



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ADMINISTRATIVA

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“AUMENTO DE LA EFICIENCIA EN UN PANEL FOTOVOLTAICO
DE 4 BUS-BAR APLICANDO HERRAMIENTAS DE LEAN SIX SIGMA”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ADMINISTRATIVA

PRESENTA:
ING. JOSÉ ALBERTO GARCÍA JUÁREZ

DIRECTOR DE TESIS:
DR. MARCOS SALAZAR MEDINA

CODIRECTOR DE TESIS:
DR. MAURICIO ROMERO MONTOYA

ORIZABA, VER

ABRIL 2025



Educación
Secretaría de Educación Pública



Instituto Tecnológico de Orizaba
Dirección

Orizaba, Veracruz, 27/11/2023
Dependencia: División de Estudios de
Posgrado e Investigación
Asunto: Autorización de Impresión
OPCION: I

C. JOSÉ ALBERTO GARCÍA JUÁREZ
Candidato(a) a Grado de Maestro en:
INGENIERÍA ADMINISTRATIVA
P R E S E N T E.-

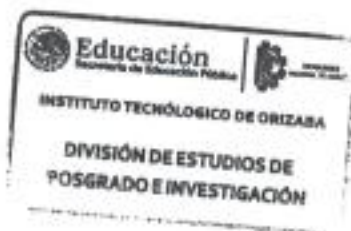
De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"AUMENTO DE LA EFICIENCIA EN UN PANEL FOTOVOLTAICO DE 4 BUS-BAR
APLICANDO HERRAMIENTAS DE LEAN SIX SIGMA".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA – CULTURA®

DRA. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



OG-13-F06



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Oriente 9 4852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94328
Orizaba, Veracruz, Tel. 01 (272) 9105300
e-mail: info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **19/Marzo/2025**
Asunto: Revisión de trabajo escrito

C. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

JOSÉ ALBERTO GARCÍA JUÁREZ

La cual lleva el título de:

**"AUMENTO DE LA EFICIENCIA EN UN PANEL FOTOVOLTAICO DE 4 BUS-BAR APLICANDO
HERRAMIENTAS DE LEAN SIX SIGMA"**

Y concluyen que se acepta y se autoriza su impresión.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA – CULTURA®

PRESIDENTE: DR. MARCOS SALAZAR MEDINA

SECRETARIO: DR. MAURICIO ROMERO MONTOYA

VOCAL: DRA. ALMA GABRIELA ALCALDE PÉREZ

VOCAL SUP: M.C. NURIA ORTEGA PETTERSON


FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

TA-09-18



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320
Orizaba, Veracruz, Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx



Agradecimientos

Me considero una persona agradecida, puesto que cada logro que alcanzo y supero, sé que no lo conseguí solo, por eso, en primer lugar, agradezco infinitamente a Dios, pues estuvo conmigo en cada momento de mi vida, incluido mi etapa de maestría, brindándome el apoyo necesario para seguir adelante y mantenerme firme en las adversidades presentadas, de igual modo, agradezco a mi familia, mis padres y mi abuela, quienes apoyaron y confiaron en mí, dándome las herramientas necesarias para seguir adelante y brindándome su amor para curar cualquier mal presentado.

De misma forma, existieron otros familiares y amigos que considero parte de mi familia, a mi tío Rafael por darme su apoyo moral al entrar en la maestría, así como a mis amigos como Diego y Paola, los cuales me ayudaron anímicamente en este proceso concluido.

Así mismo, agradezco a mis amigos de la maestría, quienes, gracias a ellos, pude superarme como persona, así como estudiante, pues cada uno de ellos tienen sus diferentes cualidades y fortalezas, los cuales tomé como ejemplo, por eso, agradezco a Victor, Diana y Aldair, los cuales admiro mucho.

Por último, agradezco al Tecnológico de Orizaba, quien me garantizó y dio una educación fenomenal, llevaré esta experiencia y conocimiento por el resto de mi vida, no sólo aprendí y crecí, también disfruté y reí, y todo fue gracias a su personal, pues todos los doctores me compartieron de su conocimiento de la mejor forma posible, en especial, mi tutor Marcos Salazar, a quién tomé como ejemplo a seguir, pues admiro muchísimo, de igual modo, un gran reconocimiento al CONAHCYT por su financiamiento durante la maestría, que fomenta la investigación y a la formación de estudiantes.

Resumen

La empresa Sol y Litio de México, ubicada en Río Blanco, Veracruz, se dedica a la fabricación de paneles solares, la cual presenta una problemática en el proceso de soldadura de las celdas fotovoltaicas, debido a que no se cuenta con manuales ni capacitación a operadores de la máquina semiautomática, provocando imprecisión al soldar el ribbon, ocasionando fisuras o líneas defectuosas en las celdas, además, de que la máquina trabaja con celdas de 2 bus-bars, mientras que el panel convencional de la empresa es de 4 bus-bars, aunado a que existen procesos manuales que generan variación en el voltaje de los paneles entre 33-36 V los cuales están por debajo de las especificaciones.

De este modo, se propone mejorar la eficiencia del panel fotovoltaico mediante el uso de herramientas de la metodología Lean Six Sigma para obtener una mayor generación de energía eléctrica en los paneles fotovoltaicos.

La metodología consta de 3 etapas: diagnosticar, diseñar e implementar, donde se utilizarán instrumentos y técnicas como diagrama SIPOC, mapa de flujo de valor, OEE, diseño de experimentos, matriz de priorización y gráficos de control con el propósito de estandarizar procesos, reducir defectos y desperdicios.

Palabras clave: Lean six sigma, paneles fotovoltaicos, métricas, herramientas, diagramas, mapas.

Abstract

The company Sol y Litio de Mexico, located in Rio Blanco, Veracruz, is dedicated to the manufacture of solar panels, which presents a problem in the welding process of photovoltaic cells because there are no manuals or training for operators of the semiautomatic machine. This causes inaccuracy when welding the ribbon, causing cracks or defective lines in the cells, in addition, the machine works with 2 bus-bar cells, while the conventional panel of the company is 4 bus-bars, in addition to the manual processes that generate variation in the amperage of the panels between 7. 5-9 A, which are below the specifications.

Thus, it is proposed to improve the efficiency of the photovoltaic panel through the use of

tools of the Lean Six Sigma methodology to obtain a greater generation of electrical energy in the photovoltaic panels.

The methodology consists of 3 stages: diagnose, design and implement, where tools and techniques such as SIPOC diagram, value stream map, OEE, design of experiments, prioritization matrix and control charts will be used in order to standardize processes, reduce defects and waste.

Keywords: Lean six sigma, photovoltaic panels, metrics, tools, diagrams, maps.

Índice

Resumen.....	v
Abstract.....	v
1 Capítulo 1. Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Posicionamiento de la tesis.....	1
1.3 Planteamiento del problema	1
1.4 Objetivo general.....	4
1.4.1 Objetivos específicos	4
1.5 Justificación	4
1.6 Propuesta de la solución.....	6
1.7 Metodología.....	6
1.8 Organización de la tesis.....	8
2 Capítulo 2 Lean Six Sigma	9
2.1 Lean	9
2.2 Six Sigma	10
2.2.1 Procesos y decisiones basados en datos.....	11
2.2.2 Beneficios de la implementación de un sistema Lean Six Sigma	12
2.3 Etapa 1	14
2.3.1 Objetivos.....	15
2.3.2 Herramientas de la etapa 1	15
2.4 Etapa 2	36
2.4.1 Objetivos.....	36
2.4.2 Herramientas y técnicas aplicadas en la etapa 2.....	37
2.5 Etapa 3	43

2.5.1	Objetivos.....	43
3	Capítulo 3 Aplicación de herramientas de Lean Six Sigma.....	45
3.1	Etapa 1. Diagnóstico.....	45
3.1.1	Elaboración de diagramas de flujo en los procesos de producción.....	46
3.1.2	Tiempos y movimientos.....	51
3.1.3	Mapa de valor actual.....	58
3.2	Etapa II. Diseño	60
3.2.1	Kaizen en proceso de corte de ribbon	60
3.2.2	Estudio de repetibilidad y reproducibilidad en proceso de soldadura manual 64	
3.2.3	Estudio de repetibilidad y reproducibilidad en proceso de pre laminado....	71
3.2.4	Diseño de experimentos.....	76
3.2.5	SMED	79
3.2.6	Kaizen en proceso de colocación de caja de conexiones.....	80
3.2.7	AMEF.....	81
3.2.8	OEE	83
3.2.9	Mapa de Valor Propuesto.....	84
3.3	Etapa III. Análisis	86
3.3.1	Determinación de nuevos Tiempos Estándar	86
3.3.2	Mapa de valor Final.....	87
3.3.3	Estandarización.....	89
4	CAPITULO IV Discusión y resultados.....	91
	Conclusiones.....	92
5	Referencias bibliográficas.....	94
6	Anexos	98

Índice de figuras

Figura 2.1 Fases de metodología Six Sigma (Bahena).....	11
Figura 2.2 Flujo de la metodología (certificación "yellow belt")	14
Figura 2.3 Actividades AMEF (Bahena).....	39
Figura 2.4 Actividades AMEF (Romero, 2015)	41
Figura 3.1 Layout Sol y Litio de México	46
Figura 3.2 Diagrama de bloques de proceso Sol y Litio de México.....	47
Figura 3.3 Flujograma de procedimiento 1	49
Figura 3.4 Composición del panel fotovoltaico de Sol y Litio de México	50
Figura 3.5 VSM actual de la empresa.....	59
Figura 3.6 gráficos R&R en factor del tiempo de soldado	67
Figura 3.7 gráficos R&R en factor de la presión de soldado	68
Figura 3.8 gráficos R&R en factor de la temperatura del cautín	70
Figura 3.9 gráficos R&R en factor de temperatura de la antorcha	73
Figura 3.10 gráficos R&R en factor del voltaje del multímetro	74
Figura 3.11 gráficos R&R en factor del tiempo de soldado	75
Figura 3.12 Interacción para el voltaje con los factores de tiempo y temperatura.....	78
Figura 3.13 AMEF realizado para la maquinaria de la empresa	82
Figura 3.14 VSM propuesto de la empresa	85
Figura 3.15 VSM final de la empresa	88
Figura 3.16 Manual de procedimiento de la máquina stringer	90

Índice de tablas

Tabla 2.1 simbología VSM	16
Tabla 2.2 Simbología ASME	24
Tabla 2.3 Simbología ANSI	26
Tabla 2.4 Simbología ISO	27
Tabla 2.5 Simbología Therbligs	31
Tabla 2.6 Valoraciones de rendimiento	35
Tabla 3.1 Diagrama SIMO operación 1	51
Tabla 3.2 Diagrama SIMO operación 2	52
Tabla 3.3 Diagrama SIMO operación 3	52
Tabla 3.4 Diagrama SIMO operación 4	52
Tabla 3.5 Diagrama SIMO operación 5	53
Tabla 3.6 Diagrama SIMO operación 6	53
Tabla 3.7 Tiempos total mediante diagrama SIMO	54
Tabla 3.8 Número de ciclos en procedimiento 1	55
Tabla 3.9 Tiempo observado en procedimiento 1	55
Tabla 3.10 Tiempo estándar procedimiento 1	56
Tabla 3.11 Valoración de rendimiento	56
Tabla 3.12 Suplementos procedimiento 1	57
Tabla 3.13 Tiempos estándar actuales	57
Tabla 3.14 Cálculo de Tack Time	58
Tabla 3.15 Observaciones de tiras de ribbon	61
Tabla 3.16 Estados de las tiras de ribbon	61
Tabla 3.17 Tareas realizadas en el procedimiento de cortado de ribbon	62
Tabla 3.18 Nuevas actividades del procedimiento de cortado de ribbon	63

Tabla 3.19 Nuevas Observaciones de tiras de ribbon	64
Tabla 3.20 Observaciones de paneles fotovoltaicos con el método actual	76
Tabla 3.21 Parámetros registrados para el diseño de experimentos	77
Tabla 3.22 Observaciones de paneles fotovoltaicos tras aplicar nuevos parámetros	78
Tabla 3.23 Realización de actividades del SMED	79
Tabla 3.24 Mejoras propuestas del SMED	80
Tabla 3.25 Agregado del tiempo superpuesto en actividades del procedimiento de pegado de caja de diodos	81
Tabla 3.26 Porcentajes generales para la obtención del OEE	83
Tabla 3.27 Tiempos estándar finales.....	86

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Introducción

1.2 Posicionamiento de la tesis

El protocolo de investigación presente se posiciona en la línea de generación y aplicación del conocimiento (LGAC) en administración en los sistemas de producción por utilizar herramientas de control estadístico de procesos y de los sistemas de manufactura esbelta con el propósito de una mayor eficiencia y optimizar el proceso de producción de la empresa de Sol y Lito de México.

