

Artículo No. 01: *Huitron et al.* (2017). Proceso no automatizado de fabricación de paneles fotovoltaicos: el primer paso hacia la automatización de la industria fotovoltaica en México. *Semilleros*, 4 (7), 5-21.

Proceso no automatizado de fabricación de paneles fotovoltaicos: el primer paso hacia la automatización de la industria fotovoltaica en México

Not automated PV-modules manufacturing process - the first step for Mexican PV industry automation

Huitron-Peña Guillermo ¹, Molina-Ruiz Héctor Daniel ²,
Islas-Cornejo Alejandro ³, Qu Zongtao (屈宗涛) ⁴

Resumen. El entorno ambiental, económico y político actual, apremia la necesidad imperiosa de tener un cuidado más activo del medio o ambiente. Los gobiernos y la sociedad civil, desde hace ya varios años, han empezado a tomar conciencia de lo necesario que es el cuidado del ambiente, e incluso de la promoción y apropiación de una cultura sustentable. El presente trabajo expone una perspectiva muy acotada en el campo del cuidado del medio ambiente, en este se presentan las características de fabricación de paneles fotovoltaicos, los cuales forman parte del actual auge en el uso de energías limpias (renovables). Este trabajo se realizó mediante la observación y descripción del proceso de producción, además de la obtención de datos e información con la gerencia de producción y el personal de supervisión de la empresa en la cual se observó el proceso de ensamble. Como resultado se tiene la descripción del proceso manual que permite tener referencia para generar un proceso de comprensión de los procesos automatizados.

Palabras clave: *Panel solar, Proceso de producción, Sustentabilidad.*

Abstract. Environmental, economic and politic actual context grows the need to care about our planet. Since a time before, government and civil society, have been taken in to account the environmental care need, they have also promoted the owning of a sustainable culture. Present document shows a very narrow perspective about the environmental care, in this document they are presented the assembling characteristics of PV modules, which are part of the growing culture in the clean energies use. Present work was made thorough recognizing and description of production process. It was also mining some data from the manager and supervisor's scopes, in the enterprise in which it was observed the PV modules assemble process. As a result we have a description of the assemble process which help as a basement to understand actual automatized processes in that sector.

Key Words: *PV Module, Production process, Sustainability.*

^{1,3} Universidad Tecnológica Tula Tepeji, Energías Renovables Área Energía Solar, El Carmen, Tula de Allende, Hidalgo, México. E-mail: mmguillermohp99@hotmail.com, renovables@utt.edu.mx

² Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Av. del Maestro, 41, Col. Noxtongo, Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo, México. E-mail: m_en_i_molina_ruiz@engineer.com

⁴ Solarever Tecnología de América, Autopista MEX-QRO km 71.9 Noxtongo 1ª Sección, Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo, México, C.P. 42855. E-mail: antonio.qu@solarever.com.mx

INTRODUCCIÓN

El sol irradia más energía por segundo, que la energía consumida por la población mundial desde el inicio de su existencia (Solangi, *et al.* 2011). Lo anterior indica la capacidad energética que posee el sol, para su aprovechamiento. En MacKay (2013) se menciona que la cantidad de energía que alcanza el planeta, proveniente del sol, es equivalente a los 120 000 TW.

Actualmente la energía solar es aprovechada de dos formas principales, mediante aplicaciones fotovoltaicas y mediante aplicaciones foto-termales. Como se menciona en Aman *et al.* (2015), En las aplicaciones fotovoltaicas la energía del sol se convierte en electricidad mediante la absorción de fotones de luz, es entonces cuando los átomos se mueven de orbitales inferiores a superiores, mientras que el aprovechamiento foto-termal, se realiza mediante el uso de superficies de reflexión de la luz, enfocando la luz solar para calentar un fluido de trabajo (*working fluid*).

A pesar de que, como se menciona en Li, Rahman, Vega y Dong (2016), la implementación de sistemas fotovoltaicos se ha visto impedida por una serie de factores como: condiciones climáticas, cambios de estación, variaciones intra-horarias, elevación topográfica, entre otros; los módulos fotovoltaicos son el futuro del sector energético y ambiental, ya que aprovechando un recurso como el sol, los sistemas fotovoltaicos son capaces de producir energía eléctrica evitando la quema de combustibles fósiles como gas o combustóleo.

Los paneles solares están compuestos principalmente por un conjunto de celdas fotovoltaicas, las cuales son el corazón

del módulo. Estas celdas, son posteriormente soldadas con cintas de estaño, después son encapsuladas para que la humedad y suciedad no entre al panel. Hay que recordar que se trabaja con un componente que generará energía eléctrica y que esta es peligrosa si entra en contacto con la humedad. Finalmente son enmarcadas con aluminio para que puedan ser utilizadas en alguna instalación. Cabe hacer mención que una sola celda es muy frágil y además genera poca corriente eléctrica.

En el contexto de la celdas Se pueden reconocer tres tipos de celdas fotovoltaicas: monocristalinas, policristalinas (o multicristalinas) y amorfas. Sin embargo, aquellas de mayor uso comercial para procesos de manufactura o ensamble son: monocristalinas y policristalinas.

La empresa objeto de estudio asume el reto energético fijando su mercado en América Latina, desarrollando, fabricando y suministrando soluciones para energía renovable.

Durante el año 2015, esta empresa se posicionaba como la segunda en ventas en México. Para 2016, perdió dicha posición, sin embargo, incremento su participación en el mercado internacional, con la apertura de una oficina en la ciudad de Boston, Massachusetts, en la unión americana. En el primer trimestre del 2017, la empresa tenía ventas en Canadá, Estados Unidos de América, Colombia, Honduras y Costa Rica.

Además, también en el primer trimestre del 2017, la empresa contaba con oficinas en Changzhou (China), Hong Kong (China), Los Angeles (Estados Unidos de América - que sustituye a la oficina de Boston), Yucatán (México), Ciudad de

México (México) y las oficinas ubicadas en el predio donde se ubican las instalaciones de la planta de ensamble; en Hidalgo (México).

