

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PUCP**

**DISEÑO DE PLANTA DE ENSAMBLAJE DE PANELES SOLARES  
FOTOVOLTAICOS**

**Tesis para obtener el título profesional de INGENIERO INDUSTRIAL**

**AUTOR**

Marcos Edú Muñoz Quintasi

**ASESOR:**

Mery Roxana León Perfecto

Lima, Junio, 2021

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo principal proponer un diseño de planta para el ensamblaje de paneles solares fotovoltaicos en el Perú. A través de herramientas de Ingeniería Industrial, se busca analizar las operaciones involucradas para este diseño, con el fin de evaluar su factibilidad económica.

En el primer capítulo se comparó y contrastó casos de diseño de plantas de ensamblaje para tomar como referencia la metodología utilizada por dos autores. En el segundo capítulo, se evaluó las características de los paneles solares y las diferentes tecnologías que existen en el mercado, siendo las celdas solares monocristalinas, la tecnología escogida. Posteriormente, en el tercer capítulo, se evaluó los componentes y materiales requeridos para la fabricación y ensamble de un panel solar.

En el cuarto capítulo se realizó un análisis de las operaciones y máquinas necesarias para el diseño de planta. De esta forma, en el quinto capítulo, se propuso un diseño de planta, se escogió un tipo de distribución por producto y el área total del diseño resultó igual a 7,425 m<sup>2</sup>. En el sexto capítulo, a través de métodos de macro y micro localización de planta, se obtuvo como localización ideal la ciudad de Sicuani, Cusco, Perú. Finalmente, en el séptimo capítulo, se evaluó los ingresos y egresos de la operación de la planta en un periodo de 5 años. La viabilidad económica se analizó con indicadores económicos como el VAN y TIR, obteniéndose un VAN igual a S/ 559,237.91 para el escenario probable y un TIR igual a 27%, siendo superior al WACC de 20%.

Los resultados obtenidos con la presenta investigación se resumen en la factibilidad económica de la propuesta de diseño de una planta para el ensamblaje de paneles solares fotovoltaicos al cabo de 5 años de operación. Siendo sus indicadores económicos positivos para cualquiera de los 3 escenarios posibles.

## DEDICATORIA

A mis padres, Marcos y Melina, por todo el apoyo durante estos 5 años, estando presentes, guiándome y dándome fortaleza cuando más lo necesitaba.

A mis abuelos, a pesar de no estar presentes, los recuerdo siempre con mucho cariño y todo el esfuerzo va dedicado a ellos, y esto es un fruto de los valores que me han inculcado desde muy niño.

A mis amigos, por los gratos momentos en la universidad y en la vida, por ser quienes me han acompañado en todo este proceso y hemos forjado muchas anécdotas que las recordaré por siempre.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Dr. César Stoll, al Mg. David Allasi, Mg. Jonatan Rojas y a Mg. Mery León. El profesor César Stoll fue el principal colaborador durante todo este proceso, quien, con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo y el éxito de este trabajo.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	i
DEDICATORIA .....	ii
ÍNDICE GENERAL .....	iii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
ÍNDICE DE ANEXOS .....	viii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. CASOS PARA EL DISEÑO DE PLANTAS PARA EL ENSAMBLAJE DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS .....	2
1.1. Caso de estudio: Diseño Integral de Planta de Construcción de Paneles Solares para Calentamiento de Agua con Fines Domésticos .....	2
1.1. Caso de estudio: Fabricación de paneles fotovoltaicos en BP Solar .....	7
1.2. Análisis de Casos de Estudio .....	10
CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA.....	14
CAPÍTULO 3. COMPONENTES Y MATERIALES PARA EL ENSAMBLE DE UN PANEL SOLAR .....	22
3.1. Componentes .....	24
3.2. Evaluación de Componentes Para Comprar y Fabricar .....	28
3.3. Selección de Proveedores .....	31
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE PROCESOS PARA EL ENSAMBLE DE UN PANEL SOLAR .....	37
4.1. Operaciones en el Proceso de Ensamble de Paneles Solares.....	37
4.2. Análisis de Máquinas y Equipos por Operación.....	40

4.3. Diagrama Relacional de Actividades.....	44
CAPÍTULO 5. DISEÑO DE PLANTA .....	47
5.1. Elección de Tipo de Distribución de Planta .....	47
5.2. Requerimientos de espacio .....	48
5.3. Propuesta de Diseño .....	54
CAPÍTULO 6. LOCALIZACIÓN DE PLANTA.....	58
6.1. Macro Localización: Método De Centro De Gravedad.....	58
6.2. Micro Localización: Método Sinérgico De Localización De Plantas (Brown Y Gibson) .....	62
CAPÍTULO 7. ANÁLISIS ECONÓMICO .....	65
7.1. Inversión .....	65
7.2. Presupuesto De Ingresos y Egresos .....	66
7.3. Evaluación Económica .....	70
CONCLUSIONES .....	73
BIBLIOGRAFÍA .....	77
ANEXOS .....	82

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Flujo de Proceso General Luzuriaga.....	4
Ilustración 2: Identificación de áreas Luzuriaga.....	4
Ilustración 3: Diagrama Relacional de Actividades Luzuriaga .....	5
Ilustración 4: Propuesta de diseño de planta Luzuriaga.....	6
Ilustración 5: Flujo de procesos de planta TF1 BP Solar.....	8
Ilustración 6: Layout de la planta TF1 BP Solar.....	8
Ilustración 7: Esquema de la región de interconexión de un módulo fotovoltaico.....	9
Ilustración 8: Metodología para el diseño de distribución de planta Luzuriaga .....	11
Ilustración 9: Panel solar fotovoltaico terminado .....	23
Ilustración 10: Componentes de un panel solar fotovoltaico.....	23
Ilustración 11: Lista de materiales para un panel solar.....	24
Ilustración 12: Interconexión Ribbon para celdas monocristalinas .....	26
Ilustración 13: Ejemplo de pegatina de test de un panel solar .....	28
Ilustración 14: Lista de materiales para una celda solar monocristalina .....	31
Ilustración 15: Diagrama de bloques de la fabricación de celdas solares monocristalinas .....	37
Ilustración 16: Diagrama de bloques del ensamblaje de paneles solares.....	38
Ilustración 17: DOP para la fabricación de celdas solares monocristalinas .....	39
Ilustración 18: DOP para el ensamble de paneles solares.....	39
Ilustración 19: Diagrama Relacional de Actividades.....	45
Ilustración 20: Layout de Bloques Unitarios .....	46
Ilustración 21: Índice regional de radiación UV en el Perú.....	49
Ilustración 22: DRE Compacto.....	55
Ilustración 23: Propuesta final de diseño .....	57
Ilustración 24: Resultados de la macro localización.....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Requerimientos y disponibilidad de espacios Luzuriaga.....	5
Tabla 2: Resumen de la comparación de diferentes tecnologías de celdas solares .....	16
Tabla 3: Ponderación de factores: criterios de comparación de tecnologías de celda solar ....	19
Tabla 4: Resultados obtenidos de la comparación de tecnologías de celda solar .....	20
Tabla 5: Características de un panel solar fotovoltaico de celdas monocristalinas .....	22
Tabla 6: Matriz de decisión de fabricar/comprar .....	29
Tabla 7: Ponderación de factores: criterios de comparación de proveedores .....	31
Tabla 8: Evaluación de proveedores para vidrio templado.....	32
Tabla 9: Resultado de proveedor más ideal para vidrio templado.....	32
Tabla 10: Evaluación de proveedores para encapsulante EVA .....	32
Tabla 11: Resultado de proveedor más ideal para encapsulante EVA .....	33
Tabla 12: Evaluación de proveedores para capa trasera TPT .....	33
Tabla 13: Resultado de proveedor más ideal para capa trasera TPT .....	34
Tabla 14: Evaluación de proveedores para marco de aluminio .....	34
Tabla 15: Resultado de proveedor más ideal para marco de aluminio .....	35
Tabla 16: Evaluación de proveedores para caja de conexiones .....	35
Tabla 17: Resultado de proveedor más ideal para caja de conexiones .....	36
Tabla 18: Tabla Relacional de Actividades - Cualitativa .....	45
Tabla 19: Ponderación de factores: criterios de comparación de distribución de planta.....	47
Tabla 20: Comparación de distribuciones de planta .....	47
Tabla 21: Resultados obtenidos de la comparación de distribución de planta .....	48
Tabla 22: Irradiancia solar en las principales ciudades del sur del Perú.....	50
Tabla 23: Demanda y cadencia de producción de paneles solares .....	52
Tabla 24: Balance de línea de producción de paneles solares .....	53

Tabla 25: Número de máquinas necesarias después de balance de línea .....	53
Tabla 26: Área requerida por cada recurso .....	54
Tabla 27: Unidades patrón por cada recurso.....	55
Tabla 28: Localización de las principales ciudades clientes.....	58
Tabla 29: Macro localización a partir del método de centro de gravedad.....	60
Tabla 30: Factores críticos y objetivos de localización de plantas .....	62
Tabla 31: Factores objetivos de la micro localización de planta .....	63
Tabla 32: Descripción de factores subjetivos de la micro localización de planta .....	63
Tabla 33: Factores subjetivos de la micro localización de planta.....	63
Tabla 34: Resultados de micro localización de planta.....	64
Tabla 35: Inversión en maquinaria .....	65
Tabla 36: Inversión en muebles y enseres .....	66
Tabla 37: Inversión total.....	66
Tabla 38: Ingresos totales .....	67
Tabla 39: Requerimiento de personal .....	67
Tabla 40: Salario mensual de personal .....	68
Tabla 41: Presupuesto de mano de obra .....	68
Tabla 42: Presupuesto de material directo e indirecto.....	69
Tabla 43: Presupuestos de costos indirectos .....	69
Tabla 44: Presupuesto de transporte .....	70
Tabla 45: Ingresos – Egresos .....	70
Tabla 46: Flujo económico del proyecto .....	71
Tabla 47: Evaluación económica VAN .....	71
Tabla 48: Evaluación económica TIR.....	71



## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Línea de producción de celdas solares monocristalinas.....	82
Anexo B: Glass Loading Machine.....	82
Anexo C: EVA Loading Machine.....	82
Anexo D: Tabber & Stringer.....	83
Anexo E: Lay-up Machine.....	83
Anexo F: Interconnection Machine .....	83
Anexo G: Electroluminescence Machine.....	84
Anexo H: Solar Laminator.....	84
Anexo I: Framing Machine.....	84
Anexo J: Junction Box Sealing Machine.....	85
Anexo K: Curing Line .....	85
Anexo L: Module Tester & Sorter Machine .....	85
Anexo M: Labelled & Sorter Machine .....	86
Anexo N: Wrapping Machine.....	86

## INTRODUCCIÓN

La importancia de estudiar este tema en particular radica en la necesidad de promover un Perú más industrializado, debido a que las empresas más grandes actualmente se dedican a las actividades económicas extractivas o de servicios, dejando en segundo plano la transformación de recursos primarios para darles un valor agregado. Actualmente, en el mundo existe una gran demanda de soluciones energéticas sostenibles con el medio ambiente, especialmente relacionadas a la producción de energía eléctrica a partir de paneles solares fotovoltaicos.

Además, el desarrollo de proyectos relacionados a la fabricación y ensamble de paneles solares dentro de Latinoamérica son muy pocas, y en Perú, nulas; siendo China, Alemania y Estados Unidos los principales países con tecnología desarrollada y dominantes del mercado solar fotovoltaico.

Esta investigación propone explorar la viabilidad económica de un proyecto relacionado al diseño de una planta para el ensamble de paneles solares fotovoltaicos, evaluando tecnologías solares actuales, componentes de un panel solar, análisis de las operaciones relacionadas al ensamble, propuesta de diseño de planta y la localización en el Perú.

# **CAPÍTULO 1. CASOS PARA EL DISEÑO DE PLANTAS PARA EL ENSAMBLAJE DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS**

## **1.1. Caso de estudio: Diseño Integral de Planta de Construcción de Paneles Solares para Calentamiento de Agua con Fines Domésticos**

La tesis realizada por (Luzuriaga, 2005) tiene como objetivo proponer un diseño integral de una planta para la manufactura y comercialización de sistemas de calentamiento de agua, los paneles solares usados para este tipo de sistema son térmicos; es decir, estos paneles están diseñados para ser utilizados como concentradores térmicos que permitan el calentamiento del agua para hogares. Si bien los paneles solares térmicos y fotovoltaicos tienen aplicaciones diferentes, se ha escogido este caso para evaluar la metodología utilizada para el posterior diseño de planta a proponer:

- a) **Diseño organizacional:** se empieza con las bases sobre cómo se va a constituir la organización; es decir, la visión y misión que perseguirá la empresa. Además, el autor plantea los objetivos que se conseguirán tanto a corto, mediano y largo plazo. Este es una etapa muy importante debido a que las plantas para el ensamble de paneles solares, a diferencia de otras plantas de manufactura, persiguen objetivos adicionales. Por ejemplo, estas plantas no solo están enfocadas en la fabricación de productos para satisfacer una demanda, sino también tienen objetivos de desarrollo sostenible promoviendo el uso de fuentes de energía renovables que aprovechen la energía solar. Por otro lado, el autor establece los lineamientos que deberán seguir los procesos y las actividades clave de

acuerdo con los valores de la empresa, del mismo modo, le permite establecer las políticas de calidad que seguirán los procesos.

- b) **Actividades clave para la fabricación y ensamble:** una vez culminado el diseño organizacional, el autor mapea los procesos principales para la planta de construcción de paneles solares térmicos. Además, establece las actividades clave de cada proceso y para realizar una priorización de actividades para su posterior diagramación. Con esta metodología, logra que los procesos sean los más simples posibles, sin descuidar políticas de calidad de la fabricación del producto. Por lo tanto, con el apoyo de metodologías y herramientas como la Cadena de Valor de Porter, la Propuesta de Valor de Osterwalder y Matriz de Priorización; se consolida los conocimientos de herramientas de Ingeniería Industrial para su aplicación y presentar oportunidades de mejora.
- c) **Diseño de flujo de procesos de la planta:** En esta etapa, Luzuriaga construye un diagrama de flujo bajo las normas ANSI en el cual se detallan las actividades dentro del punto anterior. Posteriormente, realiza un desglose de los componentes obteniendo una Lista de Materiales para el producto final. A continuación, detalla brevemente los componentes necesarios para el ensamble. Del mismo modo, especifica las áreas involucradas a las que pertenece cada proceso y las máquinas necesarias para realizar dichas operaciones. Finalmente, obtiene el Diagrama de Flujo y el Diagrama de Operaciones, diagramas necesarios para el dimensionamiento de planta.

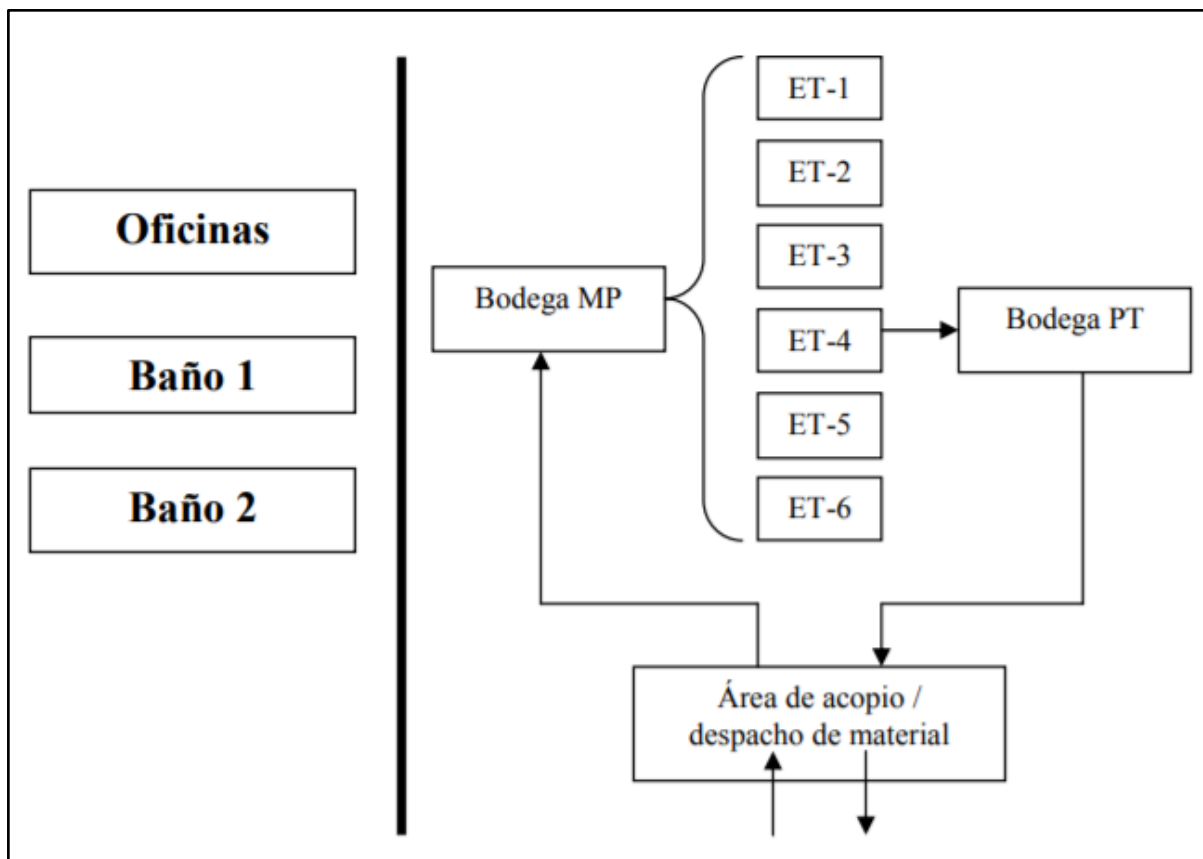


Ilustración 1: Flujo de Proceso General Luzuriaga

Fuente: Luzuriaga, 2005

Oficinas (1)	
Baño 1 (2)	
Baño 2 (3)	
Area acopio/despacho materiales (4)	
Bodega Materia Prima (5)	
ET-1 (6)	
ET-2 (7)	
ET-3 (8)	
ET-4 (9)	
ET-5 (10)	
ET-6 (11)	
Bodega Producto Terminado (12)	

Ilustración 2: Identificación de áreas Luzuriaga

Fuente: Luzuriaga, 2005

- d) **Balance de línea:** A partir del detalle de las operaciones, el autor realiza un balance de línea, identificando la(s) operación(es) que son cuello de botella, de forma que se pueda maximizar la producción de paneles.

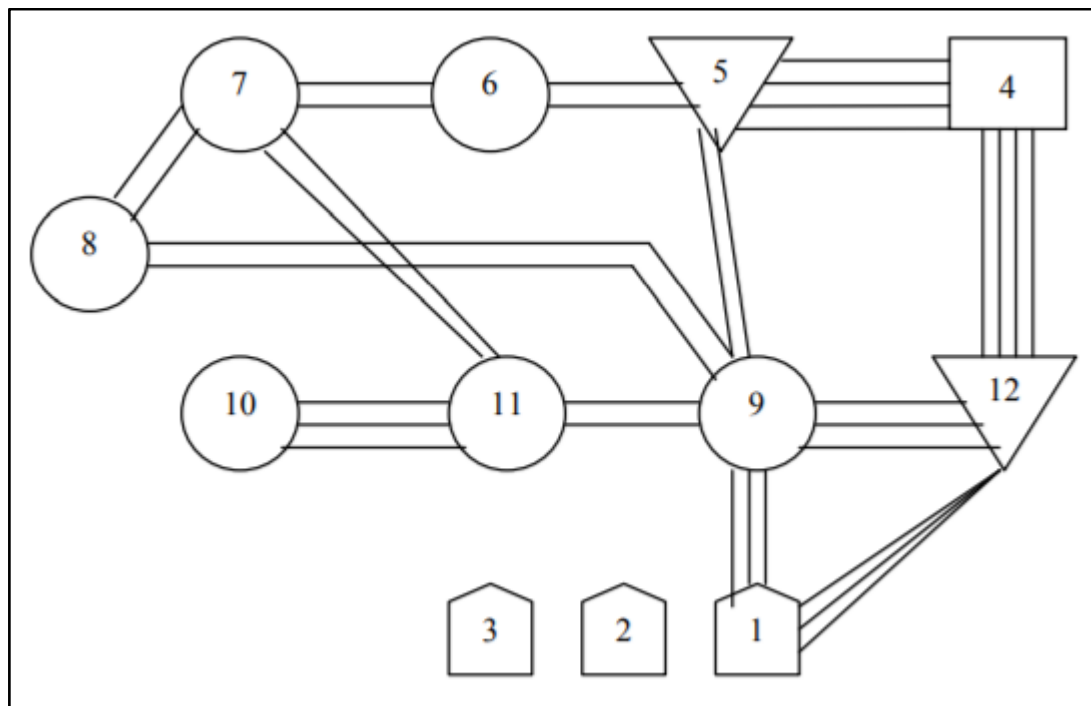


Ilustración 3: Diagrama Relacional de Actividades Luzuriaga

Fuente: Luzuriaga, 2005

- e) **Dimensionamiento de la planta:** Luzuriaga dimensiona la planta considerando áreas adicionales como oficinas, baños y almacenes de materia prima y productos terminados.

Tabla 1: Requerimientos y disponibilidad de espacios Luzuriaga

No.	Áreas	M2 requeridos	%	M2 disponibles
1	Oficinas	50	25%	99
2	Baño 1	2	1%	4
3	Baño 2	6	3%	12
4	Acopio/despacho de materiales	40	20%	79
5	Bodega MP	25	12%	49
6	ET-1	10	5%	20
7	ET-2	10	5%	20
8	ET-3	5	2%	10
9	ET-4	15	7%	30
10	ET-5	5	2%	10
11	ET-6	10	5%	20
12	Bodega PT	25	12%	49
<b>TOTAL</b>		<b>203</b>	<b>100%</b>	<b>402</b>

Fuente: Luzuriaga, 2005

- f) **Diseño de planta:** una vez obtenidas las dimensiones para cada área, el autor utiliza el Diagrama Relacional de Espacios para proponer un diseño de planta, considerando posibles modificaciones y limitaciones prácticas que requiera variar la propuesta inicial.