1.3 Planteamiento del problema

La energía permite satisfacer las necesidades humanas porque brinda desarrollo económico, social y ambiental a las sociedades, de igual modo, facilita la producción de bienes, servicios, comunicación, educación, salud y en general, el confort de las personas, pues dentro de sus usos está el acondicionamiento térmico de edificios y viviendas, el desplazamiento de los vehículos, combustible para cocinar alimentos, entre otros. Actualmente, según la Agencia Internacional de Energía (AIE) en el informe denominado World Energy Outlook 2022, menciona que el mundo está pasando su primera crisis energética global, pues el número de personas sin electricidad aumentó desde el 2022, de igual modo, aumentaron considerablemente los precios de energía debido a la guerra entre Rusia y Ucrania y la demanda energética cada año es mayor, ocasionando un impacto económico y social a gran escala perjudicando a millones de personas.

Una de las alternativas propuestas es el uso de energías renovables, en específico, la solar fotovoltaica y la eólica, las cuales representan una generación mundial de electricidad del 28%, calculando que alcance un 43% en 2030, debido a que existe un desarrollo acelerado en esta década logrando ser imprescindible para los planes y objetivos gubernamentales de diferentes países (Biol, 2022).

Las energías renovables en México tienen un gran potencial, pues en estos últimos años ha existido un incremento considerable del uso de fuentes alternativas para la generación de energía eléctrica, logrando una participación del 31.16%, aumentando un 1.69% con

respecto al 2021, alcanzando una generación neta de energía eléctrica de 106,170.96 GWh de los 340,712.75 GWh generados en 2022.

La energía solar juega un papel muy importante dentro de la generación neta de energía eléctrica, pues es la tercera energía limpia que más genera en el país creando 20,342.04 GWh sólo por debajo de las plantas hidroeléctricas y eólicas (Nahle, 2022).

Los paneles fotovoltaicos son los responsables de la generación de energía solar, gracias al efecto fotovoltaico el cual genera una diferencia de potencial entre dos puntos mediante la radiación electromagnética o radiación solar, sin embargo, las celdas solares a pesar de que absorben un 80% de la radiación incidente, gran parte de la energía se transforma en calor, ocasionando una disminución del voltaje reduciendo lo que puede generar la celda, dicho de este modo, la mayor eficiencia lograda en condiciones especiales de laboratorio es de un 29%, y en paneles convencionales comerciales una eficiencia del 19% (Montecinos & Carvajal, 2018).

En la empresa Sol y Litio de México, ubicada en Río Blanco, Veracruz, la cual se dedica a la fabricación de paneles solares, se presenta una problemática en el proceso de armado del panel fotovoltaico, en específico, en el proceso de soldadura, ya que, dentro de su máquina de soldadura semi-automática, no se cuenta con ficha técnica, lo que implica que se desconoce el funcionamiento y los componentes del equipo y sistema, esto ocasiona que no exista algún operador capacitado para manejar la máquina, más que el jefe de mantenimiento, el cual no está involucrado directamente en ese proceso, de igual modo, no existe un manual general, eléctrico o mecánico para el operador, lo que genera la falta de instrucciones, diagramas y especificaciones para la instalación, operación y mantenimiento del equipo, como consecuencia, los paneles producidos en su fase de prueba no cumplen con las especificaciones de calidad, ya que la falta de precisión de la máquina al soldar el ribbon en las celdas solares provoca fisuras o una línea de ribbon defectuosa en la celda fotovoltaica, además, el funcionamiento de la máquina para integrarse en el proceso completo del armado del panel fotovoltaico desde la adquisición del equipo es nulo e inoperable, ya que, según sus especificaciones, trabaja con celdas solares de 2 bus-bars, causando un grave problema debido a que el panel solar convencional de la empresa

actualmente es de 4 bus-bars, con una eficiencia energética del 18%, el cual está por debajo del promedio del resto de paneles solares convencionales del mercado. Asimismo, al contar con procesos manuales por parte de los operadores, se logra una cantidad de paneles con variaciones en el amperaje, con un rango entre 7.5-9 Amperes, ocasionando que no cumplan con las especificaciones para lanzarlos al consumidor y que este opte por otras alternativas más eficientes (energías no renovables). Por otro lado, los procesos actuales generan mayores desperdicios de tiempos, ya que en ocasiones se presentan defectos en el proceso de soldadura y laminado, provocando que los operadores se queden tiempo extra para cumplir con los paneles que se tienen que producir en un día o incluso se tengan contratiempos en la entrega de lotes de paneles fotovoltaicos, de la misma forma, existen desperdicios de recursos como celdas solares, ribbon, flux, etc., al tener tres procesos manuales, o incluso, que exista personal que no cuente con una carga de trabajo correcta, ocasionando que estén sin una actividad.

1.4 Objetivo general

Mejorar la eficiencia del panel fotovoltaico utilizando herramientas de Lean Six Sigma para contribuir a la sustentabilidad energética y ambiental de la región de las altas montañas.

1.4.1 Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico general de la empresa para conocer las áreas de oportunidad en los procesos de producción de la planta.
- Determinar los factores de la celda fotovoltaica mediante herramientas de manufactura esbelta para conocer su influencia en la calidad del panel fotovoltaico.
- Implementar el piloto propuesto para estandarizar los procesos de la planta.

1.5 Justificación

Río Blanco es un municipio conformado por 41,795 habitantes, ubicado en la región montañosa del estado de Veracruz, el cual, tiene como propósito el uso de tecnologías para lograr una modernización en la ciudad además de ahorros significativos mediante la disminución del consumo eléctrico, ya que, en el año 2020, se inició un proyecto para la instalación de 2700 luminarias LED.

De igual manera, dentro de los proyectos a futuro del municipio de Río Blanco, Veracruz, está considerado la implementación de más luminarias para sustituir las restantes de vapor de sodio, ahora siendo alimentadas con paneles fotovoltaicos de la empresa Sol y Litio de México, logrando una mayor calidad de iluminación, ahorro energético y una alternativa para la reducción de la contaminación atmosférica por el uso de energías limpias, sin embargo, el uso de paneles fotovoltaicos también implica una serie de desafíos técnicos y operativos que deben ser resueltos para garantizar su eficiencia y durabilidad, pues dentro de los parámetros tomados en cuenta para la implementación de estas energías, son las mejores tecnología con alta eficiencia en las celdas solares.

El propósito de este proyecto es mejorar el proceso de armado del panel fotovoltaico, enfocándose en el proceso de soldadura, el cual es clave para la calidad del producto final. Para lograrlo, se propone utilizar herramientas y técnicas de Lean Six Sigma, la cual permite optimizar los recursos, eliminar los desperdicios y aumentar la satisfacción del cliente, con estas herramientas, se busca obtener una ficha técnica de la máquina de soldadura semiautomática, la cual permita conocer el funcionamiento y los componentes del equipo y

sistema, así como elaborar un manual general, eléctrico y mecánico para el operador, el cual contenga las instrucciones, diagramas y especificaciones necesarias para la instalación, operación y mantenimiento del equipo, de esta manera, se espera capacitar al personal encargado del proceso de soldadura, reducir los defectos y aumentar la calidad de los paneles fotovoltaicos, los cuales deben cumplir con las normas establecidas.

Este proyecto se alinea al Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático **(Pronace – Energía y Cambio Climático)** ya que el proyecto de tesis busca combatir los efectos del cambio climático mediante la propuesta de un prototipo de panel fotovoltaico con una alta eficiencia energética, el cual ofrece una alternativa para la reducción de gases de efecto invernadero. Asimismo, este proyecto promueve el proceso productivo de una empresa local del estado de Veracruz, basado en el uso de la energía solar proporcionada por el innovador panel con una de las tecnologías de punta por las celdas solares de 5 bus-bar.

Social: El aumento de eficiencia en un panel fotovoltaico contribuye a mejorar la salud de las personas y el medio ambiente, ya que, al generar una mayor capacidad de energía eléctrica de manera limpia, reduce la emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación atmosférica que causan los combustibles fósiles.

Cultural: El resultado de un nuevo tipo de panel fotovoltaico de alta tecnología permitirá impulsar una mayor promoción de las energías renovables en la región, captando la atención de las personas de los alrededores por las innovadoras celdas solares, así mismo, brindarles información sobre las ventajas y beneficios del uso de energías limpias y como impactan al cambio climático.

Económico: Al optimizar el proceso, reduciendo el desperdicio y los gastos de materia prima, mano de obra, y tiempos de fabricación, permitirá disminuir el costo de fabricación de un panel fotovoltaico, lo que podrá acceder a nuevas estrategias comerciales con el propósito de aumentar el beneficio de la empresa.

Tecnológico: La implementación de celdas solares con 5 bus-bars es una de las mejores tecnologías para aumentar la eficiencia de un panel fotovoltaico el cual permitirá una mayor captación de radiación incidente y de esta forma, un aumento de la generación de energía eléctrica.

1.6 Propuesta de la solución

Aplicando herramientas de Lean Six Sigma a los procesos de producción de la planta se logra realizar una mejora en la eficiencia en los paneles fotovoltaicos contribuyendo a la sustentabilidad energética y ambiental de la región de las altas montañas.

1.7 Metodología

De acuerdo con la tesis de (Alayo), junto a (Medina & Montalvo) y (Cevallos & Hidrovo), además de artículos como el de (Barcia, Verdezoto, & Abad, 2019) y (Felizzola & Luna, 2014) así como el libro de (Socconini, Lean Six Sigma Green Belt para la excelencia en los negocios, 2015), se propone que la primera etapa sea la siguiente:

Etapa 1. Diagnóstico: Se identificará la situación actual de la empresa describiendo el proceso completo de la fabricación de un panel fotovoltaico, con el propósito de conocer las variables a mejorar y establecer parámetros para compararlos con el piloto propuesto.

- Mapa de valor actual: permitirá visualizar la cadena de valor del proceso de armado del panel fotovoltaico y detectar las fuentes de desperdicio.
- Estudio de tiempos y movimientos: permitirá medir y conocer los tiempos de cada procedimiento efectuado en la empresa, con el fin de establecer parámetros y compararlos al final con el piloto propuesto.

En el artículo de (Malpartida, y otros, 2021), (Gomez & Muñoz, 2023) y (Carrera, 2019) para determinar los factores críticos de sus respectivos productos y servicios, se utilizaron determinadas herramientas de estadística, de este modo, la segunda etapa de la metodología consiste en:

Etapa 2: Diseño: Se seleccionará las características claves del producto a mejorar, estableciendo las variables para modificarlas junto con un sistema de medición que se adecue al proceso y meta, para el cumplimiento de la etapa 2 se aplicarán las siguientes herramientas:

- OEE (Efectividad total del equipo): permitirá medir el rendimiento del equipo de soldadura manual, considerando tres factores: la disponibilidad, el rendimiento y la calidad.

- Diseño de experimentos: permitirá evaluar el efecto de varias variables sobre la respuesta de interés, que en este caso sería la calidad del panel fotovoltaico, y optimizar los parámetros que la afectan.
- Estudios de repetitividad y reproducibilidad: permitirán evaluar la precisión y la consistencia del sistema de medición, es decir, la capacidad de obtener los mismos resultados bajo las mismas condiciones.
- Análisis de varianza: Permitirá comparar las medias de diferentes grupos o tratamientos, para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos.
- AMEF: permitirá definir, identificar y eliminar las fallas potenciales que podrían afectar la calidad del panel fotovoltaico, así como sus posibles efectos y causas. Con esta herramienta, se podrá priorizar las fallas según su severidad, ocurrencia y detección, y establecer acciones preventivas y correctivas para evitarlas o minimizarlas.
- SMED: permitirá reducir el tiempo de cambio de la soldadura manual, lo que aumentará la productividad, la flexibilidad y la calidad del proceso.

En los artículos de investigación de (Carrera, 2019), (Ticona, 2022) y (Teiler, Traverso, & Bustos, 2021) en sus fases de implementación y control para aplicar sus modelos propuestos y mantenerlos en funcionamiento, se utilizaron determinadas herramientas de Lean Six Sigma además de métricas para monitorear su desempeño, de este modo la última etapa de la metodología consiste en:

Etapa 3: Implementación: Se implementará el piloto propuesto, optimizando el proceso y estableciendo límites de operación, verificando el mejoramiento del desempeño y la observación de las variables para controlar y mejorar. Las herramientas a utilizar son:

- Mapa de proceso final: permitirá visualizar el proceso mejorado de la fabricación de un panel fotovoltaico, mostrando los cambios realizados y los resultados obtenidos.
- Mantenimiento de procedimientos: permitirá asegurar la continuidad y la calidad del proceso mejorado, documentando las actividades, los responsables, los recursos y los estándares a seguir.
- Calendarios de calibración: Permitirán verificar el correcto funcionamiento del equipo de soldadura semi-automática y del sistema de medición, realizando revisiones periódicas y ajustes necesarios.

1.8 Organización de la tesis

La tesis denominada “Aumento de la eficiencia en un panel fotovoltaico de 4 bus-bar aplicando herramientas de lean six sigma” está formada por 5 capítulos, los cuales son:

Capítulo 1. Generalidades: Describen aspectos que ayudan a comprender el contexto y la meta deseada mediante elementos como introducción, planteamiento del problema, objetivo general y específicos, justificación, metodología, etc.