Dentro del área de producción para la elaboración de módulos fotovoltaicos,

hay personal con la experiencia y conocimiento, para que el producto final llegue al mercado de consumo con la mejor calidad.

PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PANEL FOTOVOLTAICO

El proceso de producción del panel fotovoltaico en la empresa objeto de estudio se realiza de forma manual, mediante un proceso no automatizado de ensamble de materiales, agregando valor al producto para ser colocado en el mercado de consumo.

Estructura de un Panel Fotovoltaico

La descripción de los diferentes componentes mencionados a continuación, así como sus características, se obtuvo de fichas técnicas de las materias primas y sub-ensambles, además de la información proporcionada por la gerencia de producción y la gerencia de tecnología y sus diferentes subordinados.

Los paneles fotovoltaicos están compuestos principalmente por:

- Celdas o células fotovoltaicas.- son hechas a partir de lingotes de silicio puro, elemento muy abundante en la naturaleza pero se encuentra junto con otros elementos, es por eso que se purifica en un grado del 99.99%. Las celdas fotovoltaicas tiene 0.5/0.6 V promedio, aunque, para cálculos prácticos y ágiles se considera que cada celda aporta 0.5 V de diferencia de potencial.
- Cintas.- Están hechas comúnmente de estaño, sirven para interconectar las celdas solares en grupos para formar cadenas de ellas, y posteriormente estas

cadenas ser conectadas en serie o en paralelo según sea el caso para obtener el voltaje y potencia que se desea.

- Cristal.- vidrio templado y anti-reflejante con cualidades de transmisión de luz a más de 90%, es resistente contra impactos.
- Marco de aluminio anodizado.- soporte con perforaciones que permiten la fijación y fácil instalación de los paneles, el material del que está hecho brinda una mayor protección ante las amenazas del medio ambiente.
- EVA (Etil Vinil Acrílico).- se utiliza como encapsulante para proteger las células y sus conexiones de agentes externos, soporta temperaturas muy extremas tanto en verano como invierno a cualquier hora del día y la noche, además proporciona aislamiento eléctrico y es transparente para permitir que la energía solar llegue sin dificultad a la célula fotovoltaica.
- TPT (Tedlar Poliéster Tedlar).- se trata de un laminado típicamente de tres capas, robusto y con altas propiedades dieléctricas. Este se encarga de proteger al panel fotovoltaico de los rayos UV, la humedad y el paso del tiempo.
- Caja de conexiones o *junction box*.- ubicada en la parte posterior del módulo, contiene conexiones y diodos de protección, se utiliza para transferir la energía producida por el panel hacia

un banco de baterías o sea suministrada a la red eléctrica.

Los módulos fotovoltaicos pueden estar interconectados en serie o en paralelo, para obtener la misma diferencia de potencial (voltaje) y corriente (amperaje) deseado. Para una conexión en serie existe una suma de voltajes, manteniéndose el mismo amperaje. En el caso de la conexión en paralelo se suman los amperes pero mantiene la diferencia de potencial (voltaje).

Es importante comprender el concepto de conexión en serie y conexión en paralelo cuando se unen las celdas solares para el ensamble del panel solar. Las celdas solares están conectadas en serie cuando se realiza el proceso de soldadura, de los polos positivos (cara posterior - gris) de la primera celda con los polos negativos (cara superior - azul) de la siguiente celda. Lo anterior, constituye el proceso típico dentro del área de soldadura, en el ensamble de paneles. Este tipo de conexión se usa para sumar el voltaje de las celdas sin aumentar la corriente. Dos grupos de celdas solares están conectadas en paralelo cuando los polos positivos del primer grupo están conectados al polo positivo del segundo grupo, sumando el amperaje sin aumentar el voltaje.

Proceso de Elaboración de un Módulo Fotovoltaico

Celdas Fotovoltaicas Monocritalinas y Policritalinas

Comercialmente, en el mercado de consumo, se pueden distinguir entre dos tipos de celda solar, aquella policristalina o multicristalina y aquella denominada monocristalina (Figura 1). Generalmente las celdas solares tienen dimensiones de 156 mm de largo, por 156 mm de ancho por 120 μ m de espesor.

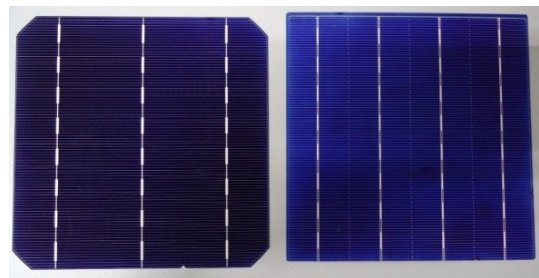


Figura 1. Celda monocristalina (izquierda) y Celda policristalina (derecha)

Selección y Corte de Celdas

Selección de Celdas

Dentro del proceso de selección de celdas se verificará que las celdas se encuentren en óptimas condiciones, sin defectos como: rupturas, celdas astilladas, manchadas. Es en el proceso de selección de celdas, que estas son separadas y agrupadas por tonalidades, para que el módulo se vea de un color uniforme y no pierda estética (Figura 2).



Figura 2. Selección de celdas

Este es un proceso sencillo en donde la persona que está seleccionando deberá tener en cuenta, algunos de los siguientes criterios:

- El color de la celda, ya que se pueden encontrar diferentes tonalidades. En un lote se pueden obtener celdas de tonalidad uniforme, sin embargo, existen ocasiones en las cuales se tienen

hasta seis tonalidades diferentes (por lote adquirido), es por ello que las celdas deben de ser seleccionadas y separadas conforme los diferentes colores que se pueden obtener (se pueden obtener colores claros y otros más oscuros), para que, posterior al proceso de laminación, los módulos fotovoltaicos mantengan un color estético y uniformes.

- En el momento de la selección de celdas, es necesario revisar que los colectores primarios y secundarios no estén demasiado desgastados u oxidados (se observan decolorados) (Figura 3).