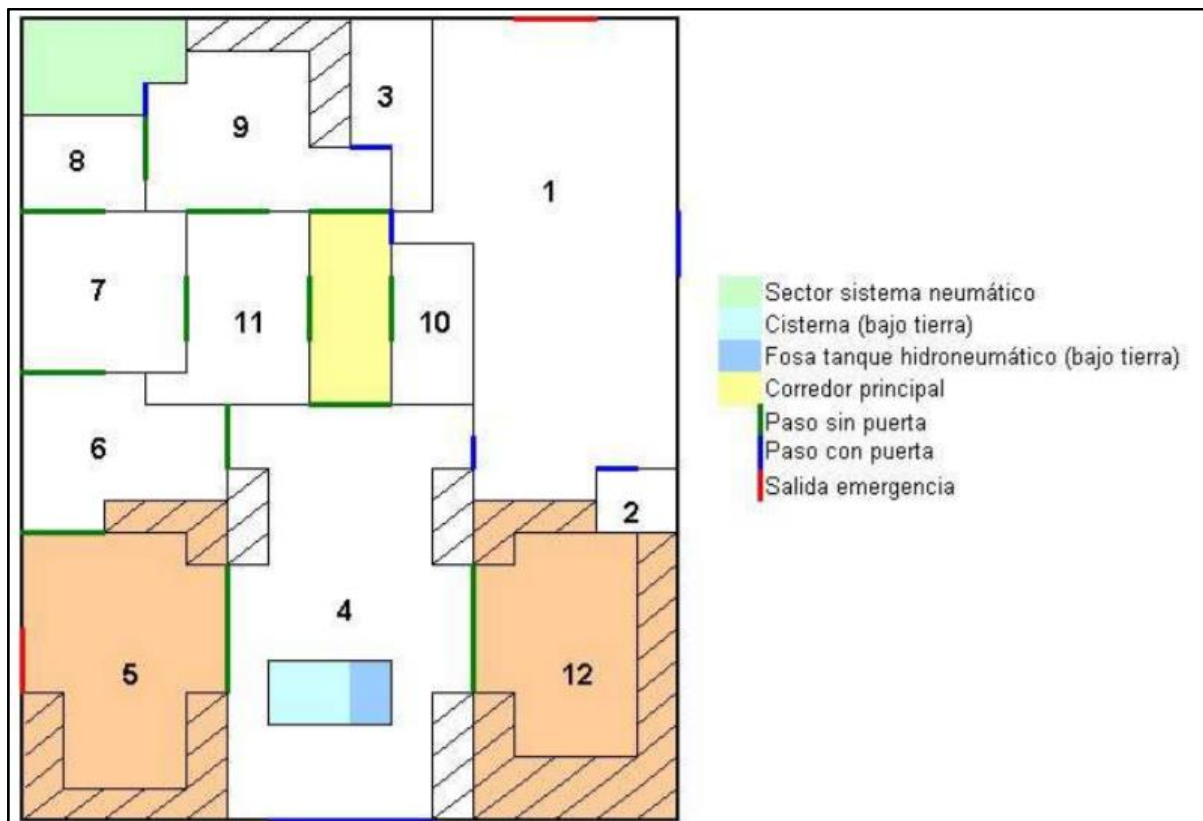


Ilustración 4: Propuesta de diseño de planta Luzuriaga

Fuente: Luzuriaga, 2005

- g) **Ubicación de planta:** La última etapa de la metodología de planificación de diseño sistemática o SLP<sup>1</sup> (por sus siglas en inglés) consiste en ubicar la planta en la localización óptima considerando diversos factores. El autor toma en cuenta factores como la distancia a los proveedores, a los centros de distribución mayoritarios y a los principales clientes. Además, también considera factores económicos como los costos por transporte y costo por m<sup>2</sup> del área del terreno.

<sup>1</sup> *Systematic Layout Planning*

## **1.1. Caso de estudio: Fabricación de paneles fotovoltaicos en BP Solar**

BP Solar es actualmente una de las compañías líderes de fabricación de paneles solares, contando con plantas en China, India y Estados Unidos. Esta empresa tiene como objetivo brindar a sus clientes productos y servicios relacionados con la energía solar a un precio competitivo, enfocándose en fabricación con tecnología propia, manteniendo una estrecha relación con proveedores regionales de suministro de componentes (British Petroleum, 2010). Una característica importante de esta empresa es que anualmente destina más de 10 millones de dólares en Investigación y Desarrollo de paneles solares fotovoltaicos (Wholesale Solar, 2020).

Esta empresa empezó fabricando pequeñas celdas solares de Silicio amorfo (a-Si) de una sola unión para consumo privado en 1984. Para el año 1997, empezaron a elaborar módulos tándem para aplicaciones remotas e integradas a edificios. Es notable el crecimiento que ha tenido, especialmente por la fusión de la empresa Solarex con BP Solar en el año 1998 para formar lo que hoy es BP Solar. Esta fusión permitió aumentar el desarrollo e investigación en tecnología de paneles solares fotovoltaicos, aumentando su eficiencia y reduciendo costos de fabricación.

El análisis del caso de fabricación de paneles solares fotovoltaicos de BP Solar permite detallar la secuencia de sus operaciones para determinada paneles solares fotovoltaicos de silicio amorfo (a-Si) y revisar la distribución de planta que proponen para hacer del proceso más eficiente. De esta forma, se utilizarán en la tesis los conceptos e ideas que se adapten mejor a la propuesta a plantear.



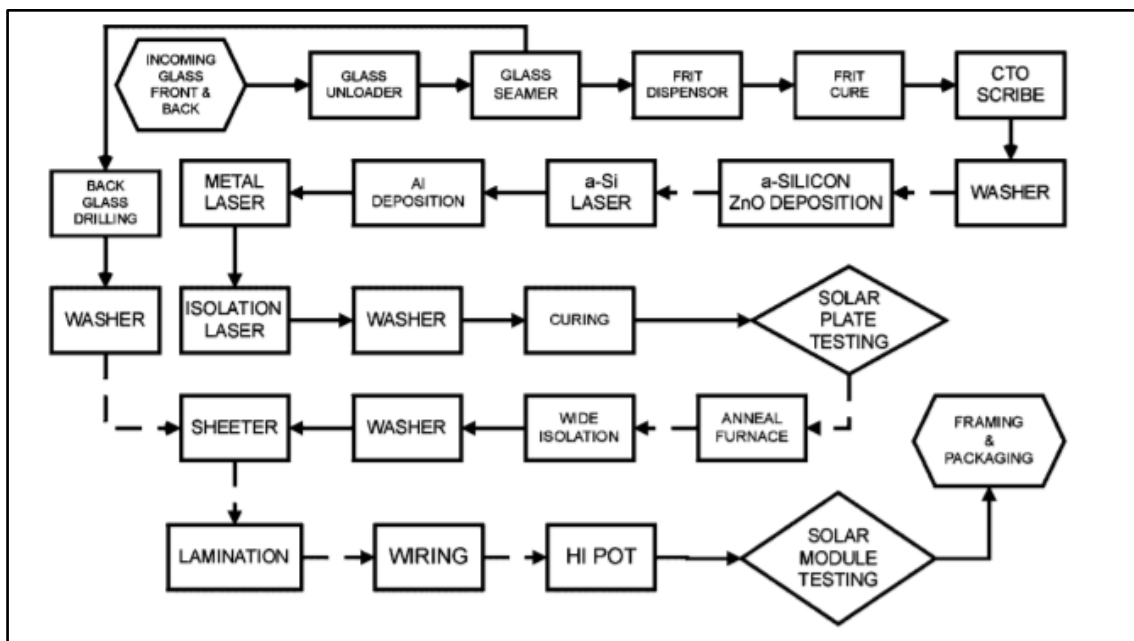


Ilustración 5: Flujo de procesos de planta TF1 BP Solar

Fuente: Arya & Carlson, 2002

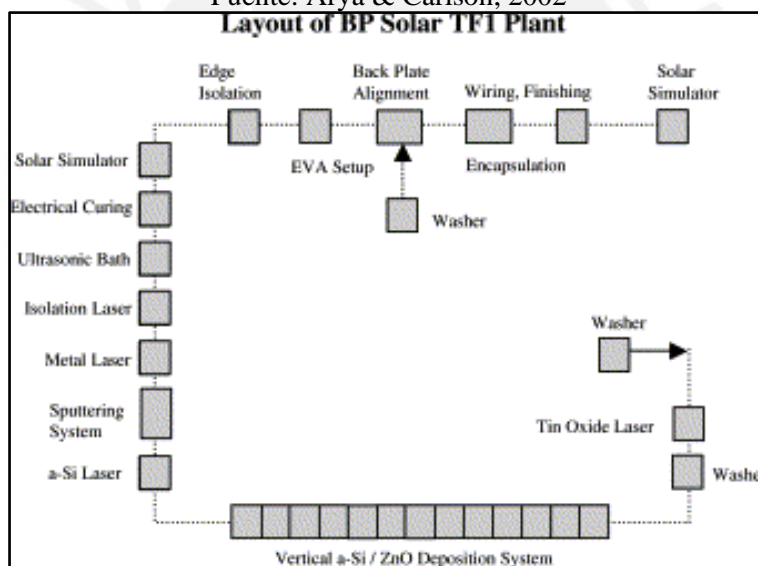


Ilustración 6: Layout de la planta TF1 BP Solar

Fuente: McEvoy, Castaner & Markvart, 2013

Como se puede apreciar en la Ilustración 6, la distribución de planta para es una distribución por producto. Esta distribución tiene como característica el movimiento del material de trabajo por cada uno de los puestos de trabajo según el flujo de operaciones establecidas. De esta forma, se aprovecha de manera más eficiente el área total de la instalación y logrando así una producción más eficiente enfocándose en un solo tipo de producto a fabricar.

Antes que inicie el proceso, se realiza la adquisición de vidrio recubierto con óxido de estaño texturizado, barras conductoras de plata que han sido cosidas en los bordes y reforzadas con calor antes de entregarlo a la planta. Para fabricar un módulo solar fotovoltaico es necesario dos capas de vidrio; una hoja de vidrio sin recubrimiento que se usa como placa posterior mientras que la otra capa de vidrio está recubierta con óxido de estaño texturizado que se usa como sustrato. A continuación, el óxido de estaño se traza mediante un láser Nd-YAG<sup>2</sup> de doble frecuencia; este patrón de trazado determina el voltaje y la corriente de funcionamiento del módulo.

Posteriormente, el subproducto pasa por un lavado en el que se recubren con varias capas de a-Si/a-SiGe<sup>3</sup>. En la actualidad, la deposición de la estructura en tándem a-Si/a-SiGe es el proceso que limita la velocidad en la planta y la capacidad total a aproximadamente 10 MWp por año. Después de la deposición de la capa de óxido de zinc, se realiza otro trazado con láser y se coloca a aproximadamente 0.13 mm del primer trazado en el óxido de estaño mediante visión artificial controlada por computadora. En la Ilustración 7 se observa el esquema transversal de un panel solar fotovoltaico de silicio amorfo.

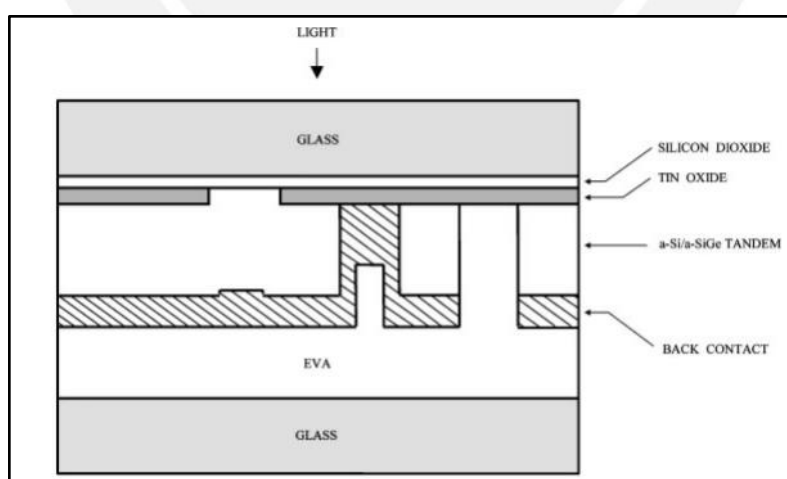


Ilustración 7: Esquema de la región de interconexión de un módulo fotovoltaico

Fuente: Arya & Carlson, 2002

<sup>2</sup> Láser de neodimio

<sup>3</sup> Silicio amorfo germánico

Posterior a la deposición del aluminio, un tercer trazador láser elimina localmente el contacto posterior para completar la interconexión en serie de las celdas. Toda la región de interconexión del láser tiene aproximadamente 3 mm de ancho y constituye solo un pequeño porcentaje del área inactiva. Se utiliza un cuarto trazador láser para realizar la remoción de todas las películas alrededor del perímetro del módulo para el aislamiento eléctrico.

Las placas marcadas se lavan y luego se someten a un curado de polarización inversa para quemar eléctricamente los defectos que causan cortocircuitos y derivaciones. Posteriormente, los módulos se prueban en un simulador solar y recocen. Después del recocido, las placas se raspan mecánicamente a lo largo de la periferia para crear una zona amplia que asegure un buen aislamiento eléctrico. Las placas frontales revestidas y marcadas se laminan luego con encapsulante EVA<sup>4</sup> a la placa de vidrio posterior. Luego, los productos se cablean, prueban, enmarcan y embalan para su envío. La planta tiene todas las operaciones críticas automatizadas, con solo cinco operaciones de manipulación manual antes de la laminación.

## 1.2. Análisis de Casos de Estudio

Es importante resaltar la investigación realizada por Luzuriaga porque plantea la creación desde cero de una planta para producir paneles térmicos para calentamiento de agua. De este caso se puede rescatar 6 pasos para el diseño de una planta de fabricación de paneles térmicos que serán utilizados para la presente tesis:

- a) Actividades clave para la fabricación y ensamble
- b) Diseño de flujo de procesos de la planta
- c) Balance de línea
- d) Dimensionamiento de la planta
- e) Diseño de planta

---

<sup>4</sup> Acetato de etilvinilo

## f) Ubicación de la planta

Cada una de estas etapas involucra herramientas de Ingeniería Industrial, especialmente temas de diseño de plantas, logística y planeamiento y control de operaciones. Además, se busca generar distintos diseños que permitan ser comparados, a partir de métodos cualitativos y cuantitativos, para obtener la distribución ideal.

En la Ilustración 8, se muestra un diagrama de la metodología utilizada por Luzuriaga para el diseño de planta de construcción de paneles solares. Este diagrama ayuda para el orden en el que se van a desarrollar cada uno de los temas, además, permite especificar en cada bloque las herramientas de Ingeniería Industrial que se utilizará. Por lo tanto, brinda un resumen rápido pero entendible, de la metodología a desarrollar en la investigación.

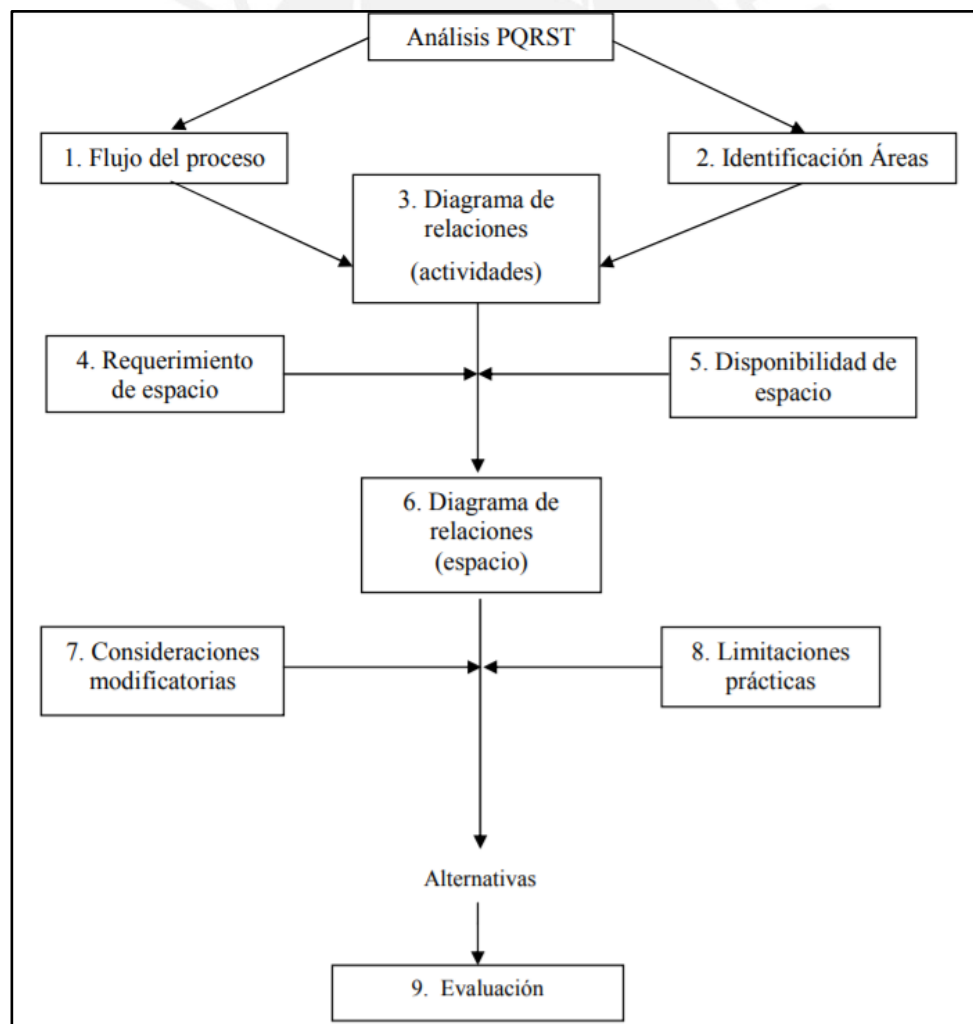


Ilustración 8: Metodología para el diseño de distribución de planta Luzuriaga

Fuente: Luzuriaga, 2005

Adicionalmente, con relación a la distribución de planta propuesta por ambos casos de estudio son diferentes entre sí. Por un lado, en el Caso de estudio 1, se basa en el diseño de planta de fabricación de la empresa *SunFlower Systems*, la cual es un tipo de distribución por proceso con un esquema en “U”; es decir, que hay una entrada y salida diferente para la fabricación de módulos solares. Este tipo de distribución es recomendable especialmente por la versatilidad que se tiene para fabricar productos que compartan procesos o etapas; de esta forma, se optimizan recursos y tiempo. Por otro lado, el Caso de estudio 2, tiene como modelo la planta TF1 de BP Solar, que tiene una distribución por producto; esta tiene como característica una capacidad anual de  $10\text{MW}_p$  de módulos tándem fotovoltaicos de a-Si. Una de las ventajas de utilizar este tipo de distribución, es la eficiencia para la fabricación del producto, ya que el insumo es transportado a través de fajas por cada uno de los procesos o etapas correspondientes, ahorrando tiempo muerto y manipulación por parte del personal (especialmente porque los procesos están en su mayoría automatizados). Sin embargo, una de las principales limitaciones que se encuentra para estos tipos de distribuciones es la poca versatilidad que se tiene para fabricar otros productos, debido a que las máquinas están programadas para cierto producto en particular y un cambio en las configuraciones involucraría una interrupción de la producción, teniendo como consecuencia pérdidas de ingreso y tiempo.

Teniendo en cuenta ambos casos de estudio, es importante resaltar la existencia del tipo de distribución modular, rescata la eficiencia de la distribución por producto y la flexibilidad de la distribución por proceso. De esta forma, las máquinas se agrupan en diferentes celdas o centros de trabajo para trabajar sobre productos que tienen componentes o especificaciones similares. Además, teniendo en cuenta que el mundo se encuentra en un entorno VUCA<sup>5</sup>, las empresas están obligadas a adaptarse a cambios repentinos y que afectan principalmente a las planificaciones y estrategias que normalmente se programan (Redacción APD, 2018). Es así,

---

<sup>5</sup> Referencia al acrónimo volátil, incierto, complejo y ambiguo por sus palabras en inglés

que un tipo de distribución modular puede satisfacer las necesidades cambiantes de las empresas y estar así en la misma línea que las principales empresas de tecnología.

Por último, los beneficios de analizar ambos casos, es valorar el uso de herramientas de Ingeniería Industrial en cada una de estas aplicaciones. Por ejemplo, en el diseño propuesto por Luzuriaga, utiliza Diagrama de Bloque y un DOP para detallar las operaciones y demoras del proceso de producción y ensamble del panel solar térmico. Además, hace uso de técnicas de requerimiento de espacio y Diagrama Relacional de Actividades para proponer alternativas para el diseño de planta. Mientras que, en el caso de BP Solar se enfocan específicamente en el tipo de distribución de planta y los procesos detallados de la producción y ensamble de paneles solares de silicio amorfo. El uso de nuevas tecnologías responde a temas de tecnología industrial y la constante inversión en el área de Investigación y Desarrollo permite explorar nuevas técnicas de producción de paneles solares. Además, para el desarrollo de esta tesis, si bien se utilizan varios procesos de los mencionados por la empresa BP Solar, estos están patentados y requieren una licencia para poder utilizarse comercialmente. Por lo tanto, se utilizarán procesos de licencia abierta que comparte similitud con operaciones de BP Solar, siendo esta una referencia sobre el tipo de distribución de planta y máquinas a utilizarse y su disposición dentro de esta.

## CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA

La fabricación de paneles fotovoltaicos dependen de dos factores: la tecnología de celdas solares y el tipo de conexión entre estas. Los paneles solares fotovoltaicos basados en silicio han cambiado muy poco en los últimos 40 años. El concepto estándar comprende paneles de silicio tipo p<sup>6</sup>, contactos disparados y encapsulado. La reducción de costos de producción es necesaria si la energía solar fotovoltaica quiere sobrevivir sin tarifas adicionales, y sea competitiva con los costos de electricidad de la red. (Strahm, Leu, Krause, Roters, & Richter, 2018).

Actualmente existen 3 generaciones de tecnologías de celdas solares, las de primera generación incluyen al silicio mono y policristalino; las de segunda generación incluyen al silicio amorfo, CdTe<sup>7</sup> y CIS<sup>8</sup>; y una tercera generación que aún está en fase de desarrollo y pruebas en laboratorio. Según (Yan & Saunders, 2014), de cara al futuro, proponen a las tecnologías de tercera generación como un excelente potencial para proporcionar el despliegue a gran escala y de bajo costo de paneles solares. Tecnologías necesarias para enfrentar el desafío de generación de electricidad solar de manera sostenible y a bajo costo. (Conibeer, 2007). Como mencionan, las tecnologías de tercera generación están muy lejos de ser viables comercialmente, por lo tanto, no serán tomadas en cuenta en el análisis.

Las tecnologías de celdas solares por comparar son:

Primera generación: estas corresponden a celdas solares hechas a partir de obleas de silicio. Estas generalmente tienen una única unión en su estructura y alcanzan aproximadamente una eficiencia teórica de 33%. Sin embargo, sus costos de fabricación son

---

<sup>6</sup> Semiconductor intrínseco con impurezas receptoras

<sup>7</sup> Telururo de cadmio

<sup>8</sup> Diselenuro de cobre e indio

más altos tanto en términos de consumo de energía como de mano de obra, y su rendimiento se degrada fácilmente en condiciones de temperatura más altas. Las células de primera generación son actualmente las más eficientes y las más utilizadas entre las tres (Zhang, Wang, & Yang, 2018).

Las únicas dos tecnologías se diferencian por sus niveles de cristalización. Si toda la oblea es de un solo cristal, se llama celda solar monocristalina. Si la oblea consta de granos de cristal, se denomina célula solar policristalina. Cualquiera puede ver los límites entre los granos de la célula solar. Aunque la eficiencia de las células solares monocristalinas es mayor que la de las células solares policristalinas, la producción de celdas policristalinas es más fácil y económica. (Tawheed, Ahammed, Sony, Hossain, & Shams-Ul-Islam, 2014)

- Silicio monocristalino
- Silicio policristalino

Segunda generación: La eficiencia de esta generación de tecnología es mucho menor en comparación a la primera generación, pero se beneficia tanto en costos de producción como estética visual. Debido al proceso de fabricación, son mucho más aplicables en ventanas, automóviles, integraciones de edificios, etc. Estas películas delgadas también se pueden cultivar en sustratos flexibles. Como ventaja de las células solares de película fina, pueden crecer en grandes áreas de hasta  $6 \text{ m}^2$ , para poder compensar la menor eficiencia de estas celdas (Tawheed, Ahammed, Sony, Hossain, & Shams-Ul-Islam, 2014).

Al utilizar menos materiales semiconductores, sus eficiencias son menores en comparación con las celdas de primera generación basadas en silicio. Hay principalmente tres tipos de celdas en esta generación, incluido el silicio amorfo, CdTe y CIS. Juntos, ocupan aproximadamente entre el 10 - 15% del mercado fotovoltaico total (Zhang, Wang, & Yang, 2018).