Capítulo 2. Marco teórico: Describe la teoría de las herramientas y metodologías de mejora continua utilizadas en el presente proyecto de tesis, desde la definición de la filosofía Lean, hasta su procedimiento de las metodologías.

Capítulo 3. Aplicación de herramientas de Lean Six Sigma: Explica las 3 fases de la metodología propuesta de la tesis, desde la evaluación de la situación actual de la empresa hasta la estandarización de las herramientas aplicadas, con el fin de mantenerlas.

Capítulo 4. Resultados: Muestra la mejora lograda, reflejada en las mediciones de voltaje y amperaje del panel fotovoltaico del modelo actual contra el modelo propuesto.

Capítulo 2 Lean Six Sigma

2.1 Lean

La filosofía Lean es un conjunto de prácticas, estrategias y métodos que se pueden aplicar específicamente en el mundo empresarial, esta filosofía se enfoca en ayudar a mejorar el negocio y eliminar cualquier desperdicio, algunas personas creen que este modelo solo se puede usar en la producción o la fabricación, pero en realidad es un concepto que se puede aplicar fácilmente a cualquier tipo de empresa, de este modo, puede ayudar a administrar una variedad de aspectos de la operación de una organización, como el valor del cliente, las redes de suministro y las operaciones internas.

El objetivo principal de la filosofía Lean es reducir las tres variaciones principales de fabricación, las tres variaciones son muda, mura y muri. En Japón, "muda" significa "inutilidad" o "ineficacia", esto se refiere al "desperdicio" en los negocios, y, para ayudar a eliminar y reducir el desperdicio, la empresa debe primero distinguir entre las actividades que generan valor y las que están generando gastos innecesarios.

En los procesos de flujo de trabajo empresarial, "mura" se puede definir como un "desnivel", este tipo de desperdicio puede causar tiempos de inactividad innecesarios o fases en las que la maquinaria, los procesos e incluso los empleados experimentan una gran cantidad de estrés innecesario, por eso, desde la perspectiva del negocio, la disparidad provocará la incertidumbre, si la incertidumbre es alta, es muy difícil planificar para el futuro y dirigir un negocio. Cualquier tipo de interrupción en el flujo de trabajo puede reducir la capacidad de la empresa para satisfacer las necesidades del cliente, y así, generar cierta incertidumbre. En este contexto puede causar muchos retrasos y caos si el cliente solicita un producto de la empresa y tiene la expectativa de que el producto se entregará en una fecha determinada.

Finalmente, "muri" se refiere a la sobrecarga de un sistema o una comprensión deficiente de cómo funciona ese sistema, si un proceso comercial o un sistema de producción comienza a acumular demasiado trabajo, es posible que no solo las máquinas, sino también los trabajadores sufran de inestabilidad. Las altas cargas de trabajo pueden causar fallas del sistema y una gran cantidad de productos defectuosos.

El kaizen es otra idea que viene con la metodología Lean y puede ir de la mano con la reducción e identificación de desperdicios, esto es lo que se conoce como "mejora

continua", y ayuda a crear una cultura en la empresa en la que los empleados pueden elegir mejorar cuando lo deseen, de esta manera, casi todas las industrias han comenzado a implementar esta idea (Edge, 2019).

2.2 Six Sigma

Utiliza una metodología que reduce el desperdicio usando herramientas estadísticas y administrativas para reducir la variación en los procesos y mejorar significativamente la calidad de cualquier proceso. La palabra griega para medir la variabilidad es "sigma".

Cuando se vio en la necesidad de igualar o superar a sus competidores japoneses, que habían alcanzado un nivel de calidad cuatro sigmas (99 partes por millón de buenos productos) en un momento en que la industria todavía estaba en el nivel tres sigma (93 ppm), se desarrolló el sistema Six Sigma. La metodología DMAMC (DMAIC, en inglés) es la base del sistema Six Sigma y permite el desarrollo de mejoras siguiendo estos pasos.

El sistema Lean Six Sigma puede convertirse en una filosofía, metodología y conjunto de herramientas muy poderosas si se combina con otros componentes, esto permitirá integrar la experiencia acumulada durante todo el proceso de mejora. El sistema es sencillo y efectivo para diseñar y administrar cualquier empresa, sin importar su tamaño o especialización, tomando en cuenta todos los aspectos organizativos, desde el diseño del plan hasta el producto, pasando por la comercialización, la logística, la fabricación, los servicios, el apoyo administrativo, la contabilidad, la calidad, los sistemas de información, la ingeniería y el mantenimiento (Socconini & Reato, Lean Six Sigma sistema de gestión para liderar empresas, 2019).

Seis Sigma es un método para administrar un negocio, ya que prioriza al cliente y utiliza hechos y datos para lograr mejores resultados, se enfoca en tres áreas principales:

- Aumentar el nivel de satisfacción del cliente;
- Disminuir el tiempo de ciclo;
- Disminuir la cantidad de errores;

La siguiente imagen muestra las fases de la metodología Six Sigma y los problemas que aborda.

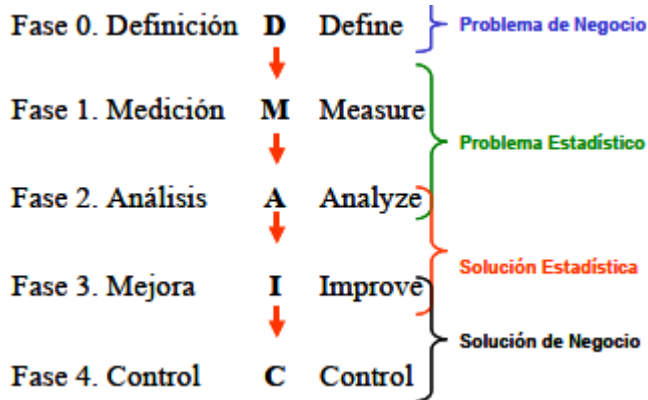


Figura 2.1 Fases de metodología Six Sigma (Bahena).

La desviación estándar, representada por la letra griega minúscula sigma (σ), es una forma estadística de describir la variación presente en un conjunto de datos; por ejemplo, se pueden encontrar solo 3.4 defectos por millón de oportunidades o actividades.

Seis Sigma implica el uso de herramientas estadísticas en una metodología estructurada para aumentar el conocimiento necesario para lograr productos y servicios de una mejor manera, más rápido y al más bajo costo que la competencia (Socconini & Reato, Lean Six Sigma sistema de gestión para liderar empresas, 2019).

Se caracteriza por la aplicación continua y disciplinada de una estrategia maestra "proyecto por proyecto", recomendada por Joseph Juran en su trilogía de calidad, donde se seleccionan proyectos utilizando estrategias clave de negocios, lo que resulta en la recuperación de la inversión realizada y el aumento de los márgenes de utilidad. Las personas que coordinan proyectos de Seis Sigma se conocen como Black Belts, Green Belts, etc.

2.2.1 Procesos y decisiones basados en datos

Las organizaciones, los equipos y los gestores de proyectos intentan implementar estrategias basadas en métricas y mediciones al implementar Seis Sigma, pero, no elimina la necesidad de un liderazgo experimentado ni niega la importancia de la intuición en cualquier proceso.

En cambio, Seis Sigma proporciona una base matemática y estadística para la toma de decisiones mediante el uso de otras habilidades, experiencia y conocimientos para el proceso de toma de decisiones. Según la experiencia, un proceso no funciona; las

estadísticas lo demuestran, por eso, las herramientas Seis Sigma ayudan a las organizaciones a corroborar las suposiciones de los directores de proyecto que creen que un cambio específico puede mejorar la producción.

No obstante, Seis Sigma se considera con frecuencia caro o innecesario, especialmente para las organizaciones pequeñas o medianas, porque es un método expansivo que requiere un compromiso de mejora continua, la falta de apoyo, recursos o conocimientos, la ejecución deficiente de los proyectos, el acceso desigual a datos estadísticos válidos y la preocupación por el uso de la metodología en nuevos sectores son algunos de los obstáculos y retos que con frecuencia se encuentran en el camino hacia los resultados positivos de Seis Sigma.

Los procesos de toma de decisiones en una organización podrían ocurrir de la siguiente manera sin la medición y el análisis adecuados según (Lean six sigma yellow belt certification, 2018):

- Alguien que tiene poder en la organización tiene una buena idea o se preocupa por alguien más.
- Los responsables de la toma de decisiones creen que la idea tendrá éxito basándose en experiencias o conocimientos previos.
- El concepto se implementa, a veces en modo beta para reducir gastos y riesgos.
- El éxito de una idea se analiza después de su aplicación; los problemas que surgen después afectan los productos o alguna otra cosa en el presente o en el futuro.

2.2.2 Beneficios de la implementación de un sistema Lean Six Sigma

La implementación del sistema Lean Six Sigma logra resultados medibles, lo que generalmente se considera un gran beneficio, sin embargo, es importante tener en cuenta que una transformación de este tipo se lleva a cabo siempre a largo plazo, a pesar de que los primeros resultados surjan en un período relativamente corto, no obstante, no es necesario desesperarse si los beneficios a corto plazo no se materializan con la rapidez prevista, algunos de estos beneficios son los siguientes de acuerdo con (Socconini & Reato, Lean Six Sigma sistema de gestión para liderar empresas, 2019):

- Un mejor rendimiento.
- Reducir los costos en todos los aspectos, como las ventas, la publicidad, gastos generales, calidad, mantenimiento, logística, fabricación, etc.

- Un aumento en las ganancias.
- Menos espacio.
- Reducir el volumen de inventario.
- Aumentar el flujo de caja.
- Una mayor capacidad.
- Aumento de la calidad.
- Disminuir los gastos.
- Disminuir los gastos de inversión.
- Eficacia en el proceso.

Beneficios no financieros

- Un mayor nivel de satisfacción del cliente
- Un mayor nivel de satisfacción del personal.
- Una mejor comunicación tanto interna como externa.
- Una disminución en la cantidad de personas que trabajan.
- Aumento de la seguridad.
- Un aumento en las ideas de mejora de las personas y los equipos.
- Aumentar la cantidad de mejoras implementadas.
- Continuos avances en la cultura implementada.
- Aumento de la disciplina.
- Empleados que siguen procedimientos.
- Mantener y reforzar los principios y objetivos de la empresa.

A continuación, se presenta el esquema de la metodología (Humberto & de la Vara, 2013).

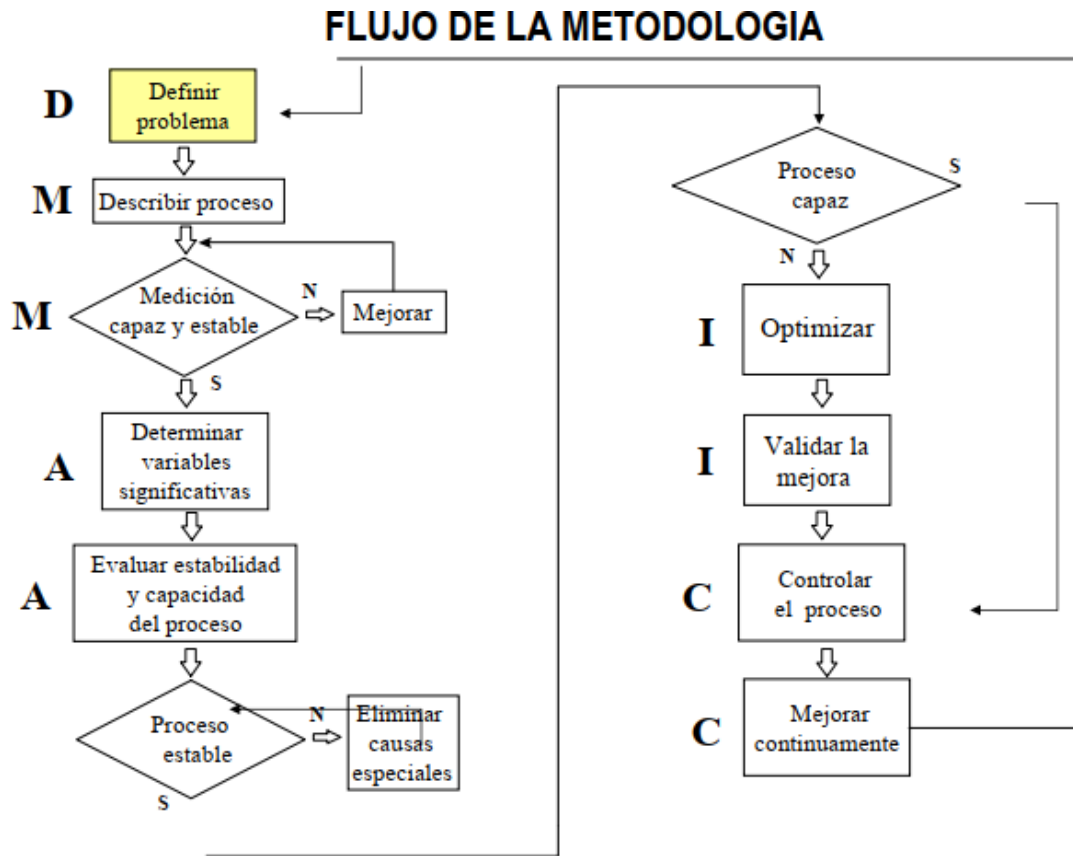


Figura 2.2 Flujo de la metodología (certificación "yellow belt")

2.3 Etapa 1

La identificación del problema en la planta de paneles solares se determinó desde el inicio, puesto que el jefe de mantenimiento, conocía las variaciones que existen en los paneles fotovoltaicos producidos, de este modo, se considera utilizar parte de metodología de lean six sigma así como algunas de sus herramientas y técnicas.

