta en una reducción de la conversión de radiación a electricidad entre 4-20%, cuando el panel se encuentra en una temperatura de 40°C por arriba de la temperatura ambiente (Du, et al,2016).

De igual manera en zonas áridas o semiáridas otro factor que afecta la eficiencia, son las partículas suspendidas en el aire que afectan la irradiancia solar, además en algún momento estas partículas de polvo se depositaran sobre los paneles disminuyendo su eficiencia, ciudades como Mexicali que cuentan con una baja precipitación pluvial anual es de suma importancia tener siempre en cuenta labores de mantenimiento y limpieza en el sistema. Los depósitos de polvo sobre los módulos restan una eficiencia de entre el 15 y un 30%, el grado de inclinación de los módulos pueden ayudar a mitigar un poco el depósito de polvo sobre los módulos sobre todo en partículas más grandes (Mussard et al,2018) .

En un estudio hecho por Vega M. (2015) en la ciudad de Mexicali, evalúa el rendimiento de un SFV de 1.2 kWp ubicada en una residencia típica del fraccionamiento residencial Coral Maya de esta ciudad, se obtuvo la información de las variables de generación de energía eléctrica, temperatura ambiente e irradiancia solar del lugar de instalación. El análisis del desempeño del sistema, fue monitoreado en el periodo de marzo - agosto del año 2012, meses en los que se registran las temperaturas más altas para la ciudad de Mexicali, B. C. y las mediciones fueron tomadas en intervalos de 1 hora para cada día del mes. Encontrando que el mes de marzo se obtiene la mayor generación que es entre 6 y 7 kWp, la mayor irradiancia solar se da en el mes de junio con un valor promedio de 7.41 kWh/m², el rendimiento global se calculó mensualmente cuyos valores oscilaron entre 0.7 y 0.95 con un valor promedio de 0.771 muy similar al reportado en la

literatura para sistemas similares. Entre las conclusiones se denota que las altas temperaturas e irradiación solar son variables que afectan el rendimiento de un sistema fotovoltaico, pues los meses que presentaron mayor irradiación, presentaron también valores más bajos de rendimiento en el sistema fotovoltaico, cabe señalar que para dicho análisis se utilizó una inclinación de 26° .

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. El cambio climático

Una de las grandes preocupaciones de las últimas décadas y que va en aumento en importancia y relevancia es el cambio climático, puede decirse que el cambio climático es una consecuencia del calentamiento global provocado a su vez por el efecto invernadero. “Se llama efecto invernadero al proceso que provocan determinados gases (los gases de efecto invernadero), que absorben parte de la radiación térmica que emite la superficie del planeta y la devuelven a la superficie. Este efecto genera un aumento de la temperatura: el calentamiento global” (Pérez Porto, 2016).

Las diversas actividades del día a día del hombre libera una gran cantidad de gases a la atmósfera una gran cantidad de estos gases tiene un efecto negativo en la misma principalmente los gases de efecto invernadero, entre los que se encuentran el dióxido de carbono, el metano, el ozono y los compuestos clorofluorocarbonados (CFC), entre otros. Al incrementarse la cantidad de estos gases en la atmósfera terrestre provoca que ésta retenga una cantidad mayor de calor, “Uno de los principales gases de invernadero, el CO₂, ha aumentado su concentración notablemente: de 280 ppm (partes por millón) antes de la revolución industrial a más de 380 ppm en la actualidad”. (Caravia, et al, 2009, p.152-153).

Estos gases incluyendo el CO₂ se encuentra actualmente en concentraciones por arriba de 430 ppm. Que es de las más altas desde hace miles de años, “Como resultado, se está produciendo un calentamiento de la atmósfera en todo el planeta. Se estima que entre 1906 y 2005 la temperatura atmosférica promedio se incrementó en 0.74°C y, si las tendencias actuales continúan, podría llegar a incrementarse hasta en 5°C”. (Caravia, et al., 2009, p.152-153).

Diversas organizaciones internacionales públicas y privadas se han dado a la tarea de investigar, medir e informar acerca de este fenómeno ya que el crecimiento de la población va en aumento y con ello la emisión de gases de efecto invernadero.

El modelo de crecimiento exponencial, postulado por Thomas R. Malthus en 1798, supone que “las poblaciones crecen a una tasa constante. Según el modelo de crecimiento exponencial, si $\lambda = 1.05$ (lo que implica un crecimiento del 5% anual), este valor se mantendrá constante independientemente del tamaño de la población y de las condiciones en las que se encuentre” (Malthus, 1798). Este aumento de la población y por lo tanto incremento del consumo de energía ha provocado un aumento de los gases en la atmósfera que provocan el efecto invernadero causante del calentamiento global y este a su vez es factor del cambio climático, es por eso que la comunidad internacional a puesto interés en estudiar, regular y proponer soluciones a esta problemática.

Es en la *Conferencia Sobre Medio Ambiente Humano* efectuado en Estocolmo en 1972 cuando se da el primer esfuerzo conjunto internacional entre naciones organizaciones y diversos organismos de la sociedad, esta conferencia fue convocado por la ONU. Veinte años después de la Cumbre de Estocolmo, la ONU volvió

a congregar a la comunidad de países para evaluar los avances logrados desde 1972. En 1979 se celebró la Primera Conferencia Mundial sobre el Clima donde se dieron a conocer las primeras pruebas de la injerencia humana sobre el clima.

El segundo evento en importancia relacionado en este tema fue la Convención de Viena para la Protección de la Capa de Ozono en 1985 resultando de esta convención la firma del *Protocolo de Montreal*. Donde se crearon acuerdos para el control de sustancias que adelgazan la capa de ozono. En 1992 tuvo lugar en Río de Janeiro la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, conocida también como Cumbre de la Tierra Conferencia de Río. “Esta reunión tuvo una enorme trascendencia en el contexto ambiental del planeta, pues de ella surgieron seis acuerdos de gran relevancia, ya que impulsaron muchos temas ambientales vinculados con el desarrollo”. (Carabias et al., 2009). En el año de 1995 se realiza en Berlín la primera conferencia de las partes (COP por sus siglas en inglés) de la convención marco de Naciones Unidas sobre cambio climático. De esta convención se reconoce el cambio climático y sale el Mandato de Berlín “documento por el cual se exigía a todas las partes iniciar negociaciones para reducir las emisiones más allá del año 2000”. (Diario el español, 2019). En 1997 se crea el Protocolo de Kioto en el cual se definen metas específicas como la reducción de cierto porcentaje de las emisiones de gases invernaderos para países desarrollados. La COP 13 se llevó a cabo en Bali en el de 2007 y se da a conocer el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC compilado por varios de cientos de científicos y “este informe concluyo que nuestro clima se está calentando rápidamente y que ahora estamos seguros en 90%

que este calentamiento se debe principalmente a la actividad humana”. (González, 2010).

Fue en la COP18 sobre cambio climático donde ratificó el segundo periodo de vigencia del Protocolo de Kioto desde el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2020. La duración de este segundo periodo del Protocolo es de 8 años, con metas concretas al 2020. Sin embargo, este proceso denotó un débil compromiso de los países industrializados, tales como Estados Unidos, Rusia, y Canadá, los cuales decidieron no respaldar la prórroga. “La puesta en marcha de Kioto ha permitido una reducción del 22,6% en las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a los niveles de 1990 en 37 países industrializados y la UE, cuando el compromiso inicial era de una disminución del 5%”. (Res, 2015).

Para finales del 2015 se llevó a cabo la COP 21 de los acuerdos más destacados están:

Evitar que el incremento de la temperatura media global supere los 2°C respecto a los niveles preindustriales y busca, además, promover esfuerzos adicionales que hagan posible que el calentamiento global no supere los 1.5°C.

Se reconoce la necesidad de que las emisiones globales toquen techo lo antes posible, asumiendo que esta tarea llevará más tiempo para los países en desarrollo. Además, incluye la importancia de conseguir una senda de reducción de emisiones a medio y largo plazo, coherente con un escenario de neutralidad de carbono en la segunda mitad de siglo, es decir, un equilibrio entre las emisiones y las absorciones de gases de efecto invernadero.

Compromete a todos los países a que, cada cinco años, comuniquen y mantengan sus objetivos de reducción de emisiones, así como la puesta en marcha de políticas y medidas nacionales para alcanzar dichos objetivos. Incluye un ciclo de revisión o sistema de ambición que establece que, cada cinco años (empezando en 2023), es necesario hacer un balance del estado de la implementación del Acuerdo respecto al objetivo de los 2°C citado en el primer párrafo. (Gobierno de España, 2015).

México al ser catalogado un país en vía de desarrollo, no tiene responsabilidad de reducir sus emisiones de CO₂. Sin embargo, México se encuentra entre la espada y la pared ya que debe reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) en 30% para el año 2020 y en 50% para 2050, según la Ley de Cambio Climático publicada en junio de 2012 en el Diario Oficial de la Federación (DOF), y así cumplir con la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y el Protocolo de Kioto. El gobierno federal se autoimpuso reducir el uso de combustibles fósiles en la generación de electricidad en 65% para 2024, 60% para 2035 y 50% para 2050, lo que está suscrito en la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética. (Hernández, 2015).

Como ya conocemos los tipos de generación de energía convencionales o no renovables, producen una cantidad de emisiones de CO₂ a la atmósfera contribuyendo así directamente al calentamiento global del planeta, es por ello de suma importancia que la utilización de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables sea impulsada y promovida, de la misma manera que se tiene que intensificar acciones de uso eficiente de la energía, este estudio pretende proporcionar información que ayude a la demostración de que sistemas alternos de generación de energía como la

fotovoltaica, ayudan a reducir los consumos de energía eléctrica y las emisiones de CO₂ a la atmósfera, en si “El futuro de nuestro modo de vida a largo plazo depende de la disponibilidad de fuentes de energía y materias primas renovables, abundantes y baratas”. (Gilber M. y Wendell, 2008, p. 102), por ello la importancia de investigaciones referente a energías alternas.

2.2. Energía solar

El Sol puede aprovecharse energéticamente de dos formas conceptualmente diferentes:

- Como fuente de calor: energía solar térmica se usa principalmente para calentar un fluido normalmente agua, la energía solar térmica de baja temperatura calienta el agua por debajo de los 90° C y se usa comúnmente para uso sanitario, calentamiento de piscinas cocinas solares etc. La energía solar térmica de media temperatura es cuando la temperatura del fluido se eleva en el rango de los 80° C y 250° C el uso de estos fluidos es en procesos industriales y desalinización solar principalmente.

- Como fuente de electricidad: por medio de un sistema solar fotovoltaicos la energía solar se puede convertir en electricidad, el destino de la energía eléctrica generada es diverso ya sea en sistemas aislado o interconectado, domésticos, industriales o en plantas de generación utilizando módulos fotovoltaicos. La energía solar térmica de alta temperatura se utiliza para calentar un fluido y producir vapor para mover una turbina acoplada a un generador para producir electricidad. “El principio de funcionamiento es como el de una central térmica convencional, diferenciándose en la

forma de producir el vapor, que es por calentamiento solar, alcanzándose temperaturas de 1000° C". (Schallenberg, 2008).

En nuestro caso de estudio se utilizará la energía solar fotovoltaica por lo que es conveniente adéntranos más en las bases y fundamentos de la misma. Diversos tipos de energía tienen como fuente principal el sol, la marítima, la eólica, biomasa entre otras además la vida en el planeta está sustentada en la energía solar como las plantas y los animales. La energía solar llega a nuestro planeta en forma de radiación a continuación se desglosan los fundamentos de la radiación solar.

2.2.1. Radiación solar

La radiación solar se puede definir como el flujo de energía que recibimos del Sol en forma de ondas electromagnéticas que permite la transferencia de energía solar a la superficie terrestre. Esta energía es producida en el interior del sol donde se producen "reacciones de fusión de los átomos de hidrógeno dando lugar a los átomos de helio y liberando gran cantidad de energía, de la cual llega a la tierra solo una pequeña parte" (Creus, 2010, p. 19).

2.2.2. Constante solar

No toda la energía del sol llega a la tierra ya que la distancia entre el sol y la tierra es aproximadamente 150 millones de kilómetros y la tierra no siempre recibe la misma cantidad de energía dado que la tierra y el sol no siempre están a la misma distancia, por lo que se utiliza una constante para determinar la cantidad de energía radiante que llega hasta el límite de la atmósfera por unidad de superficie, dispuesta perpendicularmente a la dirección de la radiación incidente, y por unidad de tiempo, existen diferentes valores

y métodos para calcular esta constante, el valor aceptado ha cambiado a través de los años actualmente uno de los valores más aceptados es el propuesto por Duffie and Beckman, (2020) de $1367 \frac{W}{m^2}$. Un método para calcular dicha constante es considerar al sol de diámetro 1.392×10^9 y la tierra como esferas, la temperatura del sol es de 5,780 Kelvin por lo cual se comporta como un cuerpo negro, se utiliza la constante de Stefan-Boltzmann (σ) que tiene un valor aproximado de $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$. La potencia total recibida a través de una esfera de radio igual a la distancia Tierra-Sol, será igual a la potencia por m^2 en ese punto, que es G_0 multiplicada por la superficie total de la esfera, $4\pi d$, entonces la fórmula para determinar la constante solar es la siguiente.

$$G_0 = \frac{\sigma T_s^4 (4\pi R_s^2)}{4\pi d^2} = 1367 \frac{W}{m^2}$$

2.2.3. Factor masa de aire (AM)

No toda la radiación que llega a la tierra llega a la superficie esto se debe a que tiene que atravesar la atmósfera y la radiación se ve afectada por los diferentes componentes que la constituyen como diversos gases por absorción, nubes por reflexión, partículas de polvo por difusión. Estas alteraciones se ven afectadas por el grosor de la capa atmosférica y de la posición relativa del sol.

Una vez que la radiación llega a la superficie de la tierra incide a un módulo fotovoltaico de tres maneras posibles determinadas por la forma en que llegan a la tierra.

2.2.4. Radiación directa:

Es aquella radiación que llega a la tierra sin ser afectada por los componentes atmosféricos.

2.2.5. Radiación Difusa:

Es la radiación que llega a la tierra en forma dispersa a través de la difracción, dispersión y reflexión de los gases y las nubes.

2.2.6. Radiación de albedo:

Es la procedente de la reflexión del terreno próximo y de otros objetos.

2.2.7. La radiación global:

Es la radiación alcanzada en un punto de la tierra y es la suma de la radiación difusa, directa y albedo, en la Figura 8 se ejemplifica cómo los diferentes tipos de la misma

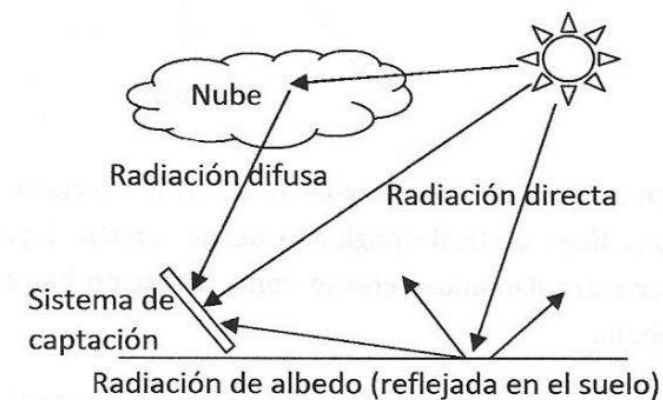


Figura 8: radiación

<https://www.aulafacil.com/cursos/medio-ambiente/energia-solar-termica1/irradiacion-solar- directa-e-indirecta-137815>

Determinar la cantidad de radiación que llega a un módulo fotovoltaico es complejo dado que existen gran variedad de factores que impactan en su cuantificación, muchos de estos son aleatorios, por lo cual es de suma importancia una correcta determinación de los factores controlables, como la inclinación y la orientación.

2.3. Incidencia de la energía solar sobre la tierra.

La inversión inicial de un sistema solar fotovoltaico a un es alta, es por ello imperante que se obtenga el mayor rendimiento del sistema, el cual necesita el máximo aprovechamiento de la energía solar que depende de diferentes factores como son, la ubicación del sistema, la temperatura, si existen o no sombreados y por supuesto la orientación y la inclinación del sistema. Para determinar la inclinación y la orientación de los SFV es necesario conocer cómo es que se recibe la radiación solar, dado que el planeta recibe la energía solar en forma de radiación, proveniente del sol, la cantidad de la misma dependerá del posicionamiento del planeta con respecto al sol, la tierra tiene diferentes movimientos que afectan la cantidad de radiación que llega a la tierra, los movimientos más importantes son el de rotación y translación.

2.3.1. Movimiento de rotación

El movimiento de rotación es el que efectúa la tierra sobre su propio eje, (que pasa por los polos y se le nombra eje polar) como ya es conocido nuestro planeta

tiene una forma esférica y hace un giro sobre su eje de rotación en sentido oeste-este, en Figura 9 se muestra la tierra con el eje de rotación y se ejemplifica el sentido de la rotación “Si la Tierra no rotase el Sol siempre iluminaría una mitad de la Tierra, mientras que la otra mitad nunca sería iluminada y conocería una noche permanente” (Fernández, et al. p. 14) de aquí se da la sucesión de los días y las noches. El tiempo que dura la tierra para completar este movimiento es de 23 horas 56 minutos y 4.1 segundos.



Figura 9: Movimiento de Rotación de la Tierra

<https://www.celeberrima.com/movimiento-de-rotacion-de-los-planetasy-su-duracion-periodo-de-rotacion/>

Es el movimiento que hace la tierra alrededor del sol y lo hace en una forma elíptica, como se observa en la Figura 10 esto lleva a que la distancia entre la tierra y el sol no sea la misma durante esta trayectoria, la distancia más cercana al sol se da los primeros días del mes de enero a esta posición de la tierra con respecto al sol se le llama perihelio y a principios del mes de julio se tiene la posición más alejada de la tierra con respecto al sol esta posición es nombrada afelio, y le toma a la tierra 365 días, 5 horas, 48 minutos y 46 segundos en realizar una vuelta completa alrededor del sol.

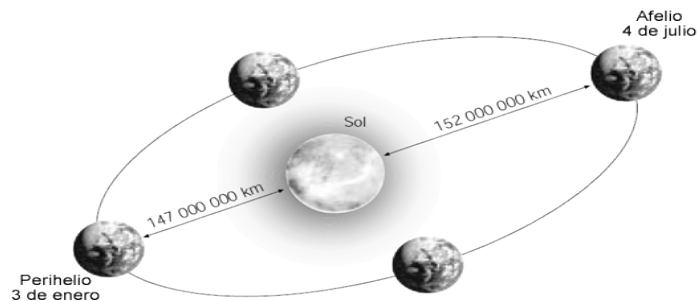


Figura 10: Movimiento de Translación de la tierra

http://www.cursosinea.conevyt.org.mx/cursos/cnaturales_v2/interface/main/recursos/antologia/cnant_4_02.htm

2.3.2. Ángulo de inclinación de la tierra

Hay que mencionar que “el eje polar de la tierra no es perpendicular al plano de su órbita alrededor del sol, sino que forma un ángulo de 23.45° con la perpendicular de dicho punto” (Castejón y Santamaría, 2010, p. 10), debido a esta inclinación de la tierra es que se dan las estaciones del año, duraciones diferentes de los días y las noches durante el año y es por esta inclinación que el sol está más alto en verano que en invierno.

2.4. Coordenadas geográficas de la tierra

Es posible definir un punto específico en la tierra “mediante las coordenadas geográficas latitud y longitud podemos definir con precisión una posición cualquiera de la superficie terrestre. Se expresa en grados sexagesimales y se dan con referencia al Ecuador y al meridiano de Greenwich”. (Castejón y Santamaría, 2010, p. 8). El Ecuador es una línea imaginaria perpendicular al eje de la tierra y es equidistante a los polos, otra línea imaginaria es el meridiano de Greenwich o meridiano cero es una línea o semi circunferencia que une ambos polos de la tierra.

2.4.1. Latitud Φ :

Es el ángulo formado entre el punto de referencia y el ecuador, como se ejemplifica en la Figura 11 es medido de 0° a 90° siendo positivos en el hemisferio norte y negativos en el hemisferio sur a este punto se le denomina paralelo y todos los puntos ubicados en dicho paralelo tienen la misma latitud.

2.4.2. Longitud:

Se conoce a la longitud como el ángulo formado entre un punto de la tierra y el meridiano de Greenwich este tiene valor 0° de referencia y a partir de él se mide de 0° a 180° siendo positivos al oeste y negativos al este como se muestra en la Figura 11.

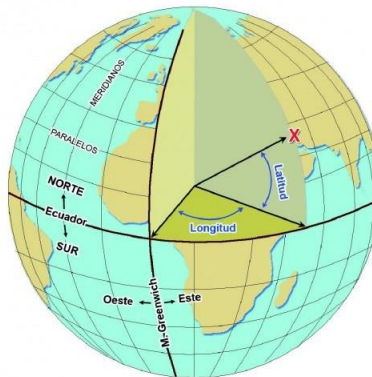


Figura 11: Meridianos y Paralelos
<https://locuraviajes.com/paralelos-y-meridianos/>

2.5. Posicionamiento del Sol respecto a la superficie terrestre

Para poder situar el sol desde un punto de la tierra se utiliza el concepto de esfera celeste que consiste en suponer a la tierra como una esfera imaginaria de radio arbitrario centrada en el observador “este sistema de representación muestra las posiciones del sol como si tuviera en movimiento aparente alrededor de la tierra”. (Castejón y Santamaría, 2010, p. 10). En la Figura 12 se muestra gráficamente el concepto de

trayectoria solar. Según Messenger y Abtahi, (2017) si se supone que la distancia del sol a la tierra siempre es constante la posición del sol puede ser especificada con los ángulos de la altitud solar y el ángulo azimutal”.

2.5.1. Altitud solar α

La altitud solar es ángulo formado entre los rayos del sol con respecto al plano horizontal.

2.5.2. Ángulo azimutal ψ

El ángulo azimutal es el ángulo formado por la proyección del Sol sobre el plano del horizonte con la dirección Sur. Positivo 0° a 180° hacia el Oeste y negativo hacia el Este 0° a -180° .

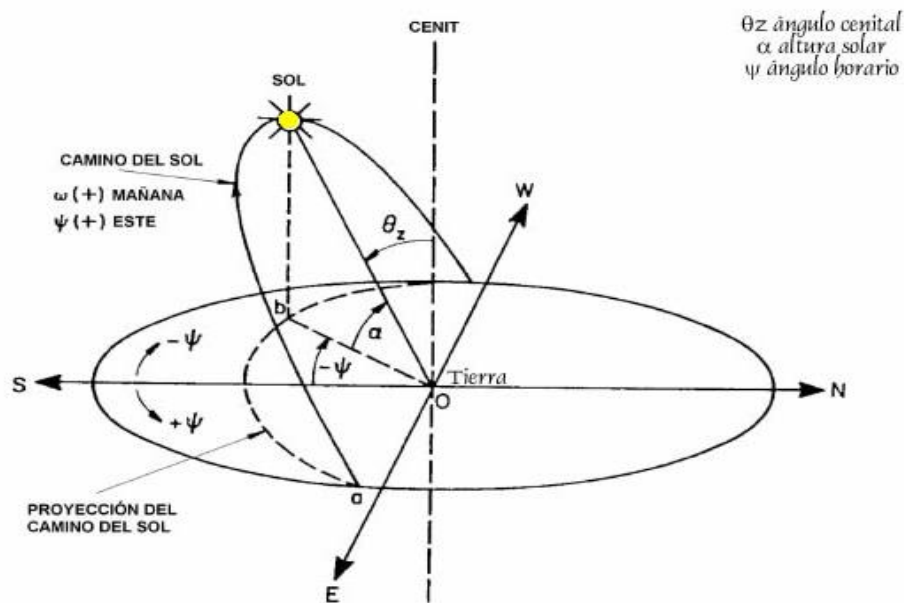


Figura 12: Movimiento Aparente del Sol

<http://efectomandela.com/category/astronomia/el-sol/>

2.5.3. El ángulo de declinación δ

El ángulo de declinación δ es el ángulo que forma la dirección de los rayos solares con el plano ecuatorial y une los centros del sol y de la tierra.” La declinación, δ , varía lentamente entre $+\delta_0 = +23,5^\circ$ en pleno verano en el hemisferio Norte, a $-\delta_0 = -23,5^\circ$ en el mismo punto en pleno invierno”. (González, 2009). Los valores de δ varían durante el transcurso del año y para cualquier día del año se puede obtener por medio de la expresión analítica en la Figura 13 se muestra gráficamente este concepto.

$$\delta = \delta_0 \operatorname{sen} \left[360^\circ \frac{(284 + n)}{365} \right]$$

donde n es el día del año en el cual se quiere conocer el ángulo de declinación y $n = 1$ para el día 1 de enero, por lo tanto

$$\delta_{21 \text{ de marzo}} = 23.45^\circ \operatorname{sen} \left[360^\circ \frac{(284+80)}{365} \right] = 23.45^\circ \operatorname{sen} |359| = -0.40$$

$$\delta_{21 \text{ de diciembre}} = 23.45^\circ \text{ con } n = 355$$

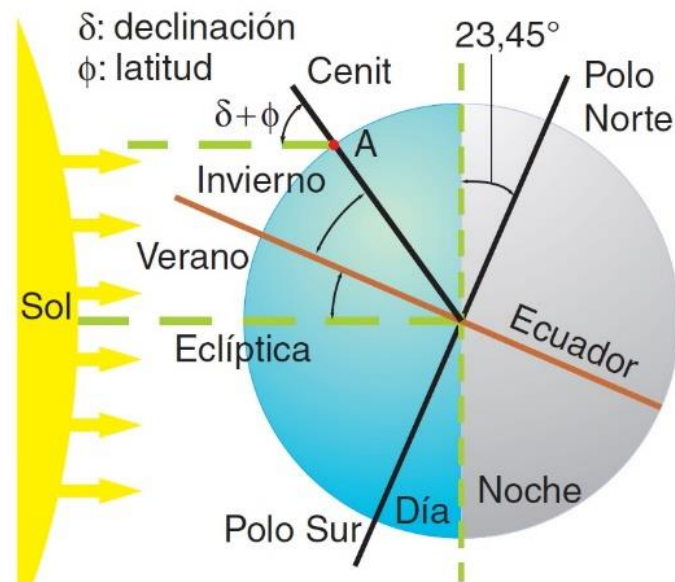


Figura 13: Inclinación de la Tierra

https://abanilla.mforos.com/2025849/10442995curiosidades/?_pag=82

2.6. El efecto fotovoltaico

La energía solar fotovoltaica se basa principalmente en el efecto fotoeléctrico, el principio de este fenómeno se basa en el uso de materiales semiconductores, que tienen la particularidad de que bajo ciertas características funcionan con propiedades aislante y bajo otras condiciones son conductores de electricidad, Las celdas solares aprovechan esta particularidad y su funcionamiento se da por medio de dos capas de materiales semiconductores uno tipo-n y otro tipo-P La luz proveniente del sol incide en forma de partículas llamadas fotones (que contienen energía) sobre la superficie del material semiconductor (la célula fotovoltaica), si este fotón es absorbido provoca el salto de un electrón a otra posición, produciendo una corriente eléctrica. (Fernández,2010)

La amplitud de la corriente eléctrica generada por la absorción de fotones en una célula solar de un tamaño determinado a una temperatura determinada es controlada por la luz incidente de dos maneras principales:

La intensidad de la luz incidente (número de fotones)

La longitud de onda de la luz incidente

En las aplicaciones reales, la luz absorbida por las celdas es una combinación de radiación solar directa, así como de luz difusa que rebota en las superficies circundantes por esta razón la celda debe estar recubierta con material antirreflejante para limitar, la reflexión de la luz en su superficie y absorber la máxima cantidad de radiación posible.