- Silicio amorfo (a-Si)



- Telururo de cadmio (CdTe)
- Diselenuro de cobre e indio (CIS)

Tabla 2: Resumen de la comparación de diferentes tecnologías de celdas solares

Criterios de comparación	Material de celda				
	Mono Si	Poli Si	a-Si	CdTe	CIS
Eficiencia del módulo	18% - 22%	14% - 18%	10% - 12%	9% - 11%	10% - 12%
Superficie requerida para 1 kWp	7 - 9 m <sup>2</sup>	8 - 9 m <sup>2</sup>	13 - 20 m <sup>2</sup>	11- 13 m <sup>2</sup>	9 - 11 m <sup>2</sup>
Costo promedio del módulo (*)	400 - 500 USD/m <sup>2</sup>		250 - 450 USD/m <sup>2</sup>		
Penetración del mercado	85% - 90% del mercado global		10% - 15% del mercado global		
Fabricación a partir de	Cristal de silicio	Fusión de cristales de silicio	Varias capas de semiconductores de silicio amorfo	Varias capas de semiconductores de telururo de cadmio	Varias capas de semiconductores de diselenuro de cobre e indio
Temperaturas óptimas de funcionamiento	Temperatura media	Temperatura media - alta	Temperatura alta		
Performance a baja luz	Baja		Media		
Coefficiente de temperatura	Alto		Bajo		
Aplicaciones	Comercial/ Residencial		Comercial/ Planta fotovoltaica		

Elaboración Propia

Criterios de comparación:

- Eficiencia del panel: mide la calidad de una celda solar, esto se define como el porcentaje de energía eléctrica producida a partir del total de la energía solar absorbida por el panel. Considerando que, a mayor porcentaje de absorción, más eficiente es la celda. Las celdas monocristalinas al ser de un solo cristal, permite una mayor absorción, teniendo una variación de su eficiencia entre 18 – 22%. Por otro lado, las celdas policristalinas al estar compuestas por granos de silicio, la eficiencia disminuye a 14 – 18%. En cuanto a las tecnologías de segunda generación, como están compuestas de materiales semi – conductores, su eficiencia disminuye considerablemente; sin

embargo, se utilizan varias capas para aumentar el porcentaje de absorción (Vidyanandan, 2017; Salvia, y otros, 2013)

- Superficie requerida para 1 kWp: este criterio está relacionado directamente a la eficiencia del panel, es decir, a una mayor eficiencia el área requerida para paneles de celdas monocristalinas va a ser mucho menor en comparación con tecnologías con menor eficiencia, por lo tanto, requerirán más área. El requerimiento de una mayor superficie se traslada a mayores costos en terrenos y una mayor cantidad de paneles para producir la misma cantidad de energía (Upadhyaya, 2016).
- Costo promedio del panel: si bien los costos de los diferentes tipos de paneles de tecnología varían por vatio, estas diferencias son menos significativas a nivel del sistema, que también toma en cuenta la eficiencia y las necesidades de uso de la tierra de la tecnología. Los costos totales del sistema son sensibles a las economías de escala y pueden variar sustancialmente según el tipo de aplicación (International Energy Agency, 2014).
- Penetración del mercado: se refiere al porcentaje de mercado global de paneles solares fotovoltaicos que abarca cada tipo de tecnología, siendo las más predominantes, las celdas mono y policristalinas. Especialmente, por su larga trayectoria y desarrollo desde 1970, han logrado abarcar estas dos tecnologías casi un 80 – 85% del mercado global de paneles solares fotovoltaicos (Vidyanandan, 2017). Su aplicación no es única, pueden ser utilizadas en postes de luz, satélites, o como sistemas portátiles para la alimentación de energía eléctrica en zonas afectadas por desastres naturales. Es decir, se adaptan al problema que se quiera solucionar.
- Fabricación a partir de: la fabricación de las tecnologías de primera generación son en base a silicio; el monocristalino, tal como lo indica su nombre, está compuesto por un solo cristal de silicio permitiendo así tener una mayor eficiencia, pero, sacrifica costos

y una fabricación más compleja. Por otro lado, la celda policristalina al ser compuesta por granos de silicio, su fabricación es más sencilla y a menor costo a diferencia del monocristalino, sacrificando eficiencia. Además, las tecnologías de películas delgadas hechas por distintos tipos de materiales semiconductores, cada uno de ellos tienen su propia complejidad dependiendo del material usado y las patentes que tengan las empresas para desarrollarlo, aún están en constante desarrollo y pruebas.

- Temperatura óptima de funcionamiento: este criterio indica cuál es la temperatura óptima de funcionamiento de un panel solar, son aspectos técnicos que varían con cada tipo de tecnología, y es importante tomarlo en cuenta cuando ya se sabe dónde estará localizada una planta solar o donde será la implementación de paneles solares.
- Performance a baja luz: en este criterio se relaciona más al performance de una celda solar a radiaciones más bajas, por ejemplo, en zonas más nubladas o que durante varios meses del año no haya mucha incidencia de luz. Mientras mayor sea el performance a baja luz, puede ser aprovechado en más zonas y aumenta su eficiencia en horas donde no haya demasiada luz en el ambiente.
- Coeficiente de temperatura: este criterio se refiere a la pérdida de eficiencia por cada °C de operación por encima de una temperatura base. Es decir, si la temperatura óptima de operación está en 25°C, y se toma como ejemplo el coeficiente de temperatura promedio de las celdas monocristalinas = 0.5 %/°C; por cada °C de operación por encima de una temperatura base, la celda va a perder 0.5% de eficiencia. Por lo tanto, tener un alto coeficiente no es lo óptimo ya que hay una mayor pérdida de eficiencia en regiones con temperaturas altamente variables.
- Aplicaciones: las aplicaciones de paneles solares fotovoltaicos son bastante amplias, desde un uso residencial para la generación de electricidad para consumo privado, uso comercial para la instalación en edificios eco amigables hasta el uso en plantas solares

con miles de paneles solares conectados para producir energía para cierta población en específico. Según (Sánchez, Martínez, de la Luz, Ortega, & Sánchez, 2017), para uso residencial, las celdas solares mono y policristalinas son las más adecuadas, ya que tienen mayor eficiencia utilizando una menor área; teniendo en cuenta que el área a utilizarse dentro de una aplicación doméstica es limitada, es importante aprovechar cada m<sup>2</sup>. Por otro lado, para plantas solares o donde el área no sea una limitante, es más recomendable utilizar paneles solares de silicio amorfo, telururo de cadmio o diselenuro de cobre e indio; a parte de su bajo costo en comparación a los paneles solares tradicionales, estos cuentan con un coeficiente de temperatura más bajo y su temperatura de funcionamiento es más alta, permitiendo su aplicación en terrenos más hostiles sin disminuir su capacidad de generar energía eléctrica. Por otro lado, son paneles más delgados, siendo también utilizados en edificios brindando estética visual; además de contribuir a la sostenibilidad de una edificación.

A continuación, se procede a asignar puntajes a cada uno de los criterios, la escala de puntos asignados será de 0 a 5 puntos; finalmente se procederá a evaluar la mejor alternativa tomando en cuenta el mejor puntaje acumulado que resulta de la sumatoria del producto del porcentaje de cada factor por su respectivo puntaje asignado.

Para determinar el porcentaje de importancia para cada criterio se realizó una ponderación de factores:

Tabla 3: Ponderación de factores: criterios de comparación de tecnologías de celda solar

Ponderación de factores	Eficiencia de la celda	Superficie requerida para 1 kWp	Costo promedio de la celda	Penetración del mercado	Fabricación a partir de	Temperatura óptima de funcionamiento	Performance con baja luz	Coefficiente de temperatura	Aplicaciones	Total	Porcentaje
<b>Eficiencia de la celda</b>		2	2	2	2	2	2	2	2	16	19%
<b>Superficie requerida para 1 kWp</b>	1		2	2	2	2	2	2	2	15	18%

Costo promedio de la celda	1	1		1	2	2	2	2	2	13	16%
Penetración del mercado	1	1	2		2	2	2	2	2	14	17%
Fabricación a partir de	1	1	2	1		2	2	2	2	13	16%
Temperatura óptima de funcionamiento	0	0	0	0	0		1	1	1	3	4%
Performance con baja luz	0	0	0	0	0	1		1	1	3	4%
Coeficiente de temperatura	0	0	0	0	0	1	1		1	3	4%
Aplicaciones	0	0	0	0	0	1	1	1		3	4%
										83	

Elaboración Propia

Los resultados obtenidos se ven reflejados en la siguiente tabla Tabla 4:

Tabla 4: Resultados obtenidos de la comparación de tecnologías de celda solar

Criterios de comparación	Porcentaje	Material de celda				
		Mono Si	Poli Si	a-Si	CdTe	CIS
Eficiencia de la celda	19%	5	4	3	2	3
Superficie requerida para 1 kWp	18%	5	4	1	2	3
Costo promedio de la celda	16%	4	4	5	5	5
Penetración del mercado	17%	5	5	4	4	4
Fabricación a partir de	16%	3	4	5	5	5
Temperaturas óptimas de funcionamiento	4%	5	5	5	5	5
Performance a baja luz	4%	4	4	5	5	5
Coeficiente de temperatura	4%	4	4	5	5	5
Aplicaciones	4%	5	5	4	4	4
<b>Puntaje ponderado</b>	<b>100%</b>	<b>41</b>	<b>40</b>	<b>38</b>	<b>38</b>	<b>40</b>

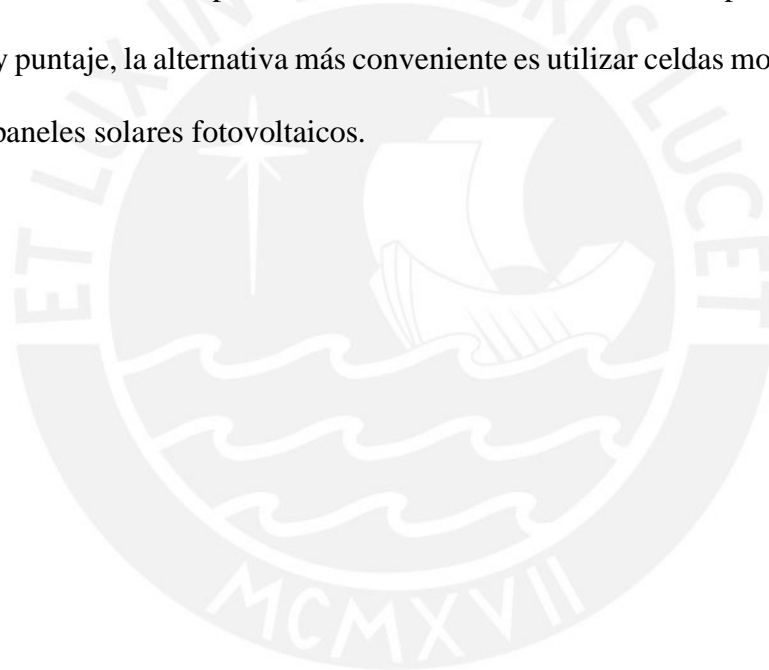
Elaboración Propia

En la Tabla 4, se puede observar que la tecnología de celdas monocristalinas es la más conveniente, no se podría descartar tampoco la utilización del resto para el ensamble de un panel solar. Considerando que las celdas mono y policristalinas representan casi el 80%-85% del mercado, la tecnología está lo suficientemente desarrollada para escoger cualquier de las dos, pero por temas de simplificar el proceso de elección, se ha tenido que escoger solo una. Cabe resaltar que, en las aplicaciones de tecnología solar fotovoltaica en nuestro país, los paneles solares monocristalinos son los más recurrentes en aplicaciones de Electrificación

Rural (Ministerio de Energía y Minas, 2018), brindando así acceso a servicios básicos de electricidad.

Además, el desarrollo de las tecnologías de segunda generación ha ido incrementando a lo largo de los últimos años, siendo los materiales de silicio amorfo, Telururo de cadmio y Diselenuro de cobre e indio, los principales materiales a ser desarrollados al nivel de los materiales de primera generación

Según los resultados obtenidos aplicando el método de factores ponderados se observa que, luego de evaluar los criterios que influyen en la decisión de la utilización de la mejor tecnología para el ensamble de paneles solares fotovoltaicos, como la ponderación de cada factor, criterios y puntaje, la alternativa más conveniente es utilizar celdas monocristalinas para el ensamble de paneles solares fotovoltaicos.



## CAPÍTULO 3. COMPONENTES Y MATERIALES PARA EL ENSAMBLE DE UN PANEL SOLAR

El principal desafío en todos los procesos de ensamblaje es lograr productos de calidad y que presenten uniones uniformes a partir de materiales de calidad para garantizar una fuerte adhesión y laminados estables (Wiesmeier, Haedrich, Weiss, & Duerr, 2012). De esta forma, se obtienen paneles solares más eficientes y permite disminuir su costo para aumentar la accesibilidad a más mercados.

A continuación, se mostrará las características y diseño final del panel solar fotovoltaico que se desea ensamblar:

Tabla 5: Características de un panel solar fotovoltaico de celdas monocristalinas

<b>Especificaciones</b>	
Modelo	RED165-36M
Potencia máxima (Pmax)	165W
Tensión de potencia máx. (Vmp)	18.92V
Tensión de corriente máx. (Imp)	8.72A
Tensión de circuito abierto (Voc)	22.71V
Corriente de cortocircuito (Isc)	9.85 A
Eficiencia de célula (%)	19.75%
Máxima tensión del sistema (V)	DC 1000V
Coef. De temp. Isc (%)/°C	0.037%/°C
Coef. De temp. Voc (%)/°C	-0.34%/°C
Coef. De temp. Pmax (%)/°C	-0.48%/°C
Temperatura nominal de funcionamiento de célula	45 +/- 2°C
Tolerancia	+/- 3%
N° de células	36
Tipo de conectores	MC4
Peso (kg)	12
Dimensiones (mm)	1482x680x35

Fuente: AutoSolar, 2020



Ilustración 9: Panel solar fotovoltaico terminado

Fuente: Amazon, 2020

Para el ensamble de un panel solar fotovoltaico es necesario tener en cuenta cuáles son los componentes y materiales requeridos para el proceso de ensamble final. Por lo tanto, se describirá cuál es la función de cada uno dentro del producto final y la cantidad requerida para una unidad, es decir, para un panel solar fotovoltaico.

En la Ilustración 10, se muestra un detalle desglosado de la lista de componentes para un panel solar fotovoltaico, cabe resaltar que se muestran solo los componentes directos que se necesita para el ensamblado de un panel solar. Los materiales indirectos se detallarán más adelante.

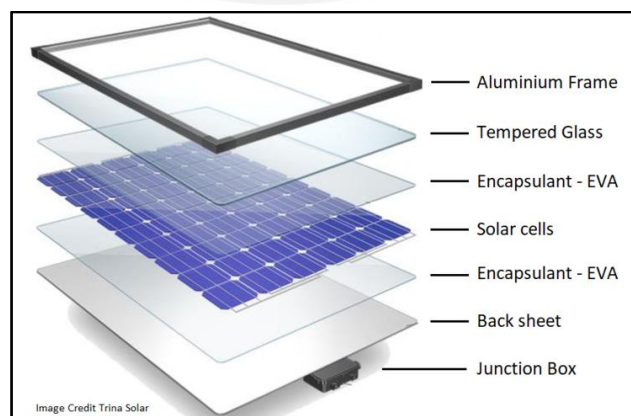


Ilustración 10: Componentes de un panel solar fotovoltaico

Fuente: Trina Solar



En la Ilustración 11, se muestra la Lista de Materiales desglosado indicando los subproductos requeridos hasta el producto final correspondiente al panel solar fotovoltaico terminado.

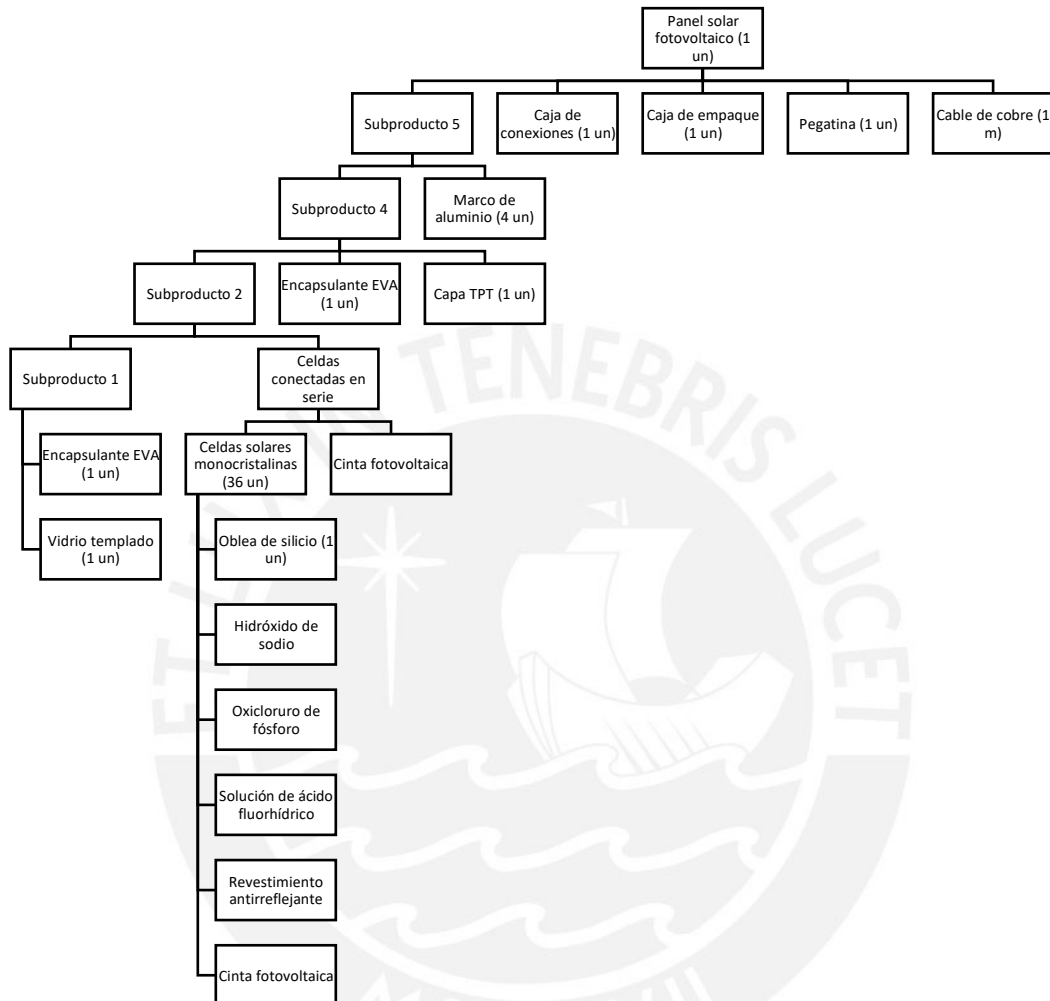


Ilustración 11: Lista de materiales para un panel solar  
Elaboración Propia

### 3.1. Componentes

- Vidrio templado: Este componente se encuentra ubicado en la parte frontal del panel solar fotovoltaico. Debe permitir una alta transmisión de las ondas de luz a través de este para no disminuir la eficiencia de la celda solar. Para celdas hechas a partir de silicio (mono y policristalino), el rango de las ondas de luz que debe permitir pasar debe estar en un rango entre 350 nm a 1200 nm (PV Education, 2020). Por otro lado, la reflexión del vidrio debe ser baja o nula en el mejor de los casos, para esto se pueden

utilizar láminas antirreflejos o texturizar la superficie haciéndola más áspera. Sin embargo, dadas estas características no tienen un efecto de auto limpieza; por lo tanto, dependiendo de su aplicación se deben programar días de limpieza de los paneles solares para evitar acumulación de polvo y otras partículas que afecten la eficiencia del panel.

Otras propiedades relevantes son la impermeabilidad, resistencia a impactos, baja resistividad térmica y estabilidad ante presencia prolongada de rayos UV. Las variantes más utilizadas son vidrio templado, polímeros y acrílicos (PV Education, 2020).

- Encapsulante: Es utilizado para adherir las celdas solares interconectadas con la superficie frontal y trasera del panel solar. Al igual que el vidrio templado, debe estar transparente, estable a altas temperaturas de operación y tiempos prolongados de exposición a rayos UV. El material encapsulante más utilizado comercialmente son las capas EVA<sup>9</sup> (Wiesmeier, Haedrich, Weiss, & Duerr, 2012), el cual viene en películas delgadas que se colocan entre la parte frontal y trasera de las celdas solares y luego calentadas a más de 150 °C para unir las capas. El proceso se detallará más adelante.
- Celdas solares monocristalinas: el número de celdas solares y su interconexión entre ellas son los componentes que más influyen en la eficiencia final del panel e impacta directamente en el precio final de este. Además, que afecta también en las dimensiones y el peso que tendrá finalmente el panel solar fotovoltaico. Como ya se revisó en el subcapítulo anterior, la tecnología escogida para el ensamblaje del panel son las celdas monocristalinas, las cuales a la fecha son las más eficientes y con mayor presencia en el mercado global fotovoltaico. Cada tecnología tiene un tipo de interconexión que permite maximizar la eficiencia de un conjunto de celdas conectadas entre sí; y, para el caso de las celdas monocristalinas, la conexión *Ribbon* (hilos), es la más utilizada

---

<sup>9</sup> Acetato de etilvinilo

actualmente. Esta interconexión consiste en soldar cinta fotovoltaica (conductora) entre celdas colocadas una al lado de la otra tal como se observa en la Ilustración 12.

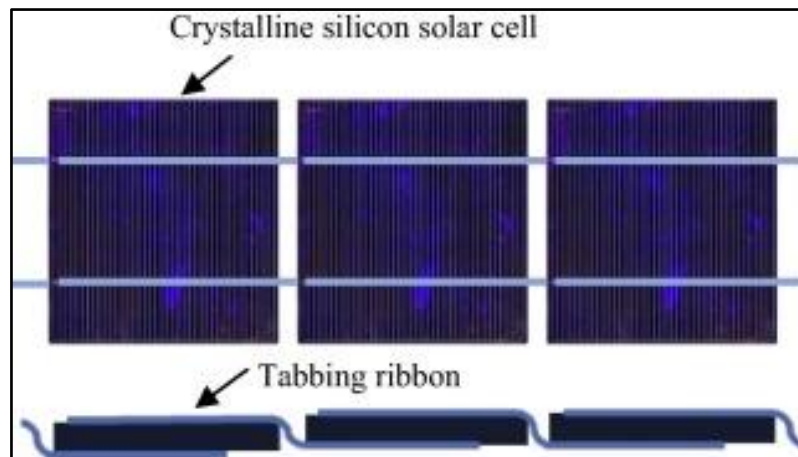


Ilustración 12: Interconexión Ribbon para celdas monocristalinas

Fuente: Zarmai et al., 2015

La interconexión es de vital importancia debido a que se quiere lograr que los paneles solares tengan una vida útil mayor a 20 años, y el componente que está provocando fallas durante el ciclo de vida son las deficientes interconexiones entre estas (Zarmai, Ekere, Oduoza, & Amalu, 2015). Por lo tanto, últimamente se propone una soldadura laser permitiendo así una mayor confiabilidad de las interconexiones frente a los métodos tradicionales de soldaduras.

