

INGENIERIA ELECTRICA

DIMENSIONAMIENTO, DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA RESIDENCIAL FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A LA RED.

Daniel de Jesús Gómez Pérez 12270625

ASESOR INTERNO

Ing. Luis Alberto Pérez Lozano

ASESOR EXTERNO

Ing. Oscar Reyes Escamilla

ELIRMEX S.A. DE C.V.

ENERO DE 2017

NOMENCLATURA		
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
A	Intensidad de corriente eléctrica	A
E_C	Energía consumida	W-h
E_{gm}	Energía generada por módulo	W-h
h_p	Hora solar-pico	h
I_m	Corriente del módulo	A
I_{inv}	Corriente del inversor	A
Kg	Masa	k
M	Número de módulos	--
m	Distancia	m
m^2	Área	m^2
N_{sis}	Eficiencia combinada	--
P	Potencia	W
P_{inv}	Potencia del inversor	W
P_m	Potencia del módulo	W
R_a	Radiación albedo	W/m^2
R_d	Radiación directa	W/m^2
R_s	Radiación dispersa	W/m^2
R_t	Radiación solar total	W/m^2
t	Tiempo en horas	h
V	Tensión eléctrica	V
V_{inv}	Tensión del inversor	V
V_m	Tensión del módulo	V
P_p	Potencia pico	W
t	Temperatura	°C
SIGLAS		
SFCR	Sistema fotovoltaico conectado a la red	--
SFV	Sistema fotovoltaico	--
FV	Fotovoltaico	--

Índice

Tabla de contenido

1. Introducción.....	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Estado del Arte	3
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos.....	4
1.5 Metodología.....	5
2. Fundamento Teórico.....	6
2.1 Fundamento de la Energía Fotovoltaica.	6
2.2 Efecto Fotovoltaico.....	10
3. Desarrollo	22
4. Resultados y Conclusiones	39
Anexos.....	42

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Los sistemas fotovoltaicos son sistemas que producen electricidad directamente de la luz solar. Los sistemas fotovoltaicos (FV; en inglés PV) producen energía limpia y confiable sin consumir combustibles fósiles y pueden ser usados en una amplia variedad de aplicaciones. [1]

Las investigaciones en la tecnología fotovoltaica comenzaron hace más de cien años. En 1873 el científico británico Willoughby Smith observó que el selenio era sensible a la luz. Smith concluyó que la capacidad del selenio de conducir electricidad aumentaba en proporción directa con su exposición a la luz. En 1880, Charles Fritts desarrolló la primera celda fotovoltaica basada en selenio.

Hasta 1905, cuando Albert Einstein ofreció su explicación del efecto fotoeléctrico, no había gran aceptación de la FV como fuente de energía. Las teorías de Einstein condujeron a un mayor entendimiento del proceso físico de generación de electricidad a partir de la luz solar. A pesar de su baja eficiencia y altos costos de producción, los científicos continuaron sus investigaciones sobre la celda solar de selenio durante los años 30 del siglo XX. [2]

Las energías renovables han tenido un crecimiento enorme en el siglo XXI y en los últimos tres años se ha presentado una mayor demanda de este tipo en México tanto en los sectores doméstico como en el comercial. Esta demanda se ha presentado mayormente en el sector doméstico y cada vez más empresas y personas muestran interés por conocer más ampliamente el funcionamiento de un sistema solar fotovoltaico.

Los sistemas conectados con la red de servicios públicos, también llamados sistemas FV interactivos, son sistemas FV de generación, instalados en casas o edificios comerciales y que interactúan con un servicio público de electricidad. Se diseñan para reemplazar total o parcialmente las necesidades eléctricas del edificio. Los avances en la tecnología electrónica solar permiten que sea relativamente fácil conectar un sistema solar a la red de servicio público. [3]

1.2 Estado del Arte

Instalaciones fotovoltaicas interconectadas en México.

El proyecto se inició en 2007 con la impartición del diplomado de SFCR por investigadores del Instituto de Investigaciones Eléctricas, en el que participaron integrantes del personal académico y administrativo de la UAM-Iztapalapa, así como estudiantes de los últimos trimestres de las licenciaturas de Ingeniería en Energía y de Ingeniería Electrónica. Como resultado del proceso de licitación pública se adjudicó el proyecto llave en mano de la instalación de un SFV de 60 kWp con un sistema de monitoreo a la empresa Tenesol. [4]

El techo del local de The Green Corner Coyoacán está cubierto por 204 módulos FV capaces de generar 30 000 W de energía eléctrica. El sistema permitirá que dejen de consumirse en promedio 120 kW-h por día. Además, por estar conectado a la red de distribución pública su diseño le permite inyectar los excedentes de energía para que sean aprovechados por otros usuarios, con lo cual se realiza una contribución positiva a la sociedad. [5]

El SFCR tiene una capacidad de 30 kWp $\pm 2\%$, los módulos FV están en la plataforma de concreto que actualmente ocupa la maqueta de la “Planta Geotérmica de Cerro Prieto, B. C.” del MUTEK. El SFV se instaló en las áreas exteriores de las instalaciones del MUTEK, las cuales se localizan en la ciudad de México, D. F., ubicadas en la Av. Grande del Bosque s/n 2ª sección del Bosque de Chapultepec. [6]

El 12 de octubre de 2006 en Mexicali B. C., fueron entregadas las primeras casas en México con SFCR. El fraccionamiento cuenta con 220 casas de interés social con 1 kW FV c/u. Esto permite que cada vivienda provista con este sistema, sea capaz de producir una parte importante de la energía que consume. Con esto se estima que una vivienda de este tipo puede producir hasta el 50% anual de su consumo de energía eléctrica. [7]

Es un edificio de 315 m de largo x 37 m de alto, diseñado a partir de formas curvadas, un edificio puente, un cuadrado curvo y gigante forrado de 5000 paneles FV. Se construyó en el 2005 para la exposición universal de Aichi, como un icono de lo que puede conseguir la arquitectura integrada con las tecnologías productoras de energías renovables. Lo particular, es que este edificio surgió a partir de un error, hace varios años Sanyo anunció la construcción de la central de energía solar más grande del mundo, con 3.4 MW de potencia, para celebrar su quincuagésimo aniversario.

1.3 Justificación

Vale la pena realizar este proyecto de dimensionamiento, diseño e instalación de un sistema residencial fotovoltaico interconectado a la red para asegurar la funcionalidad y confiabilidad en la tendencia a descentralizar la producción de electricidad y buscar tecnologías no convencionales para su abastecimiento, donde la energía solar ha surgido como una solución de alto potencial por utilizar un recurso que en teoría es inagotable.

1.4 Objetivos

El presente trabajo de investigación se centrará en el diseño de un sistema fotovoltaico para una casa residencial, interconectando a la red con la finalidad de reducir los costos derivados del consumo de energía eléctrica convencional.

1.5 Metodología

DIAGRAMA ESPECÍFICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A LA RED

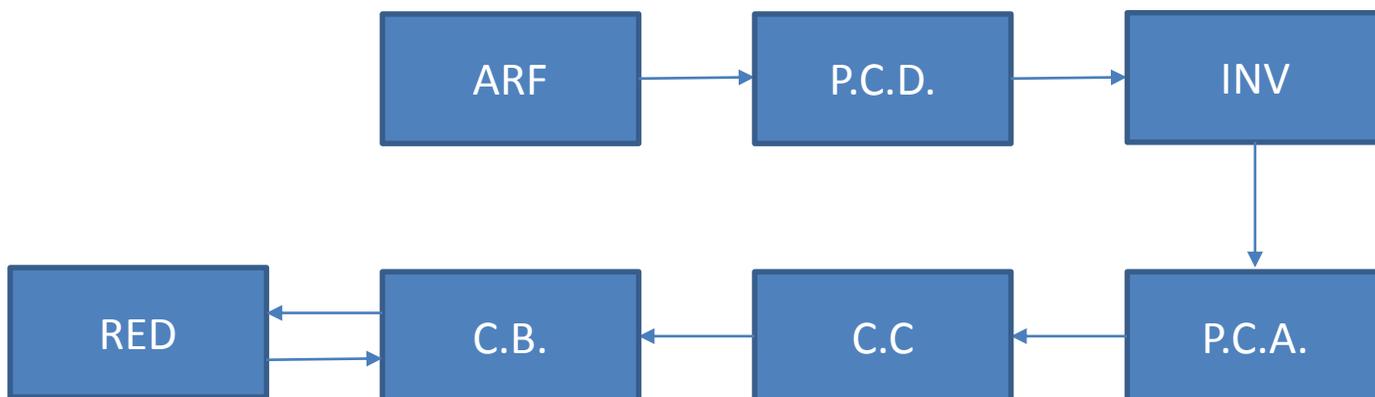


Fig.1.1 Diagrama a bloques hardware de un sistema fotovoltaico interconectado a la red.

ARF. Arreglo fotovoltaico es el conjunto de paneles conectados en serie o en paralelo para incrementar la potencia de trabajo en el sistema.

P.C.D. La protección es la encargada de salvaguardar toda la instalación eléctrica de un posible cortocircuito o punta de intensidad la cual afectaría a todos los componentes conectados a la red estas en C.C.

INV. El inversor es el equipo encargado de transformar la energía recibida del generador fotovoltaico (en forma de corriente continua) y adaptarla a las condiciones requeridas según el tipo de cargas, normalmente en corriente alterna y el posterior suministro a la red.

P.C.A. Protecciones es la encargada de salvaguardar toda la instalación eléctrica de un posible cortocircuito o punta de intensidad la cual afectaría a todos los componentes conectados a la red estas en C.A.

C.C. Centro de carga es un tablero metálico que contiene una cantidad determinada de interruptores termomagnéticos, generalmente empleados para la protección y desconexión de las cargas del cliente.

C.B. Contador bidireccional Está constituido por un contador de la energía producida por el sistema solar fotovoltaico exportada hacia la red pública nacional y otro que en contraposición medirá el consumo importado desde la red pública nacional. El valor neto mostrando indica la producción neta de electricidad consumida por la propiedad.

RED. La red eléctrica es una red interconectada que tiene el propósito de suministrar electricidad desde los proveedores hasta los consumidores, con la cual el cliente tiene contrato.

2. Fundamento Teórico

2.1 Fundamento de la Energía Fotovoltaica.

El Sol la fuente de energía de nuestro Planeta Tierra está situado a una distancia de aproximadamente 149, 600,000 kilómetros de distancia. Su energía produce alrededor de 386 billones de billones de megavatios por segundo en forma de luz solar, sustentando a casi todas las formas de vida en la Tierra. [8]

El Sol se formó hace 4,650 millones de años y tiene combustible para 5,000 millones más. Entonces, ¿por qué no usar esta energía abundante de manera útil para tener luz eléctrica en la casa, calentar agua y hasta cocinar la comida? En un día claro, la energía solar de aproximadamente un kilowatt por metro cuadrado (1 kW/m²) llega a la superficie de la Tierra. Una sola hora de la energía solar que llega a la Tierra sería suficiente para el suministro de energía que el mundo necesita para todo un año.

La tierra está bañada por un volumen enorme de energía solar. A diferencia del petróleo, carbón y otros combustibles fósiles, no hay peligro de que se acabe. La energía del Sol no produce emisiones de CO₂ u otro daño para el medio ambiente. En contraste con los recursos energéticos enterrados bajo tierra sólo en ciertas regiones, la energía solar se puede encontrar en cualquier lugar. Y no hay necesidad de transportarlo o quemarlo. Si los rayos del Sol se utilizan bien, la energía se puede obtener en cualquier parte del mundo.

2.1.1. Radiación Solar

La radiación solar es la energía electromagnética que surge en los procesos de fusión del hidrogeno contenido en el sol. La energía solar que un año llega a la tierra a través de la atmosfera es aproximadamente 1/3 de la energía total interceptada por la tierra fuera de la atmosfera de la cual 70% llega al mar y la energía restante (1.5×10^{17} kW-h) a tierra firme. La radiación solar recolectada fuera de la atmosfera sobre una superficie perpendicular a los rayos solares es conocida como constante solar y es igual a 1353 W/m^2 . [9]

El valor máximo medido sobre la superficie terrestre es de aproximadamente 1000 W/m^2 , en condiciones óptimas de Sol a mediodía y en un día de verano despejado. La radiación solar que llega a la superficie terrestre puede ser directa o dispersa. Mientras la radiación directa incide sobre cualquier superficie con un ángulo de incidencia único y preciso, la dispersa cae en esa superficie con varios ángulos.