Existen diferentes tipos de celdas fotovoltaicas las más utilizadas son:

Silicio Monocristalino: Se componen de secciones de un único cristal de silicio (reconocibles por su forma circular u octogonal, donde los cuatro lados cortos, se fabrican en cilindros que posteriormente se cortan en obleas

Silicio Policristalino: hechas de material similar al de la monocristalina, excepto que, en lugar de crecer en un solo cristal, se funden y se vierten en un molde. Esto forma un bloque cuadrado que puede cortarse en obleas cuadradas. A medida que el material se enfría, se cristaliza de una manera imperfecta, formando tonalidades de colores diferentes en su superficie.

Silicio Amorfo: La palabra amorfo significa carencia de estructura geométrica es decir el silicio no se ha cristalizado. Los átomos de silicio que forman el sólido no tienen el patrón ordenado característico de los cristales como es el caso del silicio cristalino. La tecnología de los módulos de silicio amorfo ha estado cambiando aceleradamente en los últimos años.

Las células solares de capa delgada pueden estar hechas de semiconductores orgánicos o inorgánicos con una estructura policristalina o amorfa y depositada en sustratos eléctricamente activos o pasivos como el metal, el vidrio o el plástico. La célula solar de película fina puede ser fabricadas por técnicas como la deposición de vapor, la deposición de plasma y el enchapado o incluso la serigrafía. Presentan la gran ventaja de ser más baratos y también pueden hacerse en sustratos flexibles con lo que se puede tener mayores aplicaciones. (Ramchandra, 2011). Los materiales que destacan para la

fabricación de estas celdas están el Teluro de Cadmio (Cd Te) y Diseleniuro de Indio y Cobre (CIS) con rendimientos del módulo en torno al 10 y 11%.

Actualmente existen en desarrollo y en prueba, una gran variedad de celdas solares algunas alcanzan eficiencias de más del 40%, la Figura 14 muestra la evolución de las eficiencias de las celdas fotovoltaicas de laboratorio, probadas bajo condiciones controladas para diferentes tecnologías y materiales.

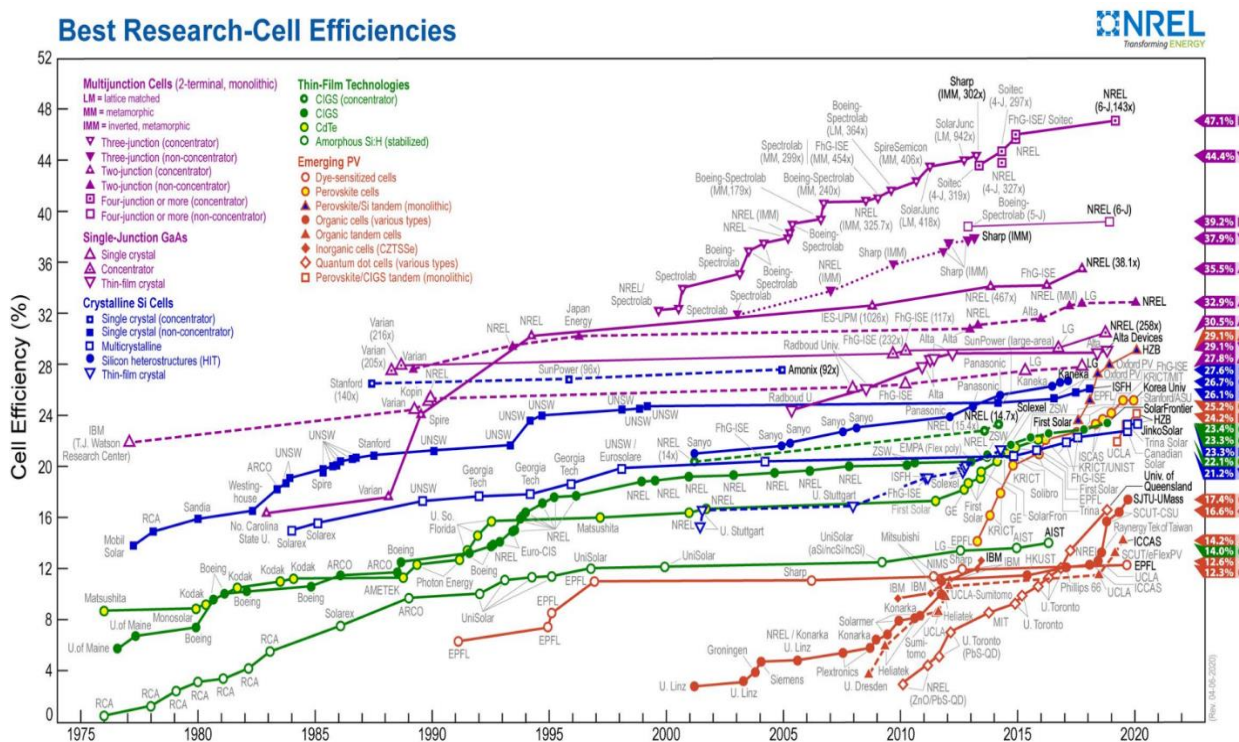


Figura 14: Eficiencia de las celdas solares.

2.7. El Módulo fotovoltaico

La unión en serie y en paralelo de varias celdas solares constituyen lo que se conoce como módulo fotovoltaico, “Un módulo fotovoltaico es una asociación de células a las que protege físicamente de la intemperie y aísla eléctricamente del exterior, dando rigidez mecánica al conjunto”. (Perpiñán, 2019), generalmente el encapsulado de las celdas solares se lleva a cabo mediante un vidrio en la parte frontal y una capa posterior de un material termo plástico, el vidrio frontal debe ser resistente al impacto tener una alta transmisividad a la onda espectral a la que las celdas trabajan y tiene que ser anti reflexivo, el encapsulado debe tener un tratamiento al vacío y el conjunto debe ser resistente a la humedad que causa la degradación de los módulos, se utilizan con marcos de aluminio anodizado para facilitar su rigidez y la instalación de los mismos. Los principales parámetros para evaluar el funcionamiento de un módulo son los siguientes.

Corriente de cortocircuito (I_{sc}) Es la máxima corriente generada por la celda solar y se mide cuando se conecta en cortocircuito las terminales positivas y negativas de la celda. Su valor depende del área superficial y de la radiación luminosa. El valor típico para la corriente de cortocircuito está dado en unidades de Amperes

Voltaje a circuito abierto (V_{oc}): Es el voltaje máximo que genera la celda solar. Este voltaje se mide cuando no existe una carga conectada a la celda.

Potencia máxima (P_{max}): Es la máxima potencia que producirá el dispositivo en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura, correspondiente al par máximo $V_{max} \times I_{max}$.

Corriente a máxima potencia (I_{max}): Corriente que entrega el dispositivo a potencia máxima bajo condiciones determinadas de radiación y temperatura.

Voltaje a máxima potencia (V_{max}): Tensión que entrega el dispositivo a potencia máxima bajo condiciones determinadas de radiación y temperatura. Se utiliza como tensión nominal del mismo.

Existen 2 principales o más utilizados métodos para conocer la eficiencia de un panel en ambos métodos es indispensable conocer el punto de potencia máxima (P_{max}) del panel.

Eficiencia en la conversión de la energía: Corresponde al porcentaje de energía eléctrica generada en relación a la cantidad de energía luminosa recibida desde el sol, cuando el panel se encuentra conectado a un circuito eléctrico y está dada por la fórmula siguiente:

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \times A_c}$$

Donde:

E : Nivel de radiación sobre la superficie del panel ($\frac{W}{m^2}$), bajo condiciones estándar.

A_c : Superficie del panel fotovoltaico (m^2).

Eficiencia de Factor de forma: Define la eficiencia de un panel solar, relacionando el punto de máxima potencia, dividido por el producto entre el voltaje a circuito abierto y la corriente de cortocircuito. Como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

V_{oc}: Voltaje a circuito abierto

I_{sc}: Corriente de cortocircuito

Según Van Helden, et al. (2004) los módulos fotovoltaicos absorben hasta un 80% de la irradiación solar, pero solo entre el 5% y 20% de la energía incidente es convertida en electricidad, el resto se convierte en calor. Como se mencionó anteriormente según Du, et al. (2016) los módulos con temperatura por arriba de los 40°C tiene una pérdida en la conversión de radiación en electricidad entre un 4-20%. Diversas investigaciones se han orientado en la búsqueda de soluciones en este sentido, en una revisión a los últimos avances referente a esta problemática Muhammad, (2020) señala que el módulo fotovoltaico puede ser enfriado con materiales que cambien de fase incorporados en la parte posterior del módulo de tal forma que absorban el calor del módulo en forma de calor latente, además encuentra que usando este tipo de enfriamiento pasivo con materiales de estas características, con nanopartículas o combinados se puede alcanzar un aumento en la eficiencia de hasta un 20%. Por otro lado, Yang, et al. (2019) analiza un sistema de enfriamiento para módulos fotovoltaicos con un sistema de aspersión el cual rocía agua en la parte posterior del mismo, el agua es reciclada y se envía a un intercambiador de calor geotérmico en forma de “U”, reporta un aumento en la eficiencia del 14.3% y un tiempo de recuperación de 8.7 años para el equipo de enfriamiento. Una de las soluciones más prometedoras es la utilización de sistemas híbridos PV-T los cuales son utilizados para generar energía eléctrica y para el calentamiento de un fluido,

como puede ser el agua de servicio de los edificios o residencias. Reddy, et al. (2015) hace una revisión de diferentes investigaciones, en las cuales se utilizan como fluido de enfriamiento aire o agua por medio de convección natural o forzada entre otros métodos.

2.8. Micro inversores

Los micro inversores son dispositivos utilizados en los SFV la función principal de estos es la de convertir la corriente continua generada por el o los módulos fotovoltaicos en corriente alterna.

Los principales parámetros que los fabricantes de inversores proporcionan en su ficha técnica son los siguientes:

Potencia nominal y máxima: Siendo ésta un porcentaje de sobrecarga que el equipo es capaz de soportar durante un determinado período de tiempo (indicado por el fabricante).

Ventana de búsqueda de punto de máxima potencia (MPP): Es el rango de voltaje en los que el inversor usa un algoritmo.

Voltaje máximo de entrada: El voltaje máximo que el inversor puede soportar sin sufrir daños.

Voltaje nominal de salida: Es el voltaje de la red a la que debe ser conectado el inversor.

Eficiencia máxima: Es el valor mayor entre la potencia de salida y la potencia de entrada.

Umbral de arranque: Es la potencia de entrada necesaria para que el inversor comience el proceso de conversión.

Los principales tipos de inversores utilizados en sistemas fotovoltaicos interconectados a la red son los siguientes.

Inversor central: Se utiliza para arreglos de módulos fotovoltaicos conectados en serie, aunque se pueden utilizar arreglos en paralelos con ayuda de diodos, tiene la desventaja que la producción mayor será la de la del módulo que menor producción.

Micro inversor: Son instalados en cada módulo tienen la ventaja de que la producción de los módulos es independiente de los demás es decir no hay pérdida de energía cuando la producción de un módulo disminuye. Permiten el monitoreo individual de los módulos.

Existen también los optimizadores de potencia son dispositivos que se colocan a los módulos y a su vez estos van hacia el inversor central o string. Al igual que los micro inversores, los optimizadores de potencia reducen el impacto del sombreado del panel en el rendimiento del sistema, y también ofrecen monitoreo del rendimiento del cada panel.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se detalla el método empleado para la obtención de los resultados; se describe la secuencia de las diferentes etapas del análisis, los criterios utilizados y se especifican las diferentes herramientas estadísticas utilizadas para el manejo de la información.

Como primer paso se obtiene la generación de los sistemas fotovoltaicos solares para lo cual se utiliza el programa SAM el cual calcula el rendimiento, el costo y las medidas financieras de un sistema de energía renovable, cabe mencionar que se caracterizaron diferentes tipos de configuración de sistemas fotovoltaicos variando el tipo de módulo, el tipo de inversor, la inclinación y la orientación, una vez obtenida la generación para las diferentes configuraciones, con esta información se alimenta a un simulador de costos de tarifa eléctrica que se aplica en la ciudad de Mexicali la cual se denomina tarifa 1F, este simulador tarifario también fue alimentado con una base de datos con los consumos reales de una muestra estadísticamente representativa de los usuarios del servicio eléctrico residencial de la ciudad de Mexicali, B. C. entre las funciones del simulador resta la generación del SFV al consumo real del usuario y genera tanto el costo total de la facturación a pagar como el ahorro obtenido al utilizar un SFV, siendo esta nuestra variable de respuesta para el siguiente eslabón en la metodología que es el Análisis y Diseño de Experimentos con la cual se validan estadísticamente los resultados obtenidos en el simulador tarifario y se utiliza además para determinar los

factores de un SFV que son significativos para obtener un mejor ahorro económico en el costo eléctrico de la facturación. Con este tipo de análisis también se logra conocer estadísticamente cuál es la configuración óptima de un SFV para los usuarios del servicio eléctrico del sector residencial de la ciudad de Mexicali, B. C. tomando como meta lograr el mayor ahorro en el costo eléctrico. Para el análisis y diseño de experimentos se utiliza el método factorial 2^4 y se utiliza el programa MINITAB como apoyo para el manejo de la información y para el desarrollo el análisis de varianza (ANOVA), con el cual se determinó los factores que tienen un efecto en la media de la variable de respuesta. En la representación de resultados, se utilizó la gráfica de cubo la cual analiza las medias del sistema, este tipo de gráfica ayuda a determinar la configuración que brinda el mayor ahorro económico.

La Figura 15 representa el proceso e instrumentos que se utilizaron para la obtención de resultados.

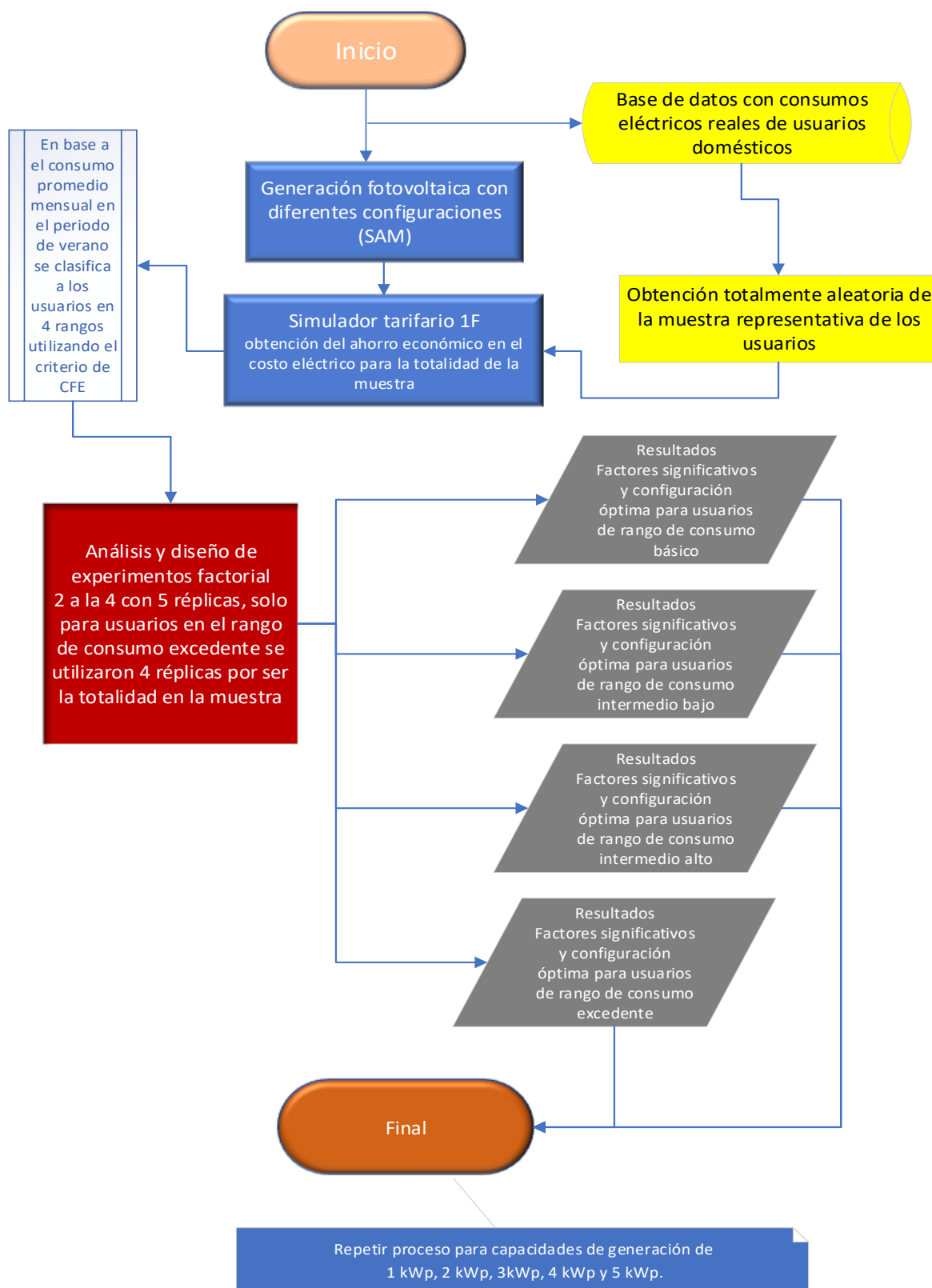


Figura 15: Diagrama de flujo del proceso de obtención de resultados

3.1. Obtención de la muestra representativa

Para el cumplimiento de los objetivos y la obtención de resultados de esta investigación se utilizó información proporcionada por la dirección del programa ASI respecto consumos eléctricos mensuales de todos los usuarios del sector residencial de la ciudad de Mexicali. Es importante aclarar que la información personal de los usuarios siempre estuvo en anonimato y solo se requirió un número de identificador para el usuario, el consumo mensual en kWh y el tipo de tarifa. Con la finalidad de obtener una muestra representativa del sector se utilizó la fórmula para el cálculo del tamaño de una muestra para poblaciones finitas, la cual se muestra a continuación.

$$n = \frac{NZ^2p(1-P)}{Z^2p(1-P) + (\Delta-p)^2 (N-1)}$$

Fórmula para la obtención de una muestra estadística para poblaciones finitas

Dónde:

N= 361,927 (usuarios del servicio residencial eléctrico en la ciudad de Mexicali 2018)

Z= 2.57 (para un nivel de confianza del 99%)

Δ -p= 5% (porcentaje de error)

P= 0.85

n= tamaño de la muestra de la población a evaluar

Al aplicar la fórmula anterior se obtiene una muestra requerida de 336 usuarios, sin embargo, al contar con suficiente información, la muestra se redondeó a 400 usuarios.

3.2. Simulador SAM (System Advisor Model)

Para el desarrollo de esta investigación es necesario conocer la generación eléctrica producida por un sistema fotovoltaico con cada una de las diferentes configuraciones propuestas, para esto se utilizó el simulador SAM, debido a su capacidad de simular la generación eléctrica de diferentes tipos de sistemas de energía renovable como la solar-térmica, eólica, geotérmica, biomasa y por supuesto solar fotovoltaico. El algoritmo básico del funcionamiento de SAM para los SFV se muestra en la Figura 16.

Entre los principales cálculos que realiza SAM para los SFV está el cálculo de los ángulos solares a partir de los datos de fecha, hora y posición geográfica del archivo meteorológico como primer paso determinar las coordenadas elípticas del lugar que definen la posición del arreglo con relación al sol. SAM utiliza las coordenadas de la eclíptica en lugar de las coordenadas ecuatoriales para incluir el efecto de la inclinación de la tierra en los cálculos del ángulo solar y utiliza el algoritmo de Michalsky para calcular la posición del sol utilizando las siguientes fórmulas. (Michalsky,1988).

Longitud media (L) ($0 \leq L < 360^\circ$):

$$280.46 + 0.9856474 n \quad (n = \text{día juliano})$$

Anomalía media(g) en radianes ($0 \leq g < 2\pi$):

$$\frac{\pi}{180} (357.528 + 0.9856003n)$$

Longitud elíptica (l_e) en radianes ($0 \leq l_e < 2\pi$):

$$l_e = \frac{\pi}{180} [L + 1.915 \sin(g) + 0.02 \sin(2g)]$$

Oblicuidad elíptica en radianes:

$$ep = \frac{\pi}{180} (23.439 - 0.0000004n)$$

El siguiente paso es calcular las coordenadas celestes, que son la ascensión y la declinación correctas.

La ascensión directa (ra) en radianes:

$$ra = \begin{cases} \arctan\left(\frac{\cos(ep) \operatorname{sen}(le)}{\cos(le)}\right) + \pi & \text{si } \cos(le) < 0 \\ \arctan\left(\frac{\cos(ep) \operatorname{sen}(le)}{\cos(le)}\right) + 2\pi & \text{si } \cos(ep) \operatorname{sen}(le) < 0 \end{cases}$$

El ángulo de declinación en radianes se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\delta = \arcsen(\operatorname{sen}(ep) \operatorname{sen}(le))$$

Para el cálculo de la posición del Sol tomando en cuenta las coordenadas locales, se debe calcular primeramente el tiempo que definen las estrellas y no el Sol, conocido como el tiempo sideral de Greenwich central (gmst, por sus siglas en inglés)

$$gmst = 6,697375 + 0,0657098242 * n + \text{hora(UT)} \quad (0 \leq gmst < 24h)$$

A continuación, se determinará el tiempo sideral de la longitud media local (lmst, por sus siglas en inglés) en horas ($0 \leq lmst < 24$):

$$lmst = gmst + \frac{\text{longitud}}{15}$$

El ángulo horario (HA) en radianes ($-\pi < HA < \pi$):

$$b = 15 \frac{\pi}{180} l m s t - r a$$

$$H A = \begin{cases} b + 2\pi & \text{sí } b < -\pi \\ b - 2\pi & \text{si } b > \pi \end{cases}$$

El ángulo de elevación solar (α) en radianes sin corrección por refracción es:

$$a = \sin \delta \sin \left(\frac{\pi}{180} \text{latitud} \right) + \cos \delta \cos \left(\frac{\pi}{180} \text{latitud} \right) \cos H A$$

$$\alpha = \begin{cases} \arcsen a & \text{sí } -1 < a \leq 1 \\ \frac{\pi}{2} & \text{sí } a > 1 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{sí } a < -1 \end{cases}$$

el ángulo azimutal solar (γ) en radianes:

$$a = \frac{\sin \alpha \sin \left(\frac{\pi}{180} \text{latitud} \right) - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \left(\frac{\pi}{180} \text{latitud} \right)}$$

$$b = \begin{cases} \arcsen a & \text{sí } -1 < a \leq 1 \\ \pi & \text{sí } \cos \alpha = 0 \text{ o si } a < -1 \\ 0 & \text{sí } a > 1 \end{cases}$$

$$\gamma = \begin{cases} b & \text{sí } H A < -\pi \\ \pi - b & \text{sí } -\pi \leq H A < 0 \text{ o si } H A \geq \pi \\ \pi + b & \text{sí } 0 < H A < \pi \end{cases}$$

El ángulo cenital solar (Z) en radianes es:

$$Z = \frac{\pi}{2} - \alpha$$

SAM puede calcular la generación de corriente directa del módulo fotovoltaico mediante los siguientes 5 métodos:

- Simple Efficiency Module Model.
- California Energy Commission (CEC) Performance Model with Module Database.
- CEC Performance Model with User Entered Specifications.
- IEC 68153 Single Diode Model, Sandia PV Array Performance.
- Model with Module Database.