- Capa trasera TPT (*PV Backsheet*): Es la capa trasera del panel solar fotovoltaico, y similar a los demás componentes, debe tener una baja resistencia térmica, ser impermeable y no dejar entrar a partículas de polvo. Existe una variante para paneles solares donde se permite el paso de la luz tanto por el frente como por la parte trasera del panel; estos son llamados paneles bifaciales, sin embargo, aún están en desarrollo y no serán tomados en cuenta en el desarrollo de la tesis (PV Education, 2020).
- Marco de aluminio: Es la estructura final que se coloca para sostener toda la estructura, generalmente está hecha de aluminio y permite reforzar y proteger todos los componentes internos, cabe resaltar que también debe ser impermeable al agua y evitar que se acumule polvo u otras partículas.

- Caja de conexiones: esta tiene un rol importante en el panel solar, son colocados como parte de la última operación en la parte trasera del panel ya armado; tiene diodos que mantienen el flujo de energía en una dirección y evitan que se retroalimente a los paneles. Un aspecto importante de este componente es su evolución a medida que aumenta la salida del panel, esos diodos tienen que poder manejar una mayor cantidad de calor generada por la potencia. De esta forma, hay variaciones de cajas de conexiones interruptores de bypass frío que permite mitigar este aumento de temperatura (Pickerel, 2017).
- Cinta fotovoltaica: Es la cinta que permite interconectar celdas monocristalinas en paralelo a través de diferentes métodos de soldadura láser o tradicional como se explicó en el punto anterior, generalmente están hechas a partir de plata (Pickerel, 2017).
- Cable de cobre o aluminio: Permite la unión de las celdas interconectadas con la caja de conexiones.
- Cajas de cartón (empaquetado): Son cajas que permiten empaquetar los paneles ya terminados.
- Pegatinas: Estas son colocadas una vez acabado el ensamblaje de los paneles, contiene información relevante y técnica acerca de las características de este mismo. Además, también puede incluir las pruebas de test realizados para hacer visible el control de calidad por el que pasan estos paneles.





Flexible Solar Panel	
	
Electrical Ratings	
Cell Brand	SunPower(USA)
Cell type	Monocrystalline
Peak power(Pmax)	100Wp
Power tolerance range(%)	±3%
Open circuit voltage / Voc(V)	20.8
Max.power voltage / Vmp(V)	17.6
Short circuit current / Isc(A)	6.14
Max.power current / Imp(A)	5.68
Maximum System Voltage(V)	1000V DC
Dimensions(mm)	1060×540×3
Above Specification at standard test conditions (STC):1000W/m <sup>2</sup> , cell temperature 25°C, AM1.5	
 17120161201100001	
 	

Ilustración 13: Ejemplo de pegatina de test de un panel solar

Fuente: SunTech Solar

### 3.2. Evaluación de Componentes Para Comprar y Fabricar

En este punto, se realizará un análisis para evaluar la compra o fabricación de los componentes para el ensamble de paneles solares. Dentro de este análisis se están considerando los componentes que más impactan en el producto final, es decir, queda descartado los componentes como: cinta fotovoltaica, cable de cobre, pegatinas y cajas de cartón. Para estos últimos la decisión será comprarlos porque no generan un impacto importante en el desempeño del panel solar fotovoltaico.

Es importante resaltar que China, Alemania y Estados Unidos son los países más importantes y que tienen fuerte presencia en el desarrollo de productos enfocados en energía solar. En la Tabla 6, se muestra un resumen de la evaluación de componentes para comprar o fabricar.

Tabla 6: Matriz de decisión de fabricar/comprar

Componente	Factores					Decisión
	Principales países fabricantes	¿Cuenta con patente?	Nivel de complejidad del proceso de fabricación	Calidad requerida	Integración de su fabricación con el resto de los procesos	
Vidrio templado	China, Alemania, India, Estados Unidos, Reino Unido	No	Bajo	Alta	Bajo	<b>Comprar</b>
Encapsulante	China, Estados Unidos, Japón, India, Alemania, Corea del Sur	No	Bajo	Alta	Bajo	<b>Comprar</b>
Celdas monocristalinas	China, Taiwán, Estados Unidos, India, Japón	Sí	Alto	Alta	Alto	<b>Fabricar</b>
Capa TPT	China, Alemania, Estados Unidos, Japón, Corea del Sur, India	No	Bajo	Alta	Bajo	<b>Comprar</b>
Marco de aluminio	China, India, Estados Unidos	No	Bajo	Alta	Bajo	<b>Comprar</b>
Junction box	China, India, Estados Unidos, Japón, Alemania, Taiwán	No	Medio	Alta	Bajo	<b>Comprar</b>

Elaboración propia

La importancia de las patentes es relevante debido a que varios procesos y tecnologías dentro de esta industria están protegidos por propiedad intelectual. Varias empresas en conjunto con laboratorios, e investigadores se encargan de desarrollar nuevas alternativas para hacer más eficientes los paneles solares. Además, considerando el nivel de complejidad del proceso, es necesario una especialización en ciertos componentes, en este caso, en las celdas solares monocristalinas porque es el componente más importante dentro de todo el ensamble. El resto

de los componentes no requieren un proceso tan especializado y, por lo tanto, se puede dejar en los proveedores su fabricación.

Continuando con el análisis, la calidad requerida para cada uno de los componentes debe ser alta, sin embargo, si se considera integrar la fabricación de los componentes con el resto del ensamble, no existe una alta integración. Posteriormente, se analizará cómo es que el proceso de fabricación de celdas monocristalinas puede acoplarse al resto de procesos de ensamble.

Componentes a fabricar: Al ser las celdas monocristalinas el único componente a fabricar dentro de la propuesta de diseño de planta, se detalla a continuación el proceso requerido para su fabricación.

- Celdas solares monocristalinas

El proceso de fabricación de celdas monocristalinas involucra procesos que han sido patentados, por lo tanto, se requiere un permiso especial para la fabricación de este tipo de tecnología. Sin embargo, se han realizado investigaciones para mejorar estos procesos tradicionales y hacer más eficientes las celdas monocristalinas; de este modo, se utilizará el método *Czochralski* para la fabricación de celdas solares monocristalinas. Además, el nivel de complejidad del proceso de fabricación es alto, al igual que la calidad requerida, ya que de esta depende la eficiencia final del panel solar. Por último, integrar tanto la fabricación de las celdas solares monocristalinas con el proceso de ensamblaje del panel solar permitiría disminuir las mermas, por lo tanto, reducir costos. Es así como se decide la fabricación de este componente, y agregarlo al proceso de ensamblaje final.

La lista de materiales de una celda solar monocristalina se muestra en la Ilustración 14, tal como se detalló anteriormente en la Ilustración 11:

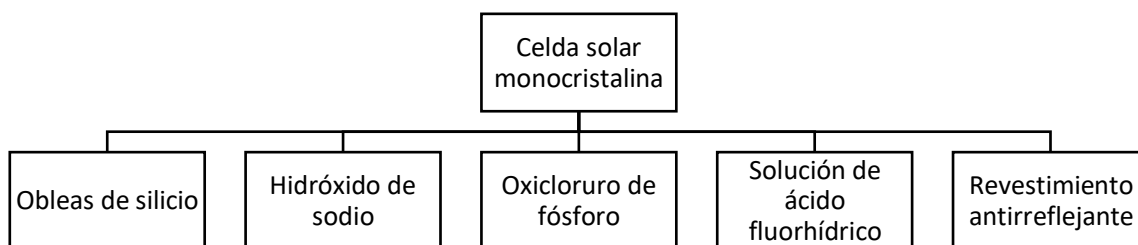


Ilustración 14: Lista de materiales para una celda solar monocristalina

Elaboración Propia

### 3.3. Selección de Proveedores

En este punto, se muestra un análisis para la selección de proveedores para cada uno de los componentes a comprar. Cabe resaltar que, en la Tabla 5 se especifican las características del panel solar fotovoltaico siendo sus medidas principales: 1482 mm de alto x 680 mm de ancho x 35 mm de profundidad. Siendo estas medidas necesarias al momento de evaluar el costo de cada material, factor importante a considerar al momento de seleccionar a un proveedor. El análisis económico se realizará en el CAPÍTULO 7, donde se detallará específicamente los costos de cada componente según el proveedor escogido en este punto.

A continuación, se muestra la ponderación de factores para cada uno de los criterios.

Tabla 7: Ponderación de factores: criterios de comparación de proveedores

Ponderación de factores	Costo	Pedido mínimo	Garantía	Certificación	Años de experiencia	Satisfacción del cliente	Número de líneas de producción	Lead Time	Total	Porcentaje
Costo		2	2	2	2	2	2	2	14	17%
Pedido mínimo	1		1	0	1	1	1	1	6	7%
Garantía	1	2		2	2	2	2	2	13	16%
Certificación	2	2	2		2	2	2	1	13	16%
Años de experiencia	1	2	1	1		2	1	1	9	11%
Satisfacción del cliente	1	2	2	2	1		2	2	12	15%
Número de líneas de producción	0	1	0	0	1	1		1	3	4%
Lead Time	1	2	2	1	1	2	2		11	14%
									81	

Elaboración Propia

- Vidrio templado



Tabla 8: Evaluación de proveedores para vidrio templado

Criterios	Proveedores		
	Qingdao Rocky Industry Co., Ltd.	Dongguan Taida Glass Co., Limited	Qingdao Hexad Glass Co., Ltd.
Costo	USD 2.00 - USD 6.00 por m2	USD 2.00 - USD 18.00 por m2	USD 8.60 - USD 16.80 por m2
Pedido mínimo	100 m2	50 m2	2500 m2
Garantía	1 año	N/A	N/A
Certificación	SGS Group	SGS Group	ISO 9001
Años de experiencia	16	9	11
Satisfacción del cliente	5	5	N/A
Número de líneas de producción	6	Más de 10	N/A
Lead Time	N/A	Más de 15 días	Más de 2 semanas

Elaboración Propia

Tabla 9: Resultado de proveedor más ideal para vidrio templado

País de fabricante		Proveedores		
		China	China	China
Criterios	Porcentaje	Qingdao Rocky Industry Co., Ltd.	Dongguan Taida Glass Co., Limited	Qingdao Hexad Glass Co., Ltd.
Costo	17%	3	2	1
Pedido mínimo	7%	2	3	1
Garantía	16%	3	1	1
Certificación	16%	3	3	3
Años de experiencia	11%	3	1	2
Satisfacción del cliente	15%	3	3	1
Número de líneas de producción	4%	2	3	1
Lead time	14%	1	3	2
<b>Puntaje ponderado</b>	100%	<b>2.62</b>	2.28	1.57

Elaboración Propia

Finalmente, se elige a la empresa Qindao Rocky Industry Co. como proveedor de vidrio templado.

- Encapsulante EVA

Tabla 10: Evaluación de proveedores para encapsulante EVA

Criterios	Proveedores			
	Fangding Technology Co., Ltd.	Shenzhen Xiangxinrui Solar Energy Co., Ltd.	Wuxi Ideal New Energy Co., Ltd.	Hainan Zhongxin Chemical Co., Ltd.
Costo	USD 1.40 - USD 7.50 por m2	USD 1.20 - 5.00 por m2	USD 0.15 - USD 0.40 por m2	USD 1.00 - USD 1.30 por m2
Pedido mínimo	1 m2	20 m2	10 m2	1000 m2

Garantía	1 año	N/A	2 años	N/A
Certificación	ISO 9001	Ninguna	TUV	ISO 9001
Años de experiencia	17	2	10	25
Satisfacción del cliente	N/A	4.8	4.9	4.8
Número de líneas de producción	3	4	10	6
Lead Time	7 días	Más de 2 días	7 días	15 días

Elaboración Propia

Tabla 11: Resultado de proveedor más ideal para encapsulante EVA

País de fabricante		Proveedores			
		China	China	China	China
Criterios	Porcentaje	Fangding Technology Co., Ltd.	Shenzhen Xiangxinrui Solar Energy Co., Ltd.	Wuxi Ideal New Energy Co., Ltd.	Hainan Zhongxin Chemical Co., Ltd.
Costo	17%	3	3	4	3
Pedido mínimo	7%	4	2	3	1
Garantía	16%	3	1	4	1
Certificación	16%	4	1	4	4
Años de experiencia	11%	3	1	2	4
Satisfacción del cliente	15%	1	3	4	3
Número de líneas de producción	4%	1	2	4	3
Lead time	14%	3	2	3	4
<b>Puntaje ponderado</b>	<b>100%</b>	<b>2.86</b>	<b>1.89</b>	<b>3.57</b>	<b>2.94</b>

Elaboración Propia

Finalmente, se elige a la empresa Wuxi Ideal New Energy Co. como proveedor de encapsulante EVA.

- Capa trasera TPT

Tabla 12: Evaluación de proveedores para capa trasera TPT

Criterios	Proveedores		
	Xiamen Mars Rock Science Technology Co., Ltd.	Wuxi Ideal New Energy Co., Ltd.	Hangzhou JOBO Logistics Supply Chain Co., Ltd
Costo	USD 5.00 - USD 13.00 por m2	USD 1.50 - USD 4.00 por m2	USD 3.00 - USD 7.00 por m2
Pedido mínimo	10 m2	1 m2	1 m2
Garantía	N/a	2 años	N/A
Certificación	N/A	TUV	N/A
Años de experiencia	14	10	15 años
Satisfacción del cliente	5	4.9	N/A
Número de líneas de producción	N/A	10	N/A
Lead Time	7 días	7 días	Más de 10 días

Elaboración Propia

Tabla 13: Resultado de proveedor más ideal para capa trasera TPT

País de fabricante		Proveedores		
		China	China	China
Criterios	Porcentaje	Xiamen Mars Rock Science Technology Co., Ltd.	Wuxi Ideal New Energy Co., Ltd.	Hangzhou JOBO Logistics Supply Chain Co., Ltd
Costo	17%	1	3	2
Pedido mínimo	7%	2	3	3
Garantía	16%	1	3	1
Certificación	16%	1	3	1
Años de experiencia	11%	2	1	3
Satisfacción del cliente	15%	3	2	1
Número de líneas de producción	4%	1	3	1
Lead time	14%	3	3	2
<b>Puntaje ponderado</b>	<b>100%</b>	<b>1.75</b>	<b>2.63</b>	<b>1.68</b>

Elaboración Propia

Finalmente, se elige a la empresa Wuxi Ideal New Energy Co. como proveedor de capa trasera TPT.

- Marco de aluminio

Tabla 14: Evaluación de proveedores para marco de aluminio

Criterios	Proveedores		
	Fujian Fenan Aluminium Co., Ltd.	Anhui Shengxin Aluminium Corporation Limited	Henan Huayang Aluminum Industry Co., Ltd.
Costo	USD 2.00 - USD 2.80 por kg	USD 2.80 - USD 2.86 por kg	USD 2.25 - USD 2.42 por kg
Pedido mínimo	500 kg	1000 kg	1 kg
Garantía	3 a 5 años	N/A	5 años
Certificación	ISO 9001	ISO/TS 16949:2009	ISO 9001
Años de experiencia	23	17	4
Satisfacción del cliente	5	5	4.9
Número de líneas de producción	N/A	Más de 10	2
Lead Time	Más de 15 días	Más de 10 días	Más de 15 días

Elaboración Propia

Tabla 15: Resultado de proveedor más ideal para marco de aluminio

País de fabricante		Proveedores		
		China	China	China
Criterios	Porcentaje	Fujian Fenan Aluminium Co., Ltd.	Anhui Shengxin Aluminium Corporation Limited	Henan Huayang Aluminium Industry Co., Ltd.
		Costo	17%	2
Pedido mínimo	7%	2	1	3
Garantía	16%	2	1	3
Certificación	16%	3	3	3
Años de experiencia	11%	3	2	1
Satisfacción del cliente	15%	3	3	2
Número de líneas de producción	4%	1	3	2
Lead time	14%	2	3	2
<b>Puntaje ponderado</b>	<b>100%</b>	<b>2.38</b>	<b>2.25</b>	<b>2.46</b>

Elaboración Propia

Finalmente, se elige a la empresa Henan Huayang Aluminum Industry Co. como proveedor de marco de aluminio.

- Caja de conexiones

Tabla 16: Evaluación de proveedores para caja de conexiones

Criterios	Proveedores		
	Wuxi Ideal New Energy Co., Ltd.	Dongguan Engineer Technology Co., Ltd.	Nantong Reoo Technology Co., Ltd.
Costo	USD 4.68 - USD 4.98 por unidad	USD 1.79 - USD 2.20 por unidad	USD 2.60 - USD 3.60 por unidad
Pedido mínimo	1 unidad	10 unidades	10 unidades
Garantía	2 años	N/A	N/A
Certificación	TUV	N/A	TUV
Años de experiencia	10	2	15
Satisfacción del cliente	4.9	4.9	4.9
Número de líneas de producción	10	N/A	10

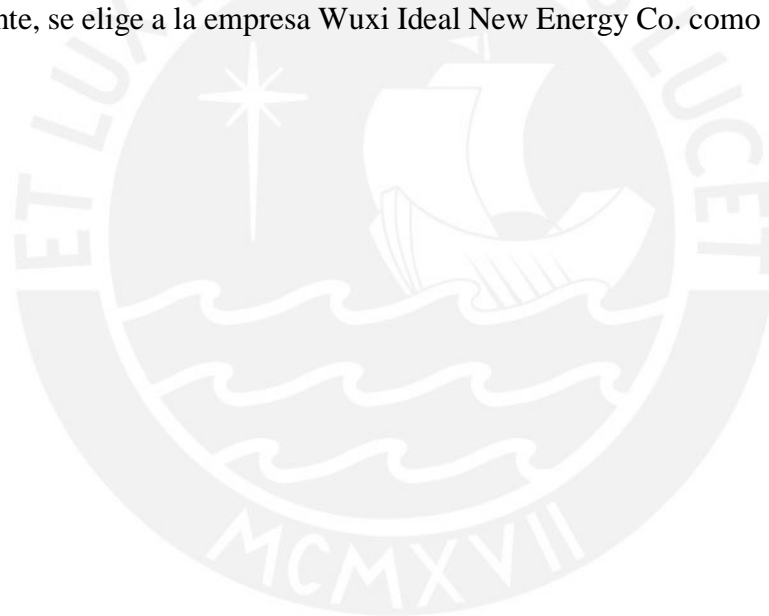
Elaboración Propia

Tabla 17: Resultado de proveedor más ideal para caja de conexiones

País de fabricante		Proveedores		
		China	China	China
Criterios	Porcentaje	Wuxi Ideal New Energy Co., Ltd.	Dongguan Engineer Technology Co., Ltd.	Nantong Reoo Technology Co., Ltd.
		Costo	17%	1
Pedido mínimo	7%	3	1	1
Garantía	16%	3	1	1
Certificación	16%	3	1	3
Años de experiencia	11%	2	1	3
Satisfacción del cliente	15%	3	3	3
Número de líneas de producción	4%	3	1	3
Lead time	14%	3	2	3
<b>Puntaje ponderado</b>	100%	2.54	1.60	2.53

Elaboración Propia

Finalmente, se elige a la empresa Wuxi Ideal New Energy Co. como proveedor de caja de conexiones.



## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE PROCESOS PARA EL ENSAMBLE DE UN PANEL SOLAR

Una vez analizado los proveedores para el suministro de componentes, se procede a mapear las operaciones necesarias en el proceso de ensamble de paneles solares fotovoltaicos. Como se analizó en los puntos anteriores, el único componente a fabricar son las celdas solares monocristalinas. Estas se fabricarán a partir de obleas de silicio monocristalino y serán el input principal para las operaciones siguientes.

### 4.1. Operaciones en el Proceso de Ensamble de Paneles Solares

En primer lugar, la Ilustración 15 muestra la diagramación en bloque de los procesos principales para la fabricación de celdas solares monocristalinas.

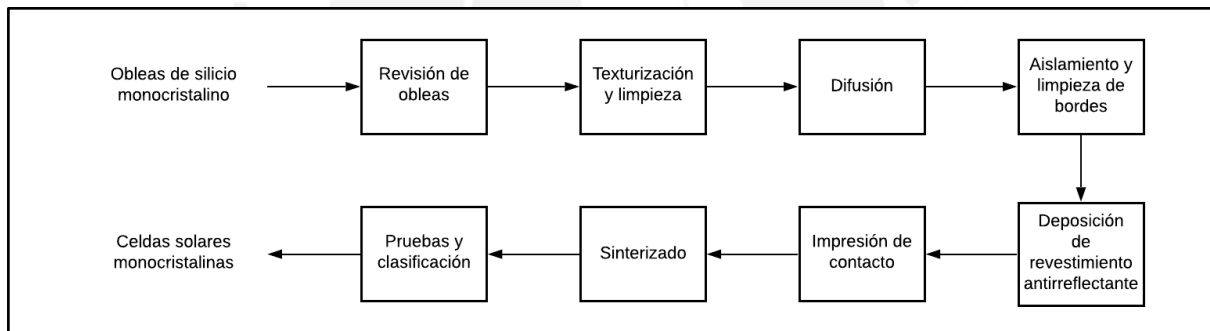


Ilustración 15: Diagrama de bloques de la fabricación de celdas solares monocristalinas

Elaboración Propia

Una vez culminado el proceso de fabricación de celdas solares, empalma con el proceso de ensamble de paneles solares. De esta forma, el proceso anterior entrega el input para el proceso de ensamble que comienza a partir de la interconexión de celdas. El diagrama de bloques del ensamble se muestra en la Ilustración 16.

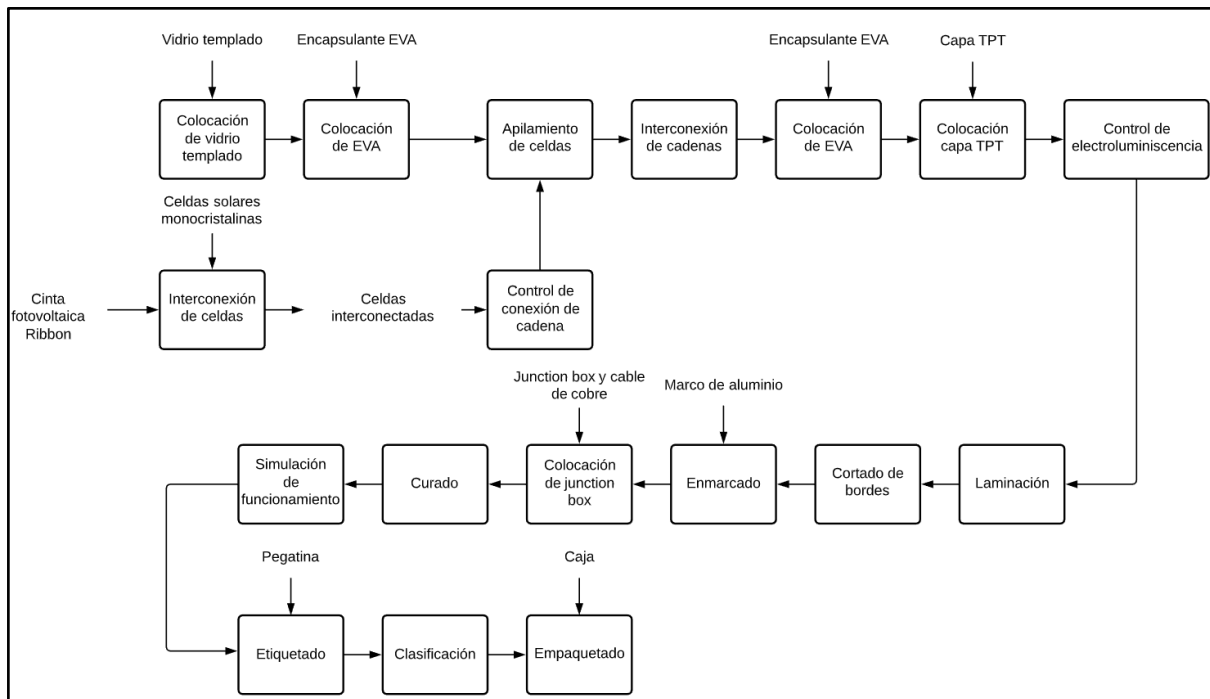


Ilustración 16: Diagrama de bloques del ensamblaje de paneles solares

Elaboración Propia

A continuación, en la Ilustración 17 e Ilustración 18 se muestra el Diagrama de Operaciones para la fabricación de celdas solares y Diagrama de Operaciones para el ensamble de paneles solares fotovoltaicos. El input principal para el primer DOP son las obleas de silicio monocristalino, la cual es comprada a través de un proveedor; finalmente, el output de este proceso son las celdas de silicio monocristalino. Para el segundo DOP, toma como input las celdas solares, y pasa por cada una de las operaciones mientras se ensambla con los otros componentes para finalmente obtener el panel solar fotovoltaico terminado. De esta forma, de todas las operaciones que se tienen dentro del proceso, son un total de 22 operaciones, 4 revisiones y 2 operaciones combinadas.