Cuando la radiación directa no incide sobre una superficie a causa de un obstáculo, el área en sombra no se encuentra completamente a oscuras debido a la contribución de la radiación dispersa. Esta observación tiene importancia técnica para los dispositivos fotovoltaicos (FV), que pueden funcionar en algunos casos solamente con radiación dispersa. Una superficie inclinada puede recibir la radiación reflejada por el terreno, por espejos de agua o por otras superficies horizontales, fenómeno conocido como albedo. [10]

Las proporciones de radiación directa, dispersa y albedo recibida por una superficie dependen de:

- Las condiciones meteorológicas: En un día nublado la radiación es prácticamente dispersa en su totalidad; en un día despejado con clima seco predomina la componente directa que puede llegar hasta el 90% de la radiación total.
- La inclinación de la superficie respecto al plano horizontal: Una superficie horizontal recibe la radiación dispersa máxima si no hay alrededor objetos a una altura superior a la de la superficie.
- La presencia de superficies reflectantes: Debido a que las superficies claras son las más reflectantes, la radiación albedo aumenta en invierno por efecto de la nieve y disminuye en verano por efecto de la absorción de la hierba o del terreno.

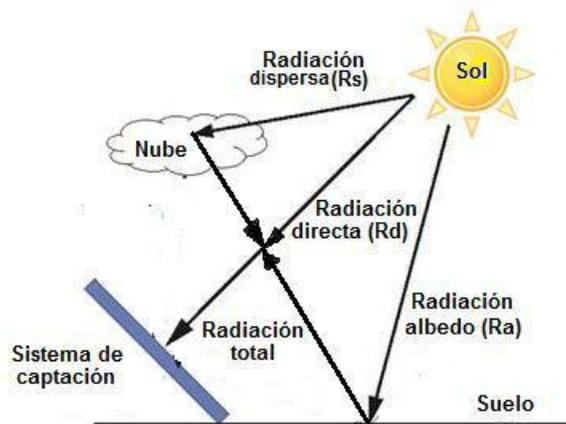


Fig2.1. Radiación sobre una superficie inclinada.

La relación entre la radiación dispersa y la total, varía en función del lugar, ya que al aumentar la inclinación de la superficie de captación, disminuye la componente dispersa y aumenta la componente albedo. Por ello, la inclinación que permite maximizar la energía recogida puede ser diferente dependiendo del lugar. La posición óptima se obtiene cuando la superficie está orientada al Sur, esto maximiza la radiación solar captada recibida durante el día, con un ángulo de inclinación igual a la latitud del lugar. [11]

El aprovechamiento de la energía del Sol está condicionado por la intensidad de radiación que se recibe en la Tierra (figura 1.3). La radiación varía según la latitud del lugar, el momento del día, las condiciones atmosféricas y climatológicas. La unidad métrica utilizada para la radiación es el W/m^2 que expresa la cantidad de energía que llega a un área de un metro cuadrado.

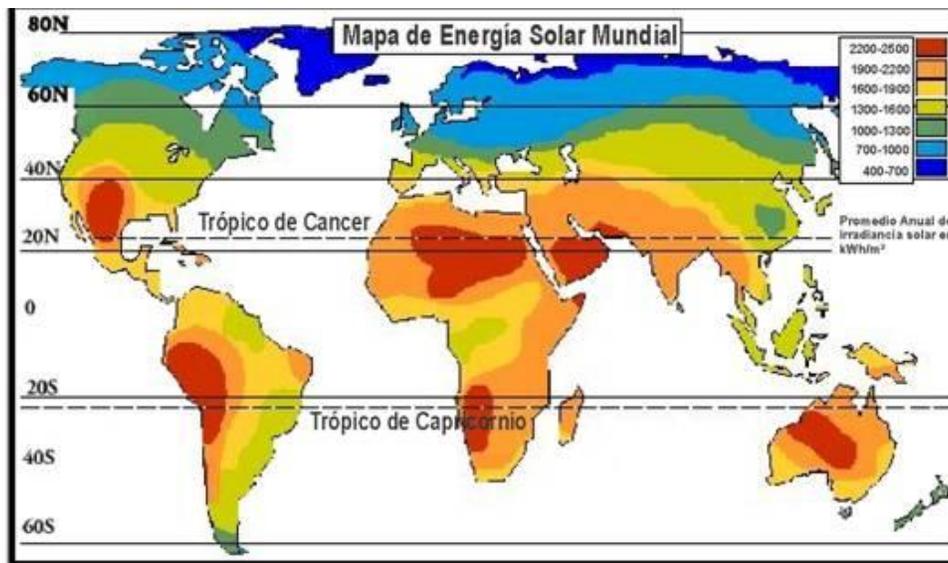
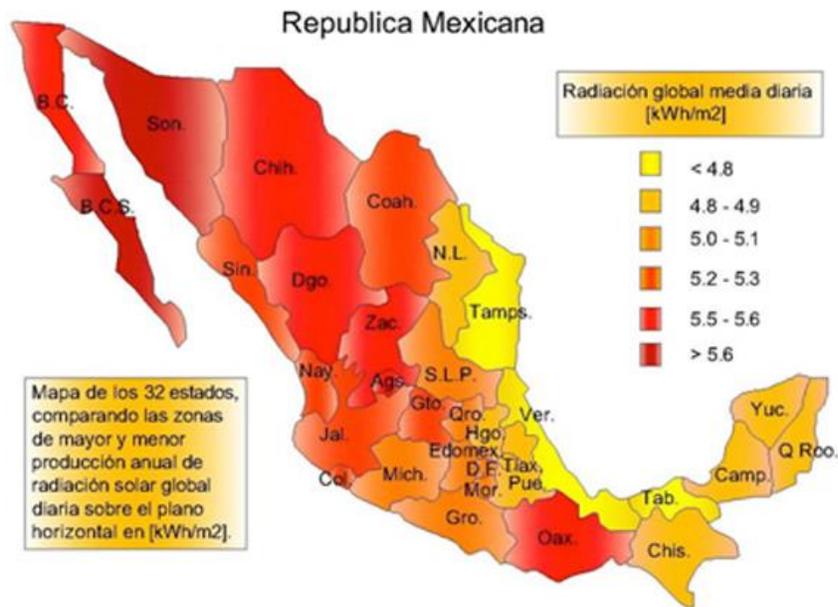


Fig2.2. Intensidad de radiación solar a nivel mundial.

El fenómeno de la radiación solar permite obtener la energía del sol para ser aprovechada de distintas formas y por distintos dispositivos, como son:

- Energía fototérmica: Cuando la radiación solar es aprovechada para el calentamiento.
- Energía fotovoltaica: Cuando la radiación solar se aprovecha para la generación de electricidad a través del efecto FV.

México tiene una alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio como lo muestra la figura 1.4; la zona norte es de las más soleadas del mundo con una radiación media anual de aproximadamente 5 kW h/m². Por lo que es uno de los países a nivel mundial que presenta condiciones ideales para el aprovechamiento masivo de este tipo de energía, sin embargo este potencial no se ha aprovechado ampliamente. [12]



Diseño ilustrativo. Elaboro: Ing. Manuel Muñoz Herrera. Datos: Servicio Metereológico Nacional

Fig.2.3. Radiación solar promedio anual en la República Mexicana.

La energía de la radiación solar que se recibe en una superficie determinada en un instante dado se le conoce como Irradiancia y se mide en unidades de watts por metro cuadrado [W/m²]. La irradiancia es un valor distinto para cada instante, es decir se espera que en un día despejado la irradiancia a las 10:00 A.M. Será diferente y menor a la que se obtiene a la 1:00 P.M., esto se debe al movimiento de rotación de la tierra (movimiento sobre su propio eje). Cuando es de noche, se tiene una irradiancia de 0 Watts por metro cuadrado (0 W/m²), porque simplemente a esa parte de la Tierra el Sol no la puede "ver". [13]

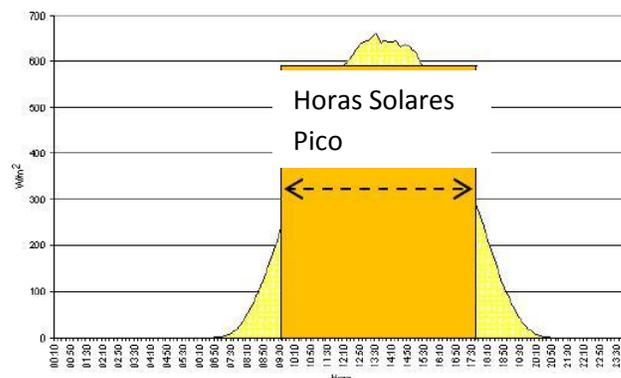


Fig.2.4. Radiación solar promedio anual en la República Mexicana.

La Insolación corresponde a la integración de la irradiancia en un período determinado. En otras palabras es la energía radiante que incide en una superficie de área conocida en un intervalo de tiempo dado. El término deriva de la palabra inglesa insolation, la que, a su vez, representa un acrónimo derivado de tres palabras del mismo idioma: incident solar radiation (radiación solar incidente). Este término tiene unidades de energía por área, comúnmente watts-hora por metro cuadrado [Wh/m²].

Generalmente se reporta este valor como una acumulación de energía horaria, diaria, estacional o anual. La energía útil que produce el arreglo fotovoltaico es directamente proporcional a la insolación que recibe. A la cantidad de irradiación recibida en un captador durante un tiempo de una hora, se ha convenido llamarla hora-pico. Para expresar al recurso solar en unidades de horas-pico, debe recordarse que el área bajo la curva de irradiancia contra tiempo representa la irradiación del día.

Si se considera que esta área es igual al área de un rectángulo cuya altura corresponde a una irradiancia-pico de 1000 W/m², entonces la base de este rectángulo es el número de horas en que supuestamente el Sol debería haber brillado con esta intensidad para obtener la misma la irradiación del día. Las horas-pico de un sitio determinado, se obtiene al dividir el valor de la irradiación diaria en Wh/m², entre 1000W/m². El resultado será el número de horas pico en que el captador estuvo aparentemente recibiendo el valor pico de la irradiancia. [14]

2.2 Efecto Fotovoltaico.

El fenómeno fotovoltaico fue descubierto en 1839 y las primeras celdas solares de selenio fueron desarrolladas en 1880. Sin embargo, no fue sino hasta 1950 que se desarrollaron las celdas de silicio monocristalino que son las más utilizadas en la industria fotovoltaica. A finales de la década de los setentas las celdas fotovoltaicas comenzaban a ser utilizadas en aplicaciones terrestres como electrificación de pequeñas instalaciones (varios Watts de potencia) en sistemas de telecomunicación, televisión rural, entre otras. [15]

El efecto fotovoltaico (FV) es la base del proceso mediante el cual una célula FV convierte la luz solar en electricidad. La luz solar está compuesta por fotones, o partículas energéticas. Estos fotones son de diferentes energías, correspondientes a las diferentes longitudes de onda del espectro solar. Cuando los fotones inciden sobre una célula FV. Pueden ser reflejados o absorbidos. Únicamente los fotones absorbidos generan electricidad. Cuando un fotón es absorbido, la energía del fotón se transfiere a un electrón de un átomo de la célula.

El objeto físico en el que este fenómeno tiene lugar es la celda solar, que es un diodo con la característica esencial de tener una superficie de unas decenas de cm^2 . Para describir el efecto FV se emplea conceptualmente el funcionamiento del diodo unión n-p (figura 1.5), el elemento más utilizado para la realización de las celdas solares es el silicio.

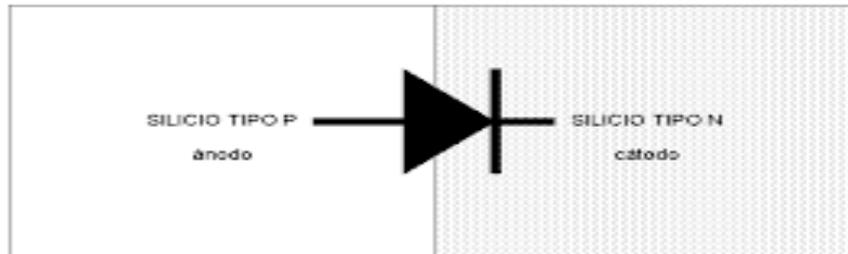


Fig 2.5. Símbolo del diodo.