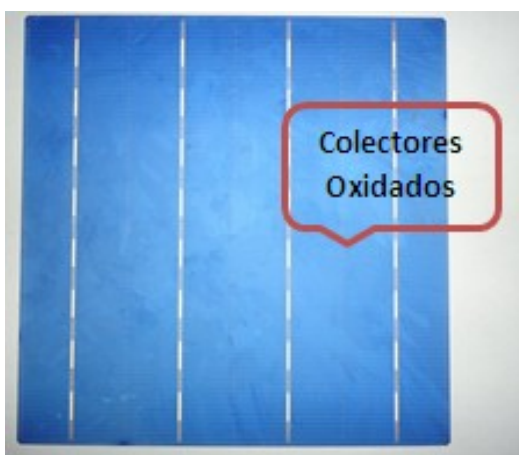


Figura 3: Celda solar con colectores oxidados

- También es recomendable observar que las celdas no estén despostilladas, fracturadas o rotas.
- Hay celdas más brillantes en ellas se observan claramente la frontera entre granos (Figura 4).
- Las celdas deben estar libres de manchadas. En algunas ocasiones las celdas solares, presentan manchas circulares diferentes tamaños. En caso de que la celda esté manchada con una huella digital (marca de dedo) el proceso de laminación desaparece y desvanece

la mancha. Sin embargo, cuando la mancha proviene de fábrica, por algún defecto de elaboración, esta debe de retirarse (Figura 5).

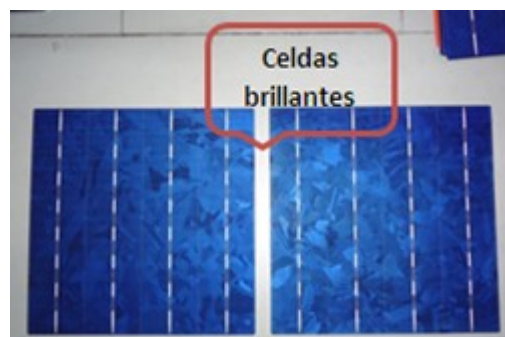


Figura 4: Celda solar de mayor brillo

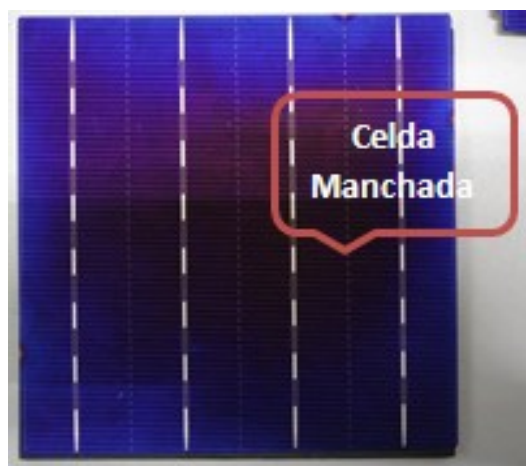


Figura 5. Celda solar con mancha

Algunos otros defectos que se pueden encontrar en la celdas con ondulaciones (Figura 6), errores en la impresión de colectores (Figura 7), falta de película en los puntos de sujeción de la celda solar (Figura 8), entre otras.

Es prudente sujetar las celdas con precaución, ya que son frágiles y tienden a fracturarse, además, al momento de manipular la celda, se debe evitar el contacto con las manos descubiertas; siempre deben tomarse con las manos protegidas, ya sea por guante o dedos de látex.

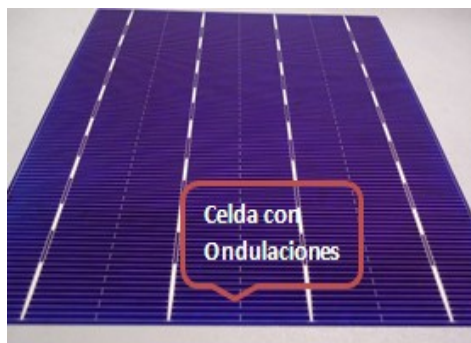


Figura 6. Celda solar con ondulaciones

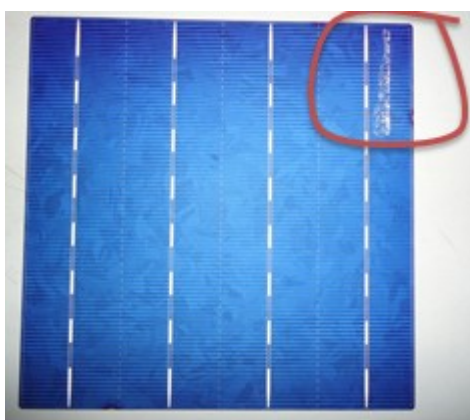


Figura 7. Celda solar con errores de impresión

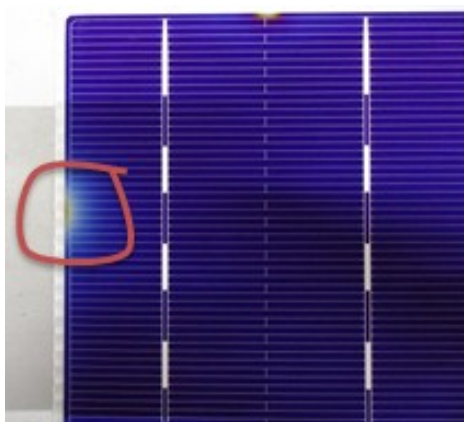


Figura 8. Celda solar con falta de película en los puntos de sujeción

Corte de Celdas

Las celdas fotovoltaicas entregan una diferencia de potencial de 0.5 volts (cada una) en promedio, si la celda es cortada,

el voltaje se mantiene, debido a que la energía necesaria mínima para mantener unidos los semiconductores de los cuales se conforma sigue siendo la misma, la característica que se ve reducida, es la corriente o amperaje debido a la reducción del área de la celda cortada.