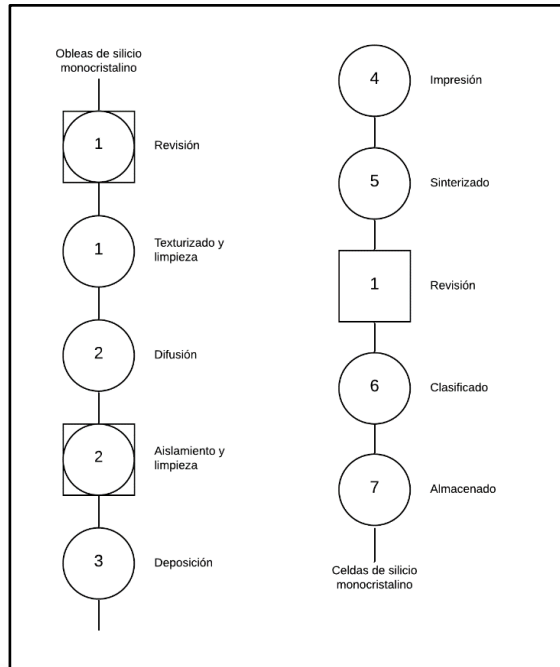


Ilustración 17: DOP para la fabricación de celdas solares monocristalinas

Elaboración Propia

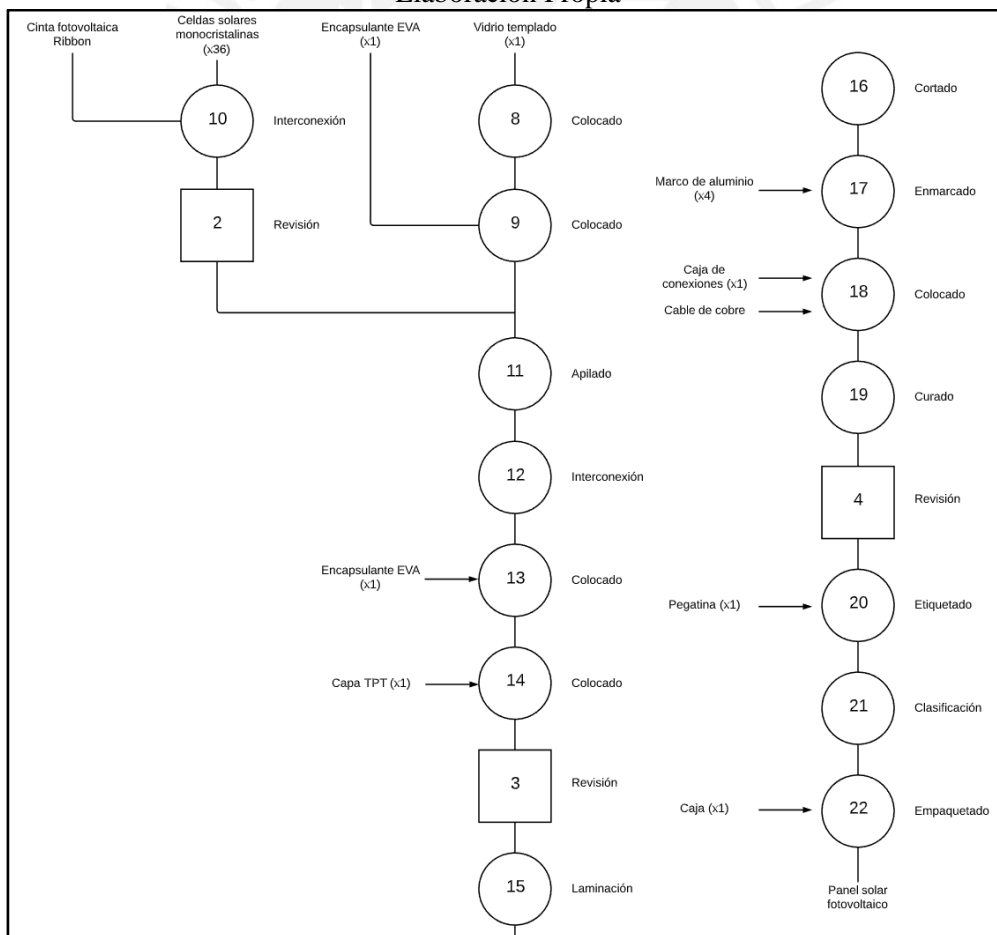
















Ilustración 18: DOP para el ensamble de paneles solares

Elaboración Propia



## 4.2. Análisis de Máquinas y Equipos por Operación

Índice	Proceso	Máquina/Personal	Descripción	Dimensiones de la máquina/línea
1		Línea de producción de celdas solares monocristalinas	Proceso: Revisión de obleas Descripción del proceso: Es el proceso de medición de parámetros técnicos de la oblea.	20000 x 50000 x 4000 mm
2			Proceso: Texturizado y limpieza Descripción del proceso: Se utiliza una corrosión anisotrópica para mejorar la absorción de la luz en la superficie.	
3			Proceso: Difusión Descripción del proceso: se utiliza para la fabricación de uniones PN de células solares	
4			Proceso: Aislamiento y limpieza Descripción del proceso: e sumergen en una solución de ácido fluorhídrico, con el fin de eliminar una capa de vidrio de silicio de fósforo formado en la superficie de las obleas de silicio después de la difusión.	
5			Proceso: Deposición Descripción del proceso: Deposición de la capa antirreflejante de nitruro de silicio.	
6			Proceso: Impresión de contacto Descripción del proceso: Formación de electrodos en la celda para exportar la corriente generada.	
7			Proceso: Sinterizado Descripción del proceso: Mejora la tensión del	

			circuito abierto de la celda	
8			Proceso: Revisión Descripción del proceso: se prueban bajo condiciones de luz solar simuladas	
9			Proceso: Clasificación de celdas Descripción del proceso: clasificación de las celdas según su rendimiento.	
10			Proceso: Almacenamiento de celdas Descripción del proceso: Almacenamiento temporal para pasar a la siguiente etapa del ensamble.	
11		<i>Glass Loading Machine</i>	Proceso: Colocación de vidrio templado Descripción del proceso: Se realiza la carga del vidrio templado desde el almacén de y lo introduce a la línea de ensamble.	4000 x 4000 x 3500 mm
12		<i>EVA Loading Machine</i>	Proceso: Colocación de encapsulante EVA Descripción del proceso: Encima del vidrio templado, se coloca el encapsulante EVA.	2000 x 3000 x 2000 mm
13		<i>Tabber &amp; Stringer</i>	Proceso: Interconexión de celdas Descripción del proceso: Esta máquina permite interconectar las celdas con cinta fotovoltaica <i>Ribbon</i> de acuerdo con las características del panel solar.	6500 x 3200 x 2100 m
14		<i>Lay-up Machine</i>	Proceso: Revisión de la interconexión Descripción del proceso: Es una revisión antes de apilar las celdas encima del encapsulante para verificar una correcta interconexión en cada	4000 x 4000 x 4000 mm

			uno de los extremos de la cadena.	
15	11	<i>Lay-up Machine</i>	Proceso: Apilado de celdas sobre el encapsulante Descripción del proceso: Cada cadena de celdas interconectadas se coloca encima del encapsulante. Estas se colocan boca abajo.	4000 x 4000 x 4000 mm
16	12	<i>Interconnection machine</i>	Proceso: Interconexión de cadenas Descripción del proceso: Se realiza la interconexión de las cadenas con cinta fotovoltaica Ribbon	3000 x 3200 x 2000 mm
17	13	<i>EVA Loading Machine</i>	Proceso: Colocación de encapsulante EVA Descripción del proceso: Se vuelve a colocar una segunda capa de encapsulante EVA, protegiendo la parte trasera de las celdas.	2000 x 3000 x 2000 mm
18	14	<i>TPT Loading</i>	Proceso: Colocación de capa TPT Descripción del proceso: Una última capa trasera se coloca encima del encapsulante.	2000 x 3000 x 2000 mm
19	3	<i>Electroluminescence Machine</i>	Proceso: Control de electroluminiscencia Descripción del proceso: Se realiza un primer testeo y control de electroluminiscencia realizado por un operario.	6000 x 2500 x 2500 mm
20	15	Laminadora solar	Proceso: Laminación Descripción del proceso: Se realiza la laminación de todo el panel, de esta manera se asegura el encapsulamiento a través de la temperatura y presión ejercida sobre el panel solar.	9000 x 3000 x 2350 mm
21	16	<i>Edge Trimming Machine</i>	Proceso: Cortado de bordes	2030 x 1370 x 910 mm

			Descripción del proceso: Se cortan los bordes sobrantes del panel solar fotovoltaico.	
22	17	Enmarcadora	Proceso: Enmarcado Descripción del proceso: Se realiza el enmarcado del panel solar con marcos de aluminio.	2700 x 1700 x 1000 mm.
23	18	<i>Solar Junction Box Sealing Machine</i>	Proceso: Colocación de caja de conexiones Descripción del proceso: Se sella e interconecta el polo positivo y negativo en la caja de interconexiones.	1100 x 550 x 1200 mm
24	19	<i>Curing Line Machine</i>	Proceso: Curado Descripción del proceso: Dentro de este proceso reposa el panel hasta que queda curado la resina sintética.	10000 x 1000 x 350 mm
25	4	<i>Cell Tester &amp; Sorter Machine</i>	Proceso: Simulación de funcionamiento Descripción del proceso: Dentro de esta máquina se realizan test de simulación solar a través de flashes para testear su rendimiento.	5050 x 2500 x 3200 mm
26	20	<i>Cell Labelled &amp; Sorter</i>	Proceso: Etiquetado Descripción del proceso: Se etiquetan los paneles con los resultados obtenidos en los controles de calidad.	5050 x 2500 x 3200 mm
27	21		Proceso: Clasificación Descripción del proceso: Se clasifican los paneles de acuerdo con sus rendimientos.	
28	22	<i>Solar Panel Packing Machine</i>	Proceso: Empaquetado Descripción del proceso: Se empaquetan los paneles dependiendo de las cantidades que solicite el cliente.	2380 x 1800 x 1780 + 5000 x 1850 x 1850 mm

### 4.3. Diagrama Relacional de Actividades

Debido a la gran cantidad de actividades que se tiene, se decide agrupar las actividades que pertenecen a una misma máquina o proceso para poder optimizar el análisis de la relación entre actividades, quedando las siguientes:

1. Fabricación de celdas solares monocristalinas: índice 1-10
2. Interconexión y revisión: índice 13
3. Colocación de EVA y TPT: índice 11-12
4. Apilado e interconexión de cadenas de celdas: índice 14-18
5. Revisión de electroluminiscencia: índice 19
6. Laminación: índice 20
7. Cortado y enmarcado: índice 21-22
8. Colocación de caja de conexiones: índice 23
9. Curado de paneles solares: índice 24
10. Revisión de simulación solar: índice 25
11. Etiquetado y clasificación: índice 26-27
12. Empaquetado: índice 28

Continuando con la metodología, se obtiene en la Tabla 18 el siguiente TRA de letras a partir del análisis realizado y la relación entre cada una de estas actividades:

Tabla 18: Tabla Relacional de Actividades - Cualitativa

1.Fabricación de celdas solares	A													
2.Interconexión y revisión	E	E												
3.Colocación de EVA y TPT	A	I	U											
4.Apilado e interconexión de cadenas de celdas	E	A	U	U										
5.Revisión de electroluminiscencia	A	E	U	U	U	U								
6.Laminación	E	U	U	U	U	U	U	U	U					
7.Cortado y enmarcado	I	I	U	U	O	U	U	U	U	U				
8.Colocación de junction box	I	U	U	O	U	U	U	U	U	U				
9.Curado de paneles solares	E	O	U	U	U	U								
10.Revisión de simulación solar	E	I	O	U										
11.Etiquetado y clasificación	E	O												
12. Empaquetado	I													

Elaboración Propia

Donde:

- A : Absolutamente necesario
- E : Especialmente necesario
- I : Importante
- O : Ordinario
- U : Innecesario

Una vez obtenido el TRA de letras, se procede a plasmar en un Diagrama Relacional de Actividades, mostrándose el resultado en la Ilustración 19:

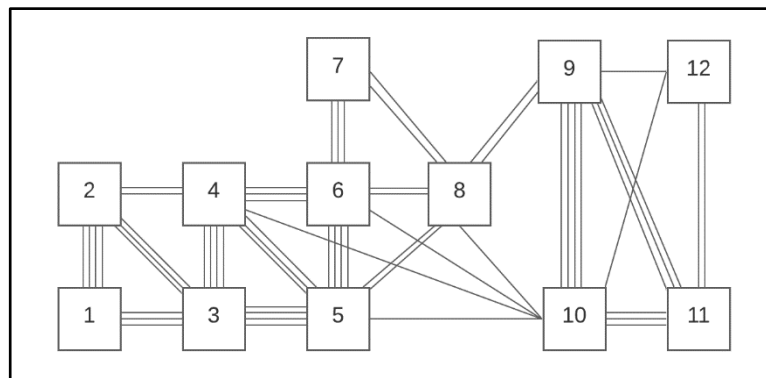


Ilustración 19: Diagrama Relacional de Actividades

Elaboración Propia

Utilizando el método de Francis para obtener el Layout de Bloques Unitarios (LBU), se obtiene la Ilustración 20:

11	10	5	3	2
12	9	6	4	1
	8	7		

Ilustración 20: Layout de Bloques Unitarios

Elaboración Propia



## CAPÍTULO 5. DISEÑO DE PLANTA

A continuación, se busca proponer un diseño de la planta de ensamblaje de paneles solares fotovoltaicos. Basando principalmente en el *Layout* de Bloques Unitarios diagramado en el punto anterior, y las necesidades de espacio por máquina que se detallaron en el listado de máquinas y equipos por operación.

### 5.1. Elección de Tipo de Distribución de Planta

Para empezar, se evaluará cuál es la distribución de planta ideal para el ensamblaje de paneles solares fotovoltaicos, teniendo en cuenta las 4 principales distribuciones: posición fija, por proceso, por producto y modular.

En la Tabla 19 se muestra la matriz de ponderación de factores para cada criterio:

Tabla 19: Ponderación de factores: criterios de comparación de distribución de planta

Ponderación de factores	Tipo de producto	Flujo de trabajo	Mano de obra	Manejo de materiales	Volumen de producción	Total	Porcentaje
Tipo de producto		2	2	2	1	7	35%
Flujo de trabajo	0		2	1	2	5	25%
Mano de obra	0	0		1	0	1	5%
Manejo de materiales	0	1	1		1	3	15%
Volumen de producción	1	0	2	1		4	20%
						20	

Elaboración propia

De esta forma, en la Tabla 20 se muestra los resultados obtenidos de la comparación

Tabla 20: Comparación de distribuciones de planta

Criterios de comparación	Posición fija	Por proceso	Por producto	Modular
Tipo de producto	A pedido	Diversificado	Estandarizado	Diversificado
Flujo de trabajo	Estación fija	Variable	Continua	Continua
Mano de obra	Alta flexibilidad	Calificada	Especializada	Especializada
Manejo de materiales	Escaso	Con esperas	Sistematizado	Con esperas
Volumen de producción	Poco	Medio	Alto	Medio
Uso de espacio	Dependiente	Ineficiente	Eficiente	Eficiente

Elaboración propia



Tabla 21: Resultados obtenidos de la comparación de distribución de planta

Criterios de comparación	Porcentaje	Posición fija	Por proceso	Por producto	Modular
Tipo de producto	30%	0	1	2	1
Flujo de trabajo	20%	0	1	2	2
Mano de obra	7%	1	1	2	2
Manejo de materiales	10%	1	1	2	2
Volumen de producción	13%	0	2	1	2
Uso de espacio	20%	0	1	2	2
Puntaje ponderado	100%	0.17	1.13	<b>1.87</b>	1.70

Elaboración propia

El tipo de distribución de planta ideal para este tipo de instalaciones es una distribución por producto. Para un panel solar fotovoltaico, es importante tener cuidado con la manipulación de los componentes, ya que un desperfecto en cualquiera de ellos afecta directamente en el performance de este. Por lo tanto, la distribución por producto favorece la mínima manipulación del producto final utilizando fajas transportadoras que traslada el panel solar a lo largo de las operaciones. Además, un factor importante dentro de la fabricación y ensamble de este producto es la automatización de las operaciones, reduciendo así procesos manuales. Aunque, eso no quita el uso de una mano de obra especializada para la manipulación de máquinas y el análisis de resultados de las operaciones de simulaciones solares, ya que los paneles solares requieren pasar por un control de calidad exhaustivo.

## 5.2. Requerimientos de espacio

Para determinar el espacio necesario de la planta para el ensamblaje de paneles solares, se debe calcular cuál debe ser la producción requerida para satisfacer las necesidades de los clientes. Tal como se mencionó en el CAPÍTULO 3, las especificaciones relevantes para calcular los requerimientos de espacio son:

- Potencia máxima = 165W
- Número de celdas por panel = 36 celdas
- Dimensiones = 1482 mm de alto x 680mm de ancho x 35 mm de profundidad

La presente investigación no tiene como objetivo calcular un pronóstico de demanda para poder calcular la demanda, por el contrario, se utilizará un porcentaje de participación de mercado fijo para calcular el consumo estimado de energía. Como menciona (Barandiarán-Gómez, 2017), no existe en el Perú un alto grado de rivalidad entre proveedores de paneles solares fotovoltaicos, siendo estos comercializadores, mas no fabricantes de paneles solares fotovoltaicos.

De esta forma, en la presente tesis se utilizará la data de Senamhi para determinar las ciudades con mayor índice de radiación UV.

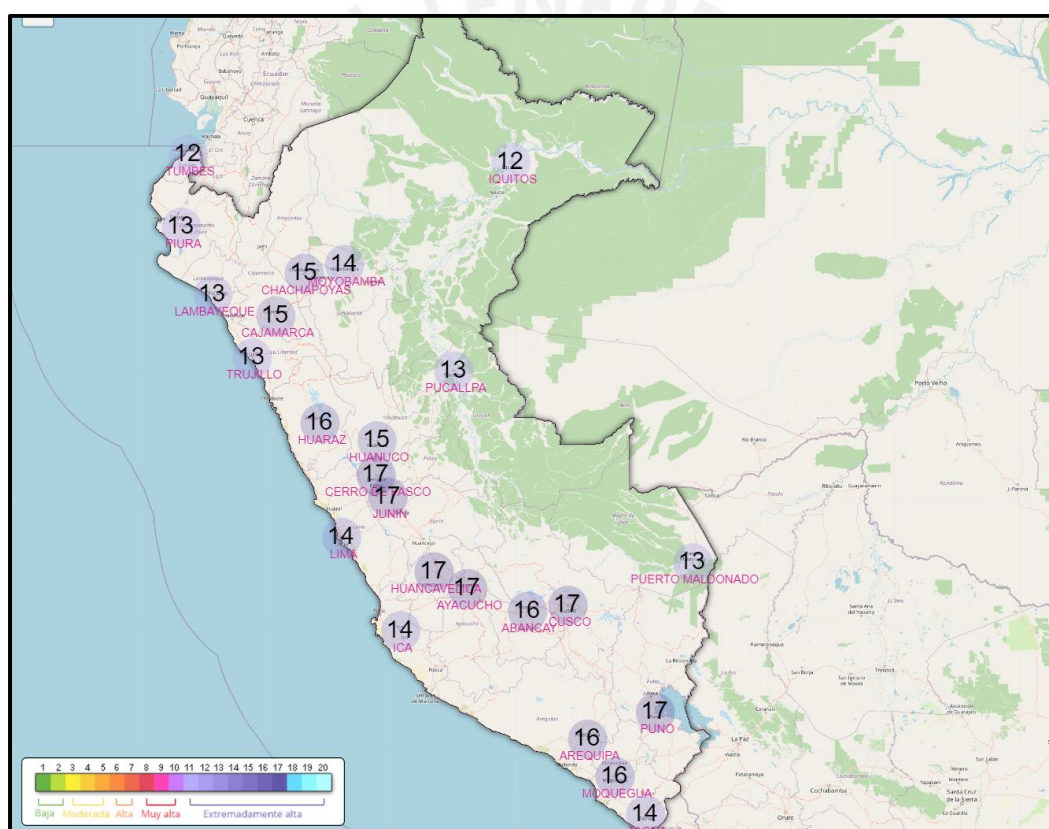


Ilustración 21: Índice regional de radiación UV en el Perú

Fuente: Senamhi, 2020

Como se puede observar en la Ilustración 21, las ciudades con mayor índice de radiación UV en el Perú se ubican en la zona central del país, específicamente las ciudades de Cerro de Pasco, Junín, Huancavelica, Ayacucho, Cusco y Puno; son aquellas que tienen el índice de radiación UV más alto.

Según Enel Perú (2018), muestra que la Central Solar Fotovoltaica Rubí, ubicada en el desierto de Moquegua, genera 440 GWh anuales, las cuales equivalen al consumo de energía eléctrica de 350,000 hogares en la Región Sur del país. Obteniendo así una proporción de abastecimiento de 800 hogares por 1 GWh de energía eléctrica.

Tomando en consideración esta información, antes de pasar al dimensionamiento se necesita un nivel de producción. Este nivel de producción para una planta de ensamblaje de este tipo (paneles solares fotovoltaicos) está dado principalmente por los requerimientos de proyectos de plantas solares. Considerando esto, la planta de ensamblaje estará destinada a cubrir un nivel de producción que permita satisfacer la demanda eléctrica de aproximadamente 1500 familias lo cual equivaldría a una producción de energía eléctrica de 0.46795 GWh en un periodo de 5 años. Obteniendo así, el siguiente cálculo:

a) Cálculo de consumo estimado

$$\begin{aligned} \text{Energía necesaria (MWh por año)} &= \frac{0.46795 \text{ GWh}}{5 \text{ años}} * \frac{10^3 \text{ MWh}}{1 \text{ GWh}} \\ &= 93.59 \text{ MWh por año} \end{aligned}$$

$$\text{Energía necesaria (Wh por año)} = 93.59 \text{ MWh} * \frac{10^6 \text{ Wh}}{1 \text{ MWh}} = 93,589,041 \text{ Wh por año}$$

b) Radiación solar disponible

Tabla 22: Irradiancia solar en las principales ciudades del sur del Perú en 2015

Mes	Principales regiones				Promedio mensual (kWh/m <sup>2</sup> /mes)	Promedio diario (kWh/m <sup>2</sup> /mes)
	Arequipa	Ayacucho	Puno	Cusco		
Enero	219.46	161.57	231.67	197.09	202.45	6.53
Febrero	166.83	152.95	222.20	198.17	185.04	6.61
Marzo	208.18	165.14	238.89	225.75	209.49	6.76
Abril	208.10	133.18	193.42	194.04	182.19	6.07
Mayo	217.08	181.86	194.81	219.09	203.21	6.56
Junio	204.20	192.03	186.82	220.94	201.00	6.70
Julio	218.82	220.92	197.63	226.42	215.95	6.97

Agosto	228.57	203.68	221.17	240.88	223.58	7.21
Septiembre	235.07	194.27	228.32	236.00	223.42	7.45
Octubre	245.13	192.60	222.54	235.52	223.95	7.22
Noviembre	224.08	185.99	211.50	217.88	209.86	7.00
Diciembre	229.80	169.91	208.35	212.09	205.04	6.61

Fuente: *Photovoltaic Geographical Information System*

El mes más desfavorable de radiación es el mes de abril con 6.07 kWh·m<sup>2</sup>/día. De forma que se calculará la cantidad de paneles necesarios para las condiciones mensuales más desfavorables de insolación, y así es seguro que se cubrirá la demanda durante todo el año.