2.2.1 Celda Fotovoltaica

La celda FV es un dispositivo formado por una lámina delgada de material semiconductor. Una celda FV tiene un espesor entre 0.25 mm y 0.35 mm y es de una forma generalmente cuadrada, con una superficie aproximada de 100 cm^2 . Para la realización de las celdas el elemento más utilizado es el silicio usado por las industrias electrónicas cuyo proceso de fabricación presenta costos muy altos por la pureza del Si requerida en esta aplicación.

Actualmente, el material más eficiente es el silicio mono-cristalino que presenta características y duración en el tiempo superior a cualquier otro material utilizado para el mismo fin; la conversión de la radiación solar en una corriente eléctrica tiene lugar en la celda FV. [16]



Fig 2.6. Celda Fotovoltaica.

Otros materiales para la realización de las celdas FV son:

- Silicio Mono-cristalino con rendimiento energético desde 15% hasta 17%.

- Silicio Poli-cristalino con rendimiento energético desde 12% hasta 14%.
- Silicio Amorfo con rendimiento energético menor del 10%.
- Otros materiales son: Arseniuro de galio, diseleniuro de indio y cobre, telurio de cadmio.

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos que convierten energía solar en electricidad por medio del efecto fotovoltaico, descubierto por el científico Francés Henri Becquerel en 1839. Una celda fotovoltaica absorbe la luz y está constituida por un cristal de silicio con impurezas de boro (material p) en una gran parte de su espesor y con impurezas de fósforo (material n) en su superficie creando una unión p-n.

La energía de los fotones de luz en la superficie de contacto de la célula de silicio provoca en la unión p-n la migración de las cargas positivas y negativas hacia un lado u otro, de tal forma que uno de los lados de la célula se carga positivamente y otro negativamente creándose una diferencia de potencial. La unión, mediante un circuito, de los lados opuestos permite obtener una corriente eléctrica.

Una característica importante de las celdas fotovoltaicas es que el voltaje de la célula no depende de su tamaño, y sigue siendo bastante constante con el cambio de la intensidad de luz.

2.2.2 Módulos Fotovoltaicos

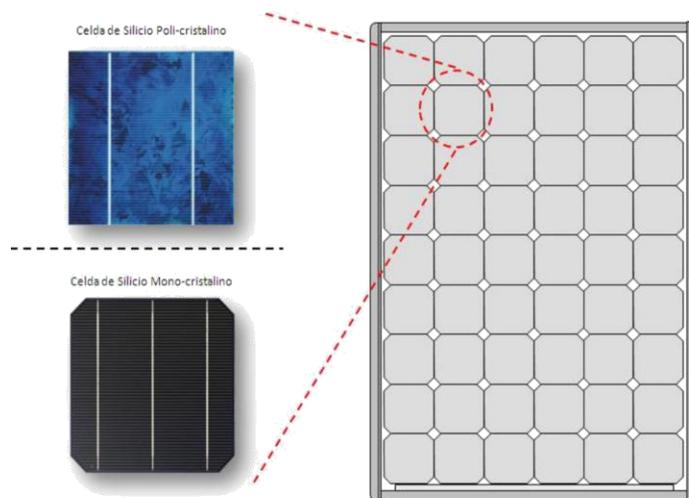


Fig 2.7. *Modulo Fotovoltaico.*

Las celdas FV constituyen un producto intermedio de la industria FV, proporcionan valores de tensión y corriente limitados, en comparación a los requeridos normalmente por los aparatos convencionales, son extremadamente frágiles, eléctricamente no aisladas y sin un soporte mecánico. Por lo que estas son ensambladas para constituir una estructura única: los

módulos FV. El módulo FV es una estructura robusta y manejable sobre la que se colocan las celdas FV. [17]

Las características eléctricas principales de un módulo FV son las siguientes:

- Potencia pico: Potencia suministrada por el módulo en condiciones normalizadas de prueba).
- Radiación solar: 1000 W/m².
- Temperatura: 25 °C.
- Corriente nominal: Corriente máxima suministrada por el módulo.
- Tensión nominal: Tensión máxima suministrada por el módulo.

La eficiencia de un Panel Solar es la parte proporcional de la radiación solar de 1,000 W/m² a 25°C de temperatura, que la célula convierte en electricidad. Viene dado en porcentaje y suele oscilar, según las características del material, entre el 3% y 30%. La Eficiencia de un panel solar puede ser calculada por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia del panel solar} = \frac{\text{Potencia de salida Nominal Maxima del Panel} \times 100}{\text{Superficie del Panelm}^2 \times 1,000 \text{ W/m}^2}$$

Los módulos FV generan electricidad durante todo el año, mientras se tenga radiación solar. Normalmente en verano es cuando más electricidad genera, debido a la mayor duración del tiempo soleado, aunque la inclinación de los módulos también es importante. En los días nublados también se genera electricidad, aunque el rendimiento energético se reduce proporcionalmente a la reducción de la intensidad de la radiación.

Los efectos del viento se suponen en algunos casos una carga adicional. Si los módulos se instalan en tejados y terrazas, el peso de los módulos no suele representar ningún problema, pero siempre es recomendable consultar la normativa vigente de edificación, aunque raramente habría que reforzar las estructuras. La vida de los módulos FV está entre 25 y 30 años; en el mercado se tienen módulos con garantías de 10, 15 y 20 años. Estos componentes nunca dejan de generar electricidad, aunque por lo menos en 10 años las celdas FV reducen su potencia en un 10%. [18]

2.2.3 Arreglo Fotovoltaico

Varias celdas ensambladas mecánicamente entre ellos forman el panel, por lo que un ARF está formado por el conjunto de paneles FV, componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar y transformar la energía solar disponible, en energía eléctrica utilizable. Los SFV generan electricidad a partir de la intensidad de la radiación solar, no del calor; por lo que el frío no representa ningún problema para el aprovechamiento. [19]

La cantidad de energía producida por un SFV varía durante el año en función de la radiación de la localidad y de la latitud de la misma.



Fig 2.8. Sistema fotovoltaico conectado a la red.

Para cada aplicación, el SFV tendrá que ser dimensionado teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Carga eléctrica.
- Potencia pico.
- Latitud del lugar y radiación solar media anual del mismo.
- Características arquitectónicas específicas del edificio.
- Características eléctricas específicas de la carga.
- Posibilidad de conexión a la red eléctrica.

2.3 Criterios de diseño de un SFV

A continuación, se describen las etapas para establecer los criterios de diseño de un SFCR.

Cálculo de la energía consumida diariamente

Un método de cálculo consiste en obtener mediante tablas adecuadas las horas equivalentes del lugar considerado y la inclinación deseada de los módulos FV. Se define como “hora equivalente u hora pico solar” el período de tiempo en el que la radiación solar toma un valor igual a 1000 W/m^2 . Esta metodología es utilizada en los cálculos de las dimensiones de una instalación FV y en la energía consumida diariamente. La energía consumida diariamente se expresa con la ecuación 1.2 y la potencia total se obtiene de la ecuación

$$E_C = P_{TOTAL} \times t \quad (1.2)$$

$$P_{TOTAL} = P1 + P2 + P3 + P4 + P5 \quad (1.3)$$

Donde:

E_C = Energía consumida, W-h.

t = Tiempo de utilización, h.

P = Potencia, W.

P_{TOTAL} = potencia total, W.

Verificación de la aptitud del lugar

Un aspecto fundamental en la localización de los módulos es asegurar que no existen obstáculos que puedan dar sombra, al menos durante las horas centrales del día (vegetación, nieve, edificios, elementos constructivos, otros módulos, etc.). Estas características determinan la ubicación del SFV, su exposición respecto al Sur geográfico, la mayor inclinación sobre el plano horizontal, y las características de las estructuras de soporte.

Elección de la inclinación de los módulos

En las latitudes del D. F. mostradas en la tabla 1.1, la orientación óptima de los módulos FV es hacia el Sur. Sin embargo lo que se deja de generar por estar orientados hacia el Sureste o Suroeste representa sólo un 0.08% por cada grado de desviación respecto al Sur (cuando se parten de desviaciones de $\pm 25^\circ$ respecto al Sur). Del mismo modo, la inclinación óptima de los módulos FV depende de la latitud del lugar donde se van a instalar.

La inclinación normalmente tiene que ser igual a la latitud del lugar, lo que es posible siempre que no haya exigencias de tipo arquitectónico que lo impidan. La latitud del sitio define la orientación e inclinación que deberá poseer un SFV (figura 1.9). Los techos horizontales son convenientes para la instalación de un SFV, debido a que el montaje puede realizarse en estructuras con condiciones óptimas de orientación e inclinación ya que son aspectos determinantes para su producción eléctrica

Si se establece una orientación hacia el Sur geográfico y un ángulo de inclinación igual al ángulo de latitud, se maximiza la producción en términos anuales, la inclinación se selecciona para aumentar la captación del mes con menos radiación; el ángulo es tal que el mínimo anual una vez inclinado sea el máximo respecto a las otras inclinaciones, por lo que se mejora la captación en una época y se desfavorece en otra. [20]

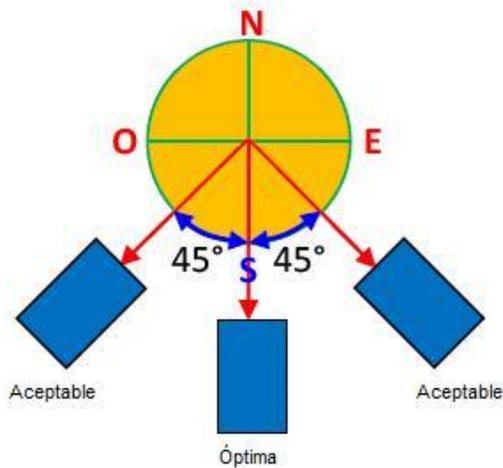


Fig 2.9. Orientación del módulo FV para máxima producción anual.

Tabla 2.1 Latitudes de la Ciudad de México.

LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
19.4°	-99.2°	2308

Tabla 2.2 Ángulo de inclinación para la generación eléctrica máxima

Ángulo de inclinación	Resultado
Latitud	Generación eléctrica máxima anualizada, durante la primavera y el otoño
Latitud - 15°	Generación eléctrica máxima en verano
Latitud + 15°	Generación eléctrica máxima en invierno

En cualquier caso, es recomendable una inclinación superior a 10° para permitir que el agua de la lluvia escurra; y donde neva con cierta frecuencia es recomendable una inclinación superior a 45°, para favorecer el deslizamiento de la nieve. No obstante se debe procurar acercarse lo más posible a las condiciones óptimas de instalación.

En caso de que los techos ya posean cierta inclinación, su orientación deberá ser preferentemente hacia el Sur geográfico y en ningún caso al Norte, si el montaje es horizontal, la ganancia energética es menor, pero puede ser aceptable estimándose una reducción en la producción de menos el 10%.

Evaluación de las pérdidas de sistema

Es necesario tener en cuenta las pérdidas/caídas de tensión introducidas por los componentes que forman el sistema (cableado, conversión, sombreado, etc.) Basta con considerar un 15% de pérdidas para lograr un buen dimensionamiento del sistema fotovoltaico aunque estas puedan llegar a ser mayores o menores.

Dimensionamiento de los Módulos.

Conociendo los siguientes datos podemos proceder a realizar el dimensionamiento de los paneles:

- Las horas solar pico del lugar (h)
- El promedio diario de energía consumida (Kwh)
- Las pérdidas del sistema son aproximadamente del 15%
- Elegir la potencia del panel que deseemos (KW)

Procedemos a calcular la energía que nos brindara cada panel a lo largo del día mediante la siguiente fórmula, que ya toma en cuenta el 15% de las perdidas en el sistema después solo realizamos el cálculo del número de paneles necesarios para satisfacer esa demanda energética:

$$E_p = P_p \times h_{sp} \times 0.85 \quad (1.4)$$

$$T_p = \frac{E_{TOTAL}}{E_p} \quad (1.5)$$

Donde:

E_p = Energía producida por cada panel, KWh.