La elaboración de los módulos con potencias superiores a 135 W, son elaborados con celdas completas (sin cortar) ya que la cantidad de celdas utilizadas en estos módulos alcanzan el voltaje necesario para aplicaciones prácticas (12 volts). Sin embargo, en el caso de los módulos con potencias menores o iguales a 100 W no es posible completar el voltaje necesario, con celdas completas, es por ello que las celdas son cortadas, para que al ser conectadas en serie, entreguen un voltaje operativo (Figura 9).



Figura 9. Celdas monocristalinas cortadas

Para calcular el voltaje que entregará cada módulo lo único que hay que hacer es multiplicar el número de celdas por el voltaje que entrega cada una:

- Por ejemplo, un módulo de 150 W tiene 36 celdas unidas en cadena y cada celda tiene un voltaje promedio de 0.5 volts.

Voltaje del módulo

$= \text{celdas} * \text{Voltaje mínimo por celda} (1)$

$\text{Voltaje del módulo} = 36 * 0.5V$

$= 18 \text{ volts D/C } (2)$

Dentro del proceso de corte de celdas, es utilizada una cortadora laser, la cual mediante programación ingresa las medidas necesarias para realizar cada corte. Cabe hacer mención que las dimensiones del corte son diferentes dependiendo la capacidad de cada panel (Tabla 1).

Tabla 1. Medidas de una celda

Potencia del módulo	Dimensiones de la Celda [mm]	Observaciones
25w	156*26	Celda cortada
50w	156*52	Celda cortada
80w	156*85	Celda cortada
100w	156*100	Celda cortada
150w	156*156	Celda completa
250w	156*156	Celda completa
300w	156*156	Celda completa

Corte de Etil Vinil Acrílico (EVA) y Tedlar Poliester Tedlar (TPT)

El EVA o Etil Vinil Acrílico sirve para unir el vidrio, las celdas y el TPT o Tedlar Poliester Tedlar, en un proceso de encapsulado, con lo cual se evita que agentes exteriores como polvo, humedad o aire, afecten a las celdas y sus conexiones. Con lo anterior se retrasa el deterioro propio del panel al exponerse a condiciones severas o agrestes del medio en el que se instale.

Cabe hacer mención que “Tedlar” es la marca comercial de “fluoruro de polivinilo” (*polivinyl fluoride*).

El primer paso consiste en colocar un rollo de material en el rodillo de la mesa de corte, el cual se desenrolla para cortar

manualmente a la medida del panel producido (medida del vidrio para el módulo de la capacidad deseada). Para dicho proceso, se deben tomar los pliegos de EVA o TPT por los dos extremos, se extienden sobre la mesa de corte realizando un corte de lado a lado del material (Figura 10, Figura 11), sobre el riel de corte.



Figura 10. Mesa de apoyo para corte de EVA y TPT



Figura 11. Máquina corte para material EVA y TPT

Soldadura con Cautín

La soldadura con cautín se utiliza comúnmente en electrónica para la fabricación de circuitos, pero en este caso se usará para unir celdas solares en la fabricación de módulos fotovoltaicos.

Se requiere tener el siguiente equipo completo en orden y a la mano para soldar: cintas de estaño, celdas, flux, tabla

térmica, soldador “cautín”. El área de trabajo debe estar limpia y despejada de cualquier otro objeto que no corresponda a dicha área. Cabe hacer mención, que dentro de la misma se delimitan los espacios donde se ubica cada uno de los instrumentos y materiales a utilizar.

Soldadura Individual

En el proceso de soldadura individual, existen dos elementos importantes, la plancha y el soldador “cautín”, los cuales mantienen cierta temperatura, en caso de una temperatura alta, (más de 400 C) existe el riesgo de quemar la celda y con temperatura baja (menos de 380 C), se impide la soldadura correcta.

La soldadura con cautín para celdas solares es un proceso sencillo, consta de desplazar la punta del cautín sobre las cintas de estaño colocadas en las celdas. Cada celda debe de tener cuatro cintas (o tres, dependiendo de la tecnología utilizada) colocadas sobre las líneas verticales (colectores primarios en el lado azul o negativo). Para que las cintas queden unidas (soldadas) a los colectores primarios, se realiza un proceso de limpieza con una mezcla de alcohol (alcohol, alcohol iso-propílico, metanol y etanol) (Figura 12).

Soldadura en Cadena

En el proceso de soldadura en cadena son necesarias las celdas que anteriormente fueron soldadas en proceso individual. Dentro de este proceso se unen las celdas soldadas con cintillas de estaño, ajustando el número de celdas para la capacidad requerida del módulo (Tabla 2). Para comenzar a formar una cadena de celdas, estas deben de ser colocada sobre una bandeja. La bandeja tiene delimitadas cada una de las separaciones entre celda y

celda. En el proceso de soldadura en cadena las celdas son unidas en el lado positivo (color gris), en serie, de tal forma que se genera una suma de voltajes (Figura 13).