Basándose en la fase de “medir” de la metodología lean six sigma, esta etapa busca comprender bien qué hace el proceso y cómo funciona, además, este paso se centra en elegir una o más características para medir, determinar cómo se medirá, crear un plan de recolección de datos y recopilar datos (Bahena).

De esta manera, antes de que comiencen las mejoras, se debe desarrollar una métrica de referencia para comprender cómo debe medirse un proceso y cómo funciona realmente,

además, proporciona un punto de comparación para que se pueda demostrar la mejora que han hecho al final de las etapas (Lean six sigma yellow belt certification, 2018).

Las herramientas se seleccionan según las circunstancias y las necesidades; no necesariamente se utilizan todas las de la fase de “medir”, por este modo, es crucial elegir cuidadosamente las que proporcionen la información más objetiva y precisa.

2.3.1 Objetivos

- Comprender los puntos clave de la decisión y la funcionalidad detallada del proceso.
- establecer métricas para evaluar el desempeño del proceso y estimar la línea base.
- Recopilar datos del proceso para procesarlos durante la fase de análisis.
- Evaluar el sistema de medición para analizar y medir los errores relacionados con la métrica (Socconini, Lean Six Sigma Green Belt para la excelencia en los negocios, 2015).

2.3.2 Herramientas de la etapa 1

VSM (Mapa de la cadena de valor)

Los mapas de flujo de valor, también conocidos como VSM, son una técnica de producción lean que analiza, diseña y gestiona el flujo de materiales y la información necesaria para entregar un producto a un cliente. También se conocen como "mapas de flujo de información y materiales" y utilizan un sistema de símbolos estándar para representar una variedad de procesos de trabajo y flujos de información (Mukherjee, s.f.).

Los mapas de flujo de valor ofrecen información detallada sobre todos los procesos de una empresa, es por esto que, el mapa de flujo de valor ayuda a comprender mejor cómo se desarrolla un proceso e identificar las acciones que no generan valor.

El mapa de flujo de valor también se utiliza como una herramienta estratégica para crear planes y proyectos de mejora con objetivos y enfoques específicos, por lo tanto, si se concentra en las principales limitaciones, la estrategia y la implementación de un proyecto tendrán mayores posibilidades de éxito (Socconini & Reato, Lean Six Sigma sistema de gestión para liderar empresas, 2019).

Ventajas

- Los mapas de flujo de valor son esenciales para la sostenibilidad de una empresa, y algunos de sus beneficios incluyen:

- La reducción o eliminación del despilfarro el cual mejora los resultados comerciales, además descubre la fuente del problema y el desperdicio.
- Los equipos pueden mejorar el comportamiento, la cultura, la comunicación y la colaboración de manera consciente al identificar entregas con desperdicio en la visualización de flujos de valor.
- Los equipos descartan opiniones individuales y definen prioridades en función de la perspectiva del cliente (Mukherjee, s.f.).

Elementos del VSM

Los símbolos del Value Stream Mapping son una parte esencial para representar visualmente los procesos en un sistema productivo, estos símbolos permiten crear mapas de flujo de valor que ayudan a analizar y mejorar la eficiencia de los procesos. A continuación, se muestran los símbolos juntos con su significado según (Socconini, Lean Six Sigma Yellow Belt Certification Manual, 2021).

Tabla 2.1 simbología VSM

Símbolo	Nombre	Descripción
	Caja de procesos	Representa un proceso u operación a través del cual fluye el trabajo o material. Normalmente no se incluye los pasos de proceso detallados a menos que haya una acumulación significativa de inventario o una mezcla entre pasos de proceso.
	Fuentes externas	Representa tanto a los proveedores como a los clientes. El proveedor es el punto de partida y suele estar en la esquina superior derecha de la hoja de ruta. El cliente es el punto final y suele estar en la esquina superior derecha de la tabla.

	Envíos	El proceso de transporte implica la recepción de materiales de un proveedor externo o la entrega de productos o servicios terminados al cliente.
	Caja de datos	Este símbolo se encuentra bajo otros símbolos para presentar información crítica. Normalmente, mostrará datos como la frecuencia de envío, la tamaño del lote, la información del material, etc. Cuando se encuentra dentro de una caja de proceso, suele mostrar información como el tiempo de ciclo, el tiempo de cambio, el tiempo de actividad, el tiempo de avance, la capacidad disponible, la producción, etc.
	Inventario	Representa el nivel de inventario antes y después de cada proceso. El nivel de inventario se muestra bajo el nombre del símbolo.
	Empleados	Representa a uno o más empleados. El número de trabajadores se muestra bajo el símbolo.

	Flecha de empuje	Representa el movimiento del material de un proceso a otro. Se utiliza cuando el proceso anterior "empuja" los materiales al siguiente proceso, independientemente de lo que realmente necesite el siguiente proceso.
	Recibos de material y Envíos	Representa el movimiento de bienes o servicios terminados hacia el cliente. También se puede usar para representar el movimiento de materiales primarios de proveedores a la instalación.
	Flujo electrónico de información	Representa el flujo de información electrónica o datos.
	Flujo de información manual	Representa el flujo de información manual.
	Go see	Hace referencia a la confirmación visual de algo durante el proceso. La programación "Go See" es un conteo manual de inventario para realizar ajustes de programación.
	Cronograma (actividades de valor agregado)	Representa un cronograma cuando una actividad agrega valor.
	Timeline (Non-Value Added Activities)	Representa un cronograma cuando una actividad no agrega valor.

	Flecha de retirada	Representa la eliminación de materiales del proceso anterior.
	Publicación Kanban	Representa el lugar donde se almacenan las tarjetas Kanban.
	Señal Kanban	Utilizado para indicar el cambio y el inicio de la producción de una parte o servicio específica. Cuando el nivel de inventario en el supermercado cae por debajo del nivel mínimo requerido, se usa con frecuencia.
	Supermercado	Representa un nivel de inventario predeterminado que el siguiente proceso o el cliente puede usar o extraer cuando sea necesario. El proceso de proveedor recargará el inventario del supermercado una vez que sea consumido por el siguiente proceso.
	Buffer / Stock de seguridad	Representa el inventario de seguridad necesario para continuar la producción en caso de que el proceso enfrente problemas relacionados con fluctuaciones en la demanda o falta de actividad de producción.
	Nivelación de carga	Utilizado para nivelar el volumen de producción y mezclar

	Kaizen	Describe áreas de oportunidad y la ejecución de eventos kaizen para lograr el estado futuro.
---	--------	--

Mapa del estado actual

Para (Socconini & Reato, Lean Six Sigma sistema de gestión para liderar empresas, 2019) refleja la situación actual de la cadena de valor y crea un documento de referencia para determinar las actividades que no aportan valor al proceso.

Procedimientos que se deben seguir para crear un mapa del flujo de valor actual:

1. Definir la extensión del proceso, bastará con elegir cualquiera de los procesos internos que hayan causado el problema principal de la empresa.
2. Organizar los productos o la familia de servicios en función de los pasos o equipos necesarios para definir el producto o la familia de servicios.
3. Crear el mapa de flujo de valor actual para identificar problemas en el sistema e identificar desechos durante el proceso.
4. Crear un mapa del flujo de valor futuro para determinar la solución posible y los resultados previstos, para llevar a cabo la estrategia, este mapa debe convertirse en un plan táctico.

Según la información de (Lean Solution, s.f.) en esta etapa, se debe determinar cómo funcionará el proceso en un plazo corto, analizar y responder a las preguntas como ¿qué procesos se integran? y ¿cuántos trabajadores requiere la línea? ¿Cuántos equipos hay? ¿Qué espacio hay? ¿Y cuántos productos están en proceso?

El takt time (TT) se obtiene dividiendo el tiempo de apertura menos los tiempos bajos por día entre la cantidad de piezas a producir es un día.

El lead time se obtiene sumando todos los tiempos muertos.

Mapa del futuro estado

Presenta la mejor solución de operación a corto plazo teniendo en cuenta las mejoras que se realizarán en el sistema de producción.

Procedimientos para crear un mapa de flujo de valor en el futuro

1. Determinar la capacidad del proceso.
2. Determinar cómo conectar todos los pasos del proceso en un flujo continuo.
3. Describir el flujo de valor futuro necesario para obtener mejores resultados.
4. Calcular los posibles resultados.
5. Crear un plan para el futuro de la empresa

Para mejorar un proceso, es necesario comprender su estado actual, y esto se puede lograr utilizando las métricas más apropiadas (Socconini & Reato, Lean Six Sigma sistema de gestión para liderar empresas, 2019).

Diagramas de flujo

Para facilitar el estudio del proceso de fabricación, se utilizan diagramas simplificados que usan un lenguaje y unos símbolos determinados que incluyen una variedad de conjuntos y estándares de elementos. La descripción más rápida y efectiva de la secuencia de una actividad productiva se puede obtener utilizando estos diagramas (Palacios, 2016).

De este modo, para (Calderón & Ortega, 2009) son representaciones simbólicas de los procedimientos administrativos porque los símbolos se conectan con flechas para mostrar la secuencia de las operaciones. Por esta razón, se les conoce como diagramas de flujo.

Esta herramienta es muy beneficiosa para una organización porque ayuda a mejorar la gestión de la organización en áreas como:

- Muestran cómo se compone un proceso o procedimiento de manera general, lo que facilita su comprensión al representarlo como un dibujo. Los dibujos son fáciles de reconocer por el cerebro humano. Un buen diagrama de flujo puede usar varias páginas de texto como sustituto.
- Permiten identificar responsabilidades y puntos de decisión, así como problemas como cuellos de botella o posibles duplicidades que se presentan durante el desarrollo de los procedimientos.

- Facilitan a los funcionarios el análisis de procedimientos, ilustrando quién proporciona insumos o recursos y a quién se dirigen.
- Sirven como herramientas para capacitar a los nuevos funcionarios y brindan apoyo cuando el titular del procedimiento se ausenta para que otro funcionario lo reemplace.
- La creación de un diagrama de flujo es una actividad que agrega valor porque el proceso que representa está disponible para ser analizado tanto por quienes lo realizan como por todas las partes interesadas, quienes podrán aportar nuevas ideas para cambiar y mejorarlo.

Procedimiento de los diagramas

La construcción de diagramas de flujo requiere la consideración de una serie de pasos, que sirven como guía para su diseño. Los siguientes pasos se enumeran a continuación:

- Establecer un grupo de trabajo en el que participen aquellos que son responsables de la ejecución y el desarrollo de procedimientos que se encuentran debidamente interrelacionados y que forman un proceso.
- Definir el objetivo del diseño de diagramas y quién lo utilizará, ya que esto permitirá definir el grado de detalle y el tipo de diagrama a utilizar.
- Determinar los límites de cada procedimiento identificando su primer y último paso, ya que, en los procedimientos interconectados, el comienzo de uno es la conclusión del proceso previo y su término es el inicio del proceso siguiente.
- Una vez que se han establecido los límites de cada procedimiento, se identifican los pasos que están dentro de sus límites y se ordenan en orden cronológico.
- Al realizar la ubicación de pasos, se deben identificar los puntos de decisión y formularlos en forma de pregunta, identificando las dos ramas posibles correspondientes con los términos SI/NO.
- Al identificar y ubicar los pasos en orden cronológico, es recomendable revisar el procedimiento para asegurarse de que esté completo y ordenado, evitando así la omisión de pasos relevantes.
- Construir el diagrama de acuerdo con la secuencia cronológica y asignar los símbolos adecuados.

Tipos de diagrama

Los diagramas de flujo, también conocidos como fluxogramas, se clasifican en tres categorías:

El diagrama de flujo vertical: también conocido como diagrama de análisis de procesos, es un gráfico compuesto por columnas y líneas. Los símbolos de operación, transporte, control, espera y archivo se encuentran en las columnas, así como el espacio de ejecución y el tiempo invertido. Los dos últimos se pueden incluir en el diagrama de flujo. Las líneas destacan la secuencia de los pasos y hacen referencia a los funcionarios involucrados en cada paso. Este tipo de diagrama es muy útil para armar un procedimiento, ayudar a capacitar al personal y racionalizar el trabajo.

Diagrama de flujo horizontal: este diagrama de flujo utiliza los mismos símbolos que el diagrama de flujo vertical, pero la secuencia de información se muestra de forma horizontal. Este diagrama sirve para destacar a las personas, unidades u organismos que participan en un procedimiento o rutina específico, y es bastante común que se utilice para visualizar las actividades y responsabilidades asignadas a cada uno de estos actores, lo que permite comparar la distribución de tareas y racionalizar o redistribuir el trabajo.