P_p = Potencia pico de cada panel, KW.

E_{TOTAL} = Energía total consumida en un día, KWh.

h_{sp} = Horas solar pico del lugar, h.

T_p = Total de paneles.

Selección del inversor

Siempre para la elección del inversor tendremos en cuenta que este debe mostrar los parámetros que mencionamos en el apartado de “inversor”, para conocer la potencia del inversor bastará con solo sumar la potencia de todos los paneles.

$$P_1 = T_p \times P_p$$

Donde:

P_1 = Potencia del inversor, KW.

P_p = Potencia pico de cada panel, KW.

T_p = Total de paneles.

Para finalizar la potencia del inversor debe proveer 100 W adicionales para tener un margen de tolerancia.

2.4 Criterios de diseño de un SFV

Los SFV, independientemente de su utilización y del tamaño de potencia, se pueden dividir en dos categorías:

- Aislados.
- Conectados a la red.

Los sistemas aislados, por el hecho de no estar conectados a la red eléctrica, normalmente están equipados con sistemas de acumulación de la energía producida. La acumulación es necesaria porque el SFV puede proporcionar energía sólo en las horas diurnas, mientras que a menudo la mayor demanda por parte del usuario se concentra en las horas de la tarde y de la noche. Una configuración de este tipo implica que el SFV debe estar dimensionado de forma que permita, durante las horas de radiación, la alimentación de la carga y de la recarga de las baterías de acumulación. [21]

Los sistemas conectados a la red normalmente no tienen sistemas de acumulación, ya que la energía producida durante las horas de radiación es canalizada a la red eléctrica; y durante las horas de radiación escasa o nula, la carga viene alimentada por la red. Un sistema de este tipo desde el punto de vista de la continuidad de servicio resulta más fiable que uno no conectado a la red que en caso de avería no tiene posibilidad de alimentación alternativa.

La tarea de los sistemas conectados a la red es la de introducir en la red la mayor cantidad posible de energía. Es necesario tener en cuenta que en el caso especial de un sistema conectado a la red sin acumulación; es la red misma la que desempeña la tarea de acumulador de capacidad infinita y la carga la representa el usuario conectado a la red. La estructura física de un SFV aislado o conectado a la red puede ser muy diferente, pero se pueden distinguir tres elementos:

- El campo FV.
- Sistema de acondicionamiento de la potencia.
- Sistema de adquisición de datos.

2.4.1 Sistema fotovoltaico conectado a la red (SFCR)

Aunque se han mencionado los componentes no se han profundizado las características principales de todos ellos y los tipos. A continuación se enlistan los componentes:

- Módulos Fotovoltaicos
- Inversor
- La Estructura
- Caja General de Protección
- Puesta a Tierra
- Cableado de Interconexión

Inversor.

Es el equipo encargado de transformar la energía recibida del generador fotovoltaico y adaptarla a las condiciones requeridas según el tipo de cargas, normalmente en corriente alterna y el posterior suministro a la red. Los inversores vienen caracterizados principalmente por la tensión de entrada, que se debe adaptar al generador, la potencia máxima que puede proporcionar y la eficiencia. Esta última se define como la relación entre la potencia eléctrica que el inversor entrega a la utilización y la potencia eléctrica que extrae del generador.

Aspectos importantes que habrán de cumplir los inversores: Deberán tener una eficiencia alta, pues en caso contrario se habrá de aumentar innecesariamente el número de paneles para alimentar la carga. Estar adecuadamente protegidos contra cortocircuitos y sobrecargas. Incorporar rearme y desconexión automáticos. Admitir demandas instantáneas de potencia mayores del 150% de su potencia máxima.

Características de un inversor comercial.

La información que se puede obtener de la ficha técnica proporcionada por el fabricante de un inversor puede incluir los siguientes parámetros:

- Potencia nominal y máxima, siendo esta un porcentaje de sobrecarga que el equipo es capaz de soportar durante un determinado periodo de tiempo (indicado por el fabricante).
- Ventana de búsqueda del Punto de Máxima Potencia (MPP en siglas inglesas): es el rango de tensiones en las que el inversor aplica un algoritmo de búsqueda del MPP del generador fotovoltaico.

- Cuando este punto permanece fuera de esta ventana, el inversor fija en el generador FV la tensión correspondiente al valor límite de la ventana. Por tanto, configurar un generador de forma que el MPP recaiga fuera de esta ventana.

Las principales partes de un inversor son:

- Control principal. Incluye todos los elementos de control general, los sistemas de generación de onda basados en sistemas de modulación de anchura de pulsos (PWM) y parte del sistema de protecciones.
- Etapa de potencia. Esta etapa puede ser única o modular en función de la potencia deseada. Se opta por la tecnología en baja frecuencia ya que ofrece buenos resultados con una alta fiabilidad y bajo costo. Además, debe incorporar un filtro de salida (LC), para filtrar la onda y evitar el rizado en la tensión procedente de los módulos.
- Control de red. Es la interface entre la red y el control principal. Proporciona el correcto funcionamiento del sistema al sincronizar la forma de onda generada a la de la red eléctrica, ajustando tensión, fase, sincronismo, etc.
- Seguidor del punto de máxima potencia (MPPT). Es uno de los factores más importantes en un inversor. Su función es acoplar la entrada del inversor a los valores de potencia variables que produce el generador, obteniendo en todo momento la mayor cantidad de energía disponible, la máxima potencia.
- Protecciones. De manera general, los inversores deben estar protegidos ante tensión de red fuera de márgenes, frecuencia de red fuera de márgenes, temperatura de trabajo elevada, tensión baja del generador, intensidad del generador fotovoltaico insuficiente, fallo de la red eléctrica y transformador de aislamiento, además de las protecciones pertinentes contra danos a personas y compatibilidad electromagnética.
- Monitorización de datos. Los inversores dispondrán de microprocesadores que les facilite una gran cantidad de datos tanto de los parámetros habituales (tensión, corriente, frecuencia, etc.) Como de parámetros externos (radiación, temperatura ambiente, etc.) e internos (p.a. temperaturas de trabajo).

Debido al elevado costo de las instalaciones solares fotovoltaicas, durante la explotación los inversores deben ofrecer un alto rendimiento y fiabilidad. Dicho rendimiento depende de la variación de la potencia de la instalación, por lo que debe procurarse trabajar con potencias cercanas o iguales a la nominal, puesto que si la potencia procedente de los paneles fotovoltaicos a la entrada del inversor varia, el rendimiento disminuye.

Estructura

Es la encargada de sujetar el panel solar, y muchas veces será un kit de montaje para instalarlo adecuadamente. En el caso de que no se suministrara en kit el instalador lo realizará de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana para la instalación de Sistemas Solares Fotovoltaicos NOM-2012 Artículo 690 (pp. 59-77). La estructura deberá soportar como mínimo una velocidad del viento de 150 Km/h Esta estructura es la que fijará la inclinación de los paneles solares.

Se puede tener dos tipos de estructura soporte, fija y móvil. Las estructuras fijas tienen una orientación e inclinación fija que se calcula a la hora de diseñar la instalación. Esta inclinación y orientación suelen ser impuestas por la situación de la instalación, como tejados con una determinada inclinación y orientación, o bien las óptimas para la localización donde vamos a realizar la instalación solar dependiendo de la latitud. Las estructuras móviles son aquellas utilizadas en las llamadas “huertas solares” donde los paneles pueden orientarse en torno a la posición del sol.

Protecciones.

La caja general de protección es la encargada de salvaguardar toda la instalación eléctrica de un posible cortocircuito o punta de intensidad la cual afectaría a todos los componentes conectados a la red. Esta caja general de protección podrá llevar tanto protecciones térmicas como fusibles.

Puesta a Tierra

La puesta a tierra de la instalación es muy importante ya que delimita la tensión que pueda presentarse en un momento dado en las masas metálicas de los componentes, asegurando la actuación de las protecciones y eliminando el riesgo que supone el mal funcionamiento o avería de alguno de los equipos. Las tomas a tierra se establecen principalmente a fin de limitar la tensión que puedan presentar en un momento dado las masas metálicas, asegurar la actuación de las protecciones y eliminar o disminuir el riesgo que supone una avería en los materiales eléctricos utilizados.

2.5 Costos De Un SFV

Existen dos conceptos de costo que se debe tomar en cuenta al considerar la adquisición de un SFV: el costo *de* inversión y el costo de energía. El costo de inversión de un SFV depende de diversos factores, como son:

- La capacidad del sistema.
- La preparación y ejecución del proyecto, lo que incluye diseño, instalación, conexión y puesta en marcha del sistema.

- Las características tecnológicas y económicas de los componentes, principalmente de los módulos y el inversor.
- Si el sistema se instala en el techo o a nivel de piso, o bien, si será un elemento integral de techos y fachadas.

El costo de energía se refiere al costo por cada kW-h de electricidad producida por el SFV. En el ámbito técnico se denomina costo nivelado de energía y se puede comparar directamente contra el precio de electricidad de la red. En su determinación intervienen los siguientes factores:

- El monto de la inversión.
- La eficiencia con la cual se estará efectuado la conversión de energía solar a eléctrica.
- La localidad donde se instalará el sistema.
- La afectación por sombras.
- La vida útil del sistema.

Los SFV requieren una importante inversión de capital inicial, pero dependen de las condiciones locales como, la normatividad, radiación solar, espacio disponible, impacto ambiental y su vida útil esta entre 25 años y 30 años. En algunos casos, la inversión inicial se amortiza sólo por el hecho de que el costo para electrificar la zona es superior al de la instalación de un SFV.

En muchas ocasiones el SFV presenta un costo por kW-h producido notablemente superior al costo del kW-h comprado de la red eléctrica. Por ello, la rentabilidad de la instalación depende mucho de los incentivos por parte de las administraciones públicas. Para obtener un costo por kW-h producido por un SFV comparable al kW-h comprado de la red, es necesario contar con la financiación de subvenciones en porcentaje entre 70% y 80%. [22]

3. Desarrollo

Metodología para el diseño, dimensionamiento e instalación de un sistema fotovoltaico interconectado a la red.

- Estudio de Consumo Eléctrico
- Estudio de la hora pico solar e insolación del lugar
- Calculo de los paneles
- Levantamiento
- Orientación e inclinación
- Modelado Preliminar de la instalación del SFV

- Calculo del inversor
- Calculo del Cableado
- Calculo de Protecciones
- Elección de la estructura
- Tramites de interconexión ante CFE

3.1. Estudio de Consumo Eléctrico.

En este apartado se hace el análisis de los últimos 6 consumos bimestrales del cliente en su facturación ante CFE, así como el promedio del consumo de esos 6 bimestres y el promedio del consumo diario del cliente. Este estudio es de suma importancia para poder cuantificar el consumo KWh promedio bimestral y promedio diario para los futuros cálculos de paneles e inversor.

Tabla 3.1 Consumo bimestral del cliente



Últimos consumos CFE/kWh	
1	1.405,00
2	1.335,00
3	1.218,00
4	1.237,00
5	1.111,00
6	1.196,00
	1.511,00
	1.679,00
	1.306,00
	1.097,00
	1.255,00
Promedio ultimos 6 Bi	1.309,50
Promedio diario kWh	21,83

3.1.1 Hora Pico Solar- Insolación del lugar

Como se puede observar en la tabla del Anexo 1 muestra las horas solar pico para las ciudades más importantes de México, de esta fuente del Sistema de Información Geográfica para las Energías Renovables en México (SIGER) muestra que tendremos en promedio al día 5.36 horas solar pico.

3.1.3 Calculo de los paneles.

Una vez obtenida la energía consumida diariamente de 21.83kWh promedio del cliente en el apartado 3.1, se selecciona un proveedor de módulos FV. Una de las principales razones para la selección de los módulos es la eficiencia y su potencia pico, ya que, a mayor eficiencia y potencia, menor número de módulos por instalación y área a utilizar. En este caso se optaron por módulos Policristalino de 255 Wp (cuyas características se muestran en el anexo2).

$$E_p = P_p \times h_{sp} \times 0.85 \quad (1.4)$$

$$T_p = \frac{E_{TOTAL}}{E_p} \quad (1.5)$$

Donde:

E_p = Energía producida por cada panel, KWh.