En esta investigación se utiliza el método “California Energy Commission (CEC) Performance Model with Module Database” el modelo calcula la generación de módulo utilizando ecuaciones con parámetros almacenados en la librería del módulo CEC de SAM. Esta librería contiene información proporcionada por la Comisión de Energía de California. El proceso y las fórmulas utilizadas por este método se encuentran detalladas en el documento SAM “Photovoltaic Model Technical Reference Update” (Gilman, et al. 2018). En este proyecto se trabajó con el módulo Jinko Solar Co. Ltd JKM370M-72L de tecnología Monocristalino y con el modelo Canadian Solar Inc. CS3U-370P de tecnología policristalino, el criterio para esta selección fue en base a los requerimientos del programa ASI “Lineamientos para Sistemas Fotovoltaicos Interconectados” emitido por la Unidad Coordinadora del Fideicomiso 728 FIPATERM. (ASI, 2018).

Para el cálculo de la energía de corriente alterna a la salida de los inversores SAM tiene la opción de seleccionar 3 métodos diferentes que son los siguientes:

- Inverter CEC Database
- Inverter Datasheet
- Inverter Part Load Curve

El método seleccionado en esta investigación fue “Inverter CEC Database” que es un método empírico que utiliza información proporcionada por los fabricantes con 4 coeficientes obtenidos empíricamente C_0 , C_1 , C_3 , C_4 el modelo fue validado en campo y en laboratorio con un error en la eficiencia típica de 0.1%. (King, 2007). Para la producción de la generación fotovoltaica de este proyecto se seleccionó el micro inversor Enphase Energy Inc. IQ7PLUS-72-x-US y los inversores centrales de la serie Fronius Galvo y se repitió el criterio para su selección en base a los Lineamientos para Sistemas Fotovoltaicos Interconectados del programa ASI.

Como parte de la configuración del SFV se seleccionaron dos tipos de orientación una hacia el sur y otra hacia el oeste si bien es de esperarse que se tenga una mayor generación en los SFV orientados hacia el sur, es de suponer que con los resultados obtenidos al finalizar esta investigación pueda esto quedar demostrado estadísticamente y además al analizar el ahorro económico se podrá determinar las diferencias en este sentido.

Por último, se proponen 2 tipos de inclinación a 20° y a 32° típicamente se utiliza la inclinación a 32° que es la latitud de la localidad, las otras opciones que se utilizan es usar un ángulo de inclinación promedio entre la latitud y el ángulo para una incidencia normal sobre el módulo en los solsticios de invierno y verano en un análisis exploratorio se determinó que tiene un mayor impacto el ángulo promedio tomando en cuenta el solsticio de verano y se selección hacer el análisis a 20° .

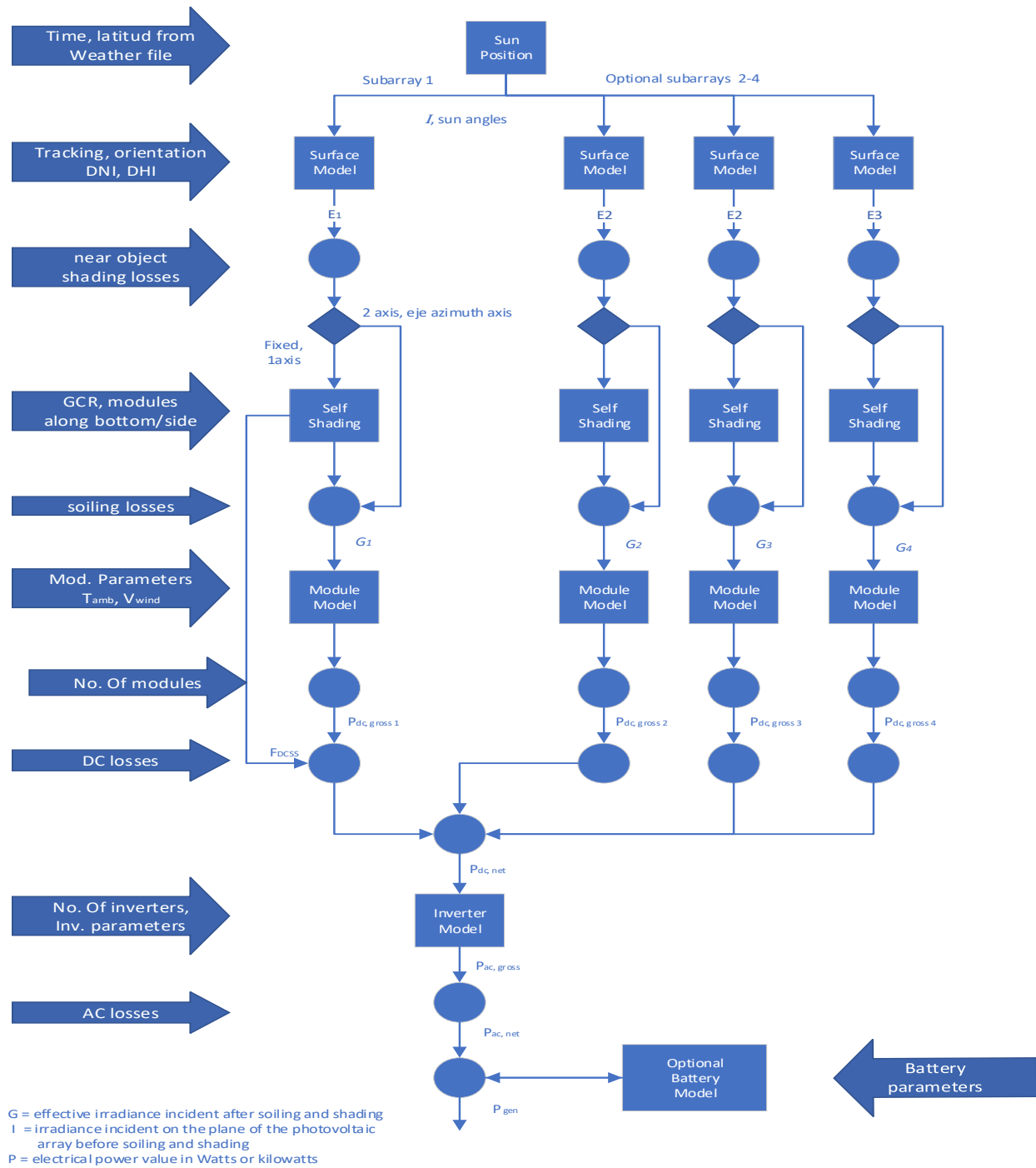


Figura 16: algoritmo básico de SAM para SFV
 Adaptado de: (Gilman, 2018) *SAM Photovoltaic Model Technical Reference Update*
<https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/67399.pdf>

3.3. Descripción del simulador de tarifa eléctrica 1F

Para la obtención de los valores de nuestra variable de respuesta en este caso es el ahorro económico anual de los usuarios residenciales de la ciudad de Mexicali, B. C., es necesario conocer el monto económico por facturación eléctrica antes y después de instalar un sistema solar fotovoltaico. Para lograr esto, fue necesaria la elaboración de un simulador en Microsoft Excel con macroinstrucciones en Microsoft Visual Basic, entre las funciones de dicho simulador se cuenta con la posibilidad de calcular para un determinado consumo eléctrico, el monto de la facturación, además de obtener los ahorros económicos anuales para diferentes configuraciones y capacidades de sistemas fotovoltaicos.

Este simulador se alimenta con datos externos como son los consumos eléctricos mensuales en kWh de los usuarios de la muestra representativa de los usuarios del servicio eléctrico de la ciudad de Mexicali B. C. y están alojados en la hoja de cálculo llamada "CONSUMOS (kWh)". La siguiente información que se ingresa al simulador es la generación producida mensualmente por el sistema fotovoltaico en las 16 posibles combinaciones utilizadas en esta investigación, los valores de la generación obtenida con el programa SAM se ingresa en la hoja de cálculo llamada "GENERACIÓN". Los últimos datos a ingresar es el precio del kWh para los diferentes meses del año y para los diferentes rangos de consumo, esta información se ingresa en las hojas de cálculo "Consumo (\$)" que calcula la facturación eléctrica sin SFV y "Consumo PV (\$)" que calcula la facturación eléctrica con SFV.

El costo del consumo eléctrico en la ciudad de Mexicali se da mediante el cobro escalonado de consumo de kWh la tarifa que se aplica es la 1F ya que esta se aplica en ciudades cuya temperatura media mensual mínima es mayor a 33°C (CFE, 2020) y cuenta con dos esquemas uno para el periodo de invierno que cubre los meses de noviembre a abril y otro esquema tarifario para el periodo de verano los rangos de consumo se muestra en la Tabla 8 y Tabla 9 en la Figura 18 se muestra el algoritmo que utiliza el programa para el cálculo del costo eléctrico para el periodo de invierno.

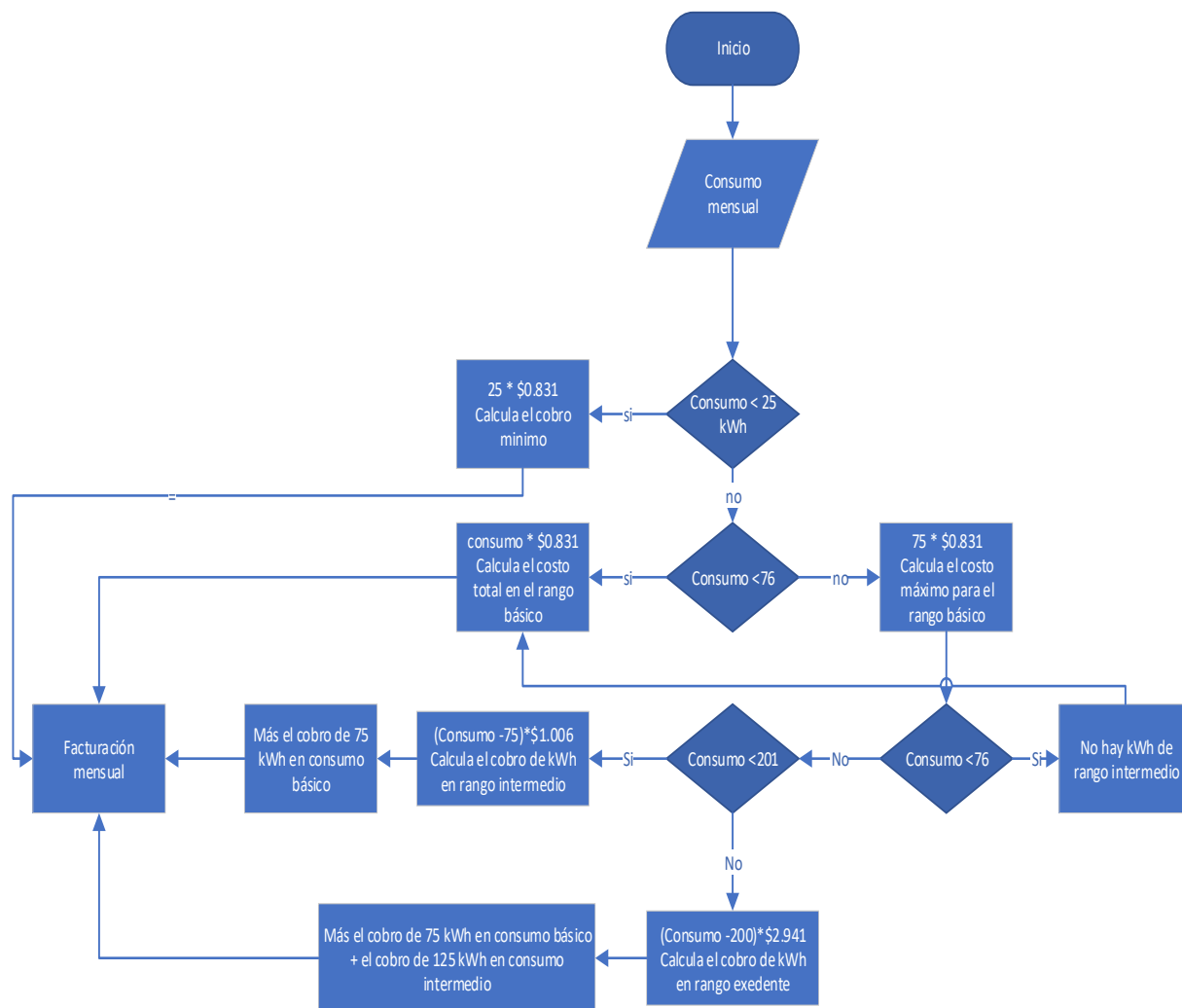


Figura 18: algoritmo para facturación en invierno

Para el periodo de verano los rangos son más amplios, además, el costo por el kWh es más barato y se agrega otro rango de consumo, en la Figura 19 se muestra el algoritmo para el cálculo de la facturación para este periodo

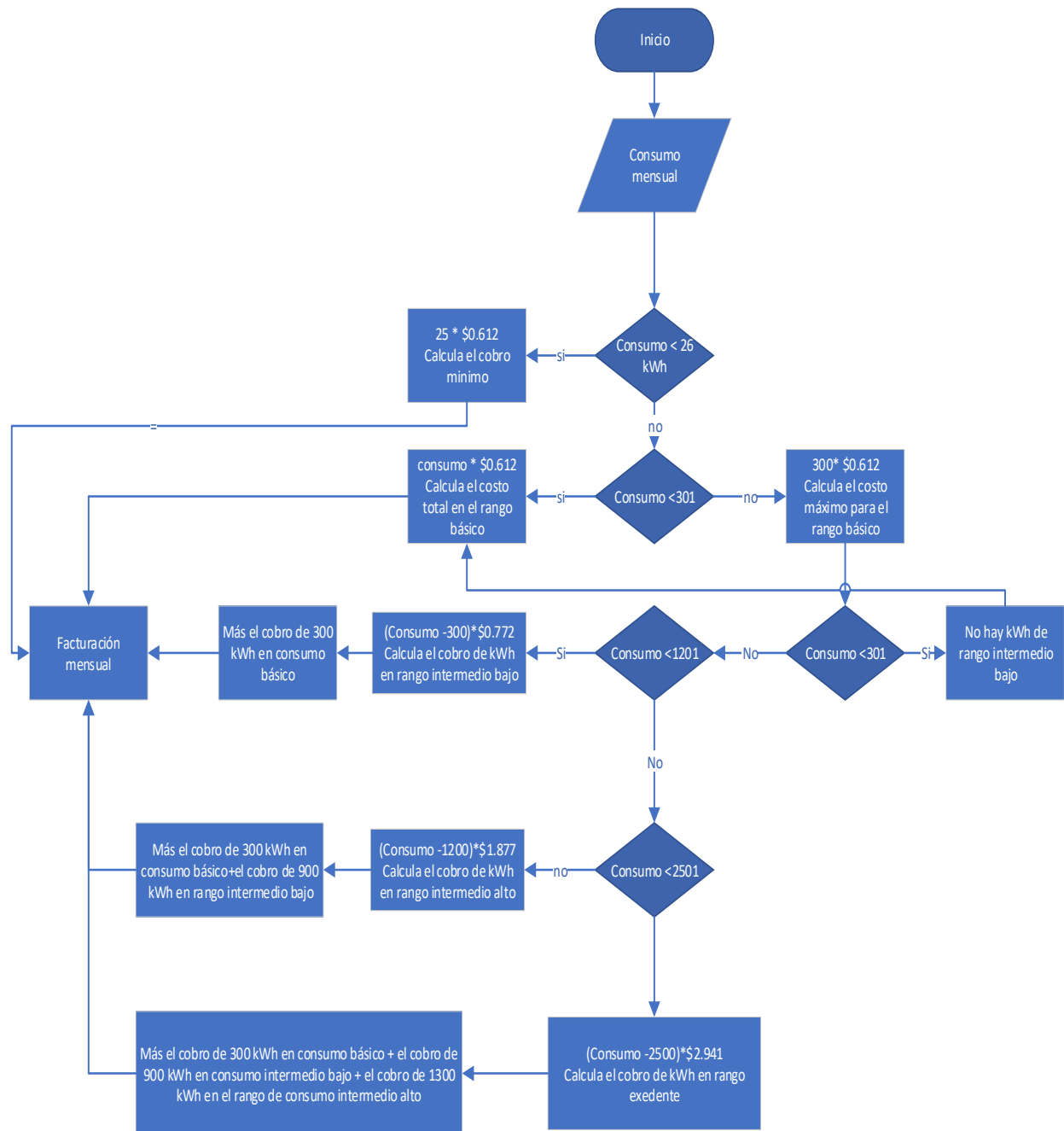


Figura 19: Algoritmo para la facturación en verano

Como se mencionó anteriormente se pretende evaluar el impacto en el costo eléctrico al utilizar SFV por lo cual se tiene que tomar en cuenta la generación mensual de los mismo y restarla al consumo, como hay la posibilidad que en algunos meses la generación sobrepase el consumo, esta energía restante se debe utilizar en los meses siguientes restándole al consumo de estos, el simulador utiliza un banco de energía para realizar esta operación en la Figura 20 se muestra el algoritmo utilizado por el simulador.

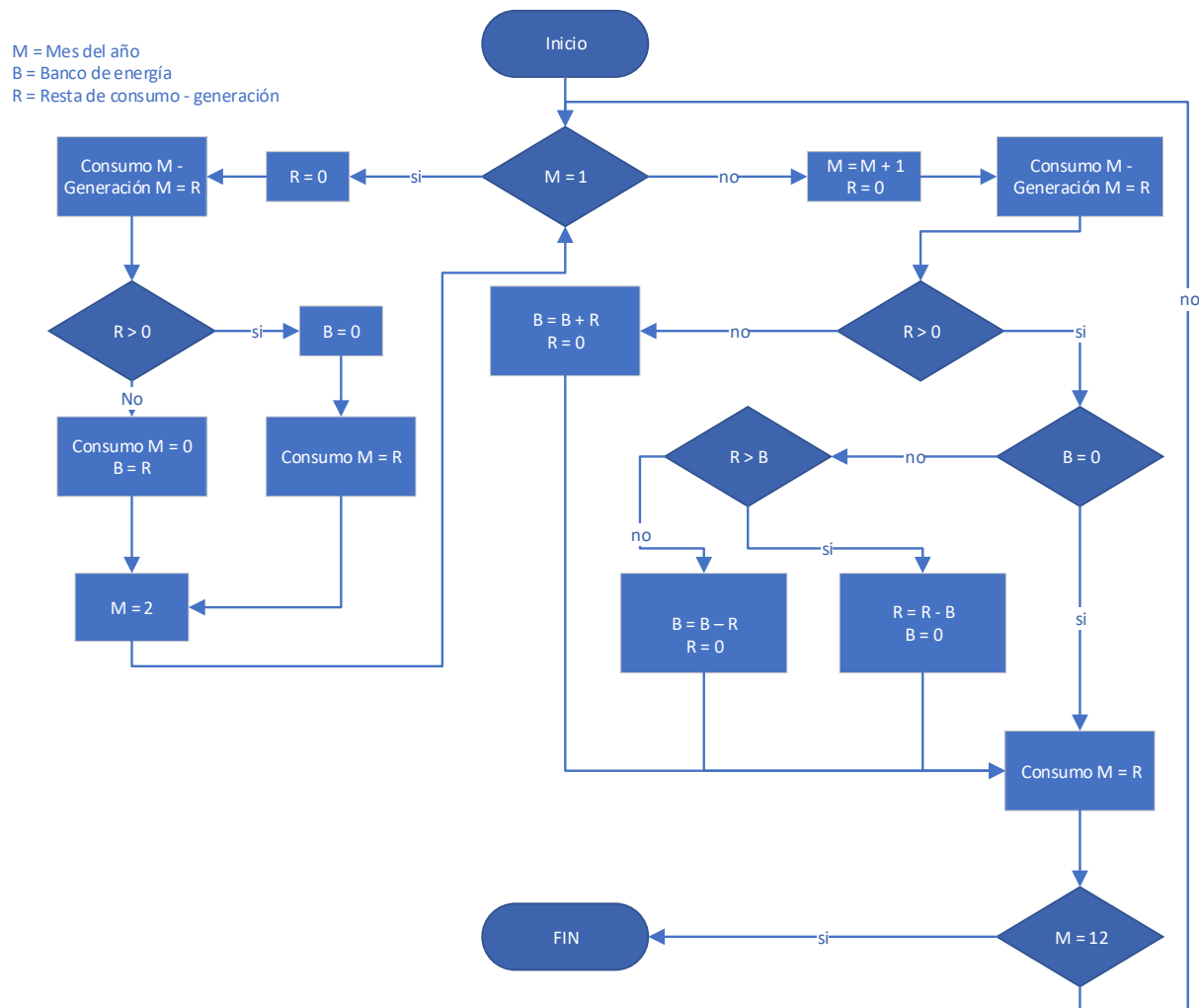


Figura 20: Algoritmo banco de energía

El simulador realiza el cálculo del ahorro para las 16 posibles configuraciones de SFV y para la totalidad de la muestra es decir para los 400 usuarios y para 5 capacidades de generación diferentes teniendo que repetirse el procedimiento 32,000 veces por lo que fue necesario la automatización por medio de una instrucción macro.

3.4. Diseño de Experimentos

Para la búsqueda y validación de resultados de esta investigación se utilizó la herramienta estadística de Diseño de Experimentos (DOE por sus siglas en inglés), el cual es un método utilizado en la industria para la optimización de procesos o para la resolución de algún problema; esta herramienta también es utilizada en la investigación, “El diseño de experimento es válido en el campo de la investigación científica o aplicada, ya que el fin de cuentas, el objetivo es generar nuevas ideas y mejores respuestas a las interrogantes del investigador sobre el objeto de estudio” (Pulido, et ál.,2012). Es por esto que en esta investigación se decidió validar los resultados por medio de esta herramienta estadística. “El enfoque estadístico del diseño de experimental es necesario si se quieren sacar conclusiones significativas de los datos.” (Mongomery, 2004. p. 11).

En la mayoría de los DOE se utilizan 4 elementos principales que son los factores, los niveles de cada uno de los factores, la variable de respuesta y las réplicas. Los factores utilizados fueron la orientación con sus niveles sur y oeste, el tipo de módulo fotovoltaico con sus niveles monocristalino y policristalino, el tipo de inversor fue otro factor con sus niveles micro inversor e inversor central como sus niveles y por último la inclinación considerando ángulos de 20° y 32° cómo sus niveles.

3.4.1. Diseño factorial completo 2^k

Cuando en un experimento se tienen varios factores que son de interés, debe emplearse el diseño experimental factorial. El objetivo de un diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas además de determinar la combinación de niveles y factores en que el proceso se desempeñe mejor. En general la familia de diseños factoriales 2^k consiste en k factores todos con 2 niveles de prueba, el número de tratamientos va implícito en el nombre del diseño factorial así, un diseño factorial 2^4 que es el que se utiliza en esta investigación tendría 16 tratamientos y el número de corridas se obtiene al multiplicar el número de tratamientos por el número de réplicas, en este trabajo se utilizarán 5 réplicas por lo que se realizarán 80 corridas para cada análisis que se realice.

La obtención de los resultados se logra mediante el análisis de la varianza ANOVA que es la técnica central en el análisis de datos experimentales con la que se separa la variación total, en cada una de las fuentes de variación del experimento. Para llegar a la construcción de la tabla de ANOVA se sigue el procedimiento mostrado en el diagrama de la Figura 21

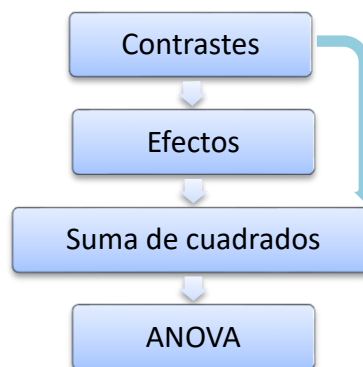


Figura 21: Pasos para llegar al ANOVA en un diseño factorial 2^k

Para los diseños factoriales 2^k los contrastes es una combinación lineal

$$C = \sum_{i=1}^{2^k} c_i Y_i \text{ con } \sum c_i = 0$$

donde Y_i representa un término en la notación de Yates en la Tabla 4 se muestra la notación de Yates para el diseño factorial 2^4 y a continuación se muestra como muestra el efecto para el termino A.