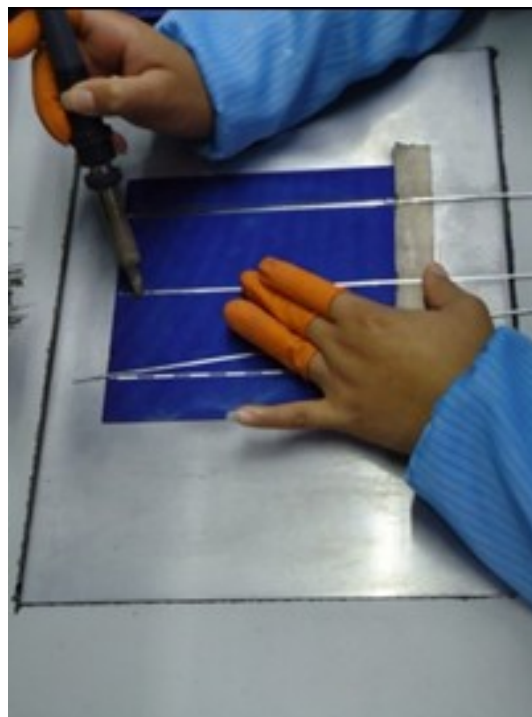


Figura 12. Soldadura de celdas en el proceso individual

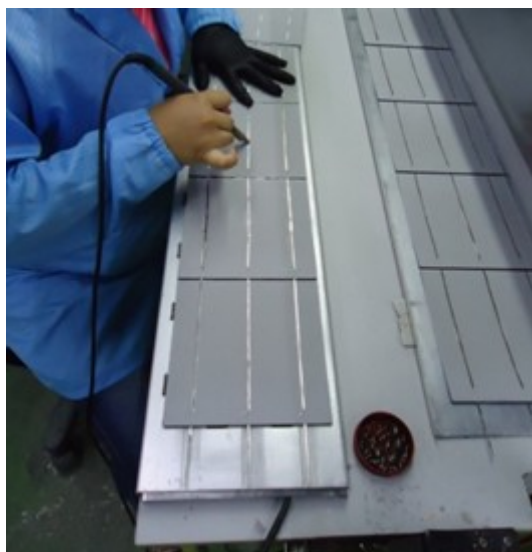


Figura 13. Soldadura de celdas en Cadena

Las cintillas deben de ser alineadas sobre los contactos posteriores. Al igual que en el proceso de soldadura individual, se le hace pasar el cautín sobre la cintilla de estaño en cada celda. Al terminar de soldar una cadena, esta es colocada sobre otra bandeja.

Un vez que se completa el número de cadenas, por ejemplo: 4 cadenas para paneles de 155W o 6 cadenas para el caso de paneles de 260W y 310W (Tabla 2), la charola pasa a una sección de depósito temporal.

Cada módulo tiene diferente cantidad de celdas unidas en cadena.

Tabla 2. Número de celdas que ocupa cada módulo conforme a su potencia

Potencia del modulo	Cantidad de celdas	No. de cadenas	Tipo de celda
25w	36	2	Celda cortada
50w	36	3	Celda cortada
100w	72	4	Celda cortada
150w	36	4	Celda completa
250w	60	6	Celda completa
300w	72	6	Celda completa

Criterios para una Buena Soldadura

Para que la soldadura de celdas solares sea aceptada bajo los estándares de control de calidad, debe cumplir con ciertas especificaciones como:

- Ausencia de “soldadura ficticia”.- en este caso se observan ligeras elevaciones en la cinta que no han sido soldadas correctamente sobre la celda.
- Ausencia de raspaduras.- otro criterio a evaluar es que en la celda no se

observen raspaduras, a causa del mal uso del cautín cuando este último se fricciona con la celda solar provocando ralladuras.

- Colectores primarios totalmente cubiertos.- las cintas de estaño deben cubrir por completo las líneas blancas donde son puestas, es preciso que no sea visible el color blanco (planteado) de los colectores primarios.

Montaje

Dentro de este proceso existe un acomodo de los materiales que conformarán el panel solar:

- Vidrio templado.
- EVA (capa de Etil Vinil Acrílico).
- Celdas conectadas en serie.
- EVA.
- TPT (capa de Tedlar Poliester Tedlar).

Sobre una mesa se coloca el vidrio templado, al tener rigidez permite soportar los demás materiales, durante etapas posteriores. En un siguiente paso, sobre el vidrio templado se coloca un pliego de EVA, poniendo especial atención para cubrir el vidrio. El EVA puede ser más grande que el vidrio templado pero no más pequeño, lo anterior para asegurar que el panel tenga un correcto encapsulado en el proceso de laminación.

Posteriormente se colocan las cadenas de celdas sobre el EVA. Dichas cadenas son colocadas de manera que la cara superior (azul o negativo) quede hacia abajo, el número de cadenas dependerá del tipo de modulo que se manufacture (Tabla 2). Una vez colocadas todas las cadenas sobre el EVA, se deben cumplir con las siguientes mediciones:

- Entre cada cadena debe existir una separación de 3 mm. Nota: una vez que

la medida entre cada cadena es correcta, son unidas con cinta adhesiva, para evitar que sufran desplazamientos, debidos a la manipulación del panel.

- Las celdas deben estar separadas del vidrio 15 mm en los costados y 28 a 29 mm en la parte superior e inferior.
- La separación de las celdas a los buses colectores primarios del panel, debe ser de 5 mm.

Para una conexión en serie, se une un polo positivo (cara posterior, en color gris) con un negativo (cara superior, en color azul), para esto las cadenas deben ser acomodadas de forma impar, es decir, se coloca la primera cadena y se gira 180 grados las siguientes, una a la vez, para hacer un efecto se zigzag entre las cadenas (de forma que una tenga su última celda con terminales positivas y otra donde su última celda se encuentre con terminales negativas). Al terminar la interconexión de las cadenas, existe una etapa de corte de sobrantes de cintas de estaño.

Posteriormente se colocan en la parte superior centrada un pedazo pequeño de EVA y otro TPT (Figura 14), esto permite que las cintas conectadas (soldadas) a los buses, no se unan (no se rosen), aislando el sistema de conexión. Dichos fragmentos de EVA y TPT, son colocados en los buses de salida para la interconexión hacia la caja conexión.

Para cerrar la etapa de montaje, se colocan las últimas dos capas, un pliego más de EVA (Figura 15) y uno de TPT, a los cuales se les realiza una pequeño corte, centrado en la parte superior del panel para posteriormente sacar los buses que servirán para conectar las cajas conexión.