Una vez conocida la radiación solar incidente, se divide entre la radiación solar incidente que se utiliza para calibrar los paneles. (1 kW/m<sup>2</sup>), y se obtiene la cantidad de horas sol pico (HSP). A efectos prácticos en la tesis caso este valor no cambia, pero se utilizará el concepto de HSP (horas sol pico) que es el número de horas equivalente que tendría que brillar el sol a una intensidad de 1000 W /m<sup>2</sup> para obtener la insolación total de un día, ya que en realidad el sol varía la intensidad a lo largo del día.

$$HSP = \frac{\text{radiación solar mínima}}{1 \text{ kWh /m}^2} = 6.07 \text{ HSP}$$

#### c) Cálculo de paneles solares necesarios

Se realizará los cálculos para establecer el número de paneles solares en función de las condiciones de radiación más desfavorables. Para realizar este cálculo, se definió anteriormente que los paneles tienen una potencia máxima de 165W contando con 36 celdas cada uno. Este dato viene dado en las características técnicas del modelo del panel solar fotovoltaico a ensamblar, tal como se mencionó a inicios del subcapítulo.

*Número de paneles*

$$= (\text{energía necesaria}) / (\text{HSP} * \text{rendimiento de trabajo} * \text{potencia pico del módulo})$$

$$\text{Número de paneles} = \frac{93,589,041 \text{ Wh}}{6.07 \text{ HSP} * 0.8 * 165\text{W}} = 116,805 \text{ paneles por año}$$

El número de paneles calculados responde a la cantidad necesaria para satisfacer la demanda de energía solar que requerirá 1500 familias del Sur del país durante los próximos 5 años aproximadamente. Como se mencionó anteriormente, esta demanda involucra diversos tipos de proyectos desde electrificación rural, proyectos de plantas solares y para proyectos residenciales, tal como lo menciona el Ministerio de Energía y Minas en su Plan de Energía 2014 – 2025.

Finalmente, con el cálculo realizado, es necesario producir anualmente 116,805 paneles solares. Por lo tanto, se realizará un balance de línea para determinar la cantidad de máquinas necesarias para satisfacer esta producción.

d) Balance de línea

Una vez calculado el número de paneles a producirse por año, se procede a calcular la demanda por hora. Considerando 365 días por año y 8 horas laborables por día. Teniendo así:

$$Demanda\ diaria = \frac{Demanda\ anual}{365 * 8}$$

$$Demanda\ por\ hora = \frac{116\ 805}{365 * 8}$$

$$Demanda\ por\ hora = 40\ módulos\ por\ hora$$

Asimismo, se calcula la cadencia según la siguiente fórmula:

$$Cadencia = \frac{1}{Demanda\ diaria}$$

$$Cadencia = \frac{1}{40}$$

$$Cadencia = 0.025 \frac{horas}{módulo}$$

Tabla 23: Demanda y cadencia de producción de paneles solares

<b>Demanda por año</b>	116805	módulos/año
<b>Demanda por hora</b>	40.0017	módulos/hora
<b>Cadencia</b>	0.0250	hora/módulo

Elaboración Propia

De esta forma se procedió a realizar el balance de línea para el ensamble de paneles solares fotovoltaicos. En la Tabla 24 se muestra el resultado del balance de línea.

Tabla 24: Balance de línea de producción de paneles solares

N°	Recurso	Tiempo de montaje (Hrs.)	Tiempo de ejecución(Pieza/hr.)	% de Desperdicio	Tiempo de montaje (Hrs.)	Tiempo por cada unidad a procesar (Hrs.)	Unidades a procesar (Un.)	Tiempo total (Hrs.)	N	N'	Nueva cadencia
1	Fabricación de celdas solares monocristalinas	0.75	100	0.5%	0.008	0.010	1.051	0.018	0.736	1	0.018
2	Interconexión y revisión	0.25	60	1.0%	0.003	0.017	1.046	0.020	0.802	1	0.020
3	Colocación de EVA y TPT	0.25	75	0.5%	0.003	0.013	1.036	0.016	0.656	1	0.016
4	Apilado e interconexión de cadenas de celdas	0.25	60	0.5%	0.003	0.017	1.031	0.020	0.790	1	0.020
5	Revisión de electroluminiscencia	0.25	40	1.0%	0.003	0.025	1.025	0.028	1.128	2	0.014
6	Laminación	0.25	40	0.0%	0.003	0.025	1.015	0.028	1.117	2	0.014
7	Cortado y enmarcado	0.25	50	0.0%	0.003	0.020	1.015	0.023	0.914	1	0.023
8	Colocación de junction box	0.25	65	0.0%	0.003	0.015	1.015	0.018	0.726	1	0.018
9	Curado de paneles solares	0.5	50	1.0%	0.005	0.020	1.015	0.025	1.015	2	0.013
10	Revisión de simulación solar	0.25	40	0.5%	0.003	0.025	1.005	0.028	1.106	2	0.014
11	Etiquetado y clasificación	0.5	75	0.0%	0.005	0.013	1.000	0.018	0.733	1	0.018
12	Empaquetado	0.5	50	0.0%	0.005	0.020	1.000	0.025	1.000	2	0.013

Elaboración Propia

Una vez realizado el balance de línea se obtiene la cantidad de máquinas necesarias para poder cumplir con la demanda por hora que se asume. Así, se ha calculado que, para las operaciones de Revisión de electroluminiscencia, Laminación, Curado de paneles solares, Revisión de simulación solar y Empaquetado es necesario 2 máquinas de las antes mencionadas.

Tabla 25: Número de máquinas necesarias después de balance de línea

N°	Recurso	Cantidad
1	Fabricación de celdas solares monocristalinas	1
2	Interconexión y revisión	1
3	Colocación de EVA y TPT	1
4	Apilado e interconexión de cadenas de celdas	1
5	Revisión de electroluminiscencia	2
6	Laminación	2
7	Cortado y enmarcado	1
8	Colocación de junction box	1
9	Curado de paneles solares	2
10	Revisión de simulación solar	2
11	Etiquetado y clasificación	1
12	Empaquetado	2

Elaboración Propia

## e) Determinación de áreas

Una vez que se tiene la cantidad de máquinas necesarias por cada operación. Se procede a especificar el área requerida por cada operación, también se deben considerar otros ambientes importantes tales como: Almacén de materia prima, Almacén de productos terminados, oficinas administrativas, baños y vestuarios para el personal. En la Tabla 26, se muestra un resumen de la cantidad de recursos por operación, el área que ocupará la(s) máquinas, el área unitaria total considerando un factor de área.

Tabla 26: Área requerida por cada recurso

N°	Recurso	Cantidad	Área maquinaria (m <sup>2</sup> )	Área requerida para el personal	Área unitaria total (m <sup>2</sup> )	Área por recurso redondeado (m <sup>2</sup> )
1	Fabricación de celdas solares monocristalinas	1	1000	40	1733	1750
2	Interconexión y revisión	1	88	40	213	225
3	Colocación de EVA y TPT	1	42	40	137	150
4	Apilado e interconexión de cadenas de celdas	1	173	40	355	375
5	Revisión de electroluminiscencia	2	30	40	140	150
6	Laminación	2	54	40	157	175
7	Cortado y enmarcado	1	12	40	104	125
8	Colocación de junction box	1	10	40	83	100
9	Curado de paneles solares	2	80	40	200	200
10	Revisión de simulación solar	2	40	40	133	150
11	Etiquetado y clasificación	1	18	40	116	125
12	Empaquetado	2	64	40	173	175
13	Almacén de materia primas	1	150	40	317	325
14	Almacén de productos terminados	1	150	40	317	325
15	Oficinas administrativas	3	75	0	125	125
16	Baños	4	25	0	42	50
17	Vestuarios	2	50	0	83	100
<b>Área total</b>						4625

Elaboración Propia

### 5.3. Propuesta de Diseño

Para la propuesta de diseño de la planta de ensamble de paneles solares fotovoltaicos, primero se calculó las unidades patrón por cada recurso para realizar un bosquejo de cómo se dispondrá cada recurso dentro del diseño final. Las unidades patrón de cada recurso se muestra en la Tabla 27, donde cada unidad representa 25 m<sup>2</sup>.

Tabla 27: Unidades patrón por cada recurso

N°	Recurso	Unidades patrón
1	Fabricación de celdas solares monocristalinas	70
2	Interconexión y revisión	9
3	Colocación de EVA y TPT	6
4	Apilado e interconexión de cadenas de celdas	15
5	Revisión de electroluminiscencia	6
6	Laminación	7
7	Cortado y enmarcado	5
8	Colocación de junction box	4
9	Curado de paneles solares	8
10	Revisión de simulación solar	6
11	Etiquetado y clasificación	5
12	Empaquetado	7
13	Almacén de materia primas	13
14	Almacén de productos terminados	13
15	Oficinas administrativas	5
16	Baños	2
17	Vestuarios	4
		185

Elaboración Propia

De este modo, se procede a realizar el DRE Compacto, en los cuales se realizaron algunas modificaciones para poder acomodar cada bloque y se pueda construir una propuesta que sea homogénea y que permita un flujo ordenado de los paneles solares; ello debido a que el transporte entre operaciones se realizará a través de fajas transportadoras.

El DRE Compacto se muestra en la Ilustración 22:

14	14	11	11	10	10	5	5	3	3	3	2	2	2	2	2	2	15	15	17	17	16	16		
14	14	11	11	10	10	5	5	3	3	3	2	2	2	2	2	2	15	15	17	17	16	16		
14	14	11	11	10	10	5	5	4	4	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	13	
14	14	12	12	9	9	6	6	4	4	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	13
14	14	12	12	9	9	6	6	4	4	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	13
14	14	12	12	9	9	6	6	4	4	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	13
14	14	12	12	9	9	6	6	4	4	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	13
15	15	16	16	8	8	7	7	7	4	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	13
15	15	16	16	8	8	7	7	7	4	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	13

Ilustración 22: DRE Compacto

Elaboración Propia

A continuación, con el DRE Compacto ya listo, se procede a plasmar las máquinas y cada área en un plano de AutoCAD. Es así como se obtiene un área total de 7,425 m<sup>2</sup> considerando también patios de maniobras para cada uno de los almacenes de materia prima y



productos terminados y entradas y estacionamientos para operarios. Cabe mencionar, que las áreas de cada máquina fue definida en el subcapítulo Análisis de Máquinas y Equipos por Operación. Se muestra la propuesta de diseño en la Ilustración 23.



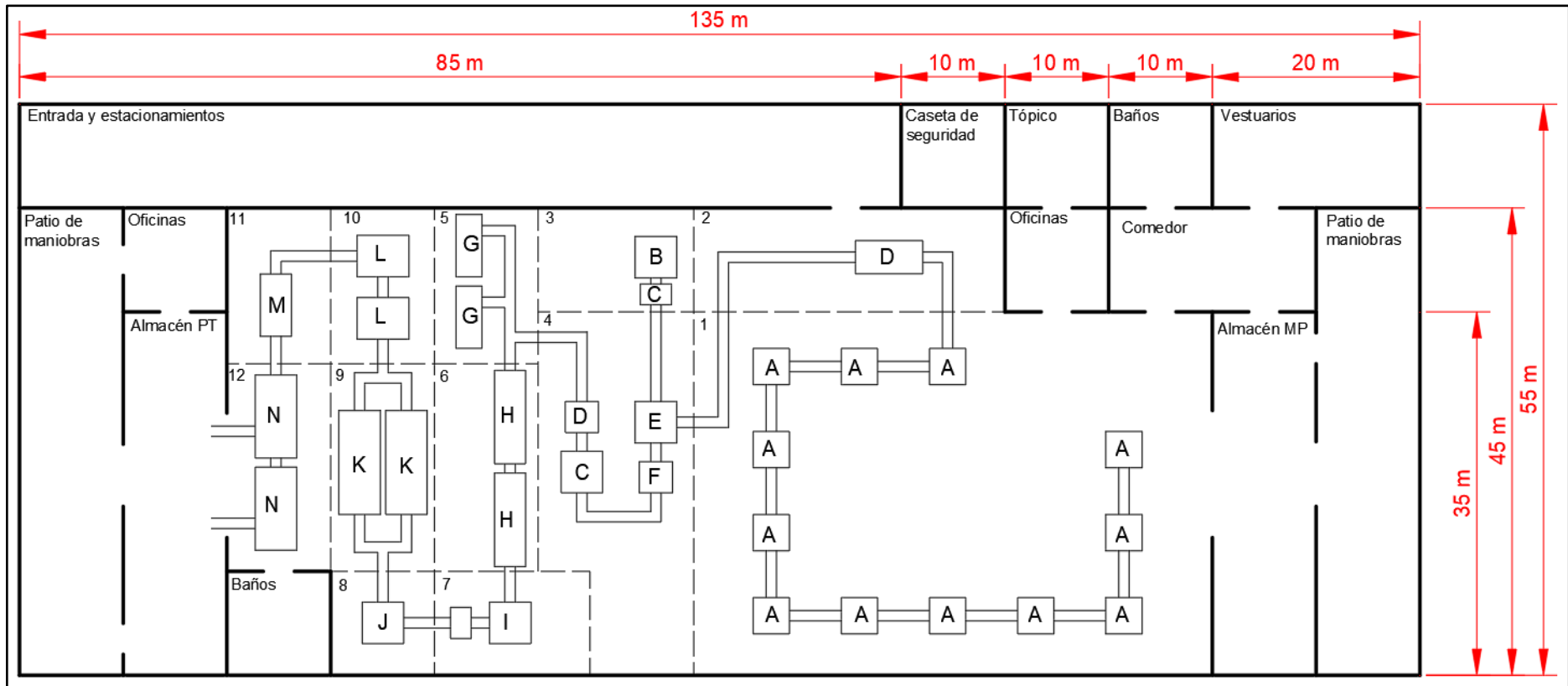


Ilustración 23: Propuesta final de diseño  
Elaboración Propia

N°	Área
1	Fabricación de celdas solares monocristalinas
2	Interconexión y revisión
3	Colocación de EVA y TPT
4	Apilado e interconexión de cadenas de celdas
5	Revisión de electroluminiscencia
6	Laminación
7	Cortado y enmarcado
8	Colocación de junction box
9	Curado de paneles solares
10	Revisión de simulación solar
11	Etiquetado y clasificación
12	Empaquetado

Anexo	Máquina
A	Línea de fabricación de celdas solares monocristalinas
B	Glass Loading Machine
C	EVA & TPT Loading Machine
D	Tabber&Stringer
E	Lay-up Machine
F	Interconnection machine
G	Electroluminescence Machine
H	Solar Laminator
I	Framing Machine
J	Junction Box Sealing Machine
K	Línea de Curado
L	Module Tester&Sorter Machine
M	Labelled&Sorter Machine
N	Wrapping Machine

## CAPÍTULO 6. LOCALIZACIÓN DE PLANTA

El diseño de planta propuesto abarca un total de 7,425 m<sup>2</sup> la cual debe ser localizada en el lugar óptimo; de esta forma, se realizará el análisis de la macro y micro localización utilizando el método de centro de gravedad y método sinérgico de Brown y Gibson, respectivamente.

### 6.1. Macro Localización: Método De Centro De Gravedad

Para empezar con la macro localización, se identificaron las 6 ciudades principales a las cuales se distribuiría los paneles solares fotovoltaicos. Estas ciudades se han elegido debido a que se encuentran en la zona sur del país y que, según el punto anterior, se identificó que son ciudades que se encuentran en regiones con un alto índice de radiación solar, logrando que los paneles solares sean lo más eficientes posibles. Además, según (Ivanov, Tsipoulanidis, & Schönberger, 2017), se tiene que priorizar la elección de un factor para la localización, ya sea cercanía a los clientes o a los proveedores. Por lo tanto, dentro de la macro localización se está priorizando la cercanía a los clientes debido a que el proveedor necesariamente será una empresa extranjera, según lo determinado en la Selección de Proveedores. Sin embargo, el valor diferencial que se busca con este estudio técnico es la entrega en el menor tiempo posible a los clientes, minimizando así, el costo de transporte a las potenciales ciudades clientes.

Las ciudades elegidas fueron las siguientes:

Tabla 28: Localización de las principales ciudades clientes

Región	Ciudad	Tipo	Latitud	Longitud	Coordenada x'	Coordenada y'
Arequipa	Arequipa	Cliente	-16.3989	-71.5369	1.6011	3.4631
Puno	Juliaca	Cliente	-15.4933	-70.1356	2.5067	4.8644
Ayacucho	Ayacucho	Cliente	-13.1572	-74.2264	4.8428	0.7736
Apurímac	Abancay	Cliente	-13.6375	-72.8786	4.3625	2.1214
Moquegua	Moquegua	Cliente	-17.1930	-70.9344	0.8070	4.0656
Cusco	Cusco	Cliente	-13.5165	-71.9788	4.4835	3.0212

Elaboración Propia

Para empezar con el método de centro de gravedad, se utilizó la aplicación Google Maps para identificar las latitudes y longitudes de cada ciudad tomando como referencia las Plazas de Armas de cada una de ellas para simplificar el análisis y determinar la ciudad donde debería ser localizada la planta de ensamblaje.

Además, para que el análisis sea más entendible se procedió a utilizarse un nuevo sistema de coordenadas xy donde  $x = 0$  sería la latitud = -18 e  $y = 0$  sería la longitud = -75. De esta forma, se trasladaron las latitudes y longitudes de las ciudades. Obteniéndose así, las localizaciones de cada ciudad según este nuevo sistema de coordenadas representadas como  $x'$  e  $y'$ .

Las fórmulas por utilizarse para el método de centro de gravedad son las siguientes:

$C_x$  : Coordenada x del centro de gravedad

$C_y$  : Coordenada y del centro de gravedad

$D_{ix}$  : Coordenada x de la ciudad i

$D_{iy}$  : Coordenada y de la ciudad i

$W_i$  : Peso (cantidad o valoración) de lo transferido "a" o "desde" ciudad i

$$C_x = \frac{\sum d_{ix} * w_i}{\sum w_i}$$

$$C_y = \frac{\sum d_{iy} * w_i}{\sum w_i}$$

Cabe resaltar que, en el punto anterior para determinar las necesidades de espacio para la propuesta de diseño de la planta de ensamble se determinó que era necesario producir anualmente 116,805 paneles. Por lo tanto, se ha tomado como referencia el consumo de energía eléctrica per cápita expresado en kWh/habitante para establecer para asignar una cierta cantidad de paneles solares según el nivel de consumo promedio en cada una de las ciudades elegidas anteriormente. Esta información se ha obtenido del Ministerio de Energía y Minas en su

publicación estadística anual del año 2018 llamada Estadística Eléctrica por Regiones (Ministerio de Energía y Minas, 2018).

Además, la equivalencia entre la latitud y la longitud es igual a 1:111.12 km<sup>10</sup>

Tabla 29: Macro localización a partir del método de centro de gravedad

Región	Ciudad	Coordenada x'' (km)	Coordenada y'' (km)	Consumo de energía eléctrica per cápita kWh/hab	Consumo relativo por ciudad	Paneles solares por ciudad	Wx	Wy
Arequipa	Arequipa	177.9	384.8	4,114	20%	23,678	4,212,630	9,111,710
Puno	Juliaca	278.5	540.5	392	2%	2,258	6,595,341	12,798,650
Ayacucho	Ayacucho	538.1	86.0	214	1%	1,229	12,741,837	2,035,457
Apurímac	Abancay	484.8	235.7	2,809	14%	16,165	11,478,108	5,581,584
Moquegua	Moquegua	89.7	451.8	10,976	54%	63,165	2,123,238	10,696,843
Cusco	Cusco	498.2	335.7	1,791	9%	10,309	11,796,495	7,949,094
				20,296	100%	116,805	48,947,649	48,173,338

Elaboración Propia

En la Tabla 29 se muestra las columnas de coordenadas xy convertida en km, también se muestra el consumo de energía eléctrica per cápita. A partir de los datos proporcionados, se obtuvo el consumo relativo por ciudad para finalmente hallar cuántos paneles solares le corresponde a cada una. Siguiendo con el método, la columna Wx y Wy se calculó a partir de la multiplicación de las coordenadas x'' e y'' con la valoración por ciudad (en este caso la valoración es paneles por ciudad). Entonces la fórmula quedaría de la siguiente manera:

$$C_x: \frac{4,212,630 + 6,595,341 + 12,741,837 + 11,478,108 + 2,123,238 + 11,796,495}{116,805}$$

$$C_x: 419.05 \text{ km}$$

$$C_y: \frac{9,111,710 + 12,798,650 + 2,035,457 + 5,581,584 + 10,696,843 + 7,949,094 + 48,173,338}{116,805}$$

$$C_y: 412.43 \text{ km}$$

<sup>10</sup> Dependiendo de qué tan cerca esté una localización de la línea ecuatorial la relación entre latitud, longitud y km varía, siendo aproximadamente 110.57 km en el ecuador, y llegando a 111.70 km cerca a los polos. A efectos prácticos, se tomará un valor medio de 111.12 km por cada unidad de latitud y longitud.

Finalmente, utilizando el método de centro de gravedad, la ciudad elegida se encuentra en las coordenadas en km: 419.05 en el eje x y 412.43 en el eje y. Transformándolo a coordenadas geográficas de latitud y longitud se obtiene las coordenadas: -14.22881, -71.28847.

Observando la Ilustración 24 en la aplicación Google Maps se obtiene que la ciudad más cercana a las coordenadas obtenidas es Sicuani, provincia de Canchis, región Cusco.