P_p = Potencia pico de cada panel, KW.

E_{TOTAL} = Energía total consumida en un día, KWh.

h_{sp} = Horas solar pico del lugar, h.

T_p = Total de paneles.

El cálculo de los paneles se da mediante las formulas 1.4 y 1.5, por lo tanto sustituyendo:

$$T_p = \frac{21.83}{.255 \times .85 \times 5.36} = 18.79 \approx 19 \text{ Paneles}$$

Por lo tanto la potencia a instalar se calcularía mediante la multiplicación de la potencia pico del panel por el número de paneles a instalar este dato será de mucha importancia para la elección del inversor.

3.2 Levantamiento

Un levantamiento no es más que un proceso mediante el cual reunimos datos e información de la situación actual del lugar donde se desea plantar el SF, teniendo en cuenta los siguientes aspectos en un levantamiento:

- Señal del WiFi para el monitoreo del sistema
- Posibles obstrucciones al sistema o posibles afectaciones al sistema (Arboles, Domos, Antenas, edificios cercanos)
- Dimensiones del lugar
- Inclinación del techo
- Mascotas en el lugar de la instalación
- Conexión de tierra física en el C.C

- Medir voltaje en fases
- Verificar tipo de medidor y base del mismo.

3.2.1 Orientación e Inclinación de los Módulos.

La instalación se realizó sobre la azotea de la vivienda que se encuentra en una:

- Latitud: 19.4 Longitud: -99.2

Por motivos de confidencialidad y política de la empresa no podemos expresar la ubicación del cliente, los paneles tuvieron una inclinación de aproximadamente de 5 grados por petición del cliente, La inclinación normalmente tiene que ser igual a la latitud del lugar, lo que es posible siempre que no haya exigencias de tipo arquitectónico que lo impidan o como en este caso la petición del cliente que pidió su SFV a una inclinación perpendicular a la que tiene su azotea.

La orientación óptima de los módulos FV es hacia el Sur. Sin embargo lo que se deja de generar por estar orientados hacia el Sureste o Suroeste representa sólo un 0.08% por cada grado de desviación respecto al Sur (cuando se parten de desviaciones de $\pm 25^\circ$ respecto al Sur).

3.2.2 Modelado Preliminar de la instalación FV

Es el modelado en 3D del lugar donde se pretende hacer la instalación del SF para poder presentarle al cliente una instalación preliminar del lugar ideal para el sembrado de estructura, paneles, canalización y montaje del inversor del sistema fotovoltaico.

Podemos apreciar en las siguientes figuras:



Fig 3.1. Vista superior del montaje de la estructura.

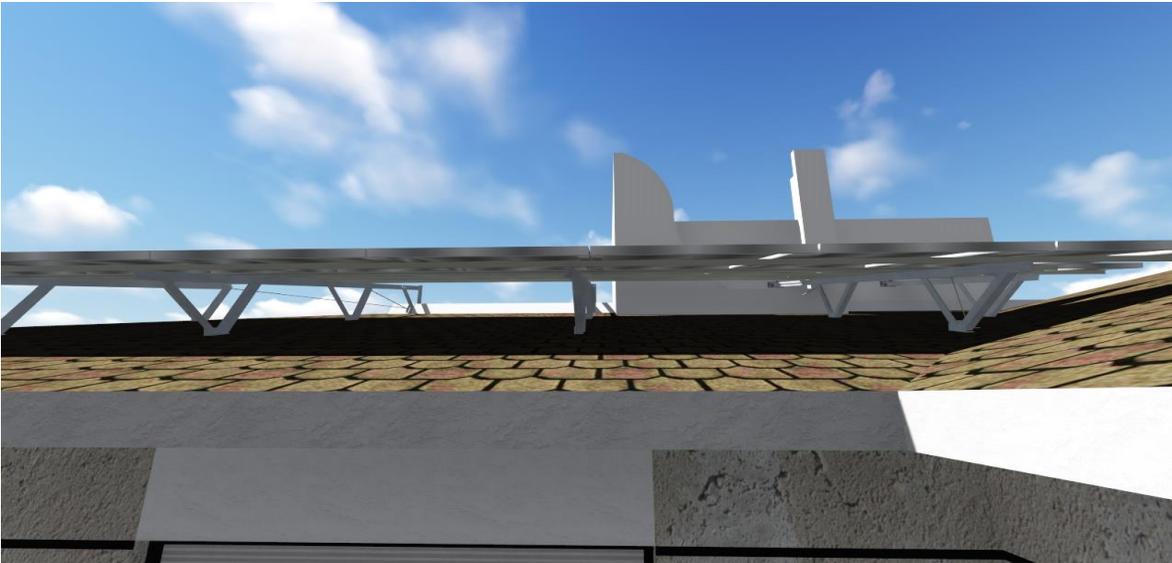


Fig 3.2. Vista por inferior de los módulos fotovoltaicos..



Fig 3.3. Vista superior de los módulos fotovoltaicos.

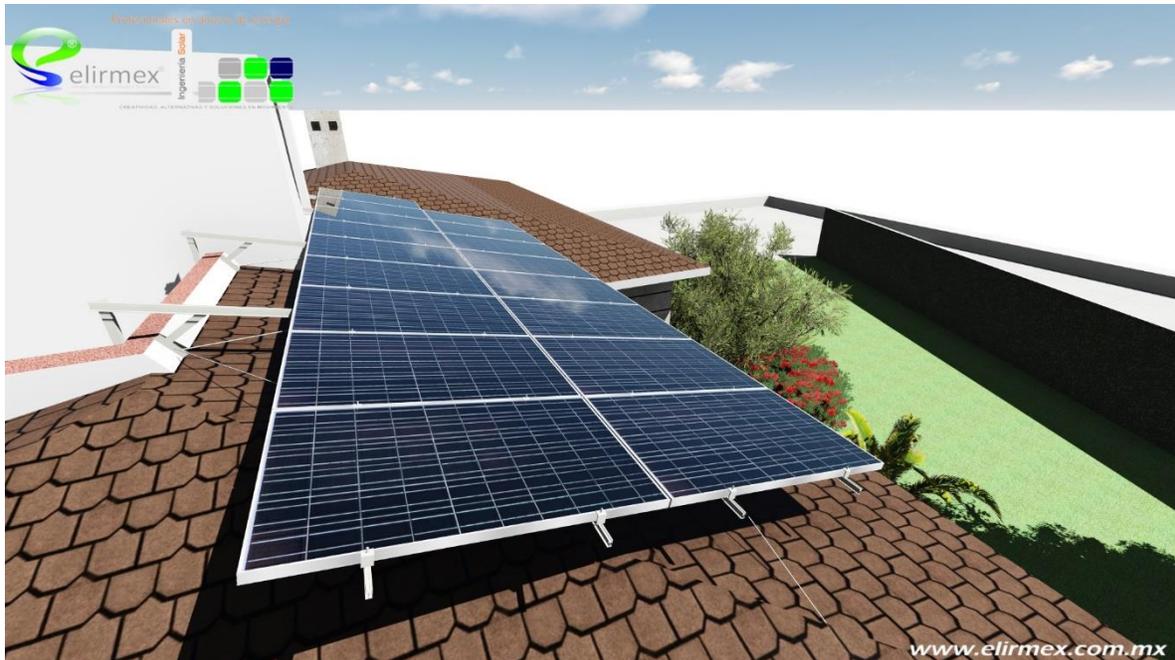


Fig 3.4. Vista superior de los módulos fotovoltaicos instalados.

3.2.2 Calculo del Inversor

El inversor es uno de los componentes más importantes en los sistemas conectados a red, ya que maximiza la producción de corriente del dispositivo FV y optimiza el paso de energía entre el módulo y la carga

La selección del inversor para esta instalación se basa en la potencia 4.845 KW_p del SFVCR a instalar que entra dentro del rango de potencia de entrada del inversor Fronius Primo 5.0.1 (cuyas características se muestran en el anexo 3) que soporta la potencia de entrada.



Fig 3.5. Inversor Fronius.

El arreglo de los paneles FV se determina con base a las especificaciones de entrada del inversor y especificaciones de salida del panel FV. El mismo fabricante del inversor te da la facilidad de poder dimensionar el arreglo fotovoltaico mediante una página web donde tu introduces los datos del módulo solar, el tipo de inversor a usar y los rangos de temperatura de operación y dicha aplicación en la página web te da opción de seleccionar el mejor arreglo y en esta ocasión se decidió hacer una cadena de 9 módulos y una de 8 módulos y la aplicación nos arrojó una configuración optima véase en la fig 1.15.

Fronius Solar Configuration Tool

Please select your system parameters

System Components [Help](#)

- Inverter Model:

Use two MPPT Use MPPT combined

- Module Manufacturer:

- Module Model:

Environmental Conditions °F °C

- Hottest Ambient Temp.:

- Coldest Ambient Temp.:

Maximum DC Voltage 600V 1000V

Module Data

Sharp	ND-AA255		
Open Circuit Voltage (Voc)	37.49 V	Short Circuit Current (Isc)	8.9 A
Power at MPP (Pmp)	255 W	Voltage at MPP (Vmp)	30.7 V
Current at MPP (Imp)	8.31 A	Open Circuit Voltage (Voc) at -10°C	41.81 V
MPP Voltage at 70°C	25.15 V	MPP Voltage at 50°C	27.62 V

Fig 3.6. Datos técnicos del módulo e inversor en la página web de fronius.



SHIFTING THE LIMITS

Configurations MPP1 (18A)
STRINGS

	1	2
# 4	1020	2041
# 5	1276	2551
# 6	1531	3061
# 7	1786	3572
# 8	2041	4082
# 9	2296	4592
# 10	2551	5102
# 11	2806	

Configurations MPP2 (18A)
STRINGS

	1	2
# 7	1786	3572
# 8	2041	4082
# 9	2296	4592
# 10	2551	5102
# 11	2806	
# 12	3061	
# 13	3317	
# 14	3572	

Please press a button!

87%

0% 80% 120% 150%

MPP1

Number of Strings: 1
 Number of Modules per String: 9
 Maximum String Current: 8.4 A
 Maximum PV Current: 8.4 A
 Maximum Voc according to NEC: 366 V

MPP2

Number of Strings: 1
 Number of Modules per String: 8
 Maximum String Current: 8.4 A
 Maximum PV Current: 8.4 A
 Maximum Voc according to NEC: 325 V

Total Power: 4337

Fig 3.7. Apartado donde nos dice la configuración óptima del arreglo fotovoltaico.

3.3 Calculo del Cableado

El dimensionamiento del conductor se realizará independientemente para cada uno de los circuitos que forman la instalación, diferenciando entre tramos de corriente continua y de corriente alterna cumpliendo lo que dice el artículo 690-8 de la NOM-001-SEDE-2012 que dice lo siguiente:

- a) Cálculo de la corriente máxima del circuito. La corriente máxima para un circuito específico se debe calcular de acuerdo con:
 - 1) Corrientes del circuito de la fuente fotovoltaica. La corriente máxima debe ser la suma de la corriente de cortocircuito de los módulos en paralelo, multiplicado por el 125 por ciento.
 - 2) Corriente del circuito de salida del inversor. La corriente máxima debe ser la corriente permanente de salida del inversor.

Por lo tanto la ecuación para dimensionar el cableado de los módulos al gabinete 1 se entiende por:

$$I_{sc} = 2(\text{cadenas}) \times 8.9A = 17.8A \text{ (arreglo en corto circuito)}$$

$$125\% \times I_{sc} = 1.25 \times 17.8A = \underline{22.25A} \text{ (capacidad de corriente)}$$

Teniendo como dato la capacidad de corriente del conductor bajo norma podemos ir a la tabla de ampacidad para elegir el conductor adecuado como se muestra en la siguiente:

Tabla 3.2 Ampacidades de conductores.