Diagrama de flujo de bloques: muestra la rutina a través de una secuencia de bloques encadenados entre sí, cada uno con su propio significado. No se limita a líneas y columnas preestablecidas como en los diagramas anteriores, sino que utiliza una simbología mucho más rica y variada.

Simbología

El lenguaje gráfico utilizado en los diagramas de flujo está compuesto por símbolos que tienen un significado distinto, lo que permite que la interpretación y el análisis de los diagramas sean claros y precisos, además, para garantizar la interpretación unívoca del diagrama de flujo, es necesario diseñar y seleccionar ciertos símbolos que tradicionalmente tienen un significado preciso, así como establecer pautas claras para su aplicación.

Sin embargo, la simbología utilizada en los diagramas de flujo varía según la discreción de cada institución, en este contexto, varias organizaciones han implementado una variedad de simbologías para representar diagramas de flujo. Las siguientes son las más comunes y utilizadas:

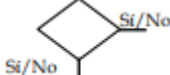
American Society of Mechanical Engineers (ASME)

La Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) fue fundada en 1880 como una organización profesional sin fines de lucro que fomenta el arte, la ciencia y la práctica de la ingeniería mecánica multidisciplinaria y relacionadas en todo el mundo. La misión principal de ASME es permitir que los profesionales de la ingeniería mecánica contribuyan al bienestar de la humanidad.

Aunque esta simbología ha sido ampliamente aceptada, su uso en la diagramación administrativa es limitado debido a la falta de un símbolo convencional que pueda satisfacer todas las necesidades.

Tabla 2.2 Simbología ASME

Símbolo	Nombre	Descripción
	Origen	El paso previo que da origen al proceso se identifica con este símbolo; no forma parte del nuevo proceso.
	Operación	Indica las fases principales del procedimiento, método o proceso. Cada vez que un documento es modificado intencionalmente en cualquiera de sus características, se produce una operación.
	Inspección	Indica cada vez que se verifica un documento o paso del proceso en términos de calidad, cantidad o características. Es una etapa de control.
	Transporte	Indica cada vez que un documento se mueve o se traslada a otro funcionario u oficina.

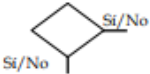
	Demora	Indica cuando un documento o proceso se encuentra detenido porque se necesita realizar otra operación o porque el tiempo de respuesta es lento.
	Almacenamiento	Indica que un documento o información permanece dentro de un archivo.
	Almacenamiento temporal	indica que un documento o información se ha depositado temporalmente dentro de un archivo mientras se inicia el siguiente paso.
	Decisión	Indica un punto dentro del flujo en el que existen múltiples rutas potenciales.

American National Standard Institute (ANSI)

El Instituto Nacional de Normalización de los Estados Unidos, también conocido como ANSI, es una organización privada sin fines lucrativos que supervisa y coordina las actividades de normalización voluntaria y evaluación de conformidad en los Estados Unidos.

El ANSI ha creado una simbología para representar los flujos de información en los diagramas orientados al procesamiento electrónico de datos, también conocidos como EDP. Algunos de estos símbolos se han utilizado ampliamente en la creación de diagramas de flujo en el trabajo de diagramación administrativa. Esta simbología se encuentra a continuación:

Tabla 2.3 Simbología ANSI

Símbolo	Nombre	Descripción
	Inicio/fin	Indica donde comienza y termina el diagrama de flujo.
	Operación/actividad	El símbolo de proceso simboliza la realización de una operación o actividad relacionada con un procedimiento.
	Documento	Representa cualquier tipo de documento que ingresa, se usa, se crea o sale del proceso.
	Datos	Indica tanto la entrada como la salida de datos.
	Almacenamiento/ archivo	Indica que un documento o información permanece dentro de un archivo.
	Decisión	Indica un punto dentro del flujo en el que existen múltiples rutas potenciales.
	Líneas de flujo	Agrupar los símbolos indicando en qué orden se deben realizar las tareas.
	Conector	Representa que el diagrama sigue siendo consistente dentro de la misma página.
	Conector de página	Representa la continuidad del diagrama en una página diferente.

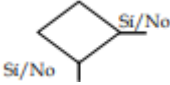
International Organization for Standardization (ISO)

La Organización Internacional para la Normalización, también conocida como ISO, es la organización que se encarga de fomentar la creación de normas internacionales para la producción, el comercio y la comunicación en todas las industrias, excepto en las áreas de la electricidad y la electrónica.

Las normas de "calidad" y "gestión continua de calidad", que se pueden utilizar en cualquier tipo de organización o actividad sistemática enfocada en la producción de bienes o servicios, se establecen en la Norma ISO 9000 y son otro tipo de simbología necesaria para diseñar un diagrama de flujo, siempre enfocada en la Gestión de la Calidad Institucional. En la siguiente tabla se muestra esta simbología:

Tabla 2.4 Simbología ISO

Símbolo	Nombre	Descripción
	Operación	Indica las fases es de un proceso, método o procedimiento.
	Operación e inspección	Indica la verificación o supervisión de sus partes durante las fases del proceso.
	Inspección y medición	Representa el proceso de verificar detalladamente la naturaleza, cantidad y calidad de los insumos y productos, con el objetivo de garantizar su idoneidad y conformidad con los estándares establecidos.
	Transporte	Registra cada vez que un documento es desplazado o transferido a otra oficina o empleado.
	Entrada de bienes	Menciona los elementos o recursos que se incorporan al procedimiento.

	Almacenamiento	Señala el almacenamiento continuo de un documento o datos en un archivo.
	Decisión	Señala un momento en el curso donde se abren múltiples senderos para seguir.
	Líneas de flujo	Une los símbolos indicando la secuencia en la que deben ejecutarse las diversas operaciones.
	Demora	Señala el momento en que un documento o un proceso se detiene, debido a la necesidad de llevar a cabo otra acción o a la lentitud en la respuesta.
	Conector	Muestra la secuencia del esquema en la misma página. Conecta dos pasos que no están uno tras otro en una sola página.
	Conector de página	Plasma la secuencia del esquema en una página adicional.

Tiempos y movimientos

La técnica de estudio de tiempos consiste en medir el tiempo estándar para realizar una tarea específica mediante el uso de cronómetros. Se observa a un trabajador experto de forma sistemática, registrando y analizando los tiempos y ritmos de trabajo bajo condiciones establecidas de acuerdo a una norma previamente definida.

La finalidad del estudio es establecer el tiempo estándar que se ajuste a un enfoque que destaque por su eficacia y ahorro, teniendo en cuenta las demandas sociales y emocionales de los empleados (Escalante & González, 2015).

Estos tiempos pueden ser identificados a través de estimaciones, archivos históricos y métodos de medición del trabajo. Esta metodología de medición constituye una manera más precisa de fijar criterios equitativos de producción. Todas estas estrategias se fundamentan en la definición de tiempos estándar permitidos para llevar a cabo una tarea específica, considerando los márgenes adicionales por fatiga y por demoras personales e inevitables.

Los tiempos estándar precisos permiten mejorar la eficacia del equipo y del personal en sus labores. Por otro lado, unos criterios mal definidos, aunque preferibles a la ausencia de criterios, pueden resultar en gastos elevados, descontento entre el personal y posiblemente fallos en la empresa en su totalidad. Esta situación puede determinar la línea entre el triunfo y el fracaso de una empresa (Niebel & Freivalds, 2009).

Elementos del estudio de tiempos

Para llevar a cabo un estudio detallado y completo de las distintas funciones relacionadas con el trabajo, es necesario seguir una serie de pasos. En primer lugar, se debe seleccionar al operario adecuado, posteriormente, se procede a analizar el trabajo y desglosarlo en sus elementos constitutivos. Es fundamental registrar con precisión los valores elementales de los tiempos transcurridos durante la ejecución de las tareas, luego, se evalúa el desempeño del operario y se asignan los suplementos u holguras necesarios. Finalmente, se lleva a cabo el estudio en su totalidad.

Selección del operario

Para iniciar un análisis de tiempos, es crucial elegir al trabajador con la asistencia del supervisor de línea o del departamento, ya que, un empleado con un rendimiento medio o un poco superior al promedio resultará en un estudio más satisfactorio que uno menos capacitado o con habilidades excepcionales.

Método de regresos a cero

Los valores del elemento transcurrido se obtienen mediante el método de regresos a cero, lo cual elimina la necesidad de realizar restas sucesivas como en el método continuo. De esta manera, la lectura puede ser directamente incorporada en la columna de TO (tiempo observado). Además, es posible registrar de inmediato los elementos realizados por el operario en desorden, sin requerir una notación especial.

Una de las desventajas del método de regresión a cero es que promueve la eliminación de elementos individuales de la operación. Estos elementos no pueden ser analizados de manera independiente debido a que los tiempos elementales están condicionados por los elementos previos y posteriores.

Método continuo

El estudio realizado proporciona un registro exhaustivo de todo el período de observación, lo cual satisface tanto al trabajador como al sindicato. El trabajador puede verificar que no se omitieron períodos durante el estudio y que se registraron todos los retrasos y factores atípicos dado que todos los datos se presentan de manera clara. Esta técnica de registro de tiempos es más sencilla de explicar y promover, además de ser más adecuada para medir y registrar elementos de corta duración.

Gráfico SIMO

El diagrama bimanual es una representación gráfica que documenta la actividad de las manos o extremidades del operario, indicando la relación entre ellas. Este diagrama registra la secuencia de eventos mostrando las manos, y a veces los pies, del operario en movimiento o en reposo, así como su interacción entre sí, generalmente en relación con una escala de tiempos. La importancia de este diagrama radica en facilitar la colocación uno frente al otro de los símbolos de los movimientos que ambas manos realizan simultáneamente. Entre sus utilidades son:

- Identificar las posibles mejoras en el procedimiento bajo análisis al determinar los momentos en que las manos se encuentran inactivas sin motivo aparente.
- Encontrar las secuencias de movimientos más eficientes.
- Cuando la operación es altamente costosa y el volumen de producción es elevado, reduce el tiempo de ejecución.
- Capacitar al personal para promover la eficiencia en los procesos (Palacios, 2016).

El analista titula el diagrama como "Proceso Bimanual" y agrega todos los datos de identificación requeridos, incluyendo el número de parte, el número de diagrama, la descripción de la operación o proceso, el método actual o propuesto, la fecha y el nombre del autor del diagrama.

De inmediato, el analista empieza a elaborar el esquema de procesos bimanuales al examinar la duración de cada componente, tras lo cual calcula la cantidad de tiempo que se reflejará en el diagrama.

Therbligs

Los Therbligs son identificados como los movimientos elementales o fundamentales que un trabajador lleva a cabo al realizar sus tareas laborales.

Los hermanos Frank y Lillian Gilbert establecieron las 17 divisiones básicas, las cuales se detallan en la tabla siguiente.

Tabla 2.5 Simbología Therbligs

Símbolo	Nombre	Descripción
RE	Alcanzar	Desplazar la mano sin nada en ella hacia o desde el objeto, con la duración del movimiento determinada por la distancia recorrida. Este gesto suele ir antes de soltar algo y después de agarrarlo.
M	Mover	"Desplazar" la mano con carga; la duración varía según la distancia recorrida, la carga y la naturaleza del movimiento; comúnmente se inicia con "Agarrar" y se concluye con "Soltar" o "Colocar".
G	Sujetar	El acto de "cerrar" los dedos alrededor de un objeto inicia al entrar en contacto con el objeto y finaliza al lograr dominarlo. Este proceso varía según la forma de agarre y suele ir precedido por "Alcanzar" y seguido por "Mover".

RL	Liberar	Liberar el dominio sobre un objeto, generalmente el therblig más breve.
PP	Preposicionar	Colocar un objeto en un lugar específico para utilizarlo más tarde, usualmente se lleva a cabo junto con la acción de "mover", como cuando se ajusta la posición de un bolígrafo para escribir.
U	Utilizar	"Manejar" una herramienta de acuerdo a su propósito original.
A	Ensamblar	Juntar dos piezas que encajan perfectamente, usualmente se inicia con "Colocar" o "Desplazar" y se finaliza con "Soltar".
DA	Desensamblar	Se trata de la antítesis de "Ensamblar", ya que desune piezas que encajan; comúnmente va antes de "Sujetar" y después de "Liberar".
S	Buscar	La búsqueda de un objeto comienza cuando los ojos o las manos se ponen en movimiento para localizarlo.
SE	Seleccionar	Elegir un artículo de entre varios suele ir seguido de la acción de "buscar".

P	Posicionar	Dirigir un objeto en el lugar de trabajo, comúnmente precedido por "Desplazar" y seguido por "Soltar" (en contraposición a mientras en una posición previa).
I	Inspeccionar	Establecer una comparación entre un objeto y un patrón, usualmente a través de la observación, aunque también se puede hacer uso de los demás sentidos.
PL	Planear	Detenerse momentáneamente antes de decidir la próxima acción; comúnmente se percibe como una vacilación previa al movimiento.
UD	Retraso inevitable	Fuera del dominio del trabajador por la índole de la tarea, como cuando la mano izquierda aguarda pacientemente mientras la derecha culmina una búsqueda extensa.
AD	Retraso evitable	El trabajador es el único que tiene el control sobre los momentos de inactividad, como por ejemplo, cuando tose.
R	Descanso para contrarrestar la fatiga	Surge de manera intermitente, no en cada ocasión; está condicionado por la intensidad de la actividad física.