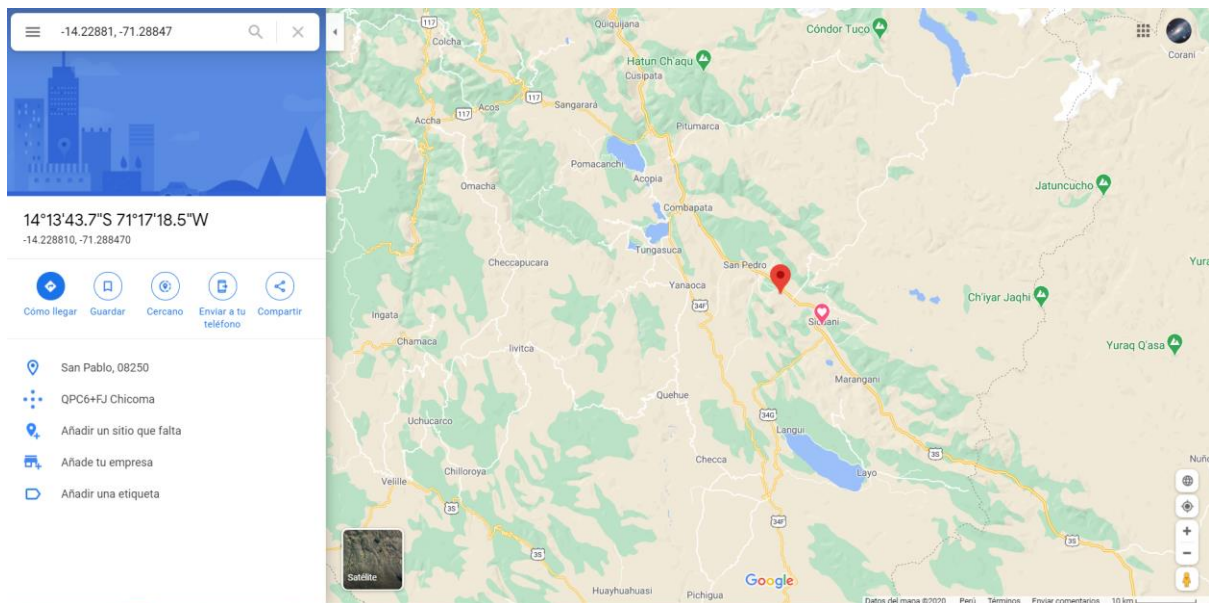


Ilustración 24: Resultados de la macro localización

Fuente: Google Maps

A pesar de que, la ciudad de Sicuani se encuentre aproximadamente a 3 horas de la capital cusqueña, es considerada como la 2da ciudad más importante del Cusco y es la 3ra más poblada de la región (Turismo, 2020). Además, el fuerte interés del país en impulsar el desarrollo sostenible y tecnológico, además de las oportunidades de desarrollo social dentro de la región y el sur del país; permite que sea una ciudad idónea para poder localizar la planta. A pesar, que la misma ciudad tenga las condiciones ideales para proyectos solares, cuenta con instituciones académicas enfocadas en ingeniería eléctrica, industrial y ambiental que permiten la capacitación y formación de profesionales técnicos y titulados para la puesta en marcha de proyectos con paneles solares fotovoltaicos.

Sin embargo, una de las desventajas de esta localización, es sin duda, la lejanía de la ciudad con respecto a los puertos más cercanos del país. Se encuentra a aproximadamente 10 horas desde el puerto de Ilo, Moquegua y a 24 horas desde el puerto de Callao, Lima. Sin embargo, su localización para la distribución de paneles solares fotovoltaicos es estratégica debido a su cercanía a las principales ciudades del sur del país. El costo por transporte de componentes comprados en el exterior se compensará con el costo relacionado a la distribución de productos terminados a las principales ciudades clientes que se identificaron al inicio del capítulo, este último análisis mencionado se mostrará en el CAPÍTULO 7.

## 6.2. Micro Localización: Método Sinérgico De Localización De Plantas (Brown Y Gibson)

La siguiente tabla muestra los costos relacionados y la calificación de los factores críticos según un estudio previo de la ciudad de Sicuani:

Tabla 30: Factores críticos y objetivos de localización de plantas

Local	Área (m2)	Factores críticos		Factores objetivos			
		Energía eléctrica	Materia prima	Alquiler lote	Costo de mantenimiento	Costo de construcción	Total
A	8500	0	1	S/ 18,000.00	S/ 5,400.00	S/ 280,000.00	S/ 303,400.00
B	8000	1	1	S/ 20,000.00	S/ 3,600.00	S/ 300,000.00	S/ 323,600.00
C	10000	1	1	S/ 25,000.00	S/ 3,000.00	S/ 350,000.00	S/ 378,000.00

Elaboración Propia

El primer paso consiste en calcular el valor correspondiente a cada factor objetivo mediante la siguiente fórmula:

Donde  $Ct_i$  corresponde al costo total asociado a cada locación.

$$FO_i = \frac{\frac{1}{Ct_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Ct_i}}$$

Para calcular el Factor Objetivo del local A, se deberá calcular de la siguiente manera:

$$FO_A = \frac{1}{Ct_A \left( \frac{1}{Ct_A} + \frac{1}{Ct_B} + \frac{1}{Ct_C} \right)}$$

La Tabla 31 muestra los factores objetivos de cada uno de los locales:

Tabla 31: Factores objetivos de la micro localización de planta

Local	Área (m2)	Factores objetivos				Factor objetivo
		Alquiler lote	Costo de mantenimiento	Costo de construcción	Total	
A	8500	S/ 18,000.00	S/ 5,400.00	S/ 280,000.00	S/ 303,400.00	0.3649
B	8000	S/ 20,000.00	S/ 3,600.00	S/ 300,000.00	S/ 323,600.00	0.3422
C	10000	S/ 25,000.00	S/ 3,000.00	S/ 350,000.00	S/ 378,000.00	0.2929

Elaboración Propia

La suma de los Factores Objetivos siempre es igual a 1, el valor de cada locación es siempre relativo respecto a las demás alternativas.

El siguiente paso corresponde en calcular los valores de los Factores Subjetivos. El carácter subjetivo de este valor hace necesario la asignación de una medida de comparación que valore los distintos criterios. Por ejemplo:

Tabla 32: Descripción de factores subjetivos de la micro localización de planta

Factores subjetivos	Ponderación	Deficiente	Bueno	Excelente
Posibilidad de concretar negociación	25%	0%	20%	40%
Disponibilidad de mano de obra	20%	0%	15%	30%
Aceptación de la comunidad	40%	0%	25%	50%
Posibilidad de renegociar contrato a futuro	15%	0%	15%	30%

Elaboración Propia

La interpretación de la tabla se realiza de la siguiente manera. En el caso de que la posibilidad de concretar negociación del local A sea “Buena” su porcentaje asignado será del 20%, en caso sea “Excelente” será del 40%, y así sucesivamente para las demás locaciones.

Para la presente tesis, las ponderaciones se asignaron así:

Tabla 33: Factores subjetivos de la micro localización de planta

Factores subjetivos	Ponderación	Local A	Local B	Local C
Posibilidad de concretar negociación	25%	20%	40%	40%
Disponibilidad de mano de obra	20%	30%	30%	30%
Aceptación de la comunidad	40%	25%	50%	50%
Posibilidad de renegociar contrato a futuro	15%	15%	15%	30%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>23%</b>	<b>38%</b>	<b>41%</b>



Elaboración Propia

El último paso consiste en aplicar la fórmula del algoritmo sinérgico:

$$IL_i = FC_i\{(FO_i * \alpha) + [(1 - \alpha)(FS_i)]\}$$

Donde alfa equivale al nivel de confiabilidad, en la presente tesis el valor será del 85%, es decir que alfa equivale a 0.85.

La siguiente tabla presenta los índices de localización de todos los locales, se observa que el local A tiene un índice de localización equivalente a 0 debido al factor crítico “Energía eléctrica”, mientras el local que tiene el mayor índice de localización y sería la mejor opción sería el local B.

Tabla 34: Resultados de micro localización de planta

Local	Factores críticos		Factor objetivo	Factor subjetivo	Índice de localización
	Energía eléctrica	Materia prima			
A	0	1	0.3649	0.2325	0.0000
B	1	1	0.3422	0.3825	0.3482
C	1	1	0.2929	0.405	0.3097

Elaboración Propia

A través del método de localización por centro de gravedad, la ubicación ideal para la construcción de una planta para el ensamble de paneles solares fotovoltaicos es la Ciudad de Sicuani, provincia de Canchis, región Cusco; siendo esta la segunda ciudad más importante de la región y la tercera más poblada. Además, cuenta con una localización estratégica ya que conecta con las principales ciudades del sur del Perú como Cusco, Arequipa, Juliaca, Ilo, Abancay.

Finalmente, en la micro localización por método sinérgico de localización de Brown-Gibson, se decide ubicar en el local B, contando con un área de 8000 m<sup>2</sup>. Esta localización tiene como ventaja encontrarse en una zona industrial de la ciudad, asegurando personal calificado, abastecimiento eléctrico en la zona y una cercanía a las carreteras para la recepción y despacho de componentes y productos terminados, respectivamente.

## CAPÍTULO 7. ANÁLISIS ECONÓMICO

En este punto, se estimará la inversión requerida para el proyecto, antes de su puesta en marcha. Posteriormente, se evaluarán los indicadores de rentabilidad como VAN<sup>11</sup> y TIR<sup>12</sup> para determinar la viabilidad del estudio técnico.

### 7.1. Inversión

En este punto, se detallará la inversión de activos fijos tangibles, consistente en maquinarias, muebles, enseres y otros.

- a) Inversión en maquinaria: Se incluye la maquinaria mencionada en el balance de línea. Según la Tabla 35, se obtiene una inversión total de S/. 1,845,201.00. El tipo de cambio a dólares considerado fue de S/. 3.6 por dólar.

Tabla 35: Inversión en maquinaria

Inversión en maquinaria	Precio unitario	Cantidad	Precio total
Línea de fabricación de celdas solares monocristalinas	S/ 360,000.00	1	S/ 360,000.00
<i>Glass Loading Machine</i>	S/ 20,000.00	1	S/ 20,000.00
<i>EVA &amp; TPT Loading Machine</i>	S/ 72,000.00	2	S/ 144,000.00
<i>Tabber &amp; Stringer</i>	S/ 80,000.00	1	S/ 80,000.00
<i>Lay-up Machine</i>	S/ 162,000.00	1	S/ 162,000.00
<i>Interconnection Machine</i>	S/ 216,000.00	1	S/ 216,000.00
<i>Electroluminescence Machine</i>	S/ 54,000.00	2	S/ 108,000.00
<i>Solar Laminator</i>	S/ 180,000.00	2	S/ 360,000.00
<i>Framing Machine</i>	S/ 21,600.00	1	S/ 21,600.00
<i>Junction Box Sealing Machine</i>	S/ 21,600.00	1	S/ 21,600.00
<i>Curing Line</i>	S/ 36,000.00	2	S/ 72,000.00
<i>Module Tester&amp;Sorter Machine</i>	S/ 126,000.00	2	S/ 252,000.00
<i>Labelled&amp;Sorter Machine</i>	S/ 108,000.00	1	S/ 108,000.00
<i>Wrapping Machine</i>	S/ 90,000.00	2	S/ 180,000.00
Faja Transportadora	S/ 180,000.00	1	S/ 180,000.00
<b>Total</b>			<b>S/ 2,285,200.00</b>

Elaboración Propia

<sup>11</sup> Valor Actual Neto

<sup>12</sup> Tasa Interna de Retorno

b) Inversión en muebles y enseres: Se incluye los muebles y enseres, además se agrega anaqueles, escritorios y sillas oficina. Adicionalmente, se agregan otros costos que se puedan requerir al momento de la instalación de la planta.

Tabla 36: Inversión en muebles y enseres

Inversión en muebles y enseres	Precio unitario	Cantidad	Precio total
Anaqueles	S/ 300.00	100	S/ 30,000.00
Escritorios de oficinas	S/ 600.00	7	S/ 4,200.00
Estantes	S/ 150.00	20	S/ 3,000.00
Sillas de oficinas	S/ 450.00	7	S/ 3,150.00
Juegos de comedor	S/ 15,000.00	2	S/ 30,000.00
Tópico	S/ 5,000.00	1	S/ 5,000.00
Seguridad	S/ 30,000.00	1	S/ 30,000.00
Otros	S/ 20,000.00	-	S/ 20,000.00
<b>Total</b>			<b>S/ 125,350.00</b>

Elaboración Propia

c) Inversión total: A continuación, se muestra la suma total de las inversiones requeridas para la instalación y operación para la propuesta de diseño de planta para el ensamblaje de paneles solares fotovoltaicos. En el caso de los costos de construcción, se ha tomado en cuenta factores como costo de materiales, la construcción metálica de la planta, conexiones, licencias.

Tabla 37: Inversión total

Inversión total	Costo de inversión
Inversión en maquinaria	S/ 2,285,200
Inversión en muebles y enseres	S/ 125,350
Costo de construcción	S/ 300,000
<b>Total</b>	<b>S/ 2,710,550</b>

Elaboración Propia

## 7.2. Presupuesto De Ingresos y Egresos

En este punto se muestra los presupuestos de ingresos y costos. Para finalmente, presentar un resumen del flujo de caja económico a lo largo de 5 años de operación.

a) Presupuesto de ingresos de ventas: Para obtener los ingresos de ventas, se ha considerado la producción para el año 1 equivalente a 116,805 paneles solares anuales, tal como se detalló al momento de dimensionar la planta. Además, se ha

considerado un crecimiento de las unidades vendidas en un 3.8%, ya que como menciona (Bellini, 2020) en la revista PV Magazine, al año 2019 hubo un aumento de 3.8% de la producción de energía solar fotovoltaica, respecto al año anterior. Siendo un indicio de la relevancia que está tomando la energía solar dentro de la matriz de generación eléctrica dentro del Perú. Por otro lado, se ha considerado un precio inicial para el año 1 igual a S/. 480 debido a la alta competencia con productos extranjeros, especialmente de China, que venden a un mayor precio dentro del territorio nacional, pero que cuentan con años de experiencia y reputación.

En el resumen, se observa un aumento del precio de venta del panel solar fotovoltaico de S/. 20 en el tercer año, asumiendo que los paneles solares habrán ganado reputación dentro del mercado. Asimismo, se asume que todo producto final ensamblado se vende. El resumen de los ingresos se muestra en la Tabla 38.

Tabla 38: Ingresos totales

Ingresos	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Unidades	116,805	121,244	125,851	130,633	135,597
Precio de venta	S/ 480	S/ 480	S/ 500	S/ 500	S/ 500
<b>Total</b>	<b>S/ 56,066,400</b>	<b>S/ 58,196,923</b>	<b>S/ 62,925,423</b>	<b>S/ 65,316,589</b>	<b>S/ 67,798,619</b>

Elaboración Propia

- b) Presupuestos de costos: Para los costos se han considerado 3 apartados, que se detallarán a continuación:

*Presupuesto de mano de obra:* En la Tabla 39, se muestra el requerimiento de personal para cada uno de los 5 años de operación.

Tabla 39: Requerimiento de personal

Requerimiento de personal	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Gerente General	1	1	1	1	1
Jefe Comercial y Marketing	1	1	1	1	1
Asistente Comercial y Marketing	2	2	3	3	4
Jefe Administración y Finanzas	1	1	1	1	1
Asistente Administración y Finanzas	2	2	1	2	2
Jefe Planeamiento, Producción y Logística	1	1	1	1	1

Asistente Planeamiento, Producción y Logística	2	2	3	3	4
Operarios	15	15	15	18	18
Limpieza	2	2	3	3	3
Vigilancia	2	2	3	3	3
<b>Total</b>	<b>29</b>	<b>29</b>	<b>32</b>	<b>36</b>	<b>38</b>

Elaboración Propia

En la Tabla 40, se muestra un detalle de los salarios mensuales por cada cargo.

Tabla 40: Salario mensual de personal

Personal	Salario mensual	Bono vivienda/colegios
Gerente General	S/ 6,000.00	S/ 1,000.00
Jefe Comercial y Marketing	S/ 3,500.00	S/ 1,000.00
Asistente Comercial y Marketing	S/ 1,500.00	S/ 1,000.00
Jefe Administración y Finanzas	S/ 4,000.00	S/ 1,000.00
Asistente Administración y Finanzas	S/ 2,000.00	S/ 1,000.00
Jefe Planeamiento, Producción y Logística	S/ 4,000.00	S/ 1,000.00
Asistente Planeamiento, Producción y Logística	S/ 1,750.00	S/ 1,000.00
Operarios	S/ 1,050.00	S/ 1,000.00
Limpieza	S/ 1,000.00	S/ 1,000.00
Vigilancia	S/ 1,300.00	S/ 1,000.00

Elaboración Propia

En la Tabla 41, se muestra el detalle del presupuesto relacionado a la mano de obra, considerando remuneraciones 12 veces al año, el concepto de gratificaciones dos veces al año cada una igual a una remuneración mensual, seguro de salud correspondiente al 9% del salario mensual del personal y CTS correspondiente a la suma de un salario mensual + 1/6 de una gratificación del personal.

Tabla 41: Presupuesto de mano de obra

Presupuesto de mano de obra	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Remuneración	S/ 580,200	S/ 580,200	S/ 622,800	S/ 684,600	S/ 723,600
Gratificaciones	S/ 96,700	S/ 96,700	S/ 103,800	S/ 114,100	S/ 120,600
Seguro de salud	S/ 52,218	S/ 52,218	S/ 56,052	S/ 61,614	S/ 65,124
CTS	S/ 30,450	S/ 30,450	S/ 30,450	S/ 30,450	S/ 30,450
Bono vivienda/colegio	S/ 348,000	S/ 348,000	S/ 384,000	S/ 432,000	S/ 456,000
<b>Total</b>	<b>S/ 1,107,568</b>	<b>S/ 1,107,568</b>	<b>S/ 1,197,102</b>	<b>S/ 1,322,764</b>	<b>S/ 1,395,774</b>

Elaboración Propia

*Presupuesto de material directo e indirecto:* en la Tabla 42 se muestra el presupuesto destinado a la compra de componentes necesarios para el ensamblaje de paneles solares, y en el caso de la fabricación de celdas solares, se muestra el costo que involucra fabricar este componente.

Tabla 42: Presupuesto de material directo e indirecto

Presupuesto de material directo e indirecto	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Unidades producidas	116,805	121,244	125,851	130,633	135,597
Vidrio templado	S/ 1,290,352.44	S/ 1,339,385.83	S/ 1,390,282.50	S/ 1,443,113.23	S/ 1,497,951.53
Encapsulante EVA	S/ 104,211.32	S/ 108,171.35	S/ 112,281.86	S/ 116,548.57	S/ 120,977.42
Capa TPT	S/ 1,042,113.21	S/ 1,081,713.51	S/ 1,122,818.63	S/ 1,165,485.73	S/ 1,209,774.19
Marco de aluminio	S/ 6,643,824.67	S/ 6,896,290.01	S/ 7,158,349.03	S/ 7,430,366.29	S/ 7,712,720.21
Caja de conexiones	S/ 2,438,888.40	S/ 2,531,566.16	S/ 2,627,765.67	S/ 2,727,620.77	S/ 2,831,270.36
Celdas monocristalinas	S/ 42,049,800.00	S/ 43,647,692.40	S/ 45,306,304.71	S/ 47,027,944.29	S/ 48,815,006.17
Cinta fotovoltaica	S/ 160,966.63	S/ 167,083.37	S/ 173,432.53	S/ 180,022.97	S/ 186,863.84
Cable de cobre	S/ 350,415.00	S/ 363,730.77	S/ 377,552.54	S/ 391,899.54	S/ 406,791.72
Pegatinas	S/ 86,435.70	S/ 89,720.26	S/ 93,129.63	S/ 96,668.55	S/ 100,341.96
Cajas de cartón	S/ 256,971.00	S/ 266,735.90	S/ 276,871.86	S/ 287,392.99	S/ 298,313.93
<b>Total</b>	<b>S/ 54,423,978.37</b>	<b>S/ 56,492,089.55</b>	<b>S/ 58,638,788.96</b>	<b>S/ 60,867,062.94</b>	<b>S/ 63,180,011.33</b>

Elaboración Propia

*Presupuesto de costos indirectos:* en la Tabla 43, se muestra los costos indirectos como el alquiler de local, considerando una renta mensual correspondiente a S/. 240,000 que se detalló anteriormente en el subcapítulo de micro localización. Además, se asume un costo por servicios de luz y agua igual a un 12% y 16% de la renta mensual, respectivamente. Por último, se considera otros gastos relacionados al local, que representa en el primer año el 10% del alquiler del local. Cabe resaltar que, para los presupuestos de luz y agua, se ha asumido un incremento del costo entre 2% y 3% cada año, motivado por una mayor utilización de estos servicios.

Tabla 43: Presupuestos de costos indirectos

Presupuesto de costos indirectos	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Alquiler de local	S/ 240,000	S/ 252,000	S/ 264,600	S/ 277,830	S/ 291,722
Servicio de luz	S/ 28,800	S/ 29,376	S/ 29,964	S/ 30,563	S/ 31,174
Servicio de agua	S/ 38,400	S/ 39,552	S/ 40,739	S/ 41,961	S/ 43,220
Otros	S/ 24,000	S/ 25,200	S/ 26,460	S/ 27,783	S/ 29,172
<b>Total</b>	<b>S/ 331,200</b>	<b>S/ 346,128</b>	<b>S/ 361,762</b>	<b>S/ 378,137</b>	<b>S/ 395,287</b>

Elaboración Propia

*Presupuesto de transporte:* por último, en la Tabla 44, se muestra los costos relacionados al transporte de componentes a planta, considerando que los componentes llegarán al puerto de Ilo, posteriormente serán enviados a la ciudad de Sicuani por transporte terrestre. Además, se muestra también los costos de transporte de producto terminado a ciudades clientes: Arequipa, Cusco, Juliaca, Moquegua, Abancay y Ayacucho. Para esto se tomó un costo por flete terrestre de S/. 0.28 soles/Ton/km (Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, 2015).

Tabla 44: Presupuesto de transporte

Costo de transporte	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
De componentes a planta	S/ 150,000	S/ 157,500	S/ 165,375	S/ 173,643	S/ 182,325
Producto terminado a clientes	S/ 162,025	S/ 168,182	S/ 174,572	S/ 181,206	S/ 188,092
<b>Total</b>	<b>S/ 312,025</b>	<b>S/ 325,682</b>	<b>S/ 339,947</b>	<b>S/ 354,850</b>	<b>S/ 370,418</b>

Elaboración Propia

### c) Flujo de caja económico

De esta forma, obtenido todos los ingresos y egresos, se muestra en la Tabla 45, un detallado de los Ingresos – Egresos para cada uno de los 5 años de operación.

Tabla 45: Ingresos – Egresos

	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
<b>Ingresos</b>	S/ 56,066,400	S/ 58,196,923	S/ 62,925,423	S/ 65,316,589	S/ 67,798,620
<b>Egresos</b>	S/ 56,174,771	S/ 58,271,468	S/ 60,537,601	S/ 62,922,814	S/ 65,341,491
<b>Ingresos - Egresos</b>	<b>-S/ 108,371</b>	<b>-S/ 74,544</b>	<b>S/ 2,387,822</b>	<b>S/ 2,393,775</b>	<b>S/ 2,457,129</b>

Elaboración Propia

## 7.3. Evaluación Económica

En este subcapítulo, se evalúa la factibilidad económica mediante los indicadores más importantes, los cuales son Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR).

En primer lugar, se muestra en la Tabla 46 el flujo económico de la propuesta de diseño de planta para el ensamblaje de paneles solares fotovoltaicos.

Tabla 46: Flujo económico del proyecto

	<b>AÑO 0</b>	<b>AÑO 1</b>	<b>AÑO 2</b>	<b>AÑO 3</b>	<b>AÑO 4</b>	<b>AÑO 5</b>
<b>Flujo económico</b>	-S/ 2,710,550	-S/ 108,371	-S/ 74,544	S/ 2,387,822	S/ 2,393,775	S/ 2,457,128

Elaboración Propia

- a) Valor Actual Neto (VAN): Para calcular el VAN, se han asumido tres escenarios posibles para el Costo Ponderado de Capital (WACC) debido a que no se cuenta con información de costos de capital, información requerida para el cálculo numérico de este indicador. Por ello, se plantearon tres escenarios posibles: optimista, probable y pesimista. El detalle de la evaluación económica utilizando el VAN se muestra en la Tabla 47.