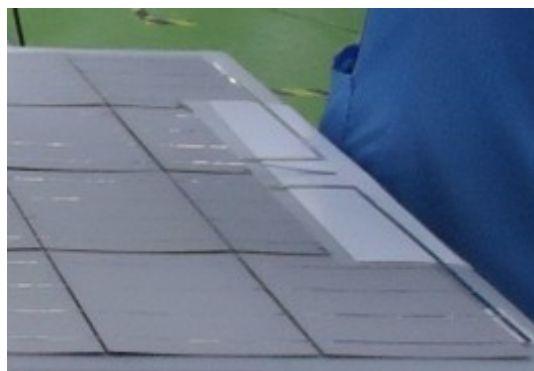


Figura 14. Proceso de montaje (colocación de EVA y TPT, como aislante entre los buses de conexión)

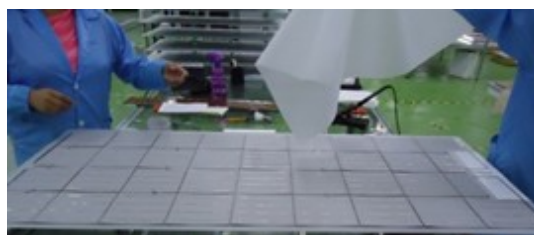


Figura 15. Proceso de montaje (colocación de la segunda capa de EVA)

Finalmente, sobre la mesa que fue colocado el conjunto permite saber si este está entregando el voltaje adecuado, ya que cuenta con un sistema de focos incandescentes que permite corroborar la corriente y voltaje (Figura 16), en caso de que exista un error en dichos parámetros, el panel es revisado y reparado.

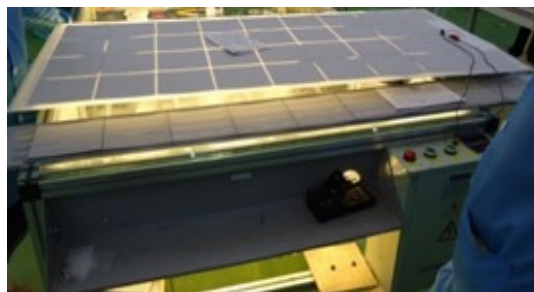


Figura 16. Verificación de voltaje y corriente del panel

Las dos capas de EVA sirven como un pegamento que adhiere todos los materiales para formar una sola pieza, esto ocurre en el proceso de laminación.

Laminación

El proceso de laminación consta de tres procesos dentro del mismo:

- Corroboración de medidas, e inspección del conjunto.
- Electroluminiscencia.
- Laminación.

Corroboración de Medidas e Inspección del Conjunto

En primer lugar se realiza la inspección básica del conjunto (entendiendo por conjunto al conglomerado formado por TPT, EVA, celdas fotovoltaicas, EVA y Vidrio templado). Este se coloca hacia abajo sobre una estructura metálica similar a una mesa, con un espejo que permite visualizar el panel con el objeto de identificar defectos, basuras, residuos o algún otro desperfecto o problema visual (Figura 17).



Figura 17. Inspección del conjunto

Dentro de este proceso se debe verificar que el conjunto cuente correctamente con los siguientes criterios:

- Polaridad de los electrodos.

- Verificar que no tenga residuos en los colectores primarios y secundarios.
- Asegurarse que el vidrio este cubierto en su totalidad por el TPT y EVA, que el TPT no tenga rasguños.
- El conjunto no debe tener basuras, cabellos, insectos, pedazos de celda, celdas rotas, etc.
- En este proceso de inspección se verifica que el conjunto cuente con las medidas correctas entre el vidrio y las celdas, la medida que se debe tener entre el filo del vidrio y la celda es de 15 mm en los costados y de 28 a 30 mm en la parte inferior y superior (como ya se había mencionado), estas medidas se toman ya que a la hora de colocar en el conjunto el marco los bordes de cada uno tienen 1.0 cm. de ancho, lo cual cubre parte del conjunto.

Electroluminiscencia

Después en el proceso de inspección se coloca el conjunto dentro del “detector de defectos de celdas”, en este segundo paso se verifica que las cadenas de celdas que anteriormente ya fueron unidas no presenten algún problema. Lo anterior se realiza mediante un efecto inverso al que ocurre cuando el módulo se encuentra instalado *in situ* (a través de la luz solar se genera electricidad en corriente directa), lo que significa que mediante una diferencia de potencial se revisa la estructura funcional de cada celda y del panel en su conjunto.

Para la realización de este proceso primero se coloca el conjunto dentro de la máquina de electroluminiscencia (Figura 18) y posteriormente conectar las puntas caimán que se encuentran en dicha máquina hacia los terminales positivo y negativo del conjunto (buses que salen en la parte trasera del conjunto), una vez el

conjunto dentro de la máquina para que comience a trabajar esta deberá estar cerrada.



Figura 18. Máquina de inspección de defectos, mediante electroluminiscencia

Posteriormente la máquina entregará una imagen en donde se podrá observar si las celdas presentan algún problema como (Figura 19):

- Rupturas en la celda.
- Grietas en la celda.
- Celdas astilladas.
- Incorrecta conexión de las celdas.
- Corto circuito.



Figura 19. Imagen que entrega el inspector de defectos en el monitor, mediante electroluminiscencia

Al momento de colocar el conjunto dentro de la máquina, la información generada (resultado del proceso de prueba exhaustiva realizada a cada conjunto), es almacenada en el disco duro del

ordenador; con dicha información se alimenta la base de datos de este proceso de revisión. Es en el monitor donde se muestran los resultados de la prueba realizada en las celdas y al conjunto.

Cabe hacer mención que, en caso de encontrarse algún defecto, la(s) celda(s) solares son remplazadas y el módulo (conjunto) se identifica como reparado. Una vez que es aceptada la calidad del conjunto o módulo, se procede al proceso de laminación.

En el caso de la figura anterior (Figura 19), y con base en la experiencia del operador, el panel analizado, se encuentra en condiciones óptimas para su entrada al siguiente proceso (laminación)

Laminación

El proceso de laminación consiste de dos etapas principales, la extracción de aire (etapa de vacío) y el aumento de temperatura, dentro de la cámara de una máquina que se denomina laminadora (Figura 20).



Figura 20. Máquina laminadora

En este proceso, el módulo o conjunto se coloca dentro de la laminadora, con la finalidad de unir heterogéneamente los elementos de dicho conjunto, los pasos a seguir son:

1. Colocar una tela de teflón resistente al calor sobre la plancha de la laminadora.
2. Colocar un pliego de papel encerado con la finalidad de evitar que el EVA se adhiera o incruste en la plancha de la laminadora.
3. Coloca el conjunto de modo que el vidrio quede hacia abajo.
4. Colocar una segunda tela de teflón para cubrir el conjunto, lo cual evita que el EVA se adhiera o incruste en el caucho de la tapa de la laminadora.