Así para el contraste A =[a+ab+ac+abc+ad+abd+acd+abcd-(1)-b-c-bc-d-bd-cd-bcd]

Tabla 4: Notación de Yates para un diseño factorial 2^4

Tratamiento	Notación de Yates	A	B	C	D
1	(1)	-	-	-	-
2	a	+	-	-	-
3	b	-	+	-	-
4	ab	+	+	-	-
5	c	-	-	+	-
6	ac	+	-	+	-
7	bc	-	+	+	-
8	abc	+	+	+	-
9	d	-	-	-	+
10	ad	+	-	-	+
11	bd	-	+	-	+
12	abd	+	+	-	+
13	cd	-	-	+	+
14	acd	+	-	+	+
15	bcd	-	+	+	+
16	abcd	+	+	+	+

la suma de cuadrados para cualquier contraste está dada por:

$$SC_c = \frac{(\sum_{i=1}^{2^k} c_i Y_i)^2}{n \sum_{i=1}^{2^k} c_i^2}$$

Los efectos los calculamos a partir de los contrastes así calculando el efecto para A es:

$$\text{Efecto } A = \frac{1}{n2^{k-1}} [\text{contraste de } A]$$

y la su suma de cuadrados con un grado de libertad está dada por:

$$SC_A = \frac{1}{n2^{k-1}} [\text{contraste de } A]^2$$

donde n es número de réplicas del experimento.

La suma de cuadrados totales en un diseño factorial 2^k está dada por:

$$SC_T = \sum_{i=1}^{n2^k} Y_i^2 - \frac{Y.^2}{n2^k}$$

y tiene $n2^k - 1$ grados de libertad.

La suma de cuadrados del error SC_E se obtiene por diferencia

$$SC_E = SC_T - SC_A - \dots SC_{AB} - SC_{(k-1)k} - SC_{ABC} - \dots SC_{AB \dots K}$$

y tiene $2^k (n-1)$ grados de libertad.

Con la información anterior ya es posible construir la tabla de ANOVA para cualquier diseño factorial 2^k ($k \leq 5$) como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: ANOVA general diseño factorial 2^k

F.V.	Suma de cuadrados	G.L.	CM	F_0	F.critica
Efecto A . . .	$\sum_{i=1}^a \frac{Y_{i...}^2}{bc \dots kr} - \frac{Y^2}{N}$	a-1	$\frac{SC_A}{GL_A}$	$\frac{CM_A}{CM_E}$	F_{α, GL_A, GL_E}
Efecto K . . .	$\sum_{m=1}^k \frac{Y^2_{...m.}}{abc \dots kr} - \frac{Y^2}{N}$	k-1	$\frac{SC_k}{GL_B}$	$\frac{CM_K}{CM_E}$	F_{α, GL_A, GL_E}
Efecto AB . . .	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{c \dots kr} - \frac{Y^2}{N} - SC_A - SC_B$	(a-1)(b-1)	$\frac{SC_{AB}}{GL_{AB}}$	$\frac{CM_{AB}}{CM_E}$	F_{α, GL_A, GL_E}
Efecto K(K-1)	$\sum_{p=1}^f \sum_{m=1}^k \frac{Y^2_{...pm.}}{abc \dots r} - \frac{Y^2}{N} - SC_{(k-1)} - SC_k$	(f-1)(k-1)	$\frac{SC_{(k-1)k}}{GL_{AB}}$	$\frac{CM_{(k-1)k}}{CM_E}$	F_{α, GL_A, GL_E}
Efecto ABC	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{o=1}^c \frac{Y_{ijo.}^2}{\dots okr} - \frac{Y^2}{N} - SC_{AB} - SC_{AC} - SC_{BC}$	(a-1)(b-1) (c-1)	$\frac{SC_{ABC}}{GL_{ABC}}$	$\frac{CM_{ABC}}{CM_E}$	F_{α, GL_A, GL_E}
Efecto AB...K	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \dots \sum_{p=1}^f \sum_{m=1}^k \frac{Y_{ij...pm.}^2}{r} - \frac{Y^2}{N} - SC_A - \dots SC_{AB} - \dots SC_{AB \dots K-1}$	(a-1)(b-1) ...(k-1)	$\frac{SC_{AB \dots K}}{GL_{AB \dots K}}$	$\frac{CM_{AB \dots KC}}{CM_E}$	F_{α, GL_A, GL_E}
Error	$SC_T - SC_A - \dots SC_{AB} - SC_{(k-1)k} - SC_{ABC} - \dots SC_{AB \dots K}$	Ab...K(r-1)	$\frac{SC_E}{GL_E}$		
Total	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \dots \sum_{m=1}^k \sum_{l=1}^r Y_{ij...kl}^2 - \frac{Y^2}{N}$	N-1			

3.4.2. Descripción de factores y niveles

Para el desarrollo de un DOE los factores y niveles son de suma importancia, se le llama factor a la variable que será estudiada y se observa cómo influye en la variable de respuesta, los niveles son los valores que se asignan a los factores. En este análisis se eligieron cuatro factores con dos niveles para cada factor, uno de los factores fue la inclinación, y se consideraron valores de 20° y 32° de inclinación como los niveles, un segundo factor es la orientación con un nivel al sur y el otro nivel se consideró una orientación al oeste, el tipo tecnología usada en los módulos fotovoltaicos fue considerado como un factor más, los módulos del tipo monocristalino y el tipo policristalino son tomados como los niveles para este factor, el inversor utilizado en el SFV es un factor evaluado, el inversor central y el micro inversor son los niveles elegidos. En la Tabla 6 se muestran los factores y niveles asignados.

Tabla 6: Factores y niveles

	Descripción del factor	Nivel 1	Nivel 2
Factor 1	Inclinación	20°	32°
Factor 2	Orientación	Sur	Oeste
Factor 3	Tecnología	Monocristalino	Policristalino
Factor 4	Inversor	Central	Micro inversor

Nota: Tabla de factores y niveles utilizados en análisis factorial

3.4.3. Definición de la variable de respuesta.

Uno de los objetivos de este trabajo de investigación es evaluar el impacto en el costo eléctrico que tienen los SFV interconectados a la red en el sector residencial. Para el cumplimiento de este objetivo es necesario conocer la facturación real por consumo eléctrico sin SFV y la facturación simulada al instalar un SFV, una de las maneras de evaluar el impacto que tiene un SFV en el costo eléctrico en el sector residencial de la ciudad de Mexicali es medir el ahorro económico obtenido al instalar un SFV, por tal motivo. es que se seleccionó el ahorro económico anual en la facturación del costo eléctrico al instalar un SFV como la variable de respuesta para los diferentes DOE efectuados. Para el cálculo de nuestra variable de respuesta se utilizó el simulador de facturación eléctrica para la tarifa 1F.

3.4.4. Réplicas

En la utilización de un diseño de experimentos son muy importantes las réplicas que “es correr más de una vez un tratamiento o combinación de factores” (Pulido, et ál., 2012) para nuestro análisis se utilizaron 5 réplicas para los 3 primeros rangos de consumo (básico, intermedio bajo e intermedio alto) y 4 réplicas para el rango de consumo excedente, esto porque ser la totalidad de usuarios en este rango, en la muestra obtenida.

En la Tabla 7 se muestra la matriz del arreglo factorial correspondiente a una réplica, en las columnas se localizan los factores (módulo, orientación, Inversor, Inclinación), cada una de las filas representa una combinación entre factores y niveles o tratamiento con su valor correspondiente en un diseño factorial completo 2^4 la totalidad de combinaciones son 16 lo que corresponde a sólo una réplica.

Tabla 7: Matriz del arreglo factorial 2^4

Módulo	Orientación	Inversor	Inclinación
Monocristalino	Sur	Micro	20
Policristalino	Sur	Micro	20
Monocristalino	Oeste	Micro	20
Policristalino	Oeste	Micro	20
Monocristalino	Sur	Central	20
Policristalino	Sur	Central	20
Monocristalino	Oeste	Central	20
Policristalino	Oeste	Central	20
Monocristalino	Sur	Micro	32
Policristalino	Sur	Micro	32
Monocristalino	Oeste	Micro	32
Policristalino	Oeste	Micro	32
Monocristalino	Sur	Central	32
Policristalino	Sur	Central	32
Monocristalino	Oeste	Central	32
Policristalino	Oeste	Central	32

Nota: Matriz del diseño factorial 2^4 correspondiente a una réplica

Cuando se maneja un volumen significativo de información es recomendable apoyarse con algún software estadístico para procesar, analizar y mostrar los resultados, uno de los programas más completos en este rubro es el programa MINITAB con él se “puede examinar datos actuales y del pasado para buscar tendencias y predecir patrones, descubrir relaciones ocultas entre las variables, visualizar las interacciones de los datos e identificar factores importantes para responder incluso a las preguntas y problemas más desafiantes” (MINITAB,2019).

MINITAB tiene diferentes opciones para estudios estadísticos, una de ellas es el diseño de experimentos y está a su vez cuenta con varias opciones en esta investigación se eligió el diseño factorial 2^4 que es el recomendable cuando se manejan análisis entre 2 y 5 factores con 2 niveles.

3.5. Clasificación de rangos de consumo eléctrico

La ciudad de Mexicali, por las condiciones climáticas las diferencias de consumo eléctricos entre el periodo de verano y el resto de año es considerable. CFE utiliza dos criterios para evaluar la facturación de los usuarios de la tarifa 1F en la ciudad de Mexicali, uno para el periodo de invierno que considera los meses noviembre, diciembre enero, febrero, marzo y abril y otro para el periodo de verano que cubre los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre. En las Tabla 8 y Tabla 9 se observa de manera escalonada los valores para rango.

Tabla 8: Rangos en invierno

Periodo de invierno	Rangos de consumo
Consumo básico	De 0 a 75 kWh
Consumo intermedio	De 76 a 300 kWh
Consumo excedente	Más de 300 kWh

Nota: Rangos de consumo para el periodo de invierno.

Adaptado de: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/Tarifa1F.aspx>

Tabla 9: Rangos en verano

Periodo de verano	Rangosa de consumo	Porcentaje de usuarios
Consumo básico	De 0 a 300 kWh	7.5 %
Consumo intermedio bajo	De 301 a 1200 kWh	75 %
Consumo intermedio alto	DE 1201 a 2500 kWh	16.5 %
Consumo excedente	Más de 2500 kWh	1 %

Nota: Rangos de consumo para el periodo de verano.

Adaptado de: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/Tarifa1F.aspx>

Como los rangos de consumo que utiliza CFE son diferentes para el periodo de invierno y para los meses de verano y tomando en cuenta que en la ciudad de Mexicali los consumos son mucho más significativos en el periodo de verano, se decide considerar a los usuarios del sector residencial por su consumo promedio en los meses de verano, este criterio se utilizó para clasificar a los usuarios de la muestra estadística con la que se trabajó en el simulador tarifario.

CAPÍTULO 4

4. Análisis de resultados

En base a los rangos de consumo descritos anteriormente, se decide hacer un diseño de experimentos para cada nivel de consumo con 4 factores y cada factor con 2 niveles. Se utiliza un diseño de experimentos factorial completo 2^4 en el cual la variable de respuesta es el ahorro económico anual que obtienen los usuarios del servicio eléctrico residencial al instalar un sistema fotovoltaico en la ciudad de Mexicali B. C.

Una vez que se han determinado los factores y niveles, se utiliza el programa para análisis estadísticos MINITAB, para realizar el experimento con diferentes rangos de consumo y distintas capacidades de sistemas fotovoltaicos. A continuación, se muestran los resultados obtenidos, para sistemas con capacidades de 1 kWp, 2 kWp, 3 kWp, 4 kWp y 5 kWp.

4.1. Análisis y resultados para capacidad de 1 kWp

En esta sección del documento se muestran desglosados los resultados obtenidos para los usuarios del sector eléctrico residencial en la ciudad de Mexicali B. C. al instalar un SFV con 1 kWp de generación en los diferentes rangos de consumo establecidos por CFE, para el periodo de verano.

4.1.1. Consumo básico con SFV de 1 kWp

Análisis para usuarios con consumos menores de 300 kWh en promedio mensual en los meses de verano con un sistema solar fotovoltaico de 1 kWp, una de las herramientas estadísticas que nos ayuda a visualizar los resultados es el diagrama de

Pareto de efectos estandarizados, en dicho diagrama se muestra la magnitud y la importancia de los efectos, además se muestra una línea de referencia la cual nos indica que todo aquel efecto que sobre pase esta línea es estadísticamente significativo.

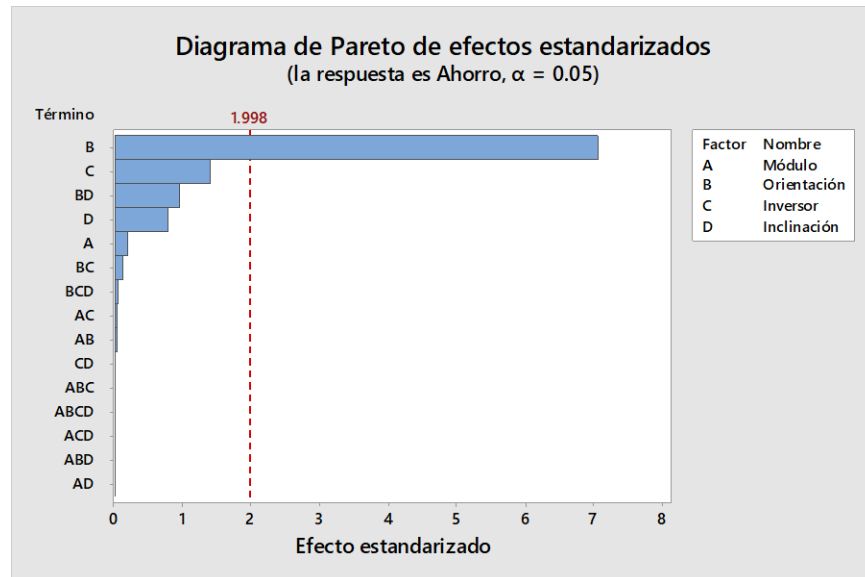


Figura 22: Diagrama de Pareto Consumo básico 1 kWp

En los resultados obtenidos con el programa MINITAB podemos observar en la gráfica de Pareto mostrada en la Figura 22 que el factor estadísticamente significativo en este rango de consumo es la orientación ya que sobre pasa el indicador estadístico a continuación, se muestra la gráfica de efectos principales.

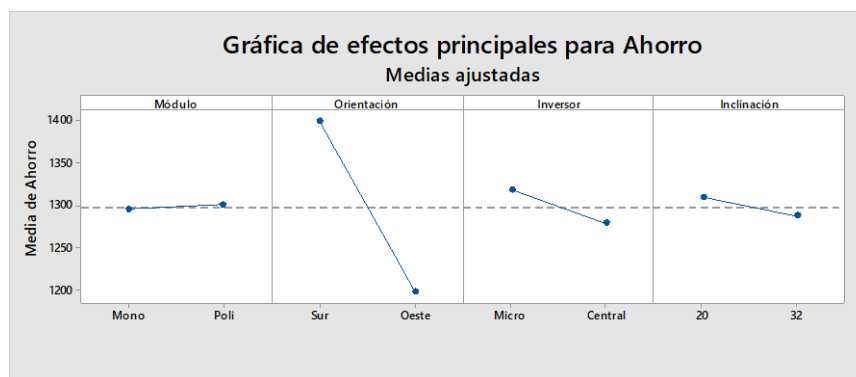


Figura 23: Efectos Principales Consumo Básico 1 kWp

La gráfica de efectos principales Figura 23 nos indica en qué nivel los factores maximizan la variable de respuesta, en este análisis, para los factores módulo, orientación, inversor e inclinación los niveles en que se hay una mayor respuesta en nuestra variable son policristalino, sur, micro inversor y 20° respectivamente.

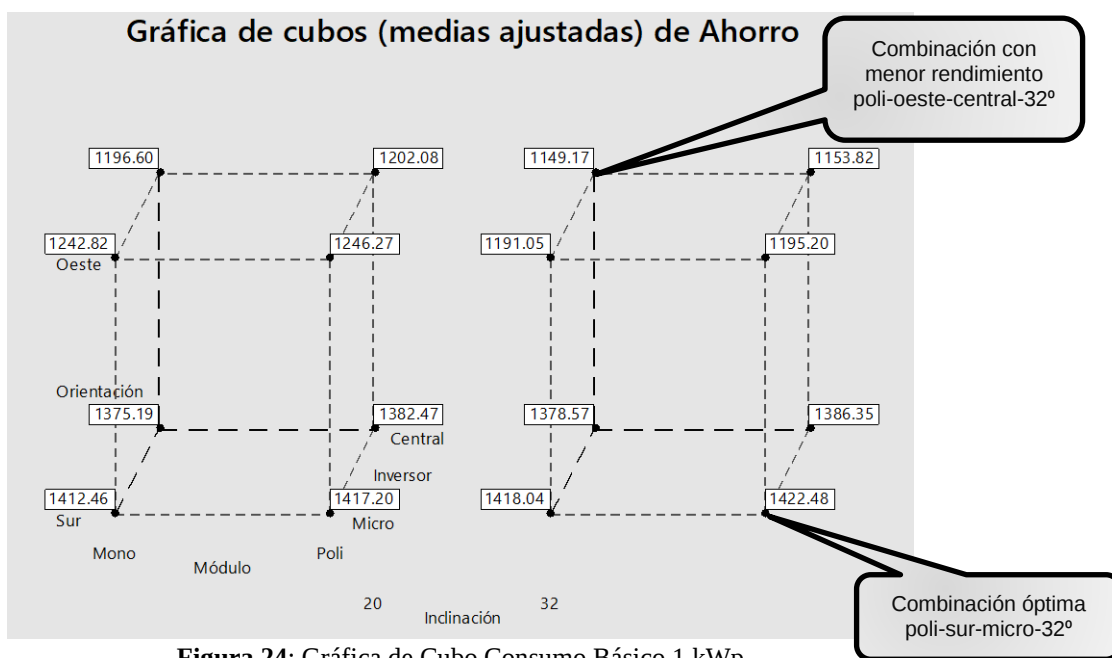


Figura 24: Gráfica de Cubo Consumo Básico 1 kWp
Nota: Gráfica de cubo ahorros económicos anuales.

Con la gráfica de cubo se analiza las medias de los datos, con lo cual se puede determinar cuál de las 16 posibles combinaciones entre factores y niveles es la apropiada, para maximizar nuestra variable de respuesta, en la Figura 24 se muestra la representación gráfica de las medias de las 16 configuraciones, se muestran dos cubos uno de los cubos representa las 8 combinaciones posibles con el factor inclinación a 20°, el otro cubo representa las restantes 8 combinaciones con el factor inclinación a 32°, cada una de las combinaciones es representada por una esquina de los cubos, para este caso la combinación más adecuada es un módulo policristalino, orientado al sur, con micro inversor y una inclinación de 32°.

4.1.2. Consumo intermedio bajo con SFV de 1 kWp

Resultados del análisis para usuarios en rango de consumo eléctrico entre 301 kWh y 1200 kWh en promedio mensual en los meses de verano con un sistema solar fotovoltaico instalado de 1 kWp de generación. La Figura 25 nos muestra el diagrama de Pareto para los usuarios de este rango de consumo y se encontró estadísticamente significativo únicamente al factor orientación, en la Figura 26 se observa la gráfica de efectos y se termina que los niveles policristalinos, sur, micro inversor y 20° son los niveles que más afectan la variable de respuesta.

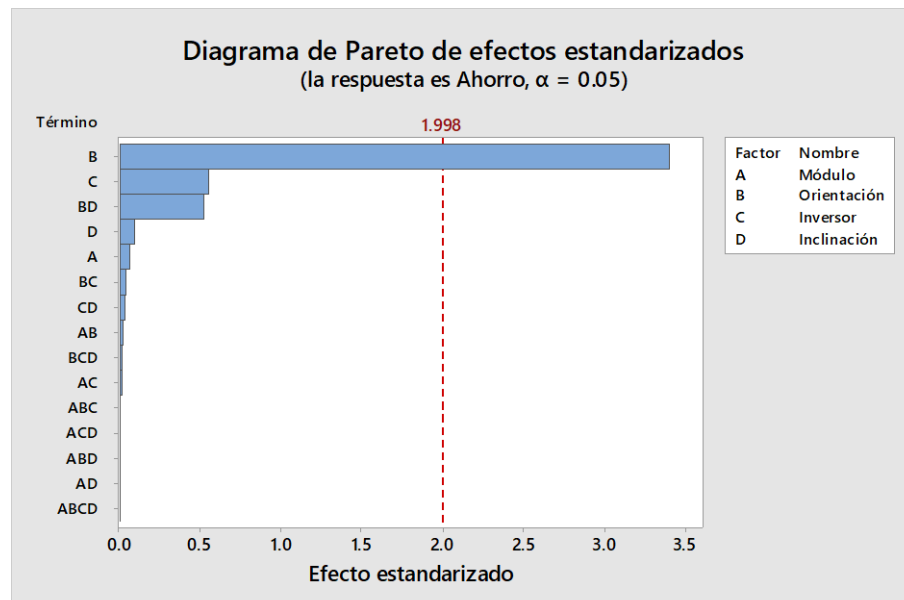


Figura 25: Diagrama de Pareto Intermedio bajo 1 kWp

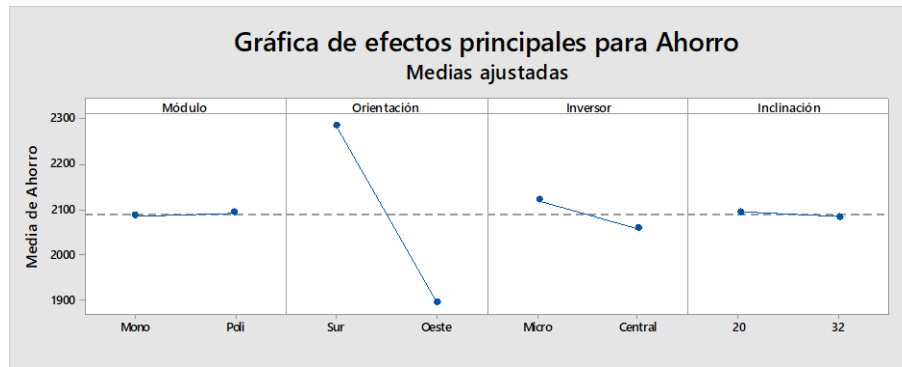


Figura 26: Gráfica de Efectos Intermedio Bajo 1 kWp

Nota: Gráfica de cubo ahorros económicos anuales.

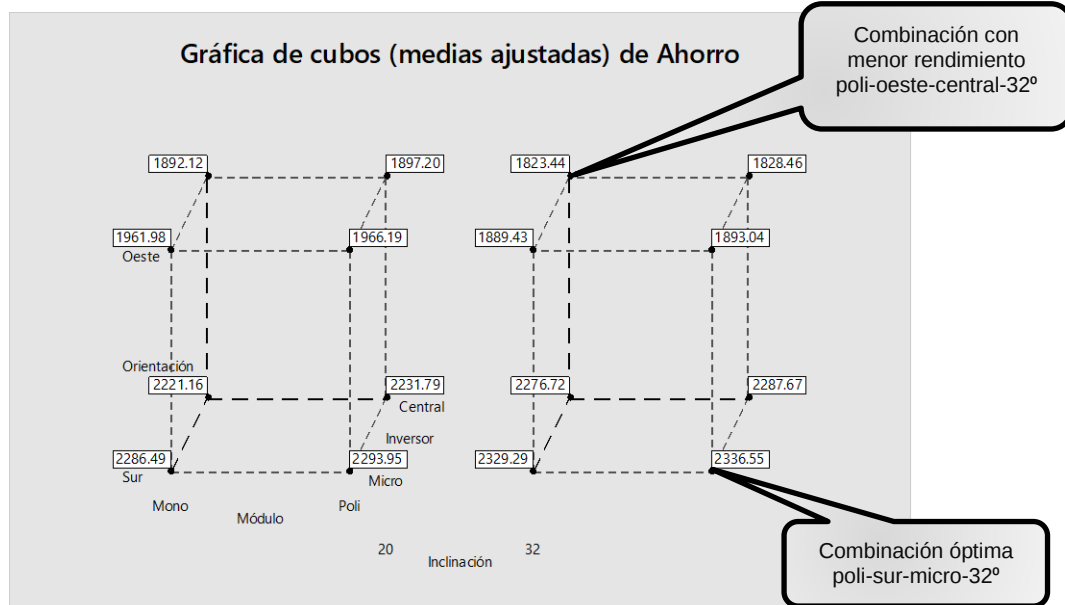


Figura 27: Gráfica de Cubo Consumo Intermedio Bajo 1 kWp

En el análisis para los usuarios de consumo denominados intermedio bajo, se encuentra que estadísticamente la orientación es un factor significativo y la combinación óptima determinada de la Figura 27 es un sistema fotovoltaico con módulos policristalinos, orientados al sur con micro inversor y con una inclinación de 32°, esto al instalar un sistema fotovoltaico de 1 kWp.