Tamaño mm ²	Designación (AWG o kcmil)	60 °C	75 °C	90 °C	75 °C	90 °C
		Tipo TW, UF	Tipo RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, ZW	Tipo THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RWH-2, USE-2, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Tipo RHW, XHHW	Tipo RHH, RWH-2, USE-2, XHHW, XHHW-2, ZW-2
		COBRE				ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE
2.08	14	16**	18**	21**	—	—
3.31	12	20**	24**	27**	—	—
5.261	10	27**	33**	36**	—	—
8.367	8	36	43	48	—	—
13.3	6	48	58	65	45	51
21.15	4	66	79	89	61	69
26.67	3	76	90	102	70	79
33.62	2	88	105	119	83	93
42.41	1	102	121	137	95	106

Por lo tanto para ese tramo se determinó usar un conductor de Calibre 12 AWG de acuerdo a la NOM-001-SEDE-2012.

Del tramo del inversor a la caja de protecciones en CA y a al C.C se utilizó calibre 10 AWG de acuerdo a los parámetros de corriente de salida del inversor que deben cumplir el artículo 690-8 de la NOM-001-SEDE-2012.

3.3.1 Calculo de Protecciones

Para proporcionar seguridad tanto a los equipos que forman la instalación solar fotovoltaica como al personal encargado de su mantenimiento y correcta operación, es necesario proporcionar una serie de elementos de protección que aseguren una explotación correcta de la instalación.

Para el cálculo de las protecciones del gabinete 1 que es donde llegan los conductores del arreglo fotovoltaico del sistema se basa en el artículo 690-8 de la NOM-001-SEDE-2012.

1) Dispositivos de Sobrecorriente. Donde son requeridos, los dispositivos de sobrecorriente deben ser seleccionados como es requerido en:

a. Conducir no menos del 125 por ciento de la corriente máxima calculada en 690-8 (a).

Por lo tanto se eligió Fusibles como protección de sobre corriente para cada cadena y de acuerdo al artículo 690-8 de la NOM-001-SEDE-2012 se dimensiono la capacidad del dispositivo de protección en el gabinete 1 mediante la siguiente ecuación:

$$125\% \times 8.9A = 11.125A \text{ (protección por sobrecorriente)} \gg 15A$$

Para el cálculo de las protecciones del gabinete 2 que son a la salida del inversor del sistema se basa en el artículo 690-9 de la NOM-001-SEDE-2012

b) Dimensionamiento y protección. Los conductores del circuito entre la salida del inversor y el medio de desconexión del edificio o estructura deben estar dimensionados con base en el valor nominal de salida del inversor. Estos conductores deben protegerse de sobrecorrientes de acuerdo con el Artículo 240. Dicha protección debe ubicarse en la salida del inversor.

Por lo tanto se determinó las protecciones en CA a la salida del inversor de acuerdo a las especificaciones del fabricante del inversor (véase en el anexo 3) que para el inversor Fronius primo 5.0-1 indica unas protecciones de 30A

3.3.2 Elección de la Estructura

El diseño de la estructura se dimensiono a partir del espacio disponible en la azotea, los paneles a instalar la orientación e inclinación de los mismos así como la velocidad del viento, la carga de nieve y los requerimientos del cliente, en la empresa se usan perfiles de aluminio de un proveedor que garantiza la durabilidad de los mismos así como te da las especificaciones del uso de cada perfil, en esta ocasión nos decidimos por el P8 este tipo de perfil para los largueros y travesaños de la estructura y los requerimientos que presento el cliente, a continuación, se presenta el modelado de la estructura .

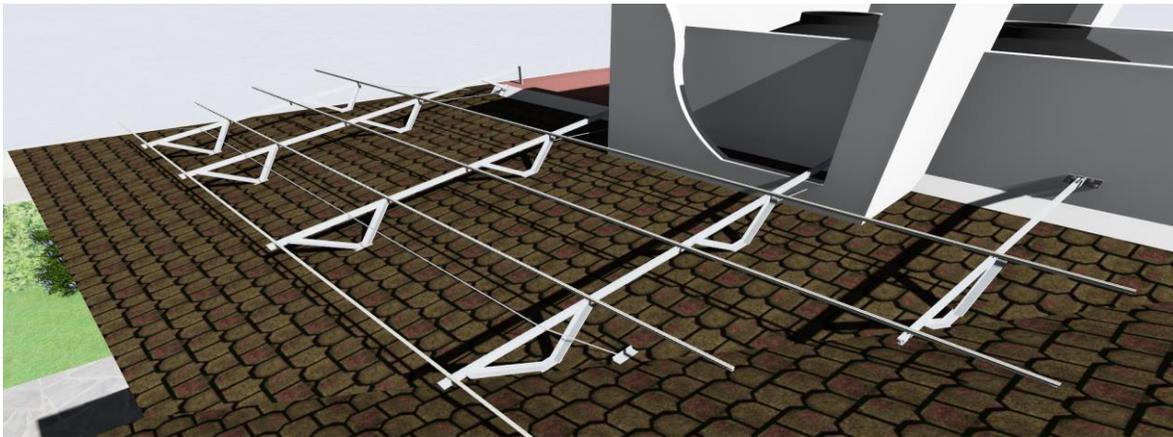


Fig 3.8. Vista superior derecha de la estructura..

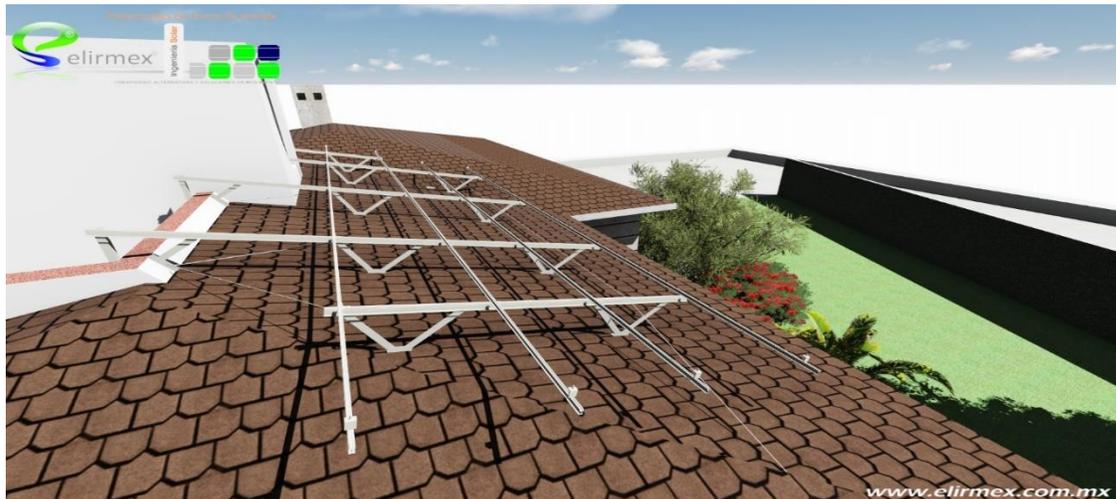


Fig 3.9. Vista lateral de la estructura montada sobre la azotea.

Se seleccionó este tipo de perfil y ángulo del proveedor para armar la estructura porque nos permitía tener unos claros y voladizos más amplios que daban solides a la estructura ya que

la estructura no estaría fijada al techo por requerimiento del cliente que a continuación se presenta los puntos de anclaje de la estructura.

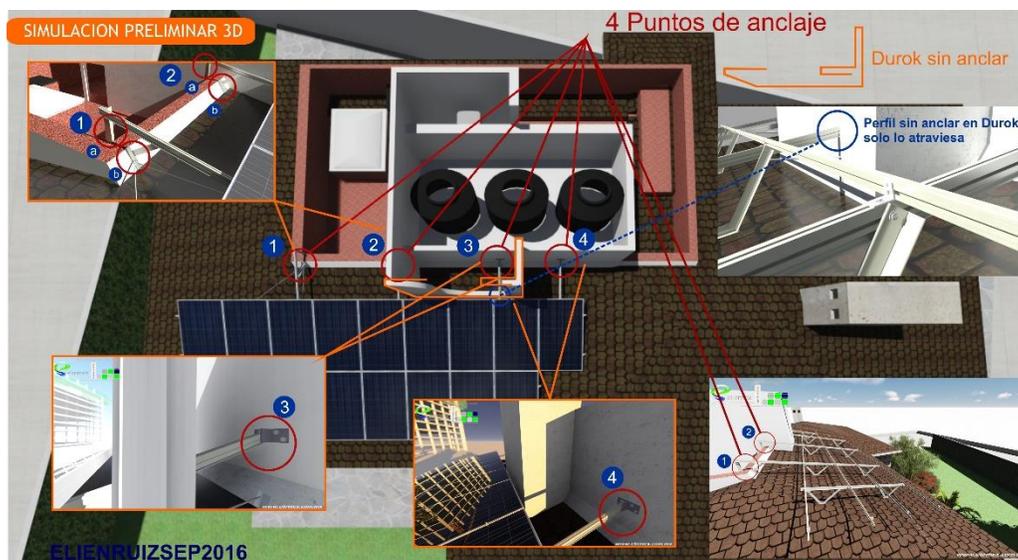


Fig 3.10. Puntos de anclaje de la estructura.

3.4 Tramite de la interconexión ante CFE

Procedimiento para realizar el contrato de conexión a la red

- 1) Solicitud – Acudir a la agencia comercial de CFE más cercana llevando el formato de solicitud lleno.

La persona que realice el trámite deberá ser el titular del contrato de suministro si es persona física; o el representante legal si se trata de una persona moral. En ambos casos se requiere presentar identificación oficial. Si se trata de persona moral, el representante deberá de presentar también la documentación que acredite la constitución de la sociedad y el otorgamiento de facultades de la misma hacia la persona que realiza el trámite.

- 2) Número de solicitud – Recibirá un número de solicitud. Con este número se podrá dar seguimiento a la solicitud de conexión a la red.
- 3) Revisión de la instalación y requerimiento de obras – Personal del área técnica de CFE acudirá al domicilio para revisar que el sistema FV cumpla con los requisitos técnicos correspondientes. CFE informará de los resultados de la revisión, y en su

caso de que la obra que se requiera construir o modificar para efectuar la conexión a la red, el gasto correrá a cargo del solicitante.

- 4) Firma del contrato y pago del importe – Una vez que haya sido aprobado técnicamente, la persona que realiza el trámite acudirá nuevamente a la agencia comercial de CFE más cercana a firmar su contrato de conexión a la red y a pagar el importe correspondiente a la diferencia de costos de los medidores.
- 5) Instalación del medidor bidireccional – Personal técnico de CFE acudirá al domicilio a cambiar el medidor.
- 6) Contrato de conexión a la red – A partir de ese momento, se tendrá un contrato de conexión a la red con CFE.

3.5 Instalación del SFVCR



Fig 3.11. Armado de la estructura.



Fig 3.12. Puntos de anclaje de la estructura.



Fig 3.13. Montaje de los paneles sobre la estructura.



Fig 3.14. Tubería del gabinete 1.



Fig 3.15. Canalización hacia el inversor.



Fig 3.16. Canalización con canaleta al inversor.



Fig 3.17. Canalización con canaleta por debajo de la marquesina hacia el inversor.



Fig 3.18. Canalización del inversor al gabinete 2.



Fig 3.19. Canalización terminada del inversor al gabinete2.