La máquina trabaja por periodos en un lapso total del 18 a 20 minutos:

- Primero extrae todo el aire existente, dentro de la máquina generando vacío dentro de la cámara (78 KPa).
- El segundo proceso consiste de un incremento gradual de la temperatura, hasta alcanzar los 130 C, lo cual permite que el EVA se funda, además de generarse una reacción química en la estructura del conjunto.

Al finalizar el proceso de laminación, la máquina abre (la tapa) y se retira el teflón. Posteriormente se retira el módulo laminado, colocando dicho módulo sobre una mesa, para su inspección. En seguida se procede a retirar los excedentes de papel encerado, EVA y TPT de las orillas, para depositarse temporalmente con la finalidad de integrarse al siguiente proceso.

Enmarcado

El proceso de enmarcado consiste en colocar los marcos de aluminio anodizado en el módulo laminado.

Antes de ensamblar el marco se coloca silicón en las ranuras de los marcos donde se ensamblará el módulo laminado, para

ello se utiliza una pistola de silicón que funciona con aire a presión (Figura 21).

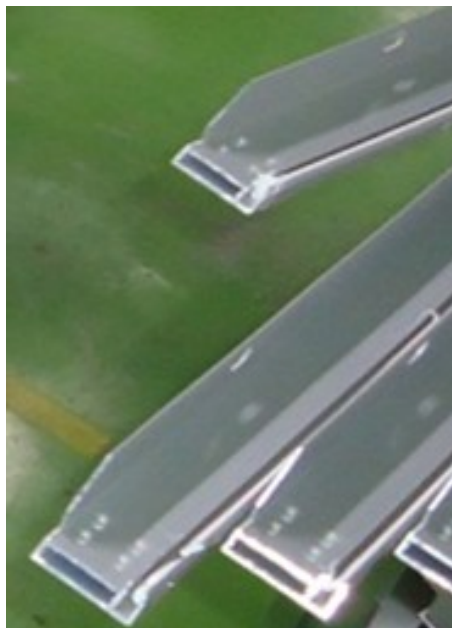


Figura 21. Colocación de marco de aluminio en módulo

Después el conjunto con los marcos son colocados sobre la máquina de presión neumática que se encarga de cuadrar y ensamblar por completo los marcos (Figura 22).

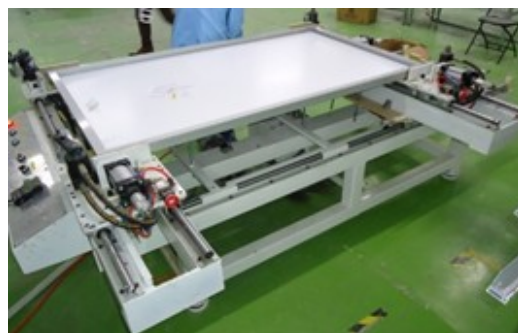


Figura 22. Colocación de marco de aluminio en módulo

Después del ensamble de marco de aluminio en el módulo laminado, se coloca otra capa de silicón en la parte interior del marco de aluminio, con el

objetivo de reforzar el proceso de encapsulamiento de cada panel. Posterior a ello, se coloca también la caja de conexión del panel solar. Una vez finalizado este proceso es necesario esperar a que el silicón seque por completo para que, posteriormente, en el área de acabados se realice un proceso de limpieza.

Acabados

En esta área el módulo se encuentra a algunos pasos (actividades) de estar disponible para su venta. En el proceso de acabado, se realiza la limpieza del panel con alcohol, además del ensamble o soldadura de los buses colectores primarios a la caja de conexión del panel.



Figura 23. Limpieza de paneles solares

Evaluación de la potencia del módulo fotovoltaico

Dentro de este proceso se le realizará una prueba al módulo para verificar que entregue la potencia nominal para la que fue ensamblado (Tabla 3).

Una vez colocado el módulo en el simulador solar (Figura 24), se prosigue a realizar la verificación de potencia. Para dicho proceso es necesario usar el equipo de protección para la vista (goggles oscuros). En este proceso de verificación, se conectan los conectores

MC4 (*Multi-Contact, 4mm of diameter*), para la emisión de un destello de luz, que permite el registro de las características de cada panel (V_{cc} , I_{cc} , P_{max} , etc), dichas características se registran en una base de datos y se visualizan en el monitor del simulador solar (Figura 25).

Tabla 3: Potencia y tolerancia de cada panel fotovoltaico

Potencia del modulo	Tolerancia	Límite inferior	Límite superior
25w	$\pm 3\%$	24.25W	25.75W
50w	$\pm 3\%$	48.50W	51.50W
100w	$\pm 3\%$	97.00W	103.00W
150w	$\pm 3\%$	145.50W	154.50W
250w	$\pm 3\%$	242.50W	257.50W
300w	$\pm 3\%$	291.00W	309.00W



Figura 24. Máquina para evaluación de las características del panel solar (simulador solar)



Figura 25. Resultado del test en simulador solar para un panel de 260W

Almacenamiento y empaque

Una vez corroborada la potencia de los paneles solares (inspección exhaustiva), estos son almacenados para su posterior empaque y envío al cliente final o, en su

caso, para su recolección en planta por parte del cliente.

En la Figura 26 se observa el diagrama de bloques del proceso de ensamble de módulos fotovoltaicos.