4.1.3. Consumo intermedio alto con un SFV de 1 kWp.

Análisis para usuarios que consuman entre 1201 kWh y 2500 kWh en promedio mensual en los meses de verano con un sistema solar fotovoltaico de 1 kWp.

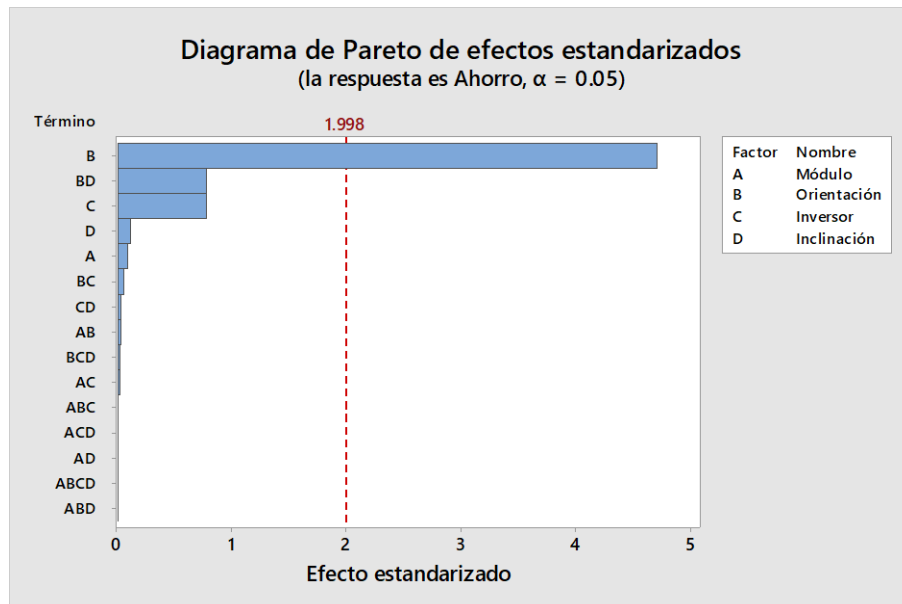


Figura 28: Diagrama de Pareto Consumo Intermedio alto 1 kWp

La gráfica de Pareto de la Figura 28 nos muestra que para usuarios dentro de la clasificación de consumo denominada intermedio alto el factor orientación resulta estadísticamente significativo.

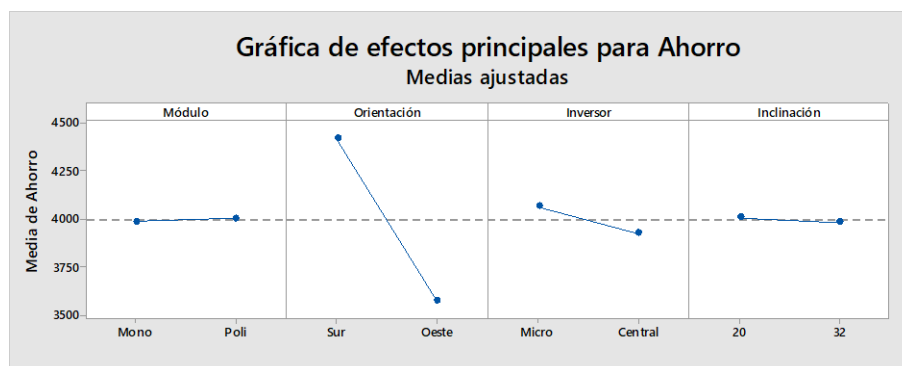
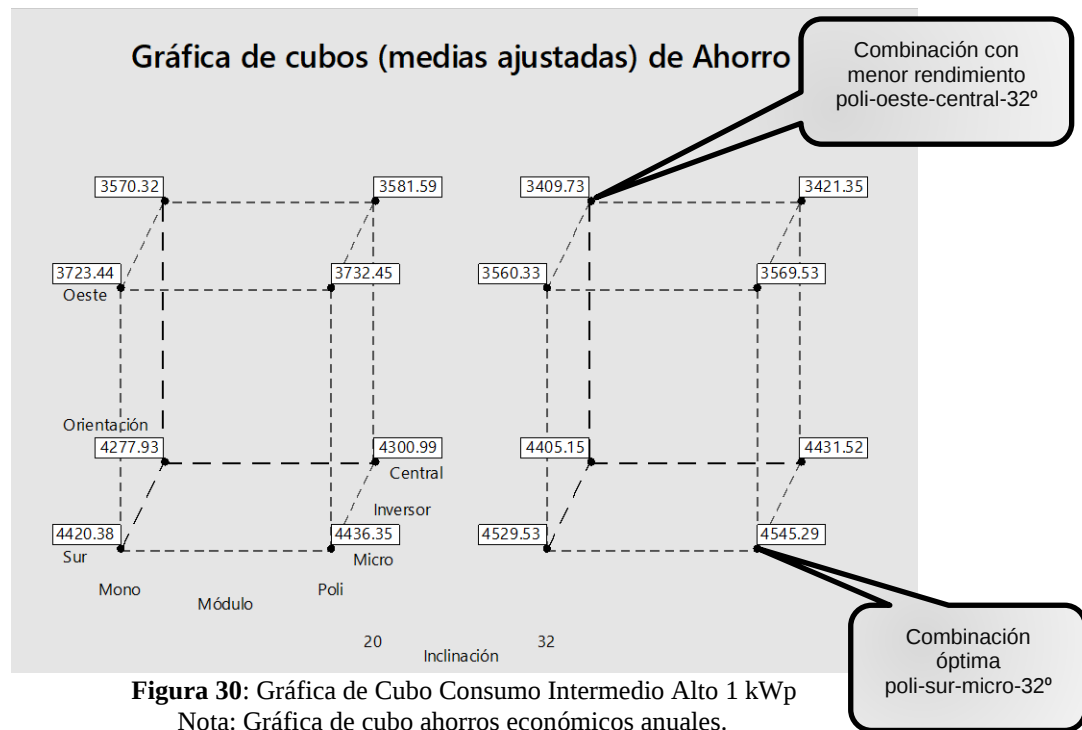


Figura 29: Gráfica de efectos Consumo Intermedio Alto 1 kWp

En la Figura 29 se observan los efectos principales para cada factor que son Policristalino para el factor módulo, nivel sur, para el factor orientación, micro inversor, para el factor inversor y 20° para el factor inclinación.



Por medio de la gráfica de cubo mostrada en la Figura 30 se puede determinar la combinación de factores y niveles que nos ofrece mayor ahorro promedio, es con una orientación al sur, con módulo policristalino, con micro inversor y con una inclinación de 32°, con lo cual se obtendría el mejor rendimiento de nuestra variable de respuesta.

4.1.4. Consumo excedente con un SFV de 1 kWp.

Análisis para usuarios que consuman más de 2500 kWh en promedio mensual en los meses de verano con un sistema solar fotovoltaico de 1 kWp de generación.

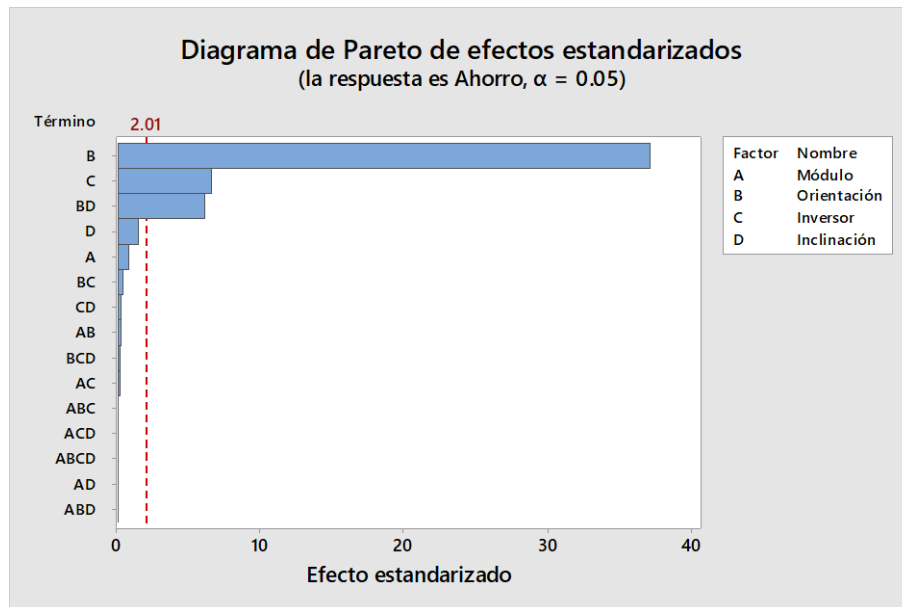


Figura 31: Diagrama de Pareto Consumo Excedente 1 kWp

En el análisis para los usuarios de consumo denominado excedente, se encuentra estadísticamente 3 términos significativos, 2 factores y una interacción siendo los factores la orientación y el tipo de inversor los significativos además de la interacción entre los factores orientación e inclinación, esto después de analizar la información presentada en el diagrama de Pareto mostrado en la Figura 31.

En la Figura 32 observamos la misma tendencia mostrada en los rangos anteriores de la gráfica de efectos principales, con los niveles policristalinos, sur, micro y 20° como los más importantes para los respectivos factores.

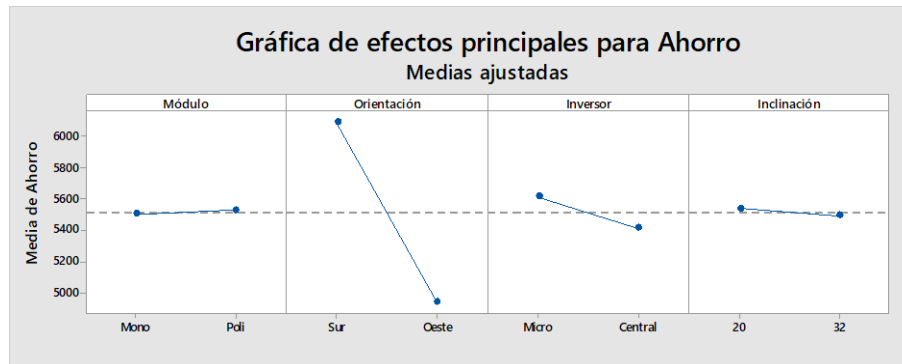


Figura 32: gráfica de Efectos Principales Consumo Excedente 1 kWp

En la Figura 33 se observa la interacción entre dos factores, la orientación y la inclinación; una interacción nos indica que las dos variables están relacionadas es decir si se cambia de nivel uno de estos factores esta acción estaría afectando al otro factor.

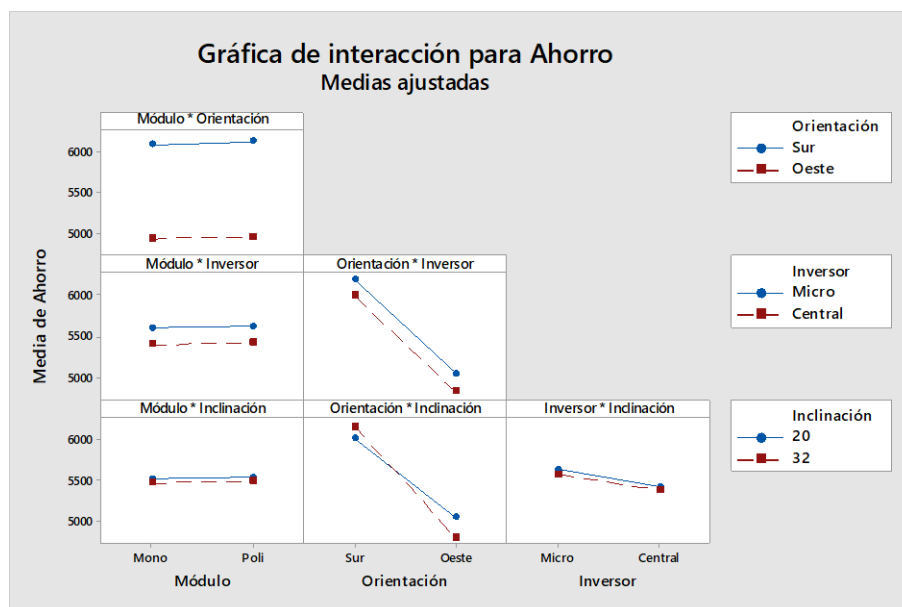


Figura 33: Gráfica de Interacciones Consumo Excedente 1 kWp

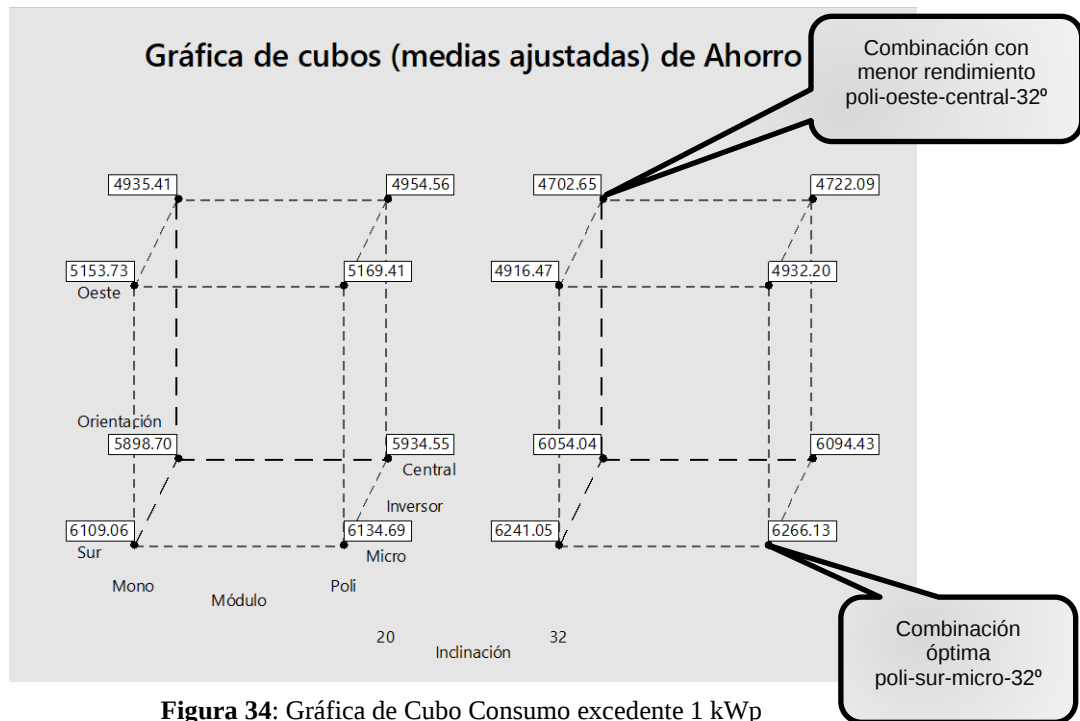


Figura 34: Gráfica de Cubo Consumo excedente 1 kWp
Nota: Gráfica de cubo ahorros económicos anuales.

Determinamos por medio de la gráfica de cubo Figura 34 que la configuración que ofrece el mayor rendimiento es utilizar módulos policristalino, orientado al sur con micro inversores y una inclinación de 32°.

Como consideraciones finales al instalar un sistema fotovoltaico con una capacidad de generación de 1 kWp y en base a los resultados obtenidos para los usuarios de consumo eléctrico en el sector residencial de la ciudad de Mexicali nos muestran que para aquellos que se encuentran en el rango de consumo básico, intermedio alto e intermedio bajo el factor estadísticamente significativo es la orientación y para los usuarios en el rango de consumo excedente, el análisis arroja dos factores significativos que son la orientación y el tipo de inversor además de la interacción entre los factores orientación e inclinación.

En la Tabla 10 se muestran los resultados concentrados para SFV de 1kWp

Tabla 10: Resultados concentrados SFV 1 kWp

Rango de consumo	Factores significativos	Configuración óptima
Básico	Orientación	Poli-Sur-Micro-32°
Intermedio Bajo	Orientación	Poli-Sur-Micro-32°
Intermedio Alto	Orientación	Poli-Sur-Micro-32°
Excedente	Orientación, inversor Y la interacción orientación-inclinación	Poli-Sur-Micro-32°

Nota: Tabla con resultados concentrados factores significativos y configuración óptima de un sistema solar fotovoltaico con capacidad de 1 kWp para cada rango de consumo en la ciudad de Mexicali B. C.

4.2. Análisis y resultados para capacidad de 2 kWp

A continuación, se presentan los resultados para los diferentes rangos de consumo eléctrico en el sector residencial en la ciudad de Mexicali B. C. al instalar un sistema solar fotovoltaico con una capacidad de generación de 2 kWp, se hace la observación que para los usuarios de rango de consumo denominado básico la generación sobrepasa el consumo en todas las combinaciones posibles por lo que no aplica un análisis estadístico para dicho rango.

4.2.1. Consumo intermedio bajo con SFV de 2 kWp

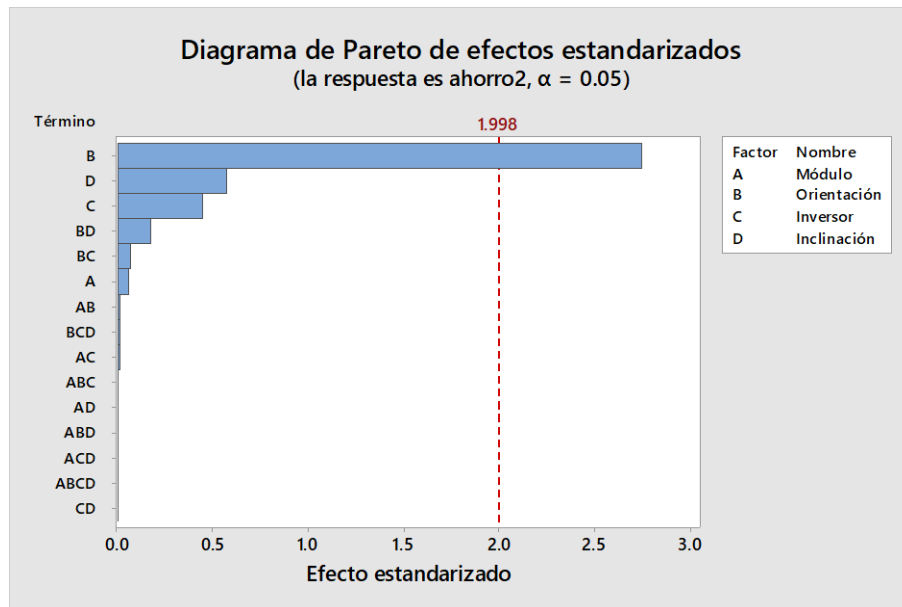


Figura 35: Diagrama de Pareto Consumo Intermedio Bajo 2 kWp

Una vez efectuado el análisis para el rango de consumo intermedio alto se obtiene que el único factor significativo es la orientación dato que se muestra en el diagrama de Pareto de la Figura 35.

En la gráfica mostrada en Figura 36 de efectos principales nos muestra en qué nivel los factores tienen una mayor respuesta en este caso es policristalino, orientación hacia el sur, micro inversor y 20°.

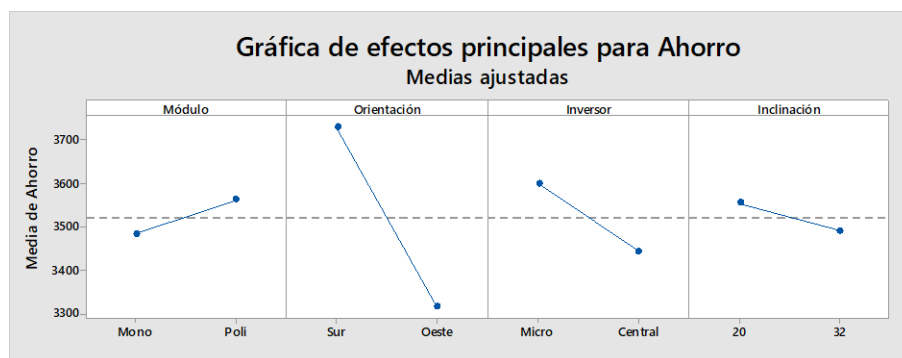


Figura 36: Gráfica de efectos Consumo Intermedio Bajo 2 kWp

La gráfica de cubo Figura 37 nos indica que la configuración óptima para los usuarios dentro de este rango de consumo es una orientación al sur, con módulo policristalino, con micro inversor y con una inclinación de 20°.

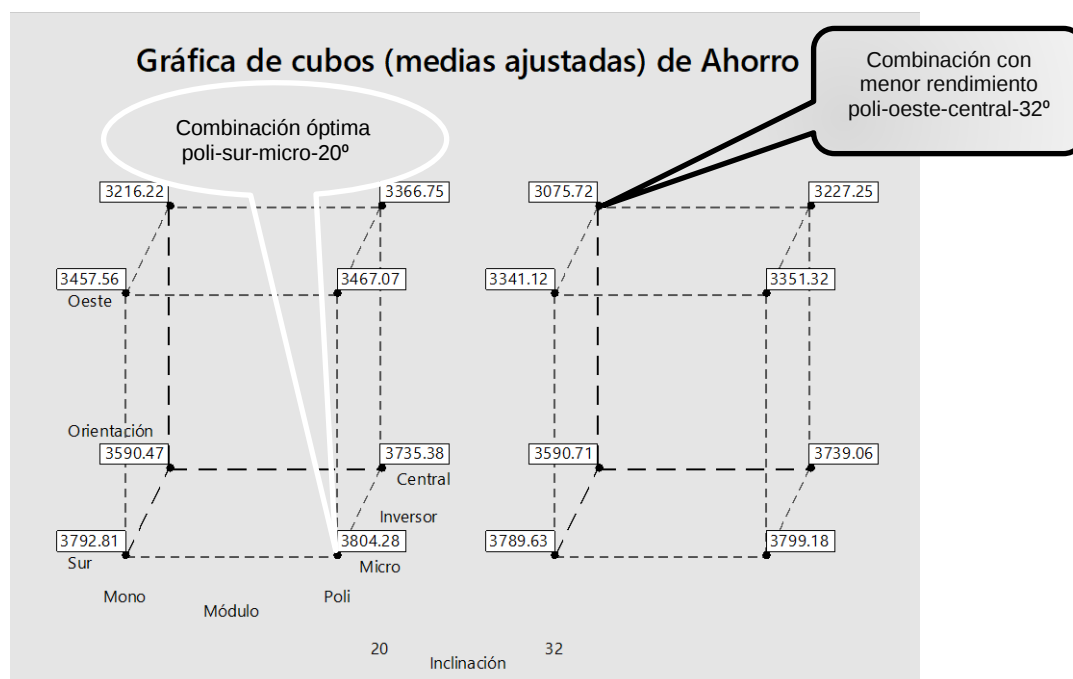


Figura 37: Gráfica de Cubo Consumo Intermedio Bajo 2kWp
Nota: Gráfica de cubo ahorros económicos anuales.

4.2.2. Consumo intermedio alto con un SFV de 2 kWp

El análisis estadístico para usuarios del servicio eléctrico del sector residencial ubicados en el rango de consumo intermedio alto, se encuentra que estadísticamente el factor orientación es significativo, como se observa en la Figura 38 con el diagrama de Pareto.

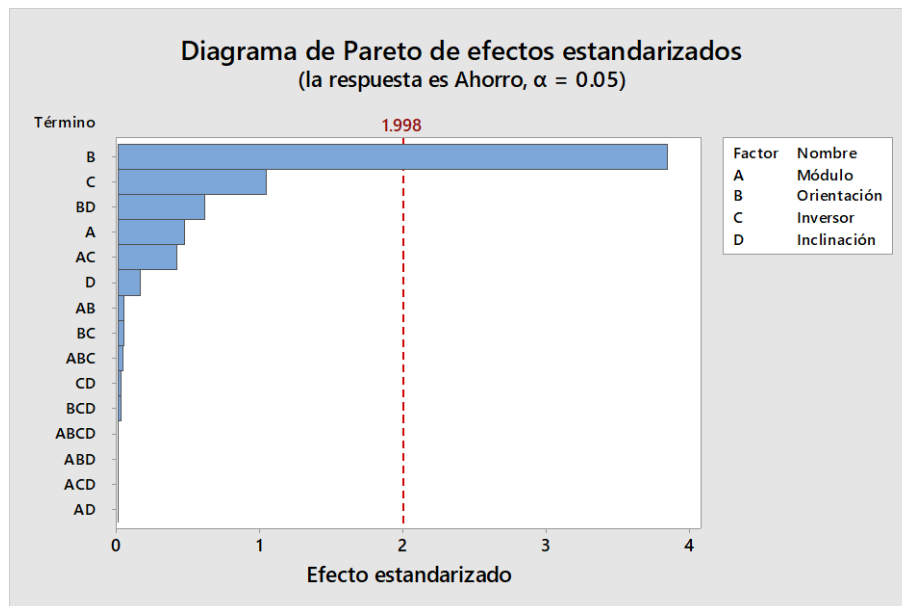


Figura 38: Diagrama de Pareto Intermedio Alto 2 kWp

En la gráfica de efectos de la Figura 39 principales los niveles que maximizan nuestra variable de respuesta de manera individual son policristalinos para el factor módulo, sur para el factor orientación, micro inversor para el factor inversor y 20 grados para el factor inclinación.