H	Parar	Mientras una mano sostiene el objeto, la otra se encarga de realizar una labor provechosa.
---	-------	--

Ciclos en el estudio

La decisión sobre cuántos ciclos estudiar para alcanzar un estándar justo ha generado un debate intenso entre los expertos en análisis de tiempos. Dado que la naturaleza de una tarea y su duración afectan la cantidad de ciclos que se pueden analizar, desde una perspectiva económica, el analista no debe limitarse únicamente a seguir la práctica estadística convencional que requiere un tamaño de muestra específico basado en la variabilidad de las mediciones individuales del elemento.

Mediante el empleo de técnicas estadísticas, es factible determinar un valor más preciso. Dado que el análisis de tiempos implica un proceso de selección de muestras, se puede inferir que las mediciones siguen una distribución normal en torno a una media poblacional y una variabilidad desconocidas. Al emplear la media muestral $\bar{x}$ y la desviación estándar muestral s , la distribución normal para una muestra extensa conduce al siguiente rango de confianza:

$$\bar{x} \pm \frac{zs}{\sqrt{n}}$$

Calificación del desempeño del operario

Dado que el tiempo real necesario para completar cada parte de la investigación está fuertemente influenciado por la destreza y dedicación del operador, es esencial elevar el tiempo estándar para el operador competente y reducirlo para el operador menos eficiente hasta alcanzar un nivel uniforme.

Dentro del sistema de evaluación de rendimiento, el observador analiza la eficacia del trabajador comparándola con la actuación de un trabajador experto que lleva a cabo la misma tarea. La puntuación se representa como un número decimal o un porcentaje y se registra en la columna C para el elemento evaluado.

$$TN = TO \times C/100$$

Dentro de las valoraciones se suele utilizar la escala 100-133, 60-80, 75-100 y la norma británica de 0-100, a continuación, se muestra una tabla con la valoración junto con su significado de acuerdo a (Kanawaty, 1997).

Tabla 2.6 Valoraciones de rendimiento

60-80	75-100	100-133	0-100	Actividad
40	50	67	50	Muy lento, movimientos torpes, inseguro
60	75	100	75	Sin prisa, lento pero sin perder tiempo
80	100	133	100	Activo, capaz, nivel de calidad intermedio
100	120	167	125	Muy rápido, alta seguridad y destreza
120	150	200	150	Excepcionalmente rápido, sobresaliente

Adición de suplementos

Durante la jornada laboral, es improbable que cualquier trabajador pueda mantener un ritmo constante en todo momento. Se identifican tres tipos de interrupciones que requieren asignación de tiempo adicional. En primer lugar, se encuentran las interrupciones personales, como los descansos para ir al baño o tomar agua. En segundo lugar, la fatiga puede afectar incluso a los trabajadores más resistentes en labores menos exigentes. Por último, se presentan retrasos inevitables, como la avería de herramientas, interrupciones

por parte de supervisores, pequeños contratiempos con el equipo y variaciones en el material, todos los cuales demandan la inclusión de un margen de tiempo adicional.

La siguiente fórmula se utiliza una vez se haya obtenido el tiempo normal, con el fin de obtener el tiempo estándar:

$$TE = TN \times TN \times Holgura = TN \times (1 + holgura)$$

2.4 Etapa 2

En esta etapa, se analizan los datos conseguidos de la etapa 1 para descubrir las relaciones causales o las causas principales del problema.

Este análisis proporciona evidencia de las causas de la variación y el desempeño insatisfactorio, lo que será muy beneficioso para la mejora del proceso (Bahena).

Además, se identifican los puntos débiles del proceso utilizando las pistas obtenidas durante la etapa 1, así como la información proporcionada por el director, el propietario del proceso y los expertos en la materia. Antes de pasar a buscar soluciones potenciales, también se verifican las causas utilizando análisis estadísticos y otras herramientas (Lean six sigma yellow belt certification, 2018).

Los equipos utilizan una variedad de herramientas, algunas de las cuales se presentaron en fases anteriores; las herramientas más comunes en la fase de análisis son la regresión lineal, VSM, el análisis de varianza, OEE, diseño de experimentos, etc. para comprender las causas comunes y especiales de variación, así como es desarrollar e implementar soluciones que aborden las causas fundamentales del problema, es decir, garantizar que se corrija o disminuya el problema. La clave es pensar en soluciones que aborden la causa del problema (raíz) en lugar del resultado (Socconini, Lean Six Sigma Green Belt para la excelencia en los negocios, 2015).

2.4.1 Objetivos

- Analizar la capacidad del proceso: se examinan los datos generados durante la etapa de medición para establecer las hipótesis iniciales.
- Establecer las variables significativas: esta etapa permite establecer las variables que se deben abordar en la fase de mejora y confirmar o rechazar las hipótesis planteadas.
- Crear condiciones nuevas durante el proceso de operación.

- Determinar las ventajas de la solución propuesta, que han sido evaluadas por el equipo y aprobadas por los directivos.
- Los modos de falla para el nuevo proceso se investigan y resuelven.
- Las mejoras se llevan a cabo y se verifican (Socconini, Lean Six Sigma Green Belt para la excelencia en los negocios, 2015).

2.4.2 Herramientas y técnicas aplicadas en la etapa 2

OEE (Efectividad total del equipo)

La efectividad total del equipo, también conocida como OEE, es un indicador crucial que muestra la capacidad real de producir sin fallas, el rendimiento del proceso y la disponibilidad del equipo. Es un potente indicador que requiere datos del proceso todos los días.

El indicador OEE es una herramienta de evaluación comparativa completa, por lo que puede utilizarse para evaluar la calidad, el rendimiento y la disponibilidad del proceso de producción. De manera similar, es un indicador adecuado para medir los avances efectivos en 5s, Lean Manufacturing, Kaizen, TPM y Six Sigma (Salazar, 2019).

Estudios de repetitividad y reproducibilidad

Se recomienda cuantificar los errores relacionados con la métrica, es por eso que, los estudios de repetitividad y reproducibilidad se realizan con el fin de cuantificar el error en relación a los procedimientos, el personal y el equipo.

La reproducibilidad y la repetitividad son dos características esenciales de la precisión. La repetitividad de un instrumento de medición se refiere a la precisión o variabilidad de sus mediciones cuando se obtienen varias mediciones del mismo objeto en condiciones similares (mismo operador), mientras que la reproducibilidad es la precisión o variabilidad de las mediciones del mismo objeto en condiciones diferentes (diferentes operadores).

Los estudios R&R evalúan de modo experimental qué parte de la variabilidad total observada en los datos es atribuible al error de medición; además, permite cuantificar si este error es significativo o insignificante en comparación con la variabilidad del producto y las tolerancias de las características de calidad que se evalúan.

Análisis de linealidad y regresión

El propósito del análisis de regresión es representar matemáticamente el comportamiento de una variable de respuesta en función de una o más variables independientes. Por ejemplo, supongamos que la temperatura de operación está relacionada con el rendimiento de un proceso químico. Este modelo puede usarse para predicción, optimización o control si es posible describir tal relación mediante un método matemático, para estimar los parámetros de un modelo de regresión, se requieren datos de experimentos planeados, observaciones de fenómenos no controlados o registros históricos. De igual modo, para la metodología Seis Sigma ayuda a comprender el tamaño del error del sistema (Gutierrez & de la Vara, 2012).

Anova (análisis de varianza)

El método principal para analizar datos experimentales es el análisis de varianza (ANOVA). La idea fundamental de esta técnica es dividir la variación total en las partes a las que contribuye cada fuente de variación en el experimento.

El método de análisis de varianza (ANOVA) es muy efectivo porque permite encontrar y medir mejor todas las fuentes de variación presentes en el. De igual modo, para la metodología Seis Sigma ayuda entender los elementos de medida del error del sistema (Humberto & de la Vara, 2013).

AMEF

La metodología del análisis de modo y efecto de las fallas (AMEF, FMEA, Failure Mode and Effects Analysis; también conocido en España como análisis modal de fallos y efectos (AMFE)) permite identificar las fallas potenciales de un producto o un proceso a partir de un análisis de su probabilidad de ocurrencia, formas de detección y el efecto que provocan. Estas fallas se jerarquizan y las que afectan más la confiabilidad del producto o el proceso será removido con el fin de reducir el riesgo del mismo (Humberto & de la Vara, 2013).

Los documentos y el proceso del AMFE son muy valiosos porque ayudan a almacenar una gran cantidad de información sobre nuestros productos y procesos, lo que los convierte en una herramienta muy poderosa.

Ventajas de AMEF

- Conoce los detalles de cada paso.
- Incluye la información que se utilizará para crear un programa de capacitación para las nuevas operaciones.
- Determina posibles fallas en un producto o proceso.
- Establece los efectos de cada falla en caso de que ocurrieran.
- Evalúa la intensidad de los efectos.
- Determina la causa potencial.
- Determina el nivel de confiabilidad de los mecanismos de detección de fallas propios.
- Evalúa de manera objetiva la relación entre la gravedad, la ocurrencia y la capacidad de detección.
- Registra las medidas tomadas para reducir los riesgos.
- Ayuda a conocer cómo los errores surgen.
- Mantiene el conocimiento que se ha creado en una empresa.
- Busca oportunidades para iniciar proyectos (Socconini & Reato, Lean Six Sigma sistema de gestión para liderar empresas, 2019).

A continuación, se presenta un esquema general de las actividades a realizar de un AMEF.

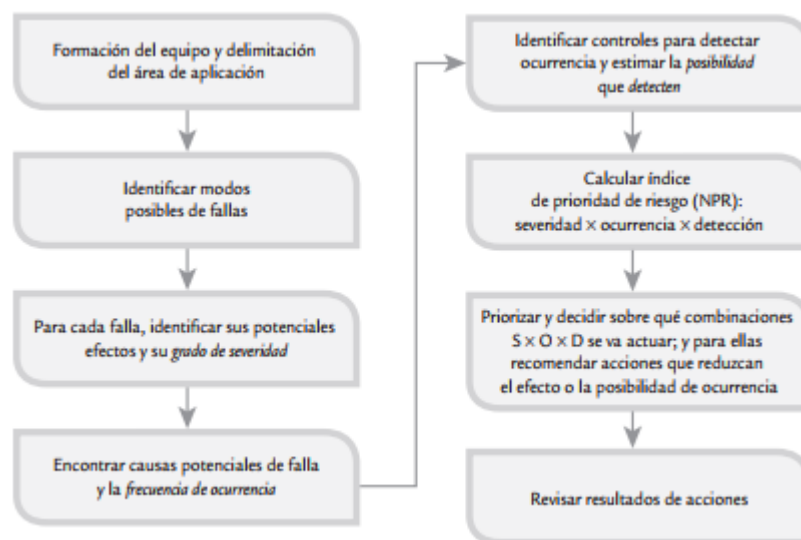


Figura 2.3 Actividades AMEF (Bahena)

SMED

El método SMED, creado por Shigeo Shingo, quien también creó otras aplicaciones Lean, es muy importante y se denomina cambio de troquel al minuto o intercambio de troquel al minuto. La rapidez con la que se puede configurar un proceso para cambiar un producto o un servicio es crucial para muchas actividades en la vida.

Su objetivo es reducir significativamente el tiempo que se tarda en pasar de una operación a la siguiente, o el tiempo del ciclo de caja. La disminución ayuda a la empresa a producir una mayor variedad de productos (en términos de color y tamaño, por ejemplo) o servicios utilizando el mismo equipo o las mismas áreas en un tiempo más corto.

SMED disminuye:

- El tiempo de espera
- Quejas y errores de los clientes
- La fecha de entrega
- Trabajo continuo.
- Un inventario de productos finalizados.
- Invertir en componentes (materiales y repuestos).

De igual manera, ofrece:

- Una mayor tasa de rotación de inventario.
- Una mayor productividad.
- Una mayor capacidad.
- Más adaptabilidad a la demanda.

Proceso

La implementación de la herramienta SMED generalmente se lleva a cabo en cuatro pasos de acuerdo con (Romero, 2015):

- Determinar las operaciones que se realizan, distinguiendo entre operaciones internas y externas.
- Es necesario separar ambos tipos de operaciones una vez que se han distinguido.
- Intentar convertir lo más posible de las operaciones internas en operaciones externas.
- Maximizar todas estas operaciones.