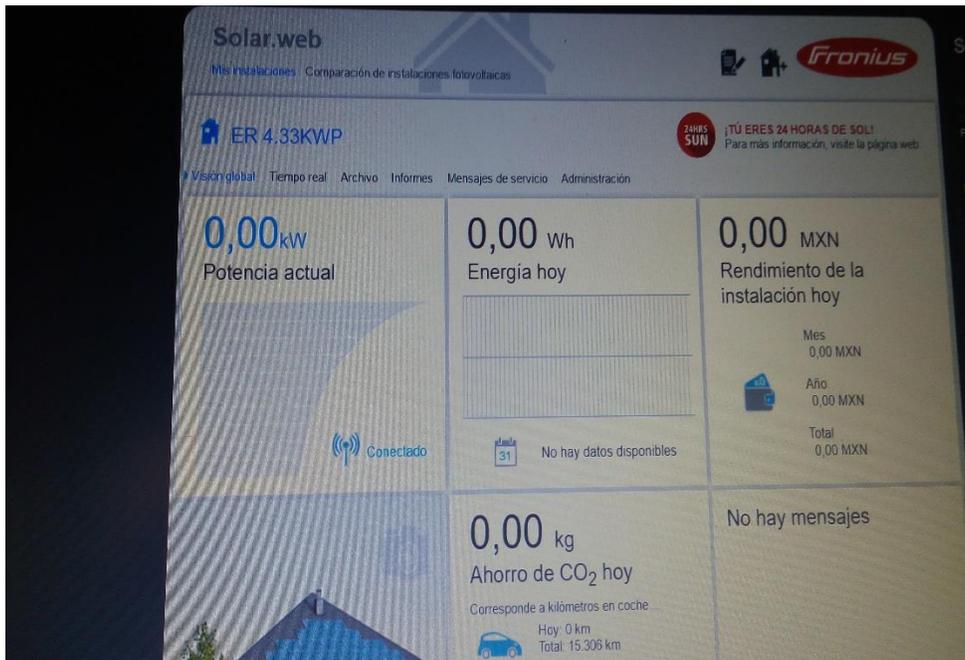


Fig 3.20. Dando de alta al SFVCR en la página del monitoreo.

4. Resultados y Conclusiones

Los resultados al realizar este proyecto, como pudimos observar se logró culminar la instalación y su puesta en marcha, no se presentó ningún tipo de incidentes, en los próximos meses y durante un lapso de 25 años el cliente podrá notar los beneficios en su recibo de consumo de energía eléctrica, ya que con el sistema fotovoltaico logrará reducirlo aproximadamente en un 95%, teniendo garantía de los componentes principales (inversor y paneles) brindándole así seguridad al cliente de un buen funcionamiento del sistema, con esto se logró no solo mejorar su economía si no apoyar a disminuir los efectos del cambio climático, logrando con ello un mejor planeta para él y las futuras generaciones.

El sistema logró ponerse en marcha en tiempo y forma, se tenía programado en un periodo de 5 días; gracias a que toda la instalación se realizó de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana para la instalación de Sistemas Solares Fotovoltaicos NOM-2012 Artículo 690 (pp. 59-77), CFE después de su visita al domicilio, autorizó la puesta del medidor bidireccional, cumpliendo con ello el objetivo de este proyecto de dimensionar, construir y dar de alta un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red.

Conclusión

México es un país que goza de las mejores ubicaciones del mundo para generar electricidad a través de sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Se sabe que las energías convencionales como el petróleo no pueden ser remplazadas del todo por las energías renovables, pero si se puede disminuir su uso a través de SFCR.

La comodidad de los hogares genera un alto consumo energético, el tener un alto consumo de electricidad hace rentable la inversión de un SFCR ya que el retorno de inversión se acorta debido al alto precio de las tarifas que manejan este tipo de consumidores, se realiza una fuerte inversión pero a largo plazo se goza de los beneficios económicos, además se apoya a la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero, que se generan al producir electricidad por métodos convencionales y con ello se apoya a inicio de una cultura de conservación del planeta y uso de las energías renovables.

Referencias Bibliográficas

[1] Carrillo García Elizabeth, ahorro y uso eficiente de energía eléctrica para el alumbrado en edificios de la escuela superior de comercio y administración unidad santo tomas, 2000, tesis de licenciatura, pág. 4.

[2] Arboliza. (2011). Como Se Calcula. Recuperado de <http://arboliza.es/compensar-co2/calculo-co2.html>

[3] Carrillo Coll E. (2009). Instalación Solar Fotovoltaica Conectada A Red. (Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Catalunya). Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitm/2099.1/7170/1/MEMORIA%20TECNICA.pdf>

[4] Rosas Iris Guevara González, et al, uso de la energía solar en sustitución de gas licuado en áreas urbanas, programa universitario de energía y el instituto de investigaciones económicas de la UNAM, 1999, pág. 1.

[5] Comisión Federal de Electricidad, Programa De Obras E Inversión Del Sector Eléctrico 2007-2016, (2007). Recuperado de http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/Lists/POISE%20documentos/Attachments/6/POISE20072016jun.pdf

[6] Tomás Perales Benito, instalación de paneles solares térmicos, alfa omega, tercera edición 2008, pág. 9.

[7] Cornejo Lalupu H. A. (2013). Sistema Solar Fotovoltaico De Conexión A Red En El Centro Materno Infantil De La Universidad De Piura. (Tesis de Ingeniería, Universidad De Piura). Recuperado de http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1762/IME_172.pdf?sequence=1

[8] Econotecnia, (2014). Energía Solar Para Residencias Y Negocios. Recuperado de <http://econotecnia.com/energia-solar-casasnegocios.html>

[9] Gaceta politécnica numero 840, 1 de marzo de 2011 año XLVII VOL 13, Foro ambiental, pág. 6

[10] Energía Solar, (2011). Centro de Energías Renovables. Gobierno de Chile. Recuperado de http://cifes.gob.cl/tecnologias/files/2011/12/libro_solar.pdf

[11] <http://www.encb.ipn.mx/WPS/WCM/CONNECT/4B4E4E80427269AA9A18BE0623BCABD/OPTIMIZATEL3428.PDF?MOD=AJPERES&CACHEID=4b4e4e80427269aa9a18be0623bcabd2> pág. 10, Febrero 2011.

[12] http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/CONA_606_fotovoltaica Febrero 2011.

- [13] Galván Mata J. F. (2013). Estacionamiento Solar Para Dos Automóviles. (Tesis de Técnico Superior Universitario, Universidad Tecnológica de Querétaro).
- [14] <http://www.conuee.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/7369/8/edificaciones.pdf> Febrero del 2011.
- [15] <http://148.206.53.231/UAMI11325.pdf>, pág. 13, Abril 2011.
- [16] Gudiño Ayala D., Hermosillo Villalobos J. J., Mendoza Ramírez M. (1995). Notas sobre el curso de Energía Solar. (Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente) Recuperado de http://www.solartronic.com/download/curso_iteso.pdf
- [17] Guía del usuario, sistemas fotovoltaicos interconectados con la red aplicaciones de pequeña escala, primera edición, versión electrónica, México 2010.
- [18] Loaeza Salcedo F. A., Ramiro Carmona C., Tenorio Caselin J. C. (2012). Metodología de un sistema fotovoltaico conectado a la red (SFCR) para uso en luminarias del edificio 3 de la ESIME Zacatenco. (Tesis de Ingeniería, Instituto Politécnico Nacional). Recuperado de <http://tesis.ipn.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/10766/20.pdf?sequence=1>
- [19] Mireya Ruiz Amelio, et al, 2^{do} Coloquio internacional de sistemas fotovoltaicos conectados a la red, sistema fotovoltaico en la UAM Iztapalapa.
- [20] Loro Grande M., Castro Herrero J. P., González Gómez E. (2014). El Efecto Fotovoltaico Y Sus Aplicaciones. Recuperado de <http://solarfotovoltaica.galeon.com/ARCHIVOS/efecto.htm>
- [21] Luna Valdez N., Reyes Barragán S., (2008). (Tesis de Ingeniería). Instituto Politécnico Nacional, Recuperado de <http://tesis.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/31/1/TESIS%20PROFESIONAL%20ENERGIA%20SOLAR.pdf>
- [22] Norma Oficial Mexicana, Artículo 690 Sistemas Solares Fotovoltaicos, Séptima Sección-Vespertina (2012).

ANEXO 1. HORAS DE SOL PICO

Horas de sol pico por día para la República Mexicana

Entidad Federativa	Ciudad	Latitud norte (°)	Horas de sol pico*		Entidad Federativa	Ciudad	Latitud norte (°)	Horas de sol pico*	
			Hor	Inc				Hor	Inc
Aguascalientes	Aguascalientes	21.88	5.78	6.10	Nayarit	Tepic	21.51	6.06	6.42
Baja California	Ensenada	31.87	5.98	6.76	Nuevo León	Monterrey	25.70	5.17	5.43
	Mexicali	32.65	5.96	6.81	Oaxaca	Oaxaca	17.06	4.88	5.01
	Tijuana	32.54	5.96	6.79	Puebla	Puebla	19.06	5.22	5.44
Baja California Sur	La Paz	24.15	6.46	6.89	Querétaro	Querétaro	20.61	5.57	5.87
	San José del Cabo	23.06	6.41	6.80	Quintana Roo	Cancún	21.16	6.01	6.32
Campeche	Campeche	19.83	5.91	6.16		Chetumal	18.51	5.85	6.09
Chiapas	Tuxtla Gutiérrez	16.76	4.88	5.00	San Luis Potosí	San Luis Potosí	22.16	5.57	5.85
Chihuahua	Chihuahua	28.63	5.96	6.52	Sinaloa	Culiacán	24.82	6.05	6.52
	Ciudad Juárez	31.73	5.78	6.41		Los Mochis	25.80	6.35	6.84
Coahuila	Saltillo	25.42	5.54	5.86		Mazatlán	23.20	6.04	6.47
	Torreón	25.53	5.96	6.37	Sonora	Ciudad Obregón	27.49	6.35	6.89
Colima	Colima	19.26	5.97	6.30		Hermosillo	29.07	6.22	6.81
Distrito Federal	Ciudad de México	19.33	5.11	5.36	Tabasco	Villahermosa	18.00	5.36	5.50
Durango	Durango	24.04	5.92	6.36	Tamaulipas	Ciudad Victoria	23.73	5.18	5.38
Guanajuato	Guanajuato	21.02	5.77	6.09		Nuevo Laredo	27.49	4.95	5.19
	León	21.11	5.75	6.07		Tampico	22.21	5.05	5.23
Guerrero	Acapulco	16.88	6.19	6.52	Tlaxcala	Tlaxcala	19.32	5.08	5.29
	Chilpancingo	17.54	6.09	6.43	Veracruz	Coatzacoalcos	18.15	4.88	5.00
Hidalgo	Pachuca	20.11	4.96	5.17		Orizaba	18.85	4.64	4.76
Jalisco	Guadalajara	20.69	5.89	6.24		Veracruz	19.20	4.56	4.66
México	Toluca	19.28	5.77	6.09		Xalapa	19.50	4.71	4.84
Michoacán	Morelia	19.71	5.79	6.13	Yucatán	Mérida	20.97	5.94	6.23
Morelos	Cuernavaca	18.92	5.76	6.07	Zacatecas	Zacatecas	22.77	5.86	6.21

Hor = Plano horizontal. Inc = Plano inclinado a la latitud de la localidad correspondiente.
 *De acuerdo con datos del Sistema de Información Geográfica para las Energías Renovables en México (SIGER) IIE-GENC, y del Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM.

ANEXO 2. FICHA TECNICA DEL PANEL SOLAR.

DATOS ELÉCTRICOS (STC)

ND-AA255			
Potencia Nominal	$P_{m\acute{a}x}$	255	W_D
Tensión en Circuito Abierto	V_{oc}	37.49	V
Corriente de Corto Circuito	I_{sc}	8.9	A
Tensión en el Punto de Máxima Potencia	V_{mpo}	30.7	V
Corriente en el Punto de Máxima Potencia	I_{mpo}	8.31	A
Coefficiente de Rendimiento del Módulo	η_m	15.5	%

STC = Standard Test Condition: irradiación de 1,000 W/m², AM 1.5, temperatura de la célula de 25 °C.

Las características eléctricas están clasificadas dentro de $\pm 10\%$ de los valores indicados de I_{sc} , V_{oc} y de 0 a +5 % de $P_{m\acute{a}x}$ (tolerancia de medición de potencia $\pm 3\%$).

DATOS ELÉCTRICOS (NOCT)

ND-AA255			
Potencia Nominal	$P_{m\acute{a}x}$	183.82	W_D
Tensión en Circuito Abierto	V_{oc}	36.5	V
Corriente de Corto Circuito	I_{sc}	7.18	A
Tensión en el Punto de Máxima Potencia	V_{mpo}	27.5	V
Temperatura Operativa Nominal de la Célula	NOCT	47.5	°C

NOCT: Temperatura de funcionamiento del Módulo con una irradiación de 800 W/m², temperatura del aire de 20 °C, velocidad de viento 1 m/s.