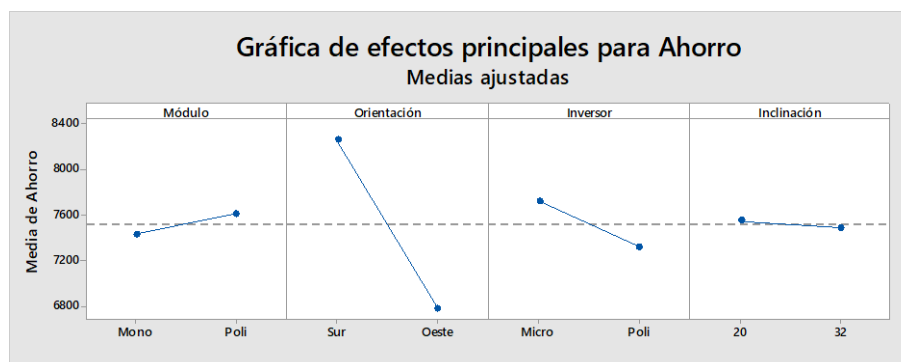
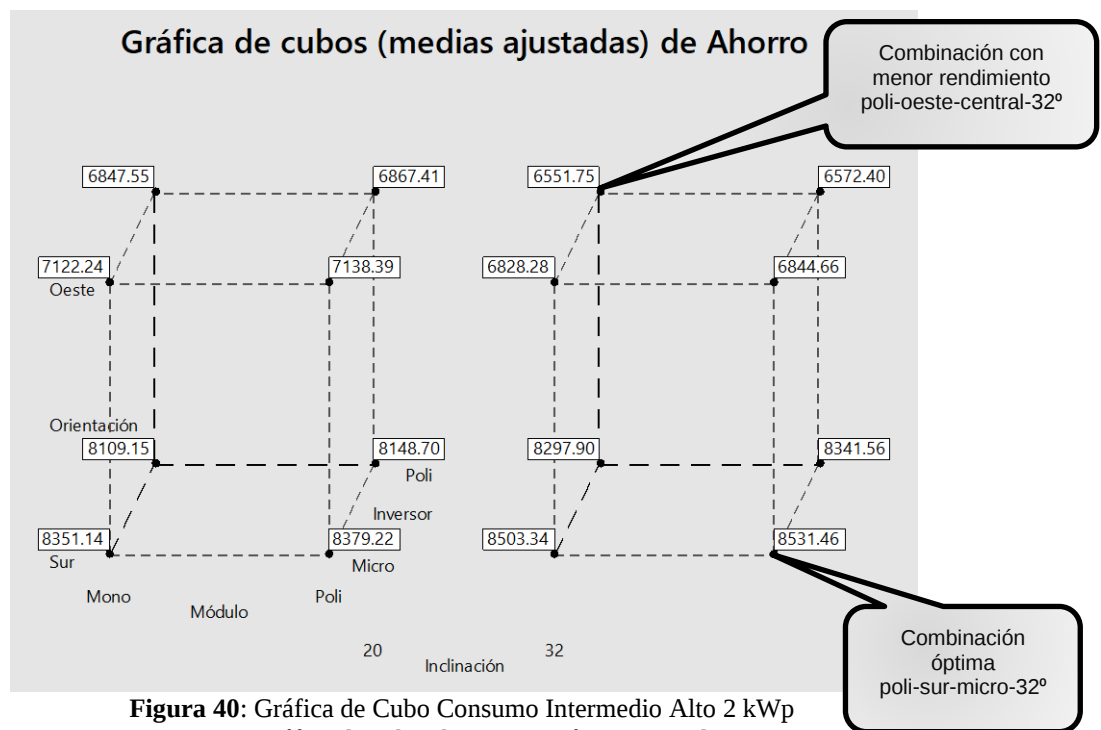


Figura 39: Gráfica de Efectos Consumo Intermedio Alto 2 kWp

En la Figura 40 que nos enseña la gráfica de cubo al analizar la misma determinamos la configuración, que tiene la media más alta como la configuración óptima para la instalación de un SFV con capacidad de 2 kWp para usuarios en el rango de consumo intermedio alto es un SFV orientado al sur, con un micro inversor, módulos policristalinos y una inclinación de 32°.



4.2.3. Consumo excedente con SFV instalado de 2 kWp.

Para usuarios en rango de consumo promedio mayores a 2500 kWh en los meses del periodo de verano y con SFV instalado de 2 kWp de generación se encuentra estadísticamente significativo dos factores como se resalta en la Figura 41 que son la orientación, el tipo de inversor y además de la interacción entre la orientación y la inclinación.

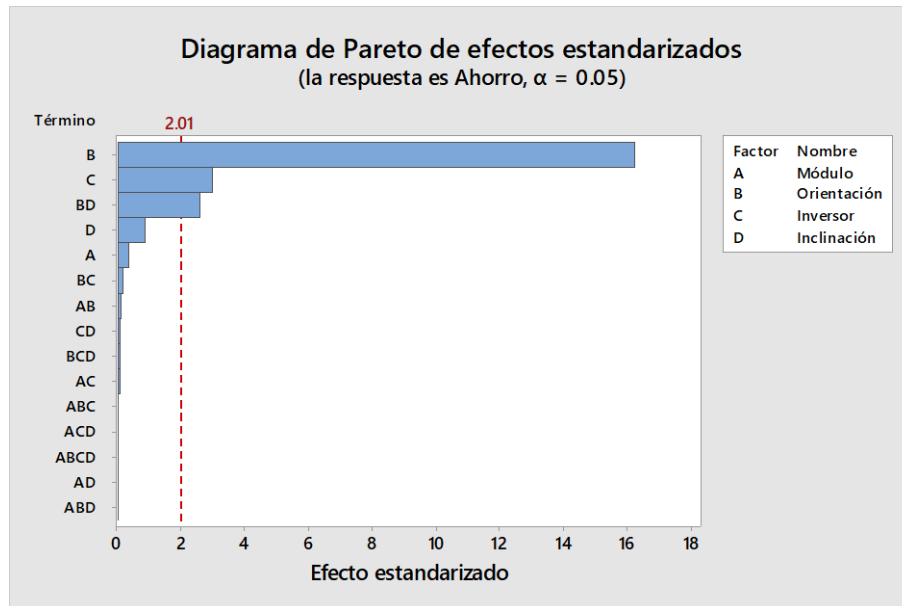


Figura 41: Diagrama de Pareto Consumo Excedente 2 kWp

En la Figura 42 se ven los efectos principales para este rango de consumo los cuales son policristalino para el factor módulo, sur para el factor orientación, micro inversor para el factor inversor y 20° para el factor inclinación.

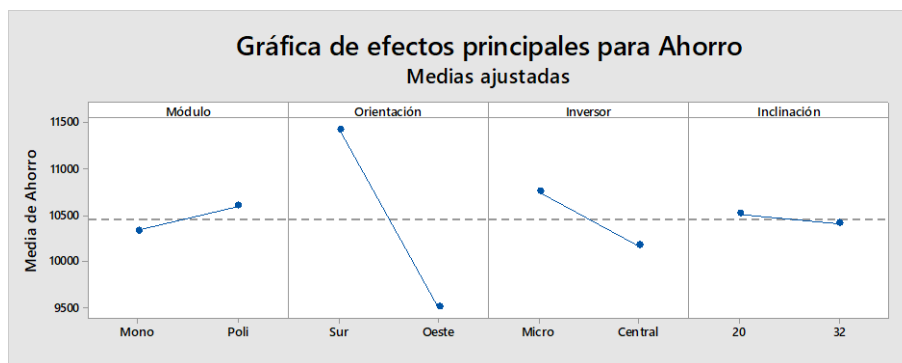


Figura 42: Gráfica de efectos Consumo Excedente 2 kWp

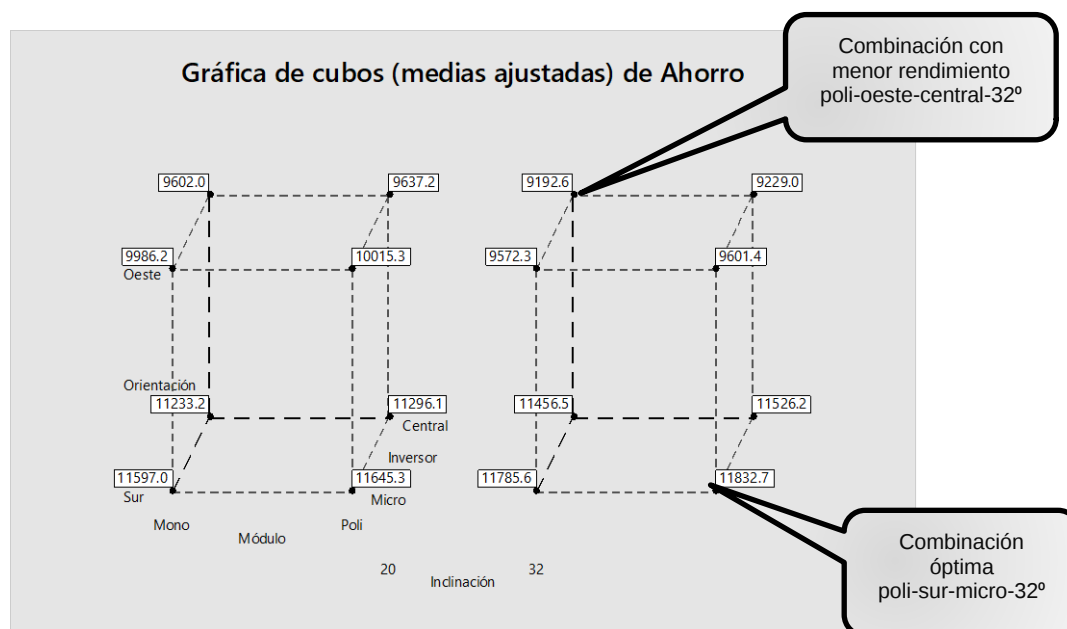


Figura 43: Gráfica de Cubo Consumo Excedente 2 kWp
Nota: Gráfica de cubo ahorros económicos anuales.

El diagrama de cubo de la Figura 43 nos indica que la combinación óptima para el rango de consumo excedente al instalar un SFV de 2 kWp, el cual es utilizar módulos policristalinos, orientados hacia el sur, con micro inversores y con una inclinación de 32°. En la Tabla 11 se muestran los resultados concentrados para la capacidad de generación de 2 kWp.

Tabla 11: Resultados concentrados SFV 2 kWp

Rango de consumo	Factores significativos	Configuración óptima
Básico	No aplica	No aplica
Intermedio Bajo	Orientación	Poli-Sur-Micro-20°
Intermedio Alto	Orientación	Poli-Sur-Micro-32°
Excedente	Orientación, inversor, módulo y la interacción orientación-inclinación	Poli-Sur-Micro-32°

Nota: Tabla con resultados concentrados factores significativos y configuración óptima de un sistema solar fotovoltaico con capacidad de 2 kWp para cada rango de consumo en la ciudad de Mexicali B. C.

4.3. Análisis y resultados para SFV de capacidad de 3 kWp

Ahora se presentan los resultados obtenidos para usuarios de consumo eléctrico en el sector residencial al instalar un sistema solar fotovoltaico con una capacidad de generación de 3 kWp, para esta capacidad de generación no se presentan resultados para el rango de consumo básico ya que la generación sobrepasa el consumo en todas las configuraciones posibles entre factores y niveles.

4.3.1. Consumo Intermedio bajo con un SFV de 3 kWp.

El análisis para los usuarios del sector residencial con consumos promedios en los meses de verano de 300 kWh y 1200 kWh nos muestra como resultado en el diagrama de Pareto que la orientación es un factor significativo como como se puede ver en la Figura 44.

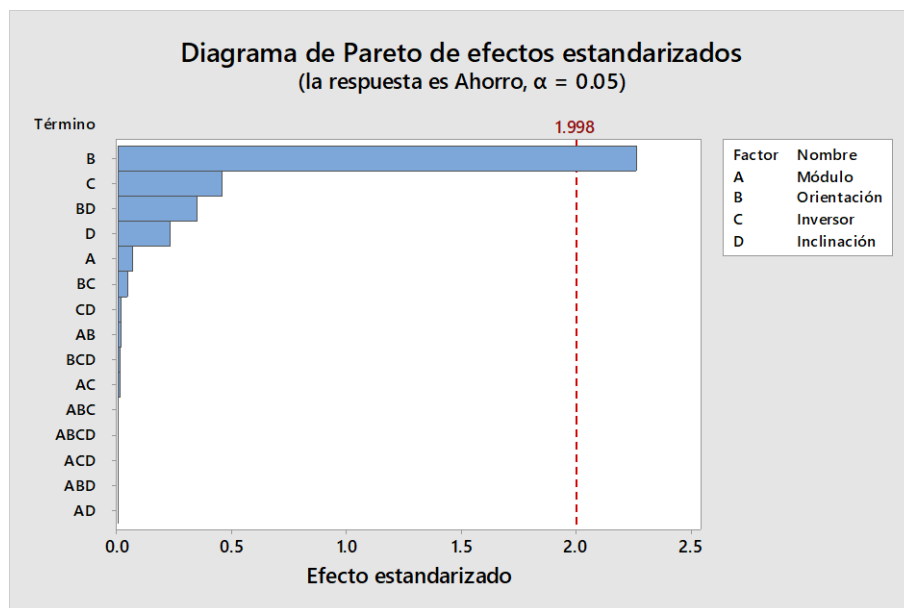


Figura 44: Diagrama de Pareto Consumo Intermedio Bajo 3 kWp

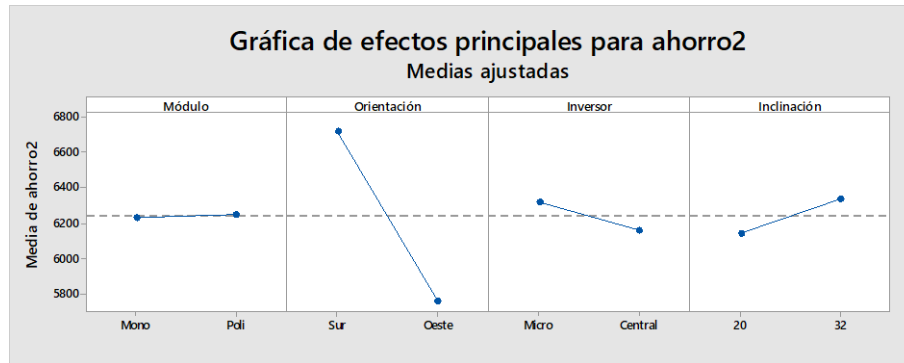


Figura 46: Gráfica de Efectos Consumo Intermedio Bajo 3 kWp

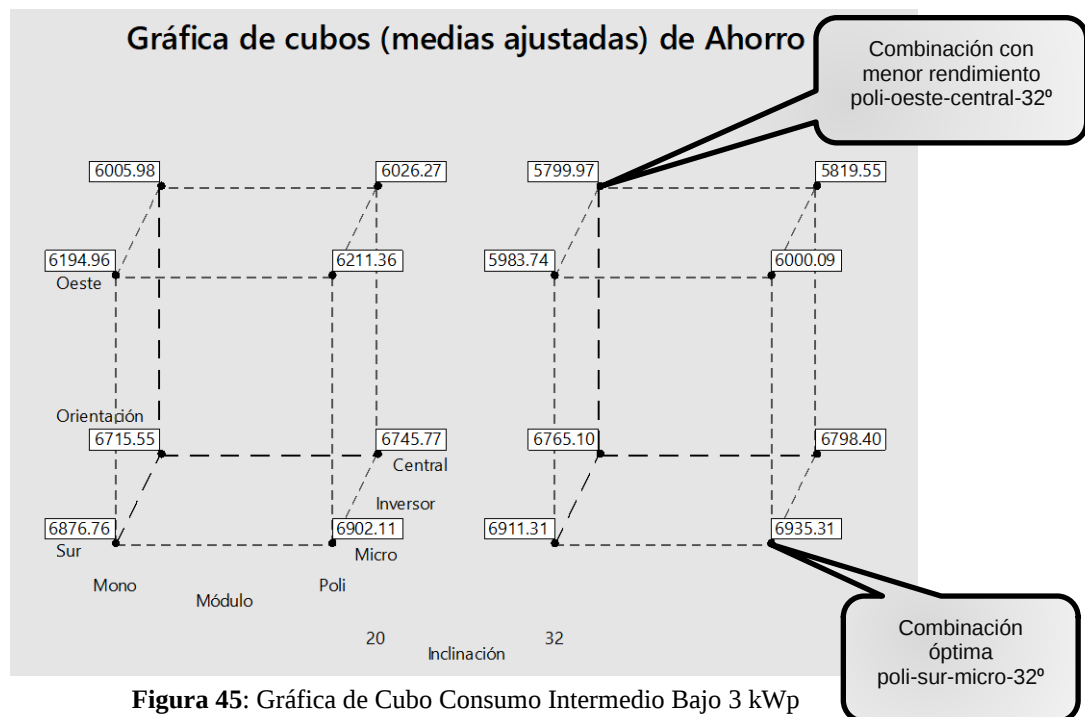


Figura 45: Gráfica de Cubo Consumo Intermedio Bajo 3 kWp
Nota: Gráfica de cubo ahorros económicos anuales.

Por medio de la gráfica de cubo determinamos que la combinación óptima para este rango de consumo es un SFV con orientación al sur, módulo policristalino, con micro inversor y una inclinación de 32° como se puede observar en la Figura 45.

4.3.2. Consumo intermedio alto kWh con un SFV de 3 kWp.

Los resultados arrojados por el programa MINITAB nos determina que los usuarios al instalar un sistema solar fotovoltaico de una capacidad de generación de 3 kWp y cuyo promedio mensual en el periodo de verano se encuentre entre el rango de 1200 kWh y 2500 kWh, estadísticamente el factor orientación es significativo este resultado en base en el diagrama de Pareto mostrado en la Figura 47.

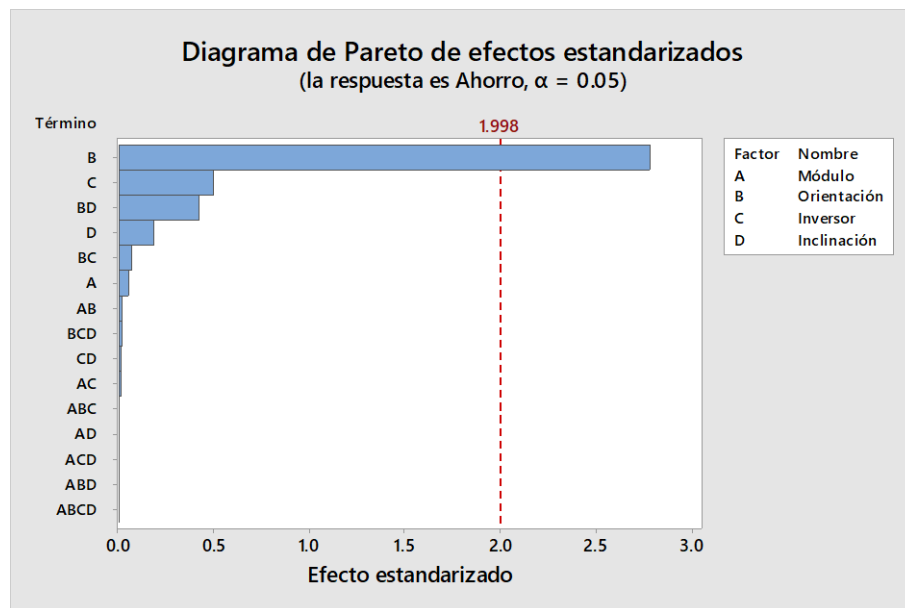


Figura 47: Diagrama de Pareto Consumo Intermedio Alto 3 kWp

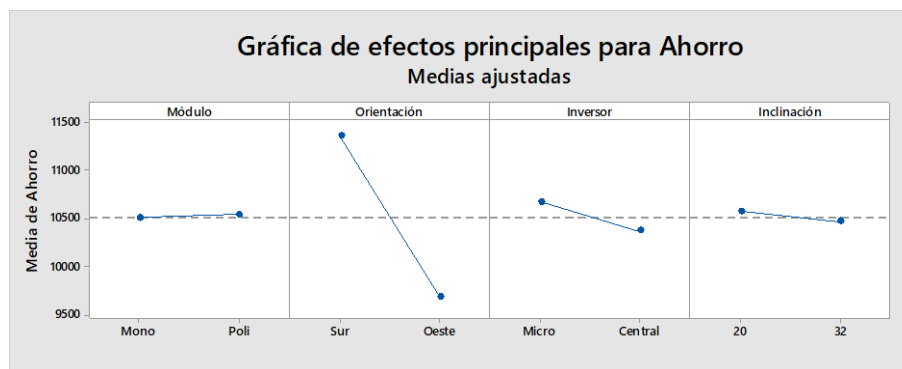


Figura 48: Gráfica de Efectos Consumo Intermedio Alto 3 kWp

Como configuración óptima se recomienda utilizar un SFV con módulo policristalino, con una orientación hacia el sur utilizando micro inversores y con una inclinación de 32°, dicha configuración es en base al análisis de la gráfica de cubo de la Figura 49.

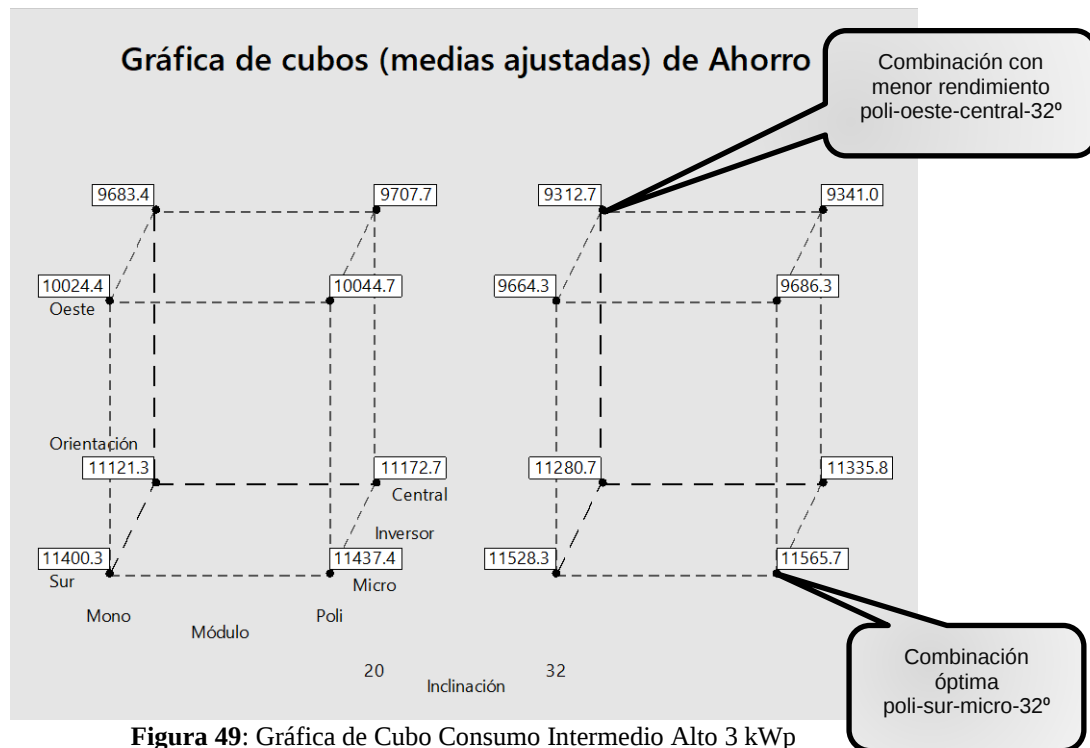


Figura 49: Gráfica de Cubo Consumo Intermedio Alto 3 kWp
Nota: Gráfica de cubo ahorros económicos anuales.

4.3.3. Consumo excedente con un SFV de 3 kWp de capacidad.

Para usuarios del servicio eléctrico del sector residencial con consumo mensual promedio mayor a 2500 kWh, se encuentra el factor orientación estadísticamente significativo, como se muestra en la Figura 50.