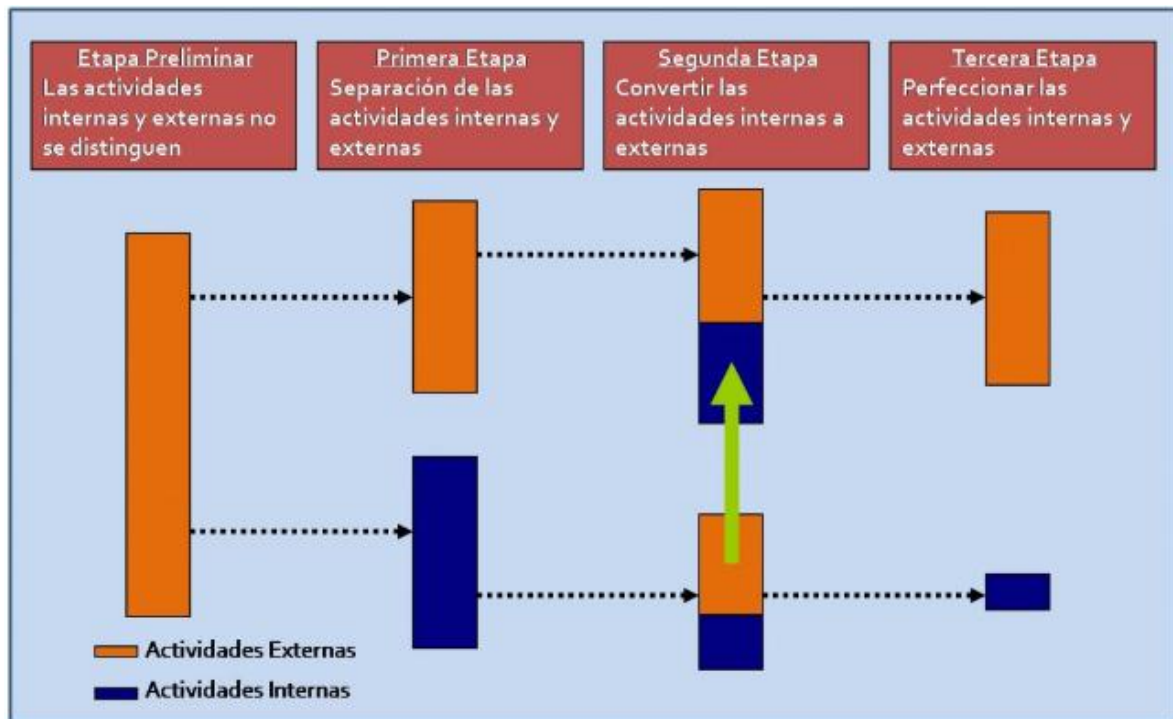


Figura 2.4 Actividades AMEF (Romero, 2015)

Diseño de experimentos

Determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras, es parte del diseño de experimentos. Los siguientes son algunos problemas comunes que pueden resolverse mediante el diseño y el análisis de experimentos:

- Comparar dos o más materiales para determinar el mejor.
- Comparar diferentes instrumentos de medición para determinar si tienen la misma precisión y exactitud.
- Determinar los componentes (las x vitales) de un proceso que afectan una o más características del producto final.
- Determinar las condiciones de operación (temperatura, velocidad, humedad, por ejemplo) que reducen los defectos o mejoran el desempeño del proceso.
- Disminuir la duración del ciclo de proceso.

- Hacer que el proceso sea resistente o insensible a las variaciones de las variables ambientales.
- Ayudar en el desarrollo o rediseño de nuevos procesos o productos.

Planeación y realización

1. Comprender y definir el problema u objeto de estudio.
2. Seleccionar la variable de respuesta que se utilizará para medir cada punto del diseño y asegurarse de que la medición sea confiable.
3. Determinar qué elementos deben estudiarse o investigarse, de acuerdo con su supuesto impacto en la respuesta.
4. Elegir los niveles de cada factor y diseñar el experimento adecuado a los factores presentes y al propósito del experimento.
5. Preparar y estructurar el trabajo experimental.
6. Realizar la prueba.

Poka yoke

El objetivo principal de un sistema poka-yoke es desarrollar sistemas, métodos de trabajo y procesos a prueba de errores. El término proviene del japonés, donde se traduce como poka (error inadvertido) y yoke (prevenir).

El enfoque poka-yoke sugiere abordar los problemas desde su origen y actuar antes de que ocurra el error. Al comprender su mecánica, es necesario diseñar sistemas a prueba de errores, también conocidos como dispositivos poka-yoke, que permitan eliminar la posibilidad de falla, que el sistema advierta y prevenga lo más posible, antes de que ocurra el error, en otras palabras, un sistema poka-yoke inspecciona la fuente o la causa del error para determinar si existen las condiciones para la producción de alta calidad.

Los dos tipos son los dispositivos preventivos poka-yoke, que evitan el error (el microondas no funciona si la puerta está abierta) y el dispositivo detector, que detecta la posibilidad de un error y envía una señal a través de pitidos para que el conductor no olvide la llave dentro del automóvil.

Los sistemas poka-yoke deben tener las siguientes características:

- Simple y económico. Si son complicados y costosos, su uso será difícil tanto para resolver el problema como para ahorrar dinero.

- Cuando se enfocan en la inspección completa de la fuente del error, deben ser parte del proceso.
- Estar cerca de donde ocurren los errores y brindan retroalimentación prácticamente inmediata a los empleados para que puedan evitarlos o al menos corregirlos (Humberto & de la Vara, 2013).

2.5 Etapa 3

Una vez que se han implementado mejoras en el proceso, el último paso es garantizar que las implementaciones se mantengan y estén actualizadas a través del tiempo (Bahena).

Los equipos suelen completar cuatro tareas durante la fase de control: establecer las bases para la disciplina del proceso, completar los documentos de mejora, establecer métricas continuas para evaluar el proceso y crear un plan de gestión del proceso que permita al equipo transferir la mejora al propietario del proceso (Lean six sigma yellow belt certification, 2018).

2.5.1 Objetivos

- Mantener las mejoras a través del control estadístico de procesos, poka yokes y trabajo estandarizado.
- Prever mejoras en el futuro y guardar las lecciones aprendidas.
- Aplicar herramientas de control.
- Garantizar el seguimiento y el control de las implementaciones.
- Identificar los procedimientos o acciones que no están bajo control y corregirlos de inmediato.
- Mantener un control adecuado mediante la implementación consistente de mejoras.

Debido a que los procesos tienden a deteriorarse con el tiempo, es crucial implementar un plan de control para cada X. Para crear el plan, es necesario documentar los procesos y procedimientos y capacitar al personal que realizará esta tarea.

Un plan de control incluye:

- Un resumen de todos los procesos de control.
- una técnica para encontrar fallas en el sistema de control.
- una lista de acciones de control que se deben implementar.

- Una entrada al AMEF (procesos maduros).
- Una salida para el AMEF (procesos nuevos).

El plan de control tiene como objetivo institucionalizar las mejoras del proceso, señalar áreas que requieren capacitación adicional y proporcionar procedimientos de control de información de un solo paso.

Los siguientes son algunos planes de control:

- Mapa de proceso final
- AMEF
- Documentación del proceso
- Requerimientos del cliente
- Estudios de capacidad
- Mantenimiento de procedimientos
- Calendarios de calibración.
- Planes de acción fuera de control (Bahena).

Capítulo 3 Aplicación de herramientas de Lean Six Sigma

El primer paso para iniciar la aplicación de las herramientas de Lean Six Sigma, basándose en la metodología de la misma, es conocer los procedimientos realizados en la empresa de paneles fotovoltaicos, con el fin de ampliar el panorama de la planta para tener la capacidad de planificar y modificar según se requiera, de este modo, la primera herramienta para aplicar es el Value Stream Mapping (VSM).

3.1 Etapa 1. Diagnóstico

La distribución de planta en la empresa Sol y Litio de México se organiza en cinco departamentos: comedor, oficinas, sala de capacitación, soldadura y almacenamiento. En la figura 3.1 se observa que la mayoría de las máquinas están ubicadas en el patio central. Entre estas máquinas se encuentran la laminadora, laminadora mediana, módulo de electroluminiscencia, simulador solar y parte de la materia prima, esta disposición permite una mayor eficiencia y flujo de trabajo dentro de la empresa.

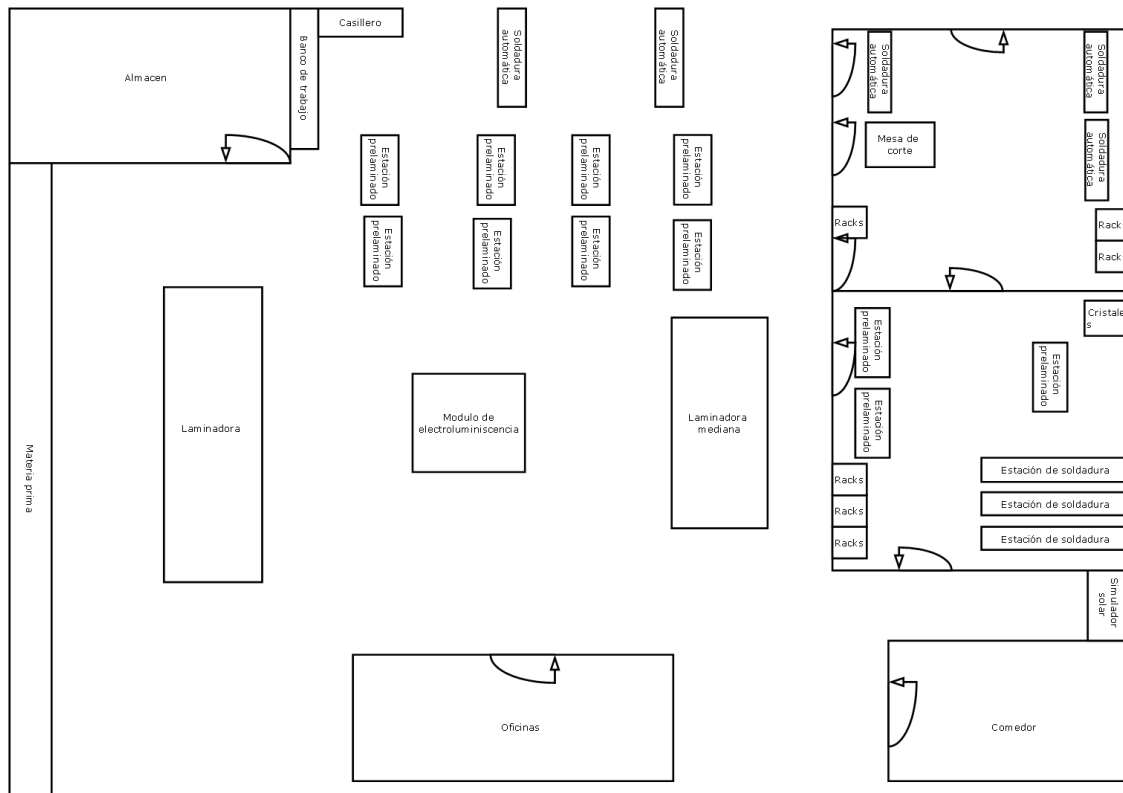


Figura 3.1 Layout Sol y Litio de México

3.1.1 Elaboración de diagramas de flujo en los procesos de producción

Para el armador de un panel fotovoltaico se deben realizar un total de 8 procesos; cada uno de estos se realizan en cadena, pues uno depende totalmente del otro para que dé inicio a su actividad, de esta forma, el proceso empieza con la obtención de las tiras de ribbon (cinta delgada de aluminio que conecta las celdas solares) utilizadas para el soldado de las celdas solares y termina con el proceso de colocación de la caja de diodos, sin embargo, la planta de producción no cuenta con los procesos registrados, por lo tanto, fue necesario crear manuales para el proceso de fabricación de panel fotovoltaico, para ello, se desglosaron las actividades principales en subtarefas detalladas y se diseñaron diagramas de flujo que representan cada etapa del proceso. En la siguiente figura se muestra el proceso que se lleva a cabo para la obtención del panel fotovoltaico mediante un diagrama de flujo de bloques.