Tabla 47: Evaluación económica VAN

	<b>OPTIMISTA</b>	<b>PROBABLE</b>	<b>PESIMISTA</b>
<b>Costo Ponderado de Capital (WACC)</b>	15%	20%	25%
<b>VAN</b>	S/ 1,129,700.47	S/ 559,237.91	S/ 130,601.34

Elaboración Propia

Como se puede observar, para cualquiera de los 3 escenarios se evidencia que el VAN es mayor a 0, ello demuestra la viabilidad del proyecto. Tanto en un escenario pesimista, donde la ganancia es aproximadamente S/. 130,000 soles, el negocio aún sigue siendo rentable. Además, considerando el escenario más probable, se obtiene una rentabilidad bastante atractiva.

- b) Tasa Interna de Retorno (TIR): Por otro lado, se considera la Tasa Interna de Retorno para evaluar hasta qué punto el proyecto es viable. Los resultados de la evaluación económica utilizando el TIR se muestra en la Tabla 48.

Tabla 48: Evaluación económica TIR

	<b>OPTIMISTA</b>	<b>PROBABLE</b>	<b>PESIMISTA</b>
<b>Costo de Ponderado de Capital (WACC)</b>	15%	20%	25%
<b>TIR</b>	<b>27%</b>	<b>27%</b>	<b>27%</b>

Elaboración Propia

Se observa que el valor de la Tasa Interna de Retorno (TIR) es igual a 27%. Por lo tanto, este valor es mayor en comparación a cada uno de los Costos Ponderados de Capital,



corroborando una vez más la viabilidad del proyecto para cada escenario posible, obteniéndose beneficios en cualquiera de ellos, incluso en el escenario pesimista, como se detalló en la evaluación del VAN.



## CONCLUSIONES

- La tesis de Luzuriaga y el caso de la empresa BP Solar, coinciden en 7 etapas importantes para el diseño de una planta para el ensamble de paneles solares fotovoltaicos, priorizando la identificación de actividades clave dentro del proceso, estableciendo una relación entre operaciones y un balance de línea que permita estimar los requerimientos de espacio de la propuesta.
- La distribución más utilizada para plantas para el ensamble de paneles solares es la distribución por producto, ya que el panel solar fotovoltaico es transportado a través de fajas por cada una de las operaciones, ahorrando tiempo muerto y manipulación por parte del personal.
- Ambos casos de estudio coinciden también en la importancia de proponer un diseño de planta semiautomatizado o automatizado debido a la versatilidad y alta confiabilidad que tienen las máquinas para la manipulación de productos tan delicados como lo son los paneles solares. Los operarios de la planta tendrían un rol de seguimiento y apoyo en caso una de las máquinas falle en el proceso, es decir, se encargarían del control de calidad del proceso.
- Las tecnologías de materiales para las celdas fotovoltaicas son un factor importante para la fabricación de celdas y el ensamble de paneles solares. Del mismo modo, se ha escogido las celdas solares de silicio monocristalino, siendo la más utilizada actualmente debido a su continuo desarrollo en la industria solar y su alta eficiencia de 18% aproximadamente. Además, sus diversas aplicaciones en proyectos de electrificación rural, plantas solares e implementaciones residenciales, permite una mayor cantidad de proyectos relacionados a la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en el Perú.

- Para el ensamble de un panel solar fotovoltaico de celdas solares monocristalinas, se necesitan 6 componentes: vidrio templado, encapsulante EVA, celdas solares monocristalinas unidas en cadenas, capa trasera TPT, marcos de aluminio y una caja de conexiones. Cada componente cumple un rol importante porque la eficiencia del panel solar depende de los materiales y calidad de la construcción de cada uno de estos.
- Para la propuesta de diseño, se decidió comprar 5 de los 6 componentes necesarios para el ensamble del panel solar fotovoltaico; siendo las celdas solares monocristalinas el único componente a fabricarse porque es un componente crítico en el diseño final y controlar la calidad requerida para el panel solar es indispensable en este producto. Cabe resaltar que las principales empresas proveedoras de los componentes a comprar provienen de China, Estados Unidos y Alemania.
- Para la fabricación de celdas solares monocristalinas y el ensamble de un panel solar se obtuvieron 22 operaciones, 4 controles de calidad y 2 operaciones combinadas. Es importante, notar la presencia de las actividades de calidad y operaciones combinadas siendo parte importante del proceso, ya que se requiere un alto estándar de calidad debido a la criticidad de cada una de las operaciones.
- El tipo de distribución de planta elegido es por producto, debido al flujo continuo que debe seguir un panel solar fotovoltaico para su producción, además de su alta especialización en maquinaria. Es importante resaltar que un panel solar debe ser manipulado lo mínimo posible, siendo este tipo de distribución la que permite especialmente la utilización de fajas transportadoras para el producto, desde el ensamble de sus primeros componentes hasta llegar al almacén de producto terminado.
- Se obtienen 15 tipos de máquinas a adquirir según el balance de línea. Además, se revisó que las operaciones más críticas son revisión de electroluminiscencia, laminación, curado

de paneles solares, revisión de simulación solar y el empaquetado. De las operaciones mencionadas, la mitad son controles de calidad; por lo tanto, se consideró duplicar el número de máquinas para cada una de estas operaciones.

- La propuesta final del diseño de planta para el ensamblaje de paneles solares involucra un área total de 7,425 m<sup>2</sup>. Se ha considerado el área requerida por cada operación, la ubicación de las maquinarias, servicios básicos como baños y vestuarios, oficinas, patio de maniobras, comedor, tópicos, caseta de seguridad y estacionamientos para el personal de trabajo. Como se mencionó, la distribución es por producto ya que hay una faja transportadora que conecta de principio a fin todas las operaciones de ensamble del panel solar fotovoltaico.
- Utilizando el método de centro de gravedad y priorizando la cercanía de la planta a los clientes. Se obtiene que la ubicación más conveniente es en la ciudad de Sicuani, provincia de Canchis, región Cusco. Como se mencionó, esta ciudad se caracteriza por ser la segunda más importante de la región Cusco por su localización estratégica, ya que conecta a la mayoría de las ciudades del sur del Perú, siendo conveniente la instalación de una planta en aquella zona para la posterior distribución de paneles solares a las ciudades clientes como Arequipa, Juliaca, Cusco, Ayacucho, Abancay y Moquegua. Respecto a la micro localización, se concluye que la ubicación más conveniente es el local B, ubicado en Sicuani con un área total de 8,000 m<sup>2</sup>.
- La inversión total del proyecto es igual a S/. 2,710,550, siendo la compra de maquinarias un equivalente al 84% de toda la inversión del proyecto. Además, cabe resaltar que la máquina de Interconexión de cadenas de celdas solares es la más costosa entre las 15 máquinas teniendo un costo unitario de S/. 216,000.00.
- Para la presente investigación se propuso satisfacer la demanda eléctrica de 1500 familias para hallar el nivel de producción necesario de paneles solares para vender para satisfacer

la demanda de energía solar. En el cual se halló una cantidad de producción mínima de 116,805 paneles solares por año. Estos paneles son de 165W con 36 celdas monocristalinas cada uno y se consideró un precio de venta de S/. 480; este precio responde, a la fuerte presencia de importadores peruanos de paneles solares chinos que tienen trayectoria y experiencia la comercialización de estos productos; por lo tanto, se requiere un precio competitivo para atraer una mayor cantidad de clientes e insertarlos en proyectos sostenibles con energía solar.

- La Tasa Interna de Retorno para el escenario pesimista resulta ser igual a 27% comparado con el WACC de 25% y obteniendo un VAN de S/. 130,601. Por lo tanto, se concluye que el ensamble y venta de paneles solares fotovoltaicos en una planta en la ciudad de Sicuani es rentable económicamente en cualquier escenario planteado: optimista, probable y pesimista.
- Realizando una comparación con la compra de un panel solar directamente de China, el precio propuesto es más alto de lo que vende un mayorista en Alibaba. El factor localización y proveedores de componentes es un factor importante, ya que en la presente investigación se ha priorizado la cercanía a las ciudades clientes sobre la cercanía a los proveedores que se encuentran en los puertos de la costa del país. Sin embargo, la ventaja de ensamblar en Perú es el nivel de producción y la disponibilidad inmediata que pueden tener para la implementación de proyectos a gran escala, disminuyendo tiempos de envío.
- La propuesta de una planta para el ensamble de paneles solares responde principalmente a la casi nula industrialización del país y la poca valoración que se tiene del producto nacional. Además, sería una oportunidad de mejora para la zona sur del Perú, ya que la industrialización trae consigo desarrollo social, trabajo, educación; especialmente cuando se busca desarrollar productos que permitan un desarrollo sostenible en la comunidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- AutoSolar. (2020). *Panel Solar 165W 12V Monocristalino Red Solar*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2020, de <https://autosolar.pe/paneles-solares-12v/panel-solar-165w-12v-monocristalino-red-solar>
- Barandiarán-Gómez, A. (2017). *Plan de Negocios de empresa comercializadora de sistemas integrados de generación de energía fotovoltaicas para viviendas*. Recuperado el 27 de Enero de 2021, de [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3264/MDE\\_1711.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3264/MDE_1711.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Bellini, E. (2020). *La solar cubrió un 1,3% de la demanda eléctrica de Perú en 2019*. Recuperado el 28 de Enero de 2021, de <https://www.pv-magazine-latam.com/2020/01/20/la-solar-cubrio-un-13-de-la-demanda-electrica-de-peru-en-2019/#:~:text=Imprimir%20archivo-,La%20solar%20cubri%C3%B3%20un%201%2C3%25%20de%20la%20demanda%20el%C3%A9ctrica,a%20generar%20unos%201%2C647%20GW.>
- British Petroleum. (2010). *BP Solar completes manufacturing restructuring with closure of Frederick, MD factory*. Recuperado el 2014 de Setiembre de 2020, de <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-solar-completes-manufacturing-restructuring-with-closure-of-frederick-md-factory.html>
- Clean Energy Reviews. (2020). *Solar Panel Construction*. Recuperado el 16 de Diciembre de 2020, de <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>
- Conibeer, G. (2007). Third-generation photovoltaics. *Materials Today*, 10(11), 42-50. doi:10.1016/S1369-7021(07)70278-X

- International Energy Agency. (2014). *Technology Roadmap: Solar photovoltaic energy*. Recuperado el 3 de Noviembre de 2020, de <https://webstore.iea.org/download/direct/792>
- Ivanov, D., Tsipoulanidis, A., & Schönberger, J. (2017). *Global Supply Chain Operations and Management*. Dresden: Springer. Recuperado el 28 de Enero de 2021
- Luzuriaga, J. (2005). *Diseño Integral de Planta de Construcción de Paneles Solares para Calentamiento de Agua con fines domésticos*. Recuperado el 23 de Junio de 2020, de <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/625/1/78667.pdf>
- Ministerio de Comercio Exterior y Turismo. (2015). *GUÍA DE ORIENTACIÓN AL USUARIO DEL TRANSPORTE TERRESTRE*. Recuperado el 28 de Enero de 2021, de [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con5\\_uibd.nsf/D93175C6F8C11A5E052582C50055B8B8/\\$FILE/Paginas\\_01\\_al\\_46\\_Guia\\_Transporte\\_Terrestre.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con5_uibd.nsf/D93175C6F8C11A5E052582C50055B8B8/$FILE/Paginas_01_al_46_Guia_Transporte_Terrestre.pdf)
- Ministerio de Energía y Minas. (2014). *Plan Energético Nacional (2014-2025)*. Recuperado el 16 de Diciembre de 2020, de <https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/InformePlanEnerg%20C3%ADa2025-%20281114.pdf>
- Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Estadística Eléctrica por Regiones*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2020, de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Capitulo%202%20Estadistica%20por%20Regiones%202018.pdf>
- Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Instalan más de 80 mil paneles solares en zonas rurales del Perú*. Recuperado el 26 de Enero de 2021, de [http://www.minem.gob.pe/\\_detallenoticia.php?idSector=8&idTitular=8660](http://www.minem.gob.pe/_detallenoticia.php?idSector=8&idTitular=8660)

- Photovoltaic Geographical Information System. (2020). *Datos mensuales de irradiación*. Recuperado el 17 de Diciembre de 2020, de [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/es/#MR](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#MR)
- Pickerel, K. (2017). *The PV junction box: An overlooked, yet important part of a solar panel*. Recuperado el 3 de Noviembre de 2020, de <https://www.solarpowerworldonline.com/2017/05/pv-junction-box-overlooked-yet-important-part-solar-panel/>
- PV Education. (2020). *Module Materials*. Recuperado el 3 de Noviembre de 2020, de <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/module-materials>
- Redacción APD. (2018). *¿Qué es el entorno VUCA y cómo afecta a la supervivencia de las empresas?* Recuperado el 14 de Septiembre de 2020, de <https://www.apd.es/que-es-el-entorno-vuca-y-como-afecta-a-la-supervivencia-de-las-empresas/>
- Salvia, M., Di Leo, S., Pietrapertosa, F., Papandrea, V., Papagianni, S., Maras, H., . . . Tarevska, Z. (2013). EU state-of-art on resource efficiency. *South East Europe RE-SEETies Project*, 1-75. Recuperado el 3 de Noviembre de 2020, de [https://www.researchgate.net/publication/275620820\\_EU\\_state-of-art\\_on\\_resource\\_efficiency](https://www.researchgate.net/publication/275620820_EU_state-of-art_on_resource_efficiency)
- Sánchez, A., Martínez, D., de la Luz, R., Ortega, J., & Sánchez, P. (2017). *Aplicaciones fotovoltaicas de la energía solar en los sectores residencial, servicio e industrial* (1 ed.). Ciudad de México: Instituto de Energías Renovables. Recuperado el 26 de Enero de 2021, de <http://www.fordecyt.ier.unam.mx/pdf/pdfFotoVoltaico.pdf>
- Senamhi. (2020). *Pronóstico de radiación UV máximo (cielo despejado y mediodía solar) a nivel nacional*. Recuperado el 16 de Diciembre de 2020, de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=radiacion-uv>



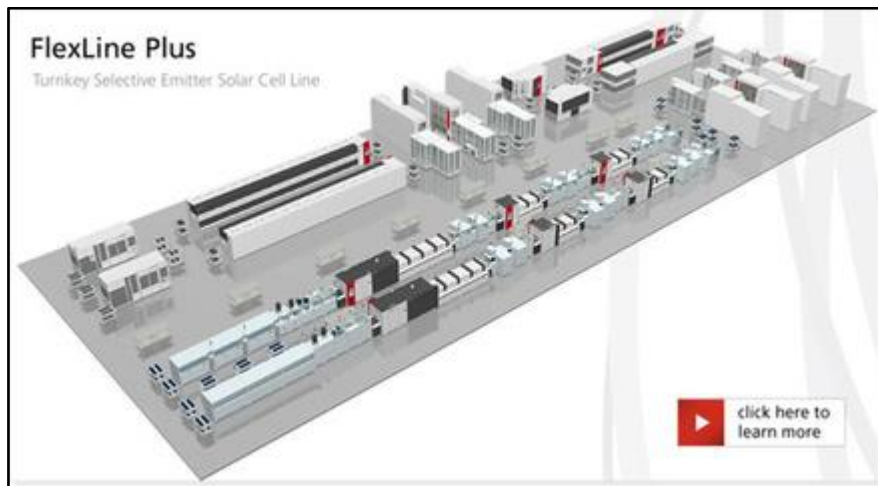
- Strahm, B., Leu, S., Krause, J., Roters, G., & Richter, A. (2018). *Heterojunction Technology*. Recuperado el 2 de Octubre de 2020, de [https://www.meyerburger.com/user\\_upload/dashboard\\_news\\_bundle/da4c7a0b7c33e8e21ccddace78c76513b12cc727.pdf](https://www.meyerburger.com/user_upload/dashboard_news_bundle/da4c7a0b7c33e8e21ccddace78c76513b12cc727.pdf)
- Tawheed, M., Ahammed, A., Sony, S. M., Hossain, F., & Shams-Ul-Islam. (2014). A Review: Comparative studies on different generation solar cells technology. *Institute of Energy*, 51-53. Recuperado el 5 de Noviembre de 2020, de <http://benjapan.org/ICEAB/proceedingsICEAB14/i14%20p33.pdf>
- Turismoi. (2020). *Turismo en Sicuani*. Recuperado el 27 de Enero de 2021, de <https://turismoi.pe/ciudades/capital/sicuani.htm>
- Upadhyaya, V. (2016). Feasibility for Small Scale Rooftop Solar Photovoltaic System in Heritage Buildings of Jaipur. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5(7). doi:10.15680/IJRSET.2016.0507072
- Vidyanandan, K. (2017). An Overview of Factors Affecting the Performance of Solar PV Systems. *Energy Scan*, 2-8.
- Wholesale Solar. (2020). *About BP Solar*. Recuperado el 13 de Septiembre de 2020, de <https://www.wholesalesolar.com/brands/bp-solar>
- Wiesmeier, C., Haedrich, I., Weiss, K.-A., & Duerr, I. (2012). Overview of PV module encapsulation materials. *Photovoltaics International*, 85-92. Recuperado el 3 de Noviembre de 2020, de [https://www.researchgate.net/publication/256374925\\_Overview\\_of\\_PV\\_module\\_encapsulation\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/256374925_Overview_of_PV_module_encapsulation_materials)
- Yan, J., & Saunders, B. (2014). Third-generation solar cells: a review and comparison of polymer:fullerene, hybrid polymer and perovskite solar cells. *RSC Advances*, 4, 43286-43314. doi:10.1039/C4RA07064J

- Zarmai, M. T., Ekere, N. N., Oduoza, C. F., & Amalu, E. H. (2015). A review of interconnection technologies for improved crystalline silicon solar cell photovoltaic module assembly. *Applied Energy*, *154*, 173-182. doi:10.1016/j.apenergy.2015.04.120
- Zhang, T., Wang, M., & Yang, H. (2018). A Review of the Energy Performance and Life-Cycle Assessment of Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems. *Energies*, *11*, 3157. doi:10.3390/en11113157



## ANEXOS

Anexo A: Línea de producción de celdas solares monocristalinas



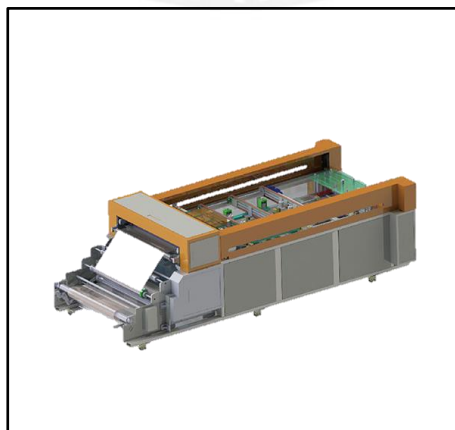
Fuente: Centrotherm, 2020

Anexo B: Glass Loading Machine



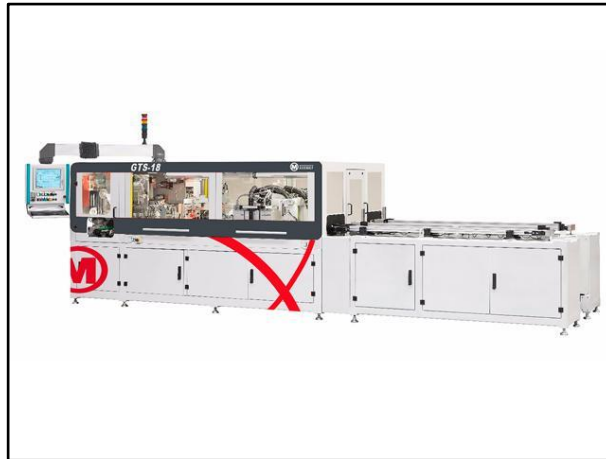
Fuente: Made in China, 2020

Anexo C: EVA Loading Machine



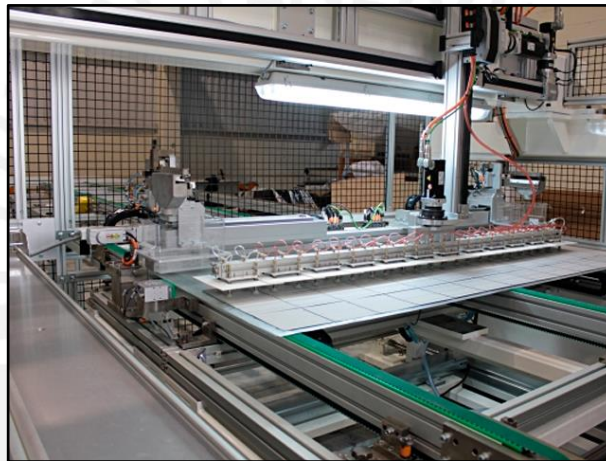
Fuente: Made in China, 2020

## Anexo D: Tabber &amp; Stringer



Fuente: Mondragon Assembly, 2020

## Anexo E: Lay-up Machine



Fuente: Mondragon Assembly, 2020

## Anexo F: Interconnection Machine



Fuente: Mondragon Assembly, 2020

Anexo G: Electroluminescence Machine



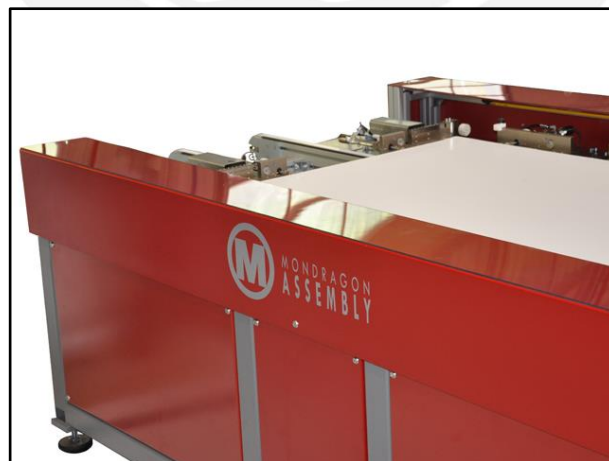
Fuente: Made in China, 2020

Anexo H: Solar Laminator



Fuente: Experia Solution, 2020

Anexo I: Framing Machine



Fuente: Mondragon Assembly, 2020

### Anexo J: Junction Box Sealing Machine



Fuente: Twin Engineers, 2020

### Anexo K: Curing Line



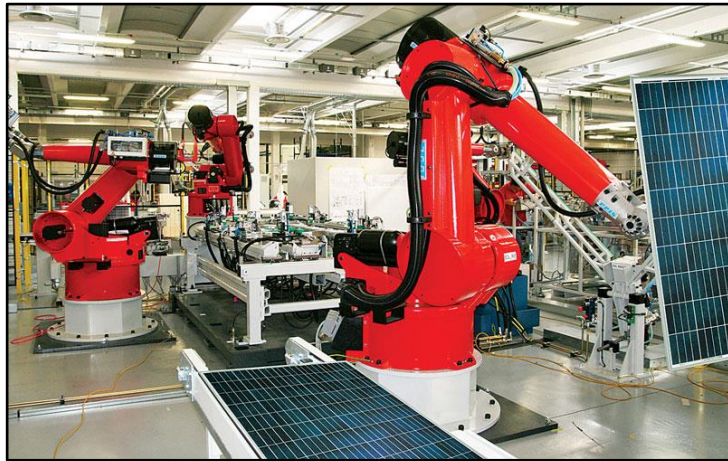
Fuente: Suzhougst, 2020

### Anexo L: Module Tester & Sorter Machine



Fuente: JRT Photovoltaics, 2020

Anexo M: Labelled & Sorter Machine



Fuente: Electronics B2B, 2020

Anexo N: Wrapping Machine



Fuente: Suzhougst, 2020