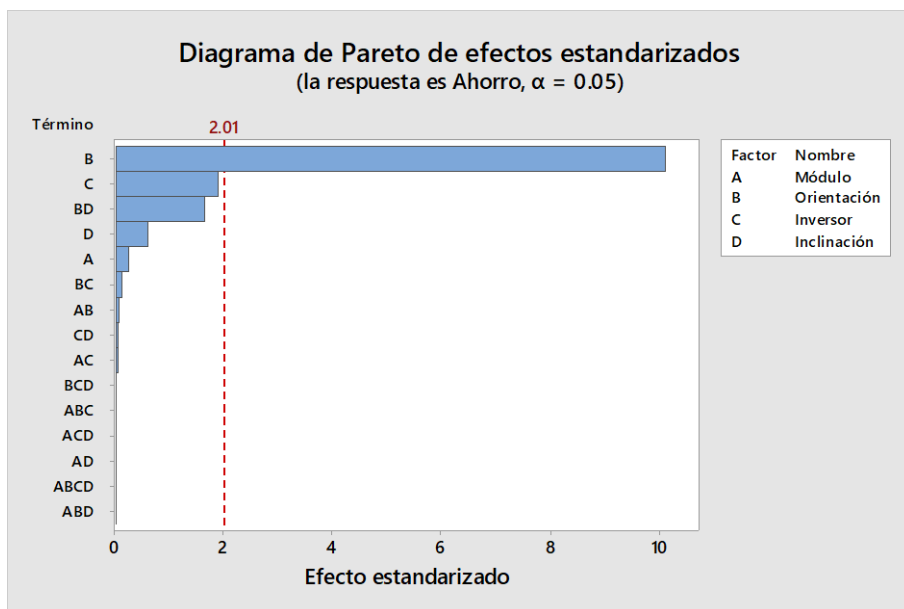


Figura 50: Diagrama de Pareto Consumo Excedente 3 kWp

En la gráfica de efectos principales Figura 51 se determina que los niveles policristalino, sur, Micro y 20° son los que tienen un mayor efecto de manera individual en la variable de respuesta.

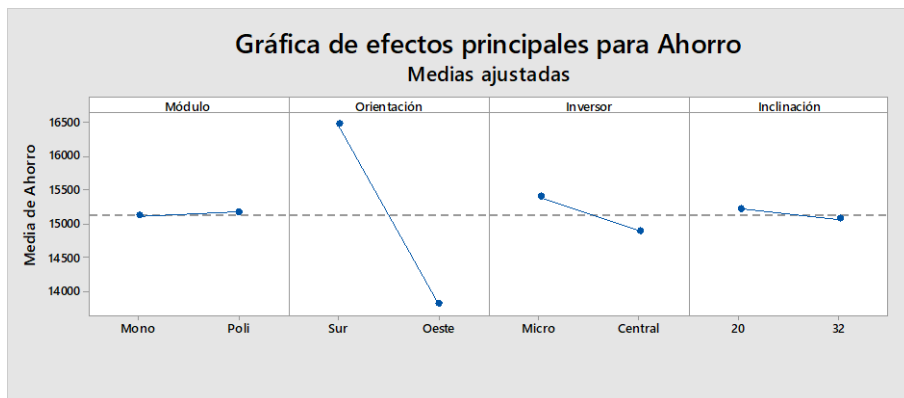
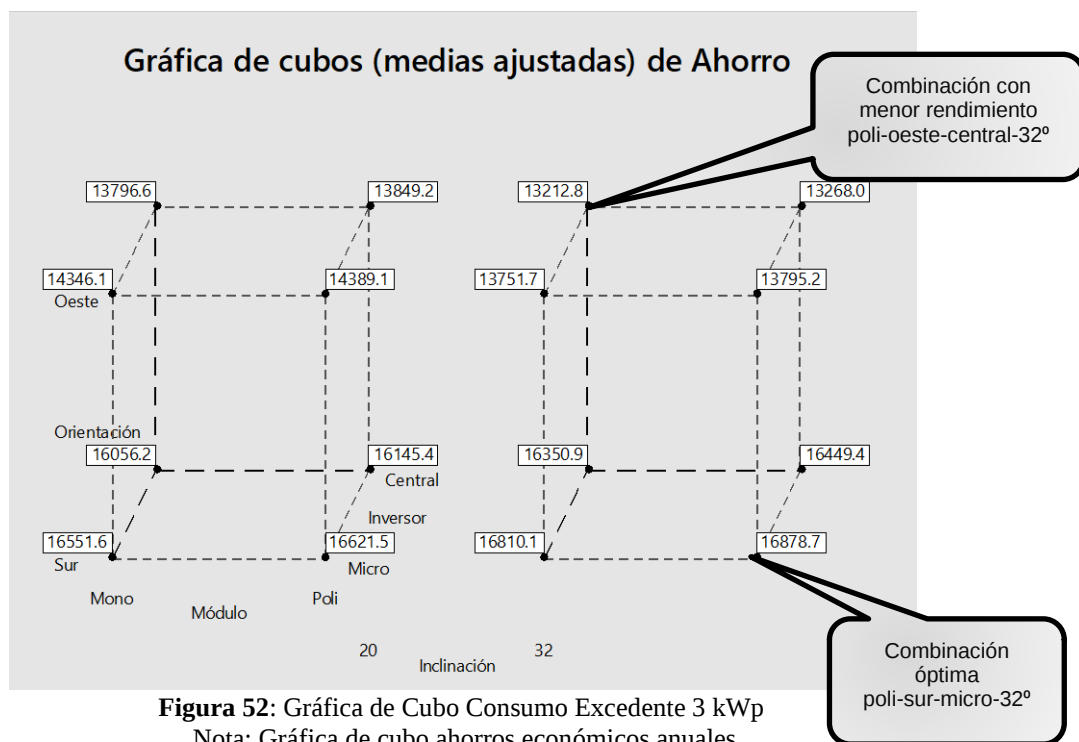


Figura 51: Gráfica de efectos Consumo Excedente 3 kWp



Como configuración óptima basada en el análisis de la gráfica de cubo mostrada en la Figura 52 se recomienda utilizar un SFV orientado al sur, con módulos policristalinos, utilizando micro inversores y con una inclinación de 32°.

En la Tabla 12 se muestran los resultados concentrados, para los usuarios del servicio eléctrico del sector residencial de la ciudad de Mexicali B. C. al instalar un sistema fotovoltaico con una capacidad de generación de 3 kWp.

Tabla 12: Resultados concentrados SFV 3 kWp

Rango de consumo	Factores significativos	Configuración óptima
Básico	No aplica	No aplica
Intermedio Bajo	Orientación	Poli-Sur-Micro-32°
Intermedio Alto	Orientación	Poli-Sur-Micro-32°
Excedente	Orientación	Poli-Sur-Micro-32°

Nota: Tabla con resultados concentrados factores significativos y configuración óptima de un sistema solar fotovoltaico con capacidad de 3 kWp para cada rango de consumo en la ciudad de Mexicali B. C.

4.4. Análisis y resultados para SFV de capacidad de 4 kWp

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para usuarios de consumo eléctrico en el sector residencial de la ciudad de Mexicali B. C. México al instalar un sistema solar fotovoltaico con una capacidad de generación de 4 kWp.

4.4.1. Consumo intermedio alto un SFV con una capacidad de 4 kWp.

Para los usuarios que instalen un sistema solar fotovoltaico con una capacidad de generación de 4 kWp y cuyo consumo eléctrico promedio mensual en el periodo de verano se encuentre en el rango de 1200 kWh y 2500 kWh, se concluye que el factor orientación es estadísticamente significativo basando esta conclusión en el diagrama de Pareto de la Figura 53.

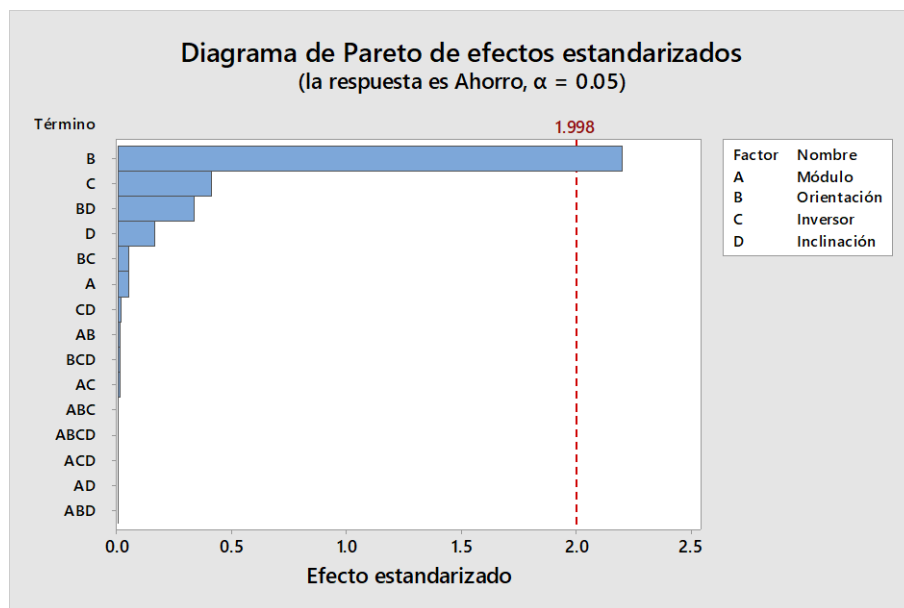


Figura 53: Diagrama de Pareto Consumo Intermedio Alto 4 kWp

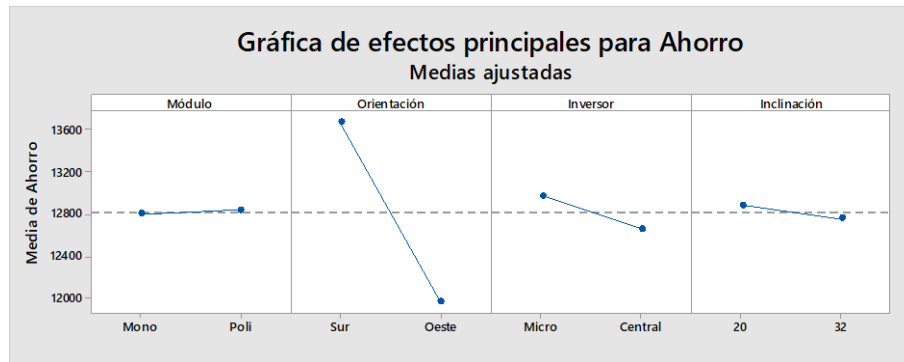


Figura 55: Gráfica de Efectos Consumo Intermedio Alto 4 kWp

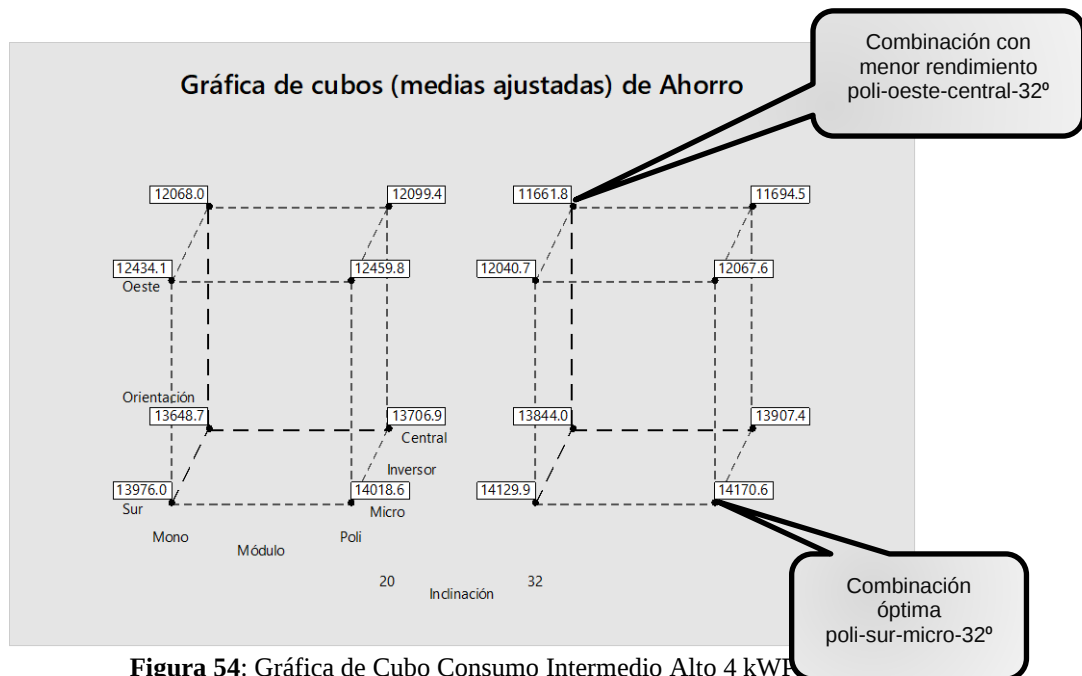


Figura 54: Gráfica de Cubo Consumo Intermedio Alto 4 kWp
Nota: Gráfica de cubo ahorros económicos anuales.

Como conclusión y tomando como referencia el análisis de la gráfica de cubo presentada en la Figura 54 se recomienda instalar un SFV con módulos policristalinos orientado hacia el sur, utilizando micro inversores y con una inclinación de 32°.

4.4.2. Consumo excedente con un SFV con una capacidad de 4 kWp

Para los usuarios del sector eléctrico residencial que instalen un sistema solar fotovoltaico con una capacidad de generación de 4 kWp y cuyo promedio de consumo mensual en el periodo de verano se encuentre por arriba de 2500 kWh, se determina que el factor orientación es estadísticamente significativo tomando, como referencia el análisis del diagrama de Pareto mostrada en la Figura 56.

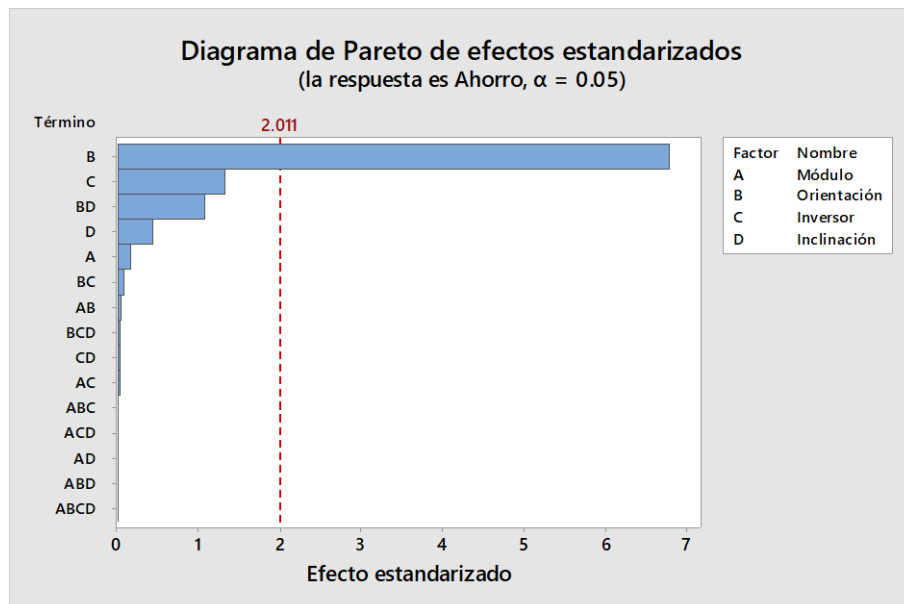


Figura 56: Diagrama de Pareto Consumo Excedente 4 kWp

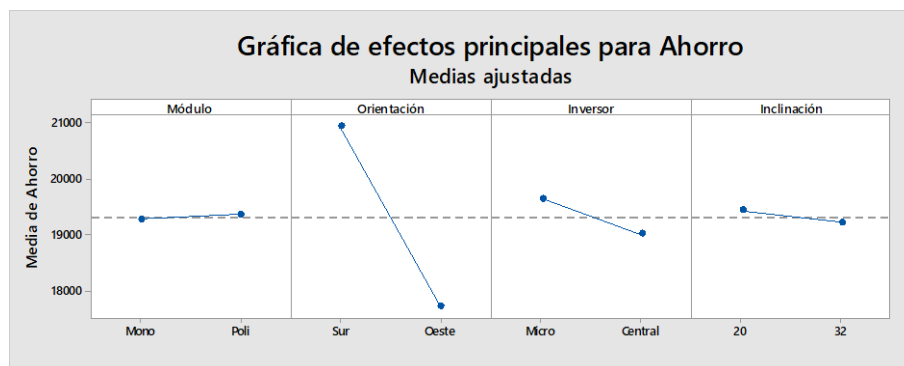


Figura 57: Gráfica de Efectos Consumo Excedente 4 kWp

Además, analizando los resultados obtenidos en la gráfica de cubo se recomienda instalar un SFV con la configuración óptima mostrada en dicha gráfica que consiste en utilizar módulos policristalinos, orientados hacia el sur, utilizando micro inversores y con una inclinación de 32° como se expone en la Figura 58.

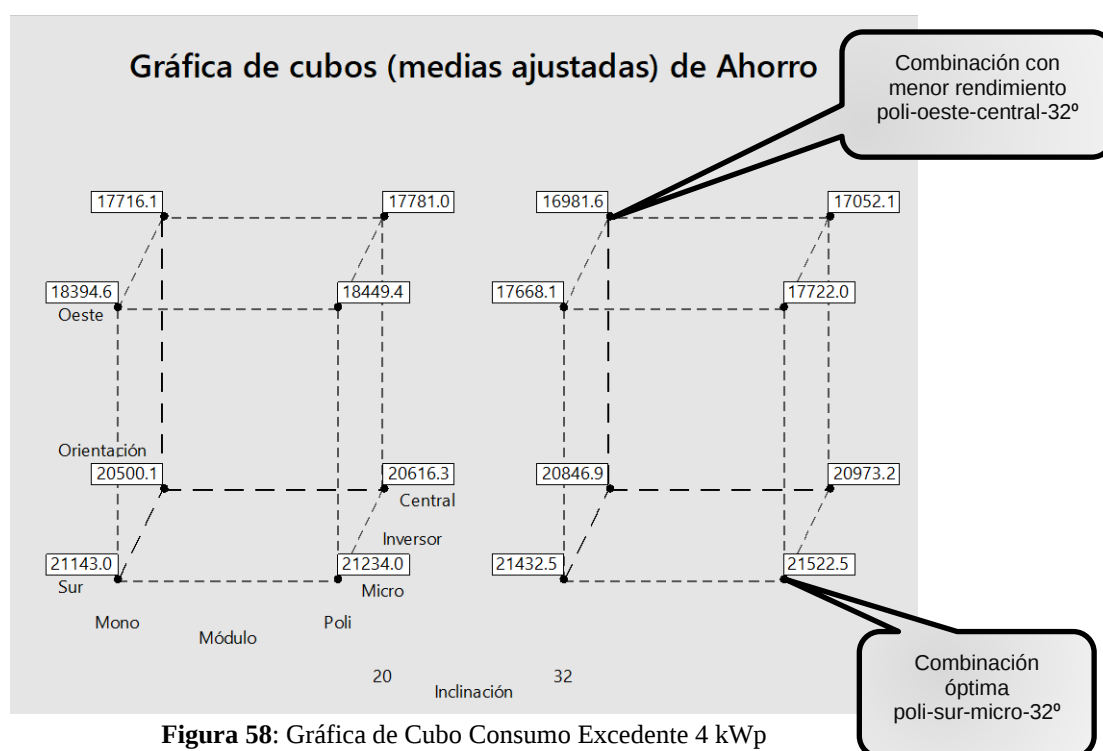


Figura 58: Gráfica de Cubo Consumo Excedente 4 kWp
Nota: Gráfica de cubo ahorros económicos anuales.

En la Tabla 13 se muestran los resultados concentrados de los análisis realizados a los usuarios del servicio eléctrico residencial al instalar un SFV de 3 kWp..

Tabla 13: Resultados concentrados SFV 4 kWp

Rango de consumo	Factores significativos	Configuración óptima
Básico	No aplica	No aplica
Intermedio Bajo	No aplica	No aplica
Intermedio Alto	Orientación	Poli-Sur-Micro-32°
Excedente	Orientación	Poli-Sur-Micro-32°

Nota: Tabla con resultados concentrados factores significativos y configuración óptima de un sistema solar fotovoltaico con capacidad de 4 kWp para cada rango de consumo en la ciudad de Mexicali B. C.

4.5. Análisis y resultados para SFV de capacidad de 5 kWp

Para usuarios de consumo eléctrico en el sector residencial en la ciudad de Mexicali B. C. México al instalar un sistema solar fotovoltaico con una capacidad de generación de 5 kWp se obtuvieron los siguientes resultados.

4.5.1. Consumo intermedio alto con un SFV de 5 kWp.

Los resultados obtenidos con el programa MINITAB para los usuarios que al instalar un sistema solar fotovoltaico de una capacidad de generación de 5 kWp y cuyo promedio mensual en el periodo de verano se encuentre entre el rango de 1200 kWh y 2500 kWh, se encontró que el factor orientación es estadísticamente significativo, esto basándonos en el diagrama de Pareto mostrado en la Figura 59.

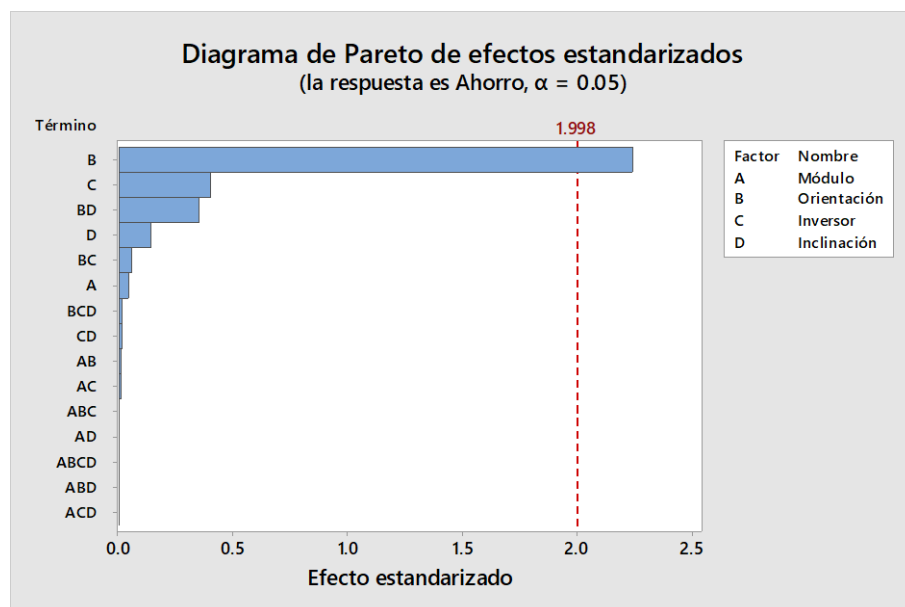


Figura 59: Diagrama de Pareto Consumo Intermedio Alto 5 kWp

En la Figura 61 se observa la gráfica de efectos principales en la cual podemos determinar el nivel en el que los factores maximizan la variable de respuesta.

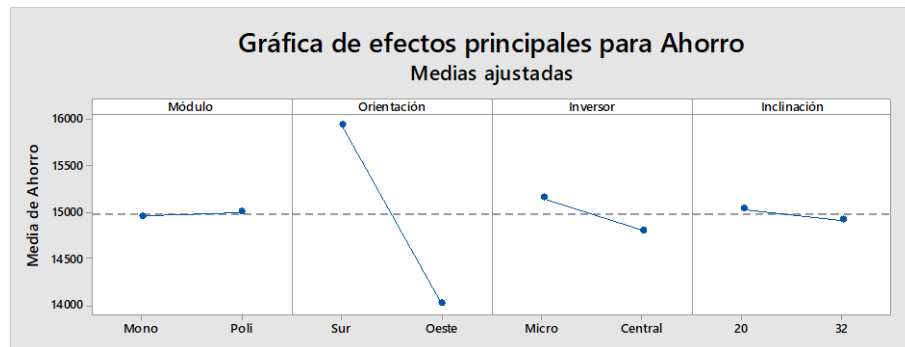


Figura 61: Gráfica de Efectos Consumo Intermedio Alto 5 kWp

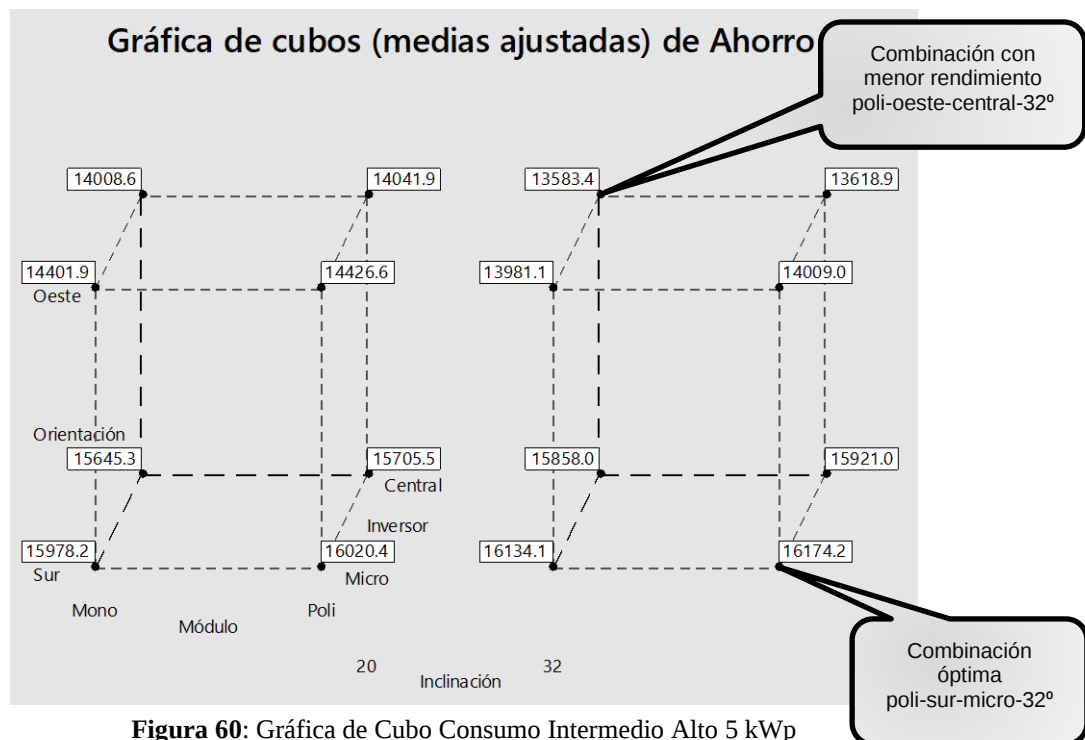


Figura 60: Gráfica de Cubo Consumo Intermedio Alto 5 kWp
Nota: Gráfica de cubo ahorros económicos anuales.