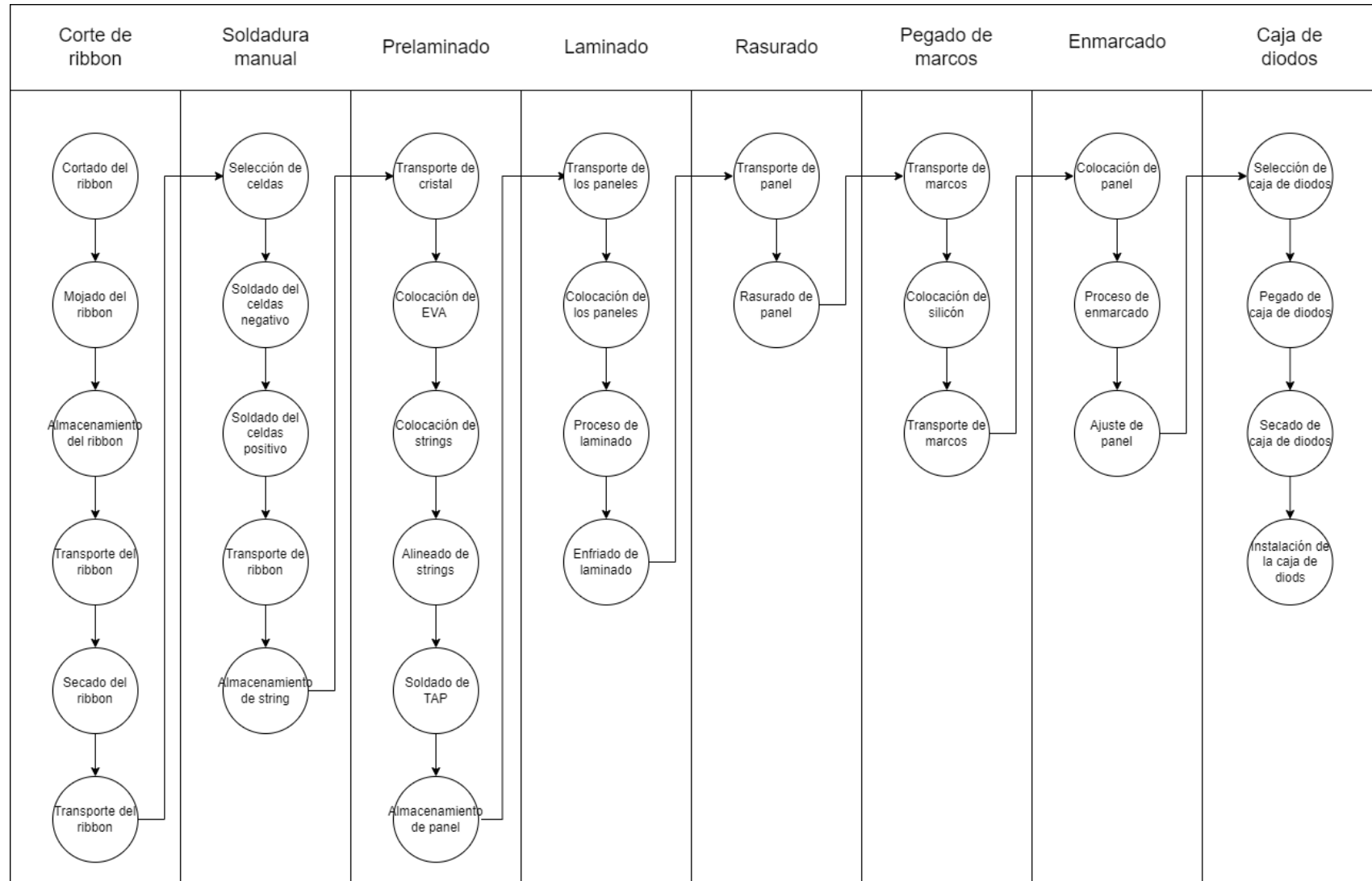


Figura 3.2 Diagrama de bloques de proceso Sol y Litio de México

Una vez representado el proceso completo para la obtención del panel fotovoltaico, se realizaron los procedimientos de cada proceso, empezando por el proceso de cortadura de ribbon.

A continuación, se presenta el procedimiento a realizar del primer proceso junto con su diagrama de flujo, donde se desglosan las actividades y el número de paso que es:

Proceso de cortadura de ribbon

- Paso 1: La operaria corta tiras de ribbon de un largo de 29 cm en un lapso de 1 hora (se cortan las tiras que alcancen en ese lapso de tiempo) en un horario de 12 p.m. a 1 p.m.
- Paso 2: La operaria almacena tiras de ribbon en la tina de flux (facilita la unión entre la celda solar y el ribbon) por 10 minutos.
- Paso 3: La operaria retira las tiras de ribbon de la tina de flux.
- Paso 4: La operaria transporta las tiras de ribbon a la bandeja de aluminio de la mesa de trabajo número 1 (en caso de que escurra una cantidad considerable de flux, poner papel encima de las tiras de ribbon).
- Paso 5: Dejar secar tiras de ribbon por 1 hora.
- Paso 6: La operaria transporta las tiras de ribbon a la estación de trabajo de las operarias.

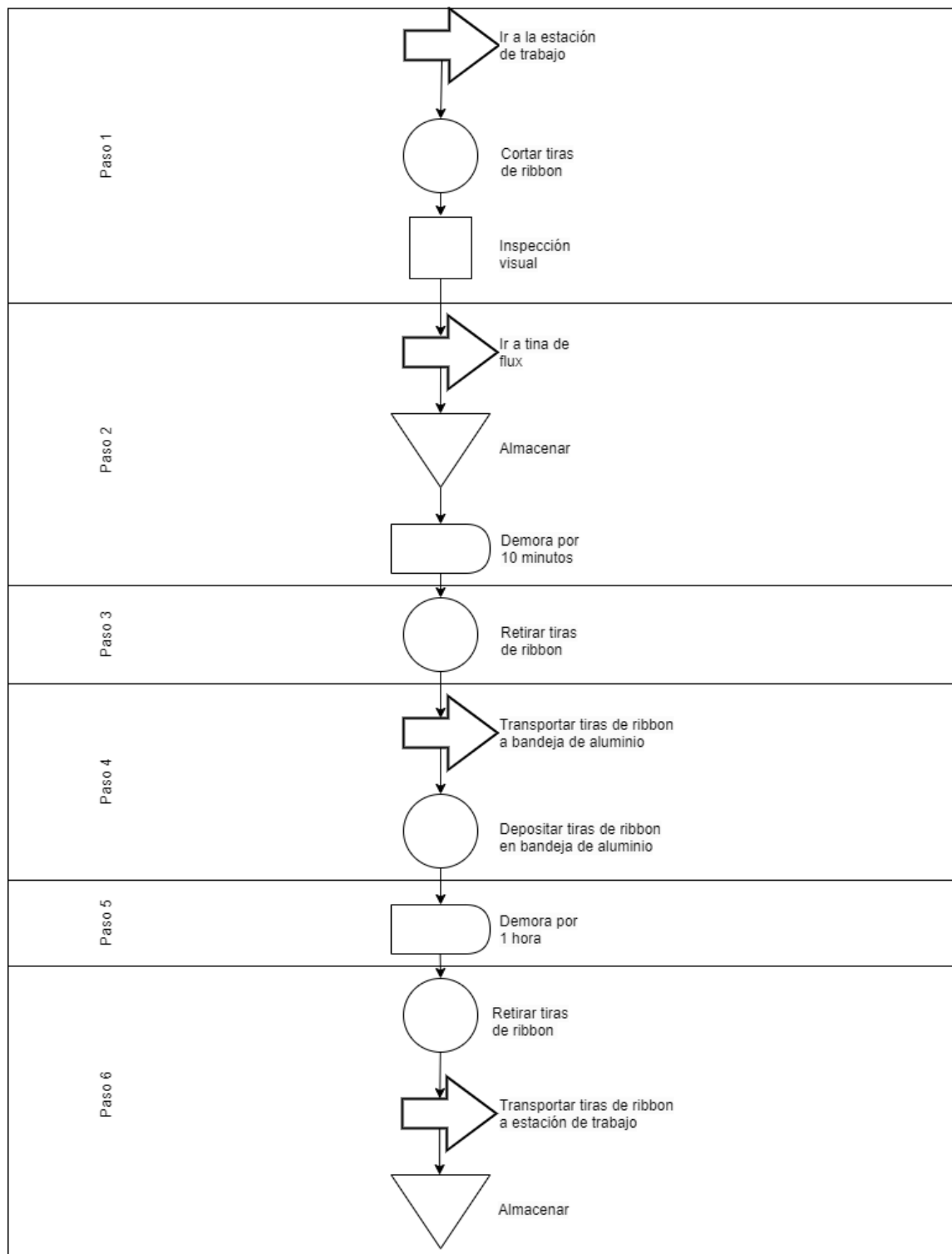


Figura 3.3 Flujograma de procedimiento 1

Una vez obtenido las tiras de ribbon, se procede al **proceso de soldado** de las celdas solares, las cuales se llegan a soldar en la parte negativa para después volver a soldarlas en la parte positiva, obteniendo un string, el cual está conformado por 10 celdas solares (el número conformado de las celdas solares para la obtención del string depende totalmente de la empresa según el voltaje y amperaje que se quiera obtener). Los diagramas de flujo del resto de procesos se podrán visualizar en los anexos.

Tras la obtención del string y, una vez juntado 6 strings (la cantidad de strings para la conformación del panel fotovoltaico depende de la empresa) se trasladan a la mesa para iniciar el **proceso de prelamado**, para el armado del panel fotovoltaico con todos sus componentes que lo conforman (figura 3.4), además de hacer una soldadura para el TAP (terminal de aluminio que conecta con la caja de diodos). En la figura 3.4 se puede observar la conformación del panel fotovoltaico y las partes que conlleva.

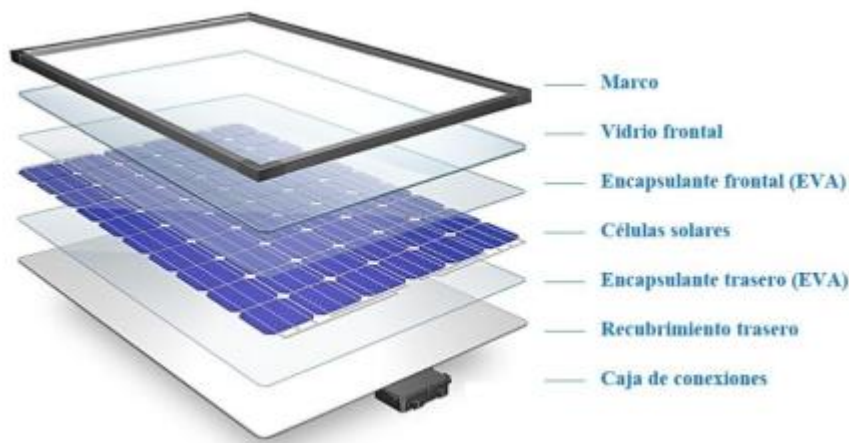


Figura 3.4 Composición del panel fotovoltaico de Sol y Litio de México

Terminado el armado del panel fotovoltaico junto con el soldado de sus terminales, se trasladan a la laminadora mediana para iniciar el **proceso de laminado**, el cual se encargada de desprender la lámina de EVA para que adhiera los componentes y les brinde solidez.

Una vez enfriado el panel fotovoltaico se mueve a la mesa para iniciar el **proceso de rasurado**, en la cual se elimina cualquier exceso de EVA causado por la laminadora mediana.

El pegado de marcos se realiza como un proceso previo al enmarcado, pues este requiere colocar una capa de silicón en el hueco de los 4 marcos minutos antes de iniciar el **proceso**

de enmarcado. Una vez colocado una capa de silicón a los 4 marcos y tras enfriarse el panel fotovoltaico, se transporta a la máquina enmarcadora, la cual presiona los 4 marcos para formar las protecciones del panel.

El último proceso a realizar es el **proceso de pegado e instalado de conexiones de la caja de diodos**, la cual funciona como protección y se instala junto las terminales TAP.

3.1.2 Tiempos y movimientos

3.1.2.1 Elaboración de diagrama bimanual

Una vez teniendo los procesos descritos y desglosados, con el objetivo de realizar una mejora posterior referente a los tiempos, se elaboraron diagramas bimanuales con el fin de eliminar movimientos que no sumen al procedimiento de los operarios, además, de obtener un tiempo estándar para la comprobación posterior en la toma de tiempos de cada procedimiento, de este modo, se registraron las acciones que realizan los operarios junto con el tiempo de dicha acción, utilizando el método continuo, pues gran parte de las acciones son de tiempos cortos, a continuación, en la figura 3.1, se muestra el procedimiento del cortado para la obtención del ribbon y las operaciones realizadas junto con los movimientos, therbligs y sus tiempos los cuales están en minutos.

Tabla 3.1 Diagrama SIMO operación 1

Operación: Cortado de tiras de ribbon					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.05	Tomar cinta de ribbon	RE, G	RE, G	Tomar tijera	0.05
0.03	Estirar cinta de ribbon	M	M, PP	Mover tijeras a tira de ribbon	0.03
0.03	Sostener cinta de ribbon	H	U	Cortar tira de ribbon con la tijera	0.03
0.01	Mover tira de ribbon	M	M	Mover tijeras	0.01
0.01	Soltar tira de ribbon	P, RL	P, RL	Soltar tira de ribbon	0.01
				Total	0.13

El tiempo tomado está en minutos, obteniendo una total de .13 minutos para esta operación, de igual manera, los movimientos realizados para cada actividad se le asignó un símbolo, como RE (alcanzar), G (tomar), M (mover), PP (preposicionar), U (utilizar), H (parar), P (posicionar) y RL (liberar). En las siguientes tablas se muestran el resto de operaciones de los procedimientos.

Tabla 3.2 Diagrama SIMO operación 2

Operación: Almacenamiento de tiras de ribbon					
Tiempo	Mano izquierda	Símbolo	Símbolo	Mano derecha	Tiempo
0.01	Tomar tiras de ribbon	RE, G	RE, G	Tomar tiras de ribbon	0.01
0.07	Mover tiras de ribbon a tina de flux	M	M	Mover tiras de ribbo a tina de flux	0.07
0.01	Soltar tiras de ribbon en tina de flux	P, RL	P, RL	Soltar tiras de ribbon en tina de flux	0.01
Total					0.09

Tabla 3.3 Diagrama SIMO operación 3

Operación: Retirado de tiras de ribbon de la tina de flux					
Tiempo	Mano izquierda	