VALORES LÍMITE

Tensión del Sistema Máxima Admisible	1,000 Vcd
Corriente inversa máxima	15 A
Rango de Temperatura	-40 bis +90°C
Capacidad de Carga Máxima	2,400 N/m ²

DATOS MECÁNICOS

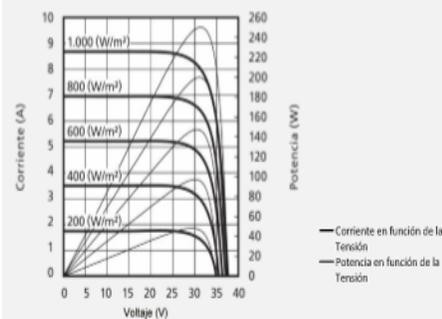
Longitud	1,652 mm (+/- 3.0 mm)
Ancho	994 mm (+/- 2.0 mm)
Profundidad	46 mm (+/- 0.8 mm)
Peso	19 kg

COEF. TEMPERATURA

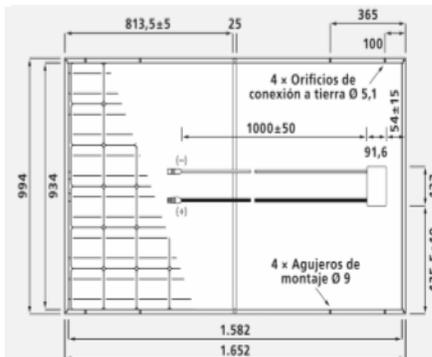
$P_{m\acute{a}x}$	- 0.440 % / °C
V_{oc}	- 0.329 % / °C
I_{sc}	+ 0.038 % / °C

CURVAS CARACTERÍSTICAS ND-AA255

Curvas características: Corriente/potencia en función de la Tensión (temperatura de la célula: 25°C)



VISTA TRASERA



DATOS GENERALES

Células	policristalinas, 156 mm x 156 mm, 60 células en serie
Vidrio Frontal	vidrio blanco templado, de 3 mm
Material del Marco	aluminio anodizado, color plata
Caja de Conexiones	PPE/resina PPO, clasificación IP65, 58 x 125 x 15 mm, 3 diodos de bypass
Cable	4 mm ² , longitud 1,000 mm
Conector	SMK (compatible con MC4), Tipo CCT9901-2361F/2451F (catálogo No. P51-7H/R51-7), IP67 Para prolongar los cables de conexión del módulo, utilice únicamente el conector SMK en la misma serie o el conector MultiContactAG MC4 (PV-K8T04/PV-K8T04)

La portada muestra una instalación de 800 kW en Hewlett Packard, Guadalajara, Jalisco, México.

El diseño y especificaciones pueden cambiar sin previo aviso. Las especificaciones pueden variar ligeramente y no son garantizadas.

Sharp es una marca registrada de Sharp Corporation. Todas las demás marcas son propiedad de sus respectivos dueños.

Póngase en contacto con Sharp para obtener los manuales de los productos más recientes antes de usar cualquier dispositivo de Sharp. Sharp no se responsabiliza de daños en equipos que han sido dotados de productos de Sharp sin la consulta previa a una fuente de información segura. Encontrará las instrucciones de instalación y operación en los manuales correspondientes. Este módulo no debería conectarse directamente a una carga.

SHARP

© 2015 Sharp Corporation México S.A. de C.V. Todos los derechos reservados.

SHARP CORPORATION MÉXICO S.A. de C.V.
Jaime Balmes No. 8 octavo piso oficinas 803 y 804
Col. Los Morales Polanco, Del. Miguel Hidalgo
C.P. 11510, México D.F.
Tel. +52 (55) 1500 1500
www.sharp.com.mx, www.sharp-solar.com/es/



ANEXO 3. FICHA TECNICA DEL INVERSOR.



Fronius
SHIFTING THE LIMITS

FRONIUS PRIMO
EL FUTURO DE LA ENERGÍA SOLAR RESIDENCIAL ESTÁ AQUÍ

-  / PC Board
Proceso de reemplazo
-  / SnapInverter
Sistema de instalación
-  / Integrated Data
Comunicación
-  / Superflec
Diseño
-  / Smart Grid & NEC
Certificación 2014
-  / APCI
Integrado

DATOS TÉCNICOS

DATOS GENERALES	ESTÁNDAR PARA TODOS LOS MODELOS PRIMO	DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN	ESTÁNDAR PARA TODOS LOS MODELOS PRIMO
Dimensiones (ancho x alto x profundidad)	50.5 x 63 x 20.6 centímetros	AFCI y NEC 2014	Si
Peso (kg)	21.45	Desconexión de CD	Si
Grado de protección	NEMA 4X	Protección contra polaridad inversa de CD	Si
Consumo durante la noche	< 1 W	Protección contra fallas de tierra con interruptor de monitor de aislamiento	Si
Tipología de inversor	Sin transformador		
Enfriamiento	Velocidad de ventilador variable		
Instalación	Interior y exterior		
Rango de operación a temperatura ambiente	-40°F ... 131°F (-40 ... +55°C)		
Humedad permitida	0 - 100 % (sin condensación)		
Terminales de conexión CD	6x CD+ y 6x CD- terminales de tornillo para cobre (sólido / trenzado / trenzado fino) o aluminio (sólido / trenzado)		
Terminales de conexión CA	Términales de tornillo 12-6 AWG		
Certificaciones y cumplimiento de estándares	UL 1741-2010, UL1998 (para funciones: AFCI monitoreo de aislamiento), IEEE 1547-2003, IEEE 1547.1-2003, ANSI/IEEE C62.41, FCC Parte 15 A y B, NEC Artículo 690, C22. 2 No. 107.1-01 (septiembre 2001), UL1699B Issue 2 -2013, CSA TIL M-07 Issue 1 -2013		

INTERFAZ	ESTÁNDAR PARA TODOS LOS MODELOS PRIMO
Wi-Fi®/Ethernet/Serial	Estándar inalámbrico 802.11 b/g/n / Fronius Solar.web, SunSpec Modbus TCP, JSON / SunSpec Modbus RTU
6 entradas y 4 E/S digitales	Administración de carga, señales, E/S multipropósito
USB (Socket)	Actualización de software y datalogging vía USB
2x RS422 (RJ45 socket)	Fronius Solar Net, protocolo de interface
Datalogger y servidor web	Incluidos

* El término Wi-Fi es una marca registrada de la Alianza Wi-Fi

DATOS DE ENTRADA	PRIMO 3.8-1	PRIMO 5.0-1	PRIMO 6.0-1	PRIMO 7.6-1	PRIMO 8.2-1
Potencia FV recomendada (kWp)	3.0 - 6.0 kW	4.0 - 7.8 kW	4.8 - 9.3 kW	6.1 - 11.7 kW	6.6 - 12.7 kW
Corriente máxima de entrada utilizable (MPPT 1 / MPPT 2)			18 A / 18 A		
CD total			36 A		
Arreglo máximo de corriente de corto circuito			2x 22.5 A		
Rango de voltaje operacional			80 V* - 600 V		
Voltaje de entrada máximo			600 V		
Voltaje nominal de entrada	410 V		420 V		
Tamaño admisible de conductor de CD			AWG 14 ... AWG 6		
Rango de voltaje MPP	200 - 480 V	240 - 480 V		250 - 480 V	270 - 480 V
Número de MPPT			2		

* Comenzando con el número de serie 26170960; anterior: 150 V

DATOS DE SALIDA	PRIMO 3.8-1	PRIMO 5.0-1	PRIMO 6.0-1	PRIMO 7.6-1	PRIMO 8.2-1
Potencia máxima de salida	208	3800 W	5000 W	6000 W	7600 W
	240	3800 W	5000 W	6000 W	8200 W
Corriente continua máxima de salida	208	18.3 A	24.0 A	28.8 A	36.5 A
	240	15.8 A	20.8 A	25.0 A	34.2 A
Capacidad de interruptor de CA	208	25 A	30 A	40 A	50 A
	240	20 A	30 A	35 A	45 A
Eficiencia máxima		96.7 %		96.9 %	97.0 %
Eficiencia CEC	208	95.0 %	95.5 %	96.0 %	96.5 %
Tamaño admisible de conductor de CA				AWG 14 - AWG 6	
Conexión a red (U _{ac})			208 / 240		
Frecuencia (f)			60 Hz		
Distorsión armónica total			< 5.0 %		
Factor de potencia (cos φ _m) predeterminado			1 (ajustable en menú oculto 0.85 - 1 ind./cap.)		

ANEXO 4. FICHA TECNICA DEL PERFIL DE LA ESTRUCTURA.



Power Rail™: P8
Code: ASCE 7-05
Exposure: B



ASCE 7-05 Exposure B Span and Cantilever Chart in Inches for flush mount of P8 with 66" Maximum Module Length and building height ≤30 feet

Snow Load, Pg (psf)	Wind Speed (mph)											Roof Pitch
	90	100	105	110	120	130	140	150	160	170	180	
0	132	121	116	111	103	95	89	83	79	74	70	θ ≤ 7°
	52	49	47	46	44	42	40	38	36	34	32	
10	116	110	107	104	99	94	89	83	79	74	70	
	47	46	45	44	43	41	40	38	36	34	32	
15	106	101	99	97	92	88	84	81	77	74	70	
	45	43	43	42	41	39	38	37	35	34	32	
20	98	94	92	90	87	83	80	77	74	71	68	
	42	41	41	40	39	38	37	35	34	33	31	
25	92	89	87	85	82	79	77	74	71	69	66	
	41	40	39	39	38	37	35	34	33	31	30	
30	87	84	83	81	79	76	73	71	69	66	64	
	39	38	38	37	36	35	34	33	31	30	29	
40	78	76	75	74	72	70	68	66	64	62	61	
	36	35	35	34	33	32	31	30	29	29	28	
50	70	70	70	69	67	66	64	62	61	59	57	
	32	32	32	32	31	30	29	29	28	27	26	
60	64	64	64	64	63	62	60	59	58	56	55	
	29	29	29	29	29	28	28	27	26	26	25	
0	138	128	121	116	108	100	93	88	83	78	74	7° < θ ≤ 27°
	53	50	49	47	45	43	41	39	38	36	34	
10	119	113	110	107	102	97	92	88	83	78	74	
	48	47	46	45	43	42	41	39	38	36	34	
15	108	103	101	99	95	91	87	83	80	77	74	
	45	44	43	43	41	40	39	38	37	35	34	
20	100	96	94	93	89	86	82	79	76	74	71	
	43	42	41	41	40	39	38	36	35	34	33	
25	93	90	89	87	84	81	79	76	73	71	68	
	41	40	40	39	38	37	36	35	34	33	31	
30	88	85	84	83	80	78	75	73	71	68	66	
	39	39	38	38	37	36	35	33	32	31	30	
40	78	77	76	75	74	72	70	68	66	64	62	
	36	36	35	35	34	33	32	31	30	29	29	
50	70	70	70	70	68	67	65	64	62	60	59	
	32	32	32	32	31	31	30	29	28	28	27	
60	64	64	64	64	64	63	61	60	59	57	56	
	29	29	29	29	29	29	28	28	27	26	26	
0	132	121	116	111	103	95	89	83	79	74	70	27° < θ ≤ 45°
	52	49	47	46	44	42	40	38	36	34	32	
10	116	110	107	104	99	94	89	83	79	74	70	
	47	46	45	44	43	41	40	38	36	34	32	
15	106	101	99	97	92	88	84	81	77	74	70	
	45	43	43	42	41	39	38	37	35	34	32	
20	98	94	92	90	87	83	80	77	74	71	68	
	42	41	41	40	39	38	37	35	34	33	31	
25	92	89	87	85	82	79	77	74	71	69	66	
	41	40	39	39	38	37	35	34	33	31	30	
30	87	84	83	81	79	76	73	71	69	66	64	
	39	38	38	37	36	35	34	33	31	30	29	
40	78	76	75	74	72	70	68	66	64	62	61	
	36	35	35	34	33	32	31	30	29	29	28	
50	70	70	70	69	67	66	64	62	61	59	57	
	32	32	32	32	31	30	29	29	28	27	26	
60	64	64	64	64	63	62	60	59	58	56	55	
	29	29	29	29	29	28	28	27	26	26	25	