Como conclusión en base a el resultado obtenido en la gráfica de cubo Figura 60, la configuración que se recomienda utilizar al instalar un SFV a usuarios dentro de este rango de consumo, es la utilización de módulos policristalinos, con una inclinación de 32° con una orientación hacia el sur utilizando micro inversores.

4.5.2. Consumo excedente con un SFV de 5 kWp.

Para usuarios del servicio eléctrico del sector residencial con consumos promedio mensual en el periodo de verano mayores a 2500 kWh y al instalar un SFV con una capacidad de 5 kWp se encuentra que el factor orientación es estadísticamente significativo como se ve en la Figura 62.

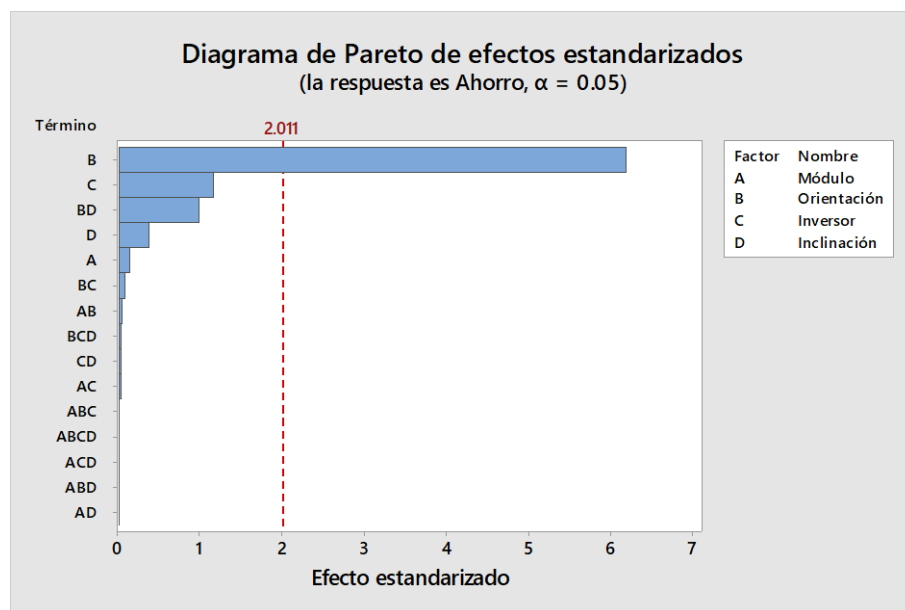


Figura 62: Diagrama de Pareto Consumo Excedente 5 kWp

En la gráfica de efectos principales Figura 63 se encuentra a los niveles policristalino, sur Micro y 20° como los que tienen un mayor efecto en los cuales sus respectivos factores tendrían una mejor respuesta.

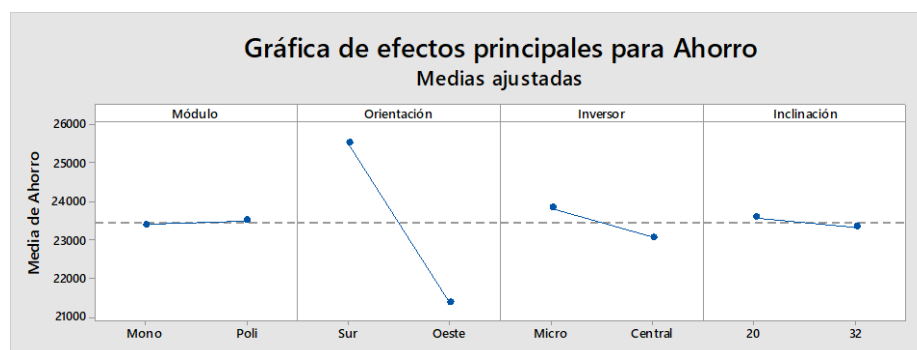


Figura 63; Gráfica de Efectos Principales Consumo Excedente 5 kWp

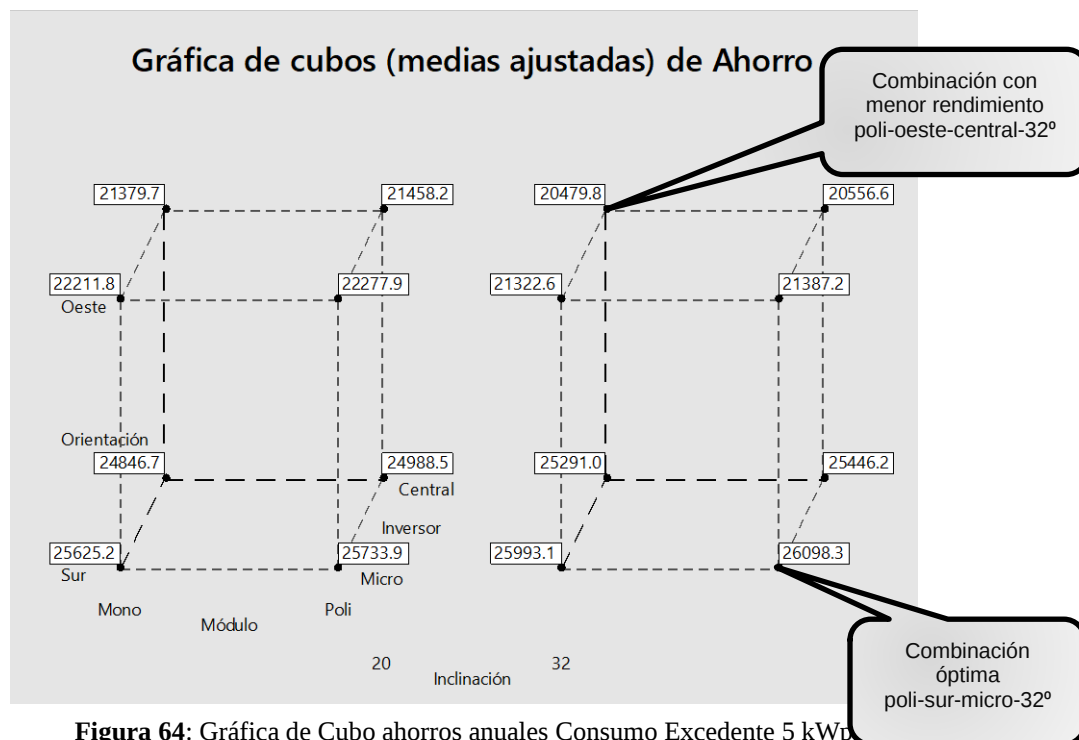


Figura 64: Gráfica de Cubo ahorros anuales Consumo Excedente 5 kWp
Nota: Gráfica de cubo ahorros económicos anuales.

Por medio del análisis de la gráfica de cubo Figura 64 se recomienda utilizar un SFV orientado al sur, con módulos policristalinos, utilizando micro inversores y con una inclinación de 32°. En la Tabla 14 se muestran los resultados concentrados en esta capacidad analizada.

Tabla 14: Resultados concentrados SFV 5 kWp

Rango de consumo	Factores significativos	Configuración óptima
Básico	No aplica	No aplica
Intermedio Bajo	No aplica	No aplica
Intermedio Alto	Orientación	Poli-Sur-Micro-32°
Excedente	Orientación	Poli-Sur-Micro-32°

Nota: Tabla con resultados concentrados factores significativos y configuración óptima de un sistema solar fotovoltaico con capacidad de 5 kWp para cada rango de consumo en la ciudad de Mexicali B. C.

En la Tabla 15 se muestran los resultados de los diferentes diseños de experimentos, efectuados para los usuarios del servicio eléctrico residencial de la ciudad de Mexicali B. C. obtenidos por rango de consumo y por capacidad instalada del sistema fotovoltaico.

Tabla 15: Resultados concentrados

Rango de consumo	Factores significativos	Configuración óptima
Resultados para SFV de 1 kWp		
Básico	Orientación	Poli-Sur-Micro-32º
Intermedio Bajo	Orientación	Poli-Sur-Micro-32º
Intermedio Alto	Orientación	Poli-Sur-Micro-32º
Excedente	Orientación, inversor Y la interacción orientación-inclinación	Poli-Sur-Micro-32º
Resultados para SFV de 2 kWp		
Básico	No aplica	No aplica
Intermedio Bajo	Orientación	Poli-Sur-Micro-20º
Intermedio Alto	Orientación	Poli-Sur-Micro-32º
Excedente	Orientación, inversor, módulo y la interacción orientación-inclinación	Poli-Sur-Micro-32º
Resultados para SFV de 3 kWp		
Básico	No aplica	No aplica
Intermedio Bajo	Orientación	Poli-Sur-Micro-32º
Intermedio Alto	Orientación	Poli-Sur-Micro-32º
Excedente	Orientación	Poli-Sur-Micro-32º
Resultados para SFV de 4 kWp		
Básico	No aplica	No aplica
Intermedio Bajo	No aplica	No aplica
Intermedio Alto	Orientación	Poli-Sur-Micro-32º
Excedente	Orientación	Poli-Sur-Micro-32º
Resultados para SFV de 5 kWp		
Básico	No aplica	No aplica
Intermedio Bajo	No aplica	No aplica
Intermedio Alto	Orientación	Poli-Sur-Micro-32º
Excedente	Orientación	Poli-Sur-Micro-32º

Nota: Tabla de resultados de los diferentes diseños de experimentos, efectuados para los usuarios del servicio eléctrico residencial de la ciudad de Mexicali B. C. aplicados por rango de consumo y por capacidad instalada del sistema fotovoltaico.

En la Tabla 16 se muestran los porcentajes de ahorro económico anual promedio para los usuarios del servicio eléctrico residencial en la ciudad de Mexicali B. C. al instalar un sistema solar fotovoltaico generados a partir de la configuración óptima determinada en los resultados de esta investigación, estos resultados se obtuvieron al promediar el ahorro de cada uno de los 400 usuarios de la muestra representativa y se obtuvo para cada rango de consumo y para cada una de las 5 capacidades de generación analizadas, el objetivo de presentar esta información es determinar de una manera rápida el porcentaje de ahorro económico obtendría un usuario en determinado rango de consumo, al utilizar un SFV de una capacidad específica. Por ejemplo, si se quiere saber el porcentaje de ahorro de un usuario clasificado en el rango de consumo intermedio bajo al utilizar un SFV de 2 kWp en base a la Tabla 16 se conoce que en promedio su ahorro económico será de 74.86 %.

Tabla 16: *Porcentajes de Ahorro económico anual promedio*

Rango de consumo	% de ahorro Promedio 1 kWp	% de ahorro Promedio 2 kWp	% de ahorro Promedio 3 kWp	% de ahorro Promedio 4 kWp	% de ahorro Promedio 5 kWp
Básico	77.68%	-	-	-	-
Intermedio bajo	46.01%	74.86%	90.83%	-	-
Intermedio alto	28.69%	49.53%	65.76%	80.16%	92.16%
Excedente	11.70%	22.06%	31.44%	39.81%	48.42%

Nota: Tabla de porcentajes de ahorro económico anual promedio, basado en el total de la muestra representativa, para el rango de consumo básico a partir de 2 kWp no aplica la metodología de igual manera de igual manera para los usuarios del rango intermedio bajo a partir de 4 kWp ya que la generación supera el consumo.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES

Al llevar a cabo un análisis estadístico del impacto que tienen los sistemas solares fotovoltaicos en el costo eléctrico de los usuarios del sector residencial de la ciudad de Mexicali B. C. y basando dicho análisis con información de consumos reales, usando el programa SAM para obtener la generación fotovoltaica, utilizando diferentes configuraciones variando entre sí el tipo de módulo, el tipo de inversor, la inclinación y la orientación, ingresar esta información en el simulador tarifario 1F, obtener los ahorros económicos al utilizar SFV interconectados a la red y realizar un diseño de experimentos para cada rango de consumo establecido por CFE, con la finalidad de obtener mayor precisión al segmentar la población a estudiar se concluye lo siguiente:

La configuración del sistema fotovoltaico que produce mayor ahorro económico en el costo eléctrico para los usuarios del sector residencial de la ciudad de Mexicali B. C. es un SFV que utilice módulos policristalinos, inclinados a 32° , orientados hacia el sur y utilizando micro inversores. Esta configuración aplica para todas las capacidades de generación analizadas y para todos los rangos de consumo excepto para los usuarios de rango intermedio bajo, que al utilizar un SFV con una capacidad de 2 kWp deberán cambiar la inclinación a 20° con la finalidad de maximizar los ahorros. Con esta conclusión se acepta la hipótesis planteada en esta investigación, con la única excepción para los usuarios de rango intermedio bajo con SFV de 2 kWp.

Para usuarios clasificados en el rango de consumo básico se encontró una diferencia del 20% en el ahorro económico obtenido entre la configuración óptima y la de menor rendimiento. En los usuarios de rango intermedio bajo las diferencias en este sentido fueron del 22%, con un SFV de 1 kWp, un 19% con un SFV de 2 kWp y de 16.37% con un SFV de 3 kWp.

En los usuarios del rango intermedio alto las diferencias del ahorro económico obtenido entre la combinación óptima y la de menor rendimiento fue de 25%, 23.20%, 19.48%, 17.70% y 13.50% para SFV de capacidades de 1, 2, 3, 4 y 5 kWp respectivamente. Asimismo, para los usuarios clasificados como excedentes las diferencias encontradas son de 24.92%, 22%, 21.71%, 21% y 21.52% para SFV de capacidades de 1, 2, 3, 4 y 5 kWp respectivamente.

Por otro lado, cambiar en la configuración óptima la inclinación de 32° a 20° representa un decremento en el ahorro económico menor al 2%, solo para los usuarios del rango intermedio alto con un SFV de 2 kWp representa una disminución del 2.4% y para los usuarios del rango de consumo intermedio bajo con un SFV de 2 kWp, para los cuales el análisis determinó una inclinación óptima a 20° el cambiar está a 32° representa una disminución menor al 1% en los ahorros económicos.

En este mismo sentido cambiar el tipo de inversor del tipo micro a inversor central para los usuarios del rango básico con un SFV de 1 kWp representa una disminución de 2.53% en los ahorros económicos y a los usuarios clasificados como intermedio bajo

representa un decremento del 2.09%, 1.81% y 1.97% con SFV de capacidades de 1 kWp, 2 kWp y 3 kWp respectivamente.

En intermedio alto se obtiene un decremento de 2.5%, 2.22%, 1.98%, 1.85% y 1.56% con SFV de 1, 2, 3, 4, 5 kWp respectivamente. En excedente las disminuciones de los ahorros económicos son de 2.78%, 2.22%, 2.5%, 2.55% y 2.49 % para SFV de 1, 2, 3, 4 y 5 kWp respectivamente.

Cabe mencionar, que la configuración óptima obtenida estadísticamente es válida, para el conjunto de la población estudiada, pero dado que la tarifa aplicada en la ciudad de Mexicali es de consumo escalonado y además varía su esquema tarifario del periodo de invierno a el periodo de verano es decir en verano disminuye el precio del kWh, la amplitud de los rangos es mayor y aumenta la cantidad rangos de 3 a 4, se descubrió que la configuración óptima puede no ser la misma para todos los usuarios, esto se debe principalmente a la variación de consumos entre verano e invierno.

Recomendaciones

Como parte final de este trabajo de investigación se hace la recomendación a los diferentes programas gubernamentales orientados a impulsar el uso de sistemas solares fotovoltaicos en la ciudad de Mexicali B. C. utilizar de manera general la configuración óptima recomendada en esta investigación, se recomienda el desarrollo y uso de un software que calcule dicha configuración para el usuario de manera individual personalizando así la configuración en base a su historial de consumo.

Se extiende la recomendación de aplicar la metodología aquí utilizada a las diferentes tarifas domésticas del país, así como a las diferentes ciudades ya que se pudiera no estar obteniendo el mayor rendimiento de los sistemas solares fotovoltaicos

Finalmente queda demostrado que el considerar el factor económico como un método para determinar la configuración de un sistema fotovoltaico es algo nuevo que no se ha utilizado. por lo que se recomienda tener en cuenta esta consideración en futuras instalaciones.

REFERENCIAS

- ASI. (2018), Lineamientos para Sistemas Fotovoltaicos Interconectados. Unidad Coordinadora del Fideicomiso 728 FIPATERM.
- Blair, N. DiOrio, N. Freeman, J. Gilman, P. Janzou, E. Neises, T. y Wagner, M. (2018). *System Advisor Model (SAM) General Description* (Version 2017.9.5). Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/ TP-6A20-70414.
- Caravia, Meave, Valverde y Cano-Santana. (2009). *Ecología y Medio Ambiente en El Siglo XXI*. México: Pearson Educación.
- Castejón, A. y Santamaria G. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. España: Editex.
- CFE. (2020). <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/Tarifa1F.aspx>
- CIEP, (2018) Comparativo de aprovechamiento solar. Recuperado de: <http://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/>.
- Creus, A. (2010). *Energía Termosolar*. España: Ediciones Ceysa
- De Buen O. Navarrete J. (2019). Análisis de la evolución del consumo eléctrico del sector residencial entre 1982 y 2018 e impactos de ahorro de energía por políticas públicas. CONUEE. https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno2nvociclo_1.pdf
- De Buen O. (2020). Eficiencia energética en el confort térmico en viviendas de clima cálido en México. CONUEE. [39https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno5nvociclo.pdf](https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno5nvociclo.pdf)
- Diario El Español. (9 de diciembre de 2019). COP: COP: ¿Cuántas Cumbres del Clima ha habido? Recuperado de: https://www.elespanol.com/ciencia/medio-ambiente/20191209/cop-cuántas-cumbres-clima/450705129_0.html
- Du Y. (2016) Evaluation of photovoltaic panel temperature in realistic scenarios 2016. Mussard M., Amara M. (2018). Performance of solar photovoltaic modules under arid climatic conditions.
- Duffie J. y Beckman W. (2020). *Solar Engineering of Thermal Process, Photovoltaics and Wind*. th Edition. Wiley.
- Fernández A. Muguruza, C. Azcárate, M, Mateos, F. y Cortés, I. (2015). *Iniciación a la Geografía. La Tierra: Un planeta habitado*. Madrid, España: Editorial Universitaria Ramón Areces.

Fernandez M. (2010). Energía Solar: Electricidad Fotovoltaica. Madrid, España: Editorial Lyberfactory.

García Judith, (2011). Atlas de riesgo del municipio de Mexicali B. C. Instituto de investigaciones sociales, UABC.

Gilbert M., Wendell, (2008), Introducción a la Ingeniería Ambiental. Madrid: Pearson Educación.

Gilman P. Dobos A. DiOro N. Freeman J. Janzuo S. y Ryber D. (2018). SAM Photovoltaic Model Technical Reference Update. National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/67399.pdf>

Gobierno de España. (2015). Resultados de la COP 21. Gobierno de España recuperado abril 22,2014 de <http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climático/temas/cumbre-cambio-climatico-cop21/resultados-cop-21-parís/default.aspx>

González A. (2010). Cambio climático: Causas, Consecuencias, y Soluciones. Madrid: AMV ediciones.

Hernández Culebro José Luis Tadeo. (2015, junio 26). El protocolo de Kioto y su impacto en la economía ambiental de México. Recuperado abril 18, 2014 de: <https://www.gestiopolis.com/el-protocolo-de-kioto-y-su-impacto-en-la-economía-ambiental-de-mexico/>

INEGI, (2018). Coordenadas extremas de México. recuperado el 01 de noviembre de 2018 de http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/coordenadas.aspx?tema=T_.

INEGI, (2018). Información por entidad/clima. Recuperado el 25 de noviembre 2018 de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/territorio/clima.aspx?tema=me&e=02>

IRENA, (2016) costos de los módulos fotovoltaicos 2010-2015, recuperado de: http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=3&subTopic=32_.

IRENA (2020), Renewable Capacity Statistics 2020; & IRENA (2019), Renewable Energy Statistics 2019, The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA, (2018). Capacidad instalada en México. Recuperado el 15 octubre 2018 de <https://www.irena.org/solar>.

IRENA, (2020). Países con mayor capacidad instalada de generación eléctrica <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>

- King D. Gonzalez S. Galbraith G. y Boyson W. (2007). Performance Model for Grid-Connected Photovoltaic Inverters. Sandia National Laboratories. SAND2007-5036. <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2007/075036.pdf>
- Malthus Thomas, (1798), An Essay on the Principle of Population.
- Matisoff Daniel, Johnson Erik, (2017). The comparative effectiveness of residential
- Messenger, R. y Abtahi, H. (2017). Photovoltaic System Engineering. Florida, Estados Unidos: CRC Press.
- Michalsky J. (1988). The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050). *Solar Energy Vol, 40*, No. 3. pp. 227-235,
- MINITAB. (2020). Recuperado de: <https://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/>
- Mongomery, D. (2004). Diseño y análisis de experimentos, México: Editorial Limusa S.A. de C.V.
- Muhammad A. (2020). Recent advancements in PV cooling and efficiency enhancement integrating phase change materials based systems. *Solar Energy* 197 163–198. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.075>
- Pérez P. (2016). Definición de Cambio Climático. Recuperado abril, 2018, de: <https://definicion.de/cambio-climatico/>
- Perpiñán O. (2018). Energía Solar Fotovoltaica. España: Creative Commons
- Programa ASI (2018). Programa ASI nosotros. Recuperado de: <http://programaasibc.com.mx/nosotros.php>
- Rachandra p. Boucar D. (2011), Solar Lighting. London: Springer. [DOI 10.1007/978-1-4471-2134-3](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2134-3).
- Reddy S. Ebadian M. Lin C. (2015). A review of PV–T systems: Thermal management and efficiency with single phase cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 91 (2015) 861–871. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.134>
- Res. (2015). Protocolo de Kioto ¿conoces en qué consiste? Eco Inteligencia Recuperado abril 20, 2018, de Sitio web: <https://www.ecointeligencia.com/2015/06/protocolo-kioto/>

- Schallenberg, J. Piernavieja, G. Hernández, C. Unamunzaga, P. García. R. Diaz, M. Cabrera, D. Martel, G. Pardilla, J. y Subiela, V. (2008). Energías renovables y eficiencia energética, España: Instituto Tecnológico de Canarias, S.A. Solar incentives.
- SENER. (2017). Reporte de Avance de Energías Limpias 2017. Recuperado de: <https://www.gob.mx/sener/documentos/informe-sobre-la-participacion-de-las-energias-renovables-en-la-generacion-de-electricidad-en-mexico-al-30-de-junio>
- Solargis, (2018). Potencial fotovoltaico de México. Recuperado el 25 de octubre 2018 de <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/mexico>
- Suástegui J. (2014). Evaluación del impacto en el consumo Eléctrico del Programa de Ahorro Sistemático Integral en Mexicali, Baja California (tesis grado de doctor) Universidad Autónoma de Baja California
- Suástegui J. Pérez C. Acuña A. Lambert A. Magaña H. Rosales P. y Ruelas A. (2018). Assessment of electrical saving from energy efficiency programs in the residential sector in Mexicali, México. . *Sustainable Cities and Society* vol. 38 785-805. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.031>
- Valenzuela, M. Michea, S. Muñoz, A. Zárate, x. Alvarado N. Inostroza, N. Reyes, L. Schaffeld, G. Linares, C. Gómez T.(2019). Energías que mueven al mundo. Chile: Universidad Autónoma de Chile. Gutiérrez, H Pulido, R. d. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw Hill.
- Van Helden W. Van Zoligen R. Zondag H. (2004). PV Thermal Systems: PV Panels Supplying Renewable Electricity and Heat. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 12:415–426. (DOI: 10.1002/pip.559).
- Yang L, Liang J.Hsu C. Yang T. Chen S. Enhance efficiency of photovoltaic panels by integrating a spray cooling system with shallow geothermal energy heat exchanger. *Renewable Energy* vol 134. 970-981. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.089>