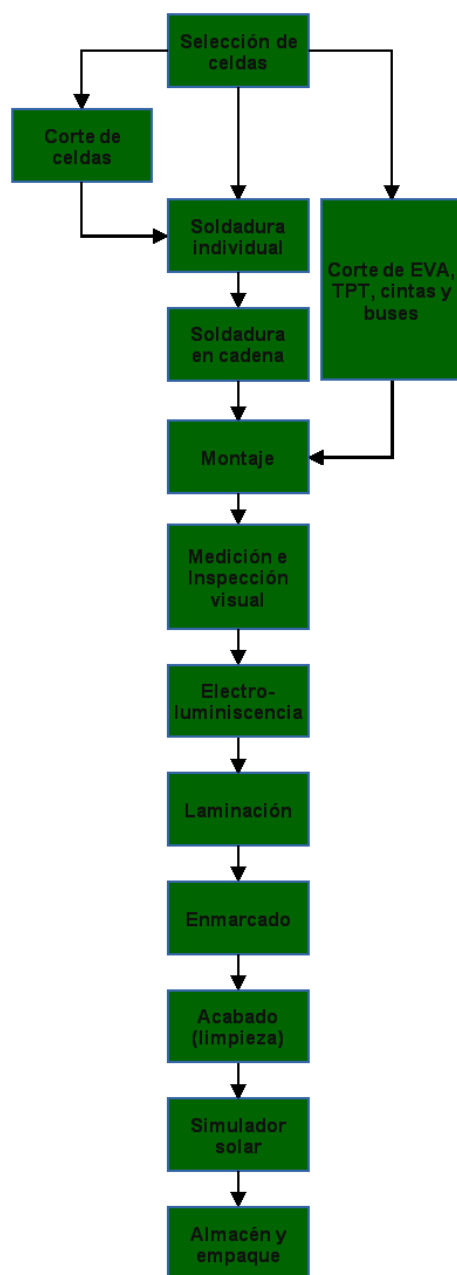


Figura 26. Diagrama de bloques de proceso de producción

De forma general es posible enfatizar la inspección de diferentes factores, con el objeto de verificar la calidad de los paneles, como lo son:

- Celdas
 - Celdas Rotas
 - celda astillada
 - celda rota por la mitad
 - Mala soldadura de la celda
 - El bus está torcido
 - Espacio entre celdas fuera de tolerancia
 - Color anormal
 - Celdas manchadas
 - quemada con el cautín, estaño en las celdas
- Cintas de conexión (*ribbon*)
 - Oxidación
- Vidrio
 - Rayado
 - Daño en el vidrio
 - estrellado
 - roto

- TPT
 - Dañado rayado
 - Hundimiento, huecos en la superficie
- Marco
 - Exceso de silicón en el marco
 - Esquinas del marco sin cerrar bien
 - Marco dañado
 - rayado
 - deforme
- Caja conexión
 - Desalineada
 - Exceso de silicón
- Defectos de laminación
 - Basura dentro del panel
 - Burbujas

Cada uno de estos factores o aspectos son revisados, mediante inspección visual, en el momento que se realiza el empaque para envío al cliente o la preparación para su recolección en planta.

DISCUSIÓN

El desarrollo e instalación de sistemas fotovoltaicos en el país y a nivel global, ha tenido un auge importante lo cual permite a las empresas de manufactura generar rentabilidad para la comercialización de paneles fotovoltaicos.

El proceso de elaboración de un módulo fotovoltaico consta de actividades que en suma, agregan un alto valor al producto final. A pesar de parecer sencillo, dicho proceso requiere de un alto grado de especialización práctica para su desarrollo. Dentro de cada proceso las herramientas y máquinas utilizadas para realizar las diversas actividades permiten ejercer control sobre el proceso de elaboración del panel fotovoltaico.

Cabe hacer mención que, dentro de cada una de las áreas de trabajo se mantienen

ciertos estándares de seguridad, debido a que existen diferentes riesgos, entre un proceso y otro. Por ejemplo, trabajar con la máquina laminadora en donde se manejan temperaturas elevadas, implica un riesgo térmico y; debido al peso de la tapa de dicha máquina, también se incurre en un riesgo mecánico; en el caso del proceso de montaje, donde no se usa ninguna maquinaria, se incurren en riesgos mecánicos menores, dada la naturaleza del proceso; en consecuencia, para cada una de las áreas de trabajo, se pueden identificar diversos riesgos vinculados al desempeño de las labores, entre ellos, mecánicos, térmicos, químicos y ergonómicos, entre los principales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Solangi, K.H., Islam, M.R., Saidur, R., Rahim N.A. & Fayaz, H. (2011). A review on global solar energy policy, *Renewable and Sustainable Energy Review*, pp. 2149-2163, consultado de: [\[https://www.researchgate.net/profile/Nasrudin_Abd_Rahim/publication/227421440_A_review_on_global_solar_energy_policy/links/0a85e52e05c7a364bb000000.pdf\]](https://www.researchgate.net/profile/Nasrudin_Abd_Rahim/publication/227421440_A_review_on_global_solar_energy_policy/links/0a85e52e05c7a364bb000000.pdf).
- [2] MacKay D.J.C. (2013). Solar energy in the context of energy use, energy transportation and energy storage, *Philosophical Transactions of Royal Society A* 371: 20110431. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2011.0431>, consultado de: [\[http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/roypta/371/1996/20110431.full.pdf\]](http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/roypta/371/1996/20110431.full.pdf).
- [3] Aman, M. M., Solangi, K. H., Hossain, M. S., Badarudin, A., Jasmon, G. B., Mokhlis, H., Bakar, A.H.H. & Kazi, S. N. (2015). A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1190-1204, consultado de: [\[http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/42687255/A_review_of_Safety_Health_and_Environmen20160214-25962-1gw8vaj.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1475518295&Signature=1y6Zs3ZAm%2FM25oc7yXKm2Wy8rdI%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DA_review_of_Safety_Health_and_Environmen.pdf\]](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/42687255/A_review_of_Safety_Health_and_Environmen20160214-25962-1gw8vaj.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1475518295&Signature=1y6Zs3ZAm%2FM25oc7yXKm2Wy8rdI%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DA_review_of_Safety_Health_and_Environmen.pdf).
- [4] Li, Z., Rahman, S. M., Vega, R. & Dong, B. (2016). A Hierarchical Approach Using Machine Learning Methods in Solar Photovoltaic Energy Production Forecasting. *Energies*, 9(1), 55, consultado de: [\[http://www.mdpi.com/1996-1073/9/1/55/html\]](http://www.mdpi.com/1996-1073/9/1/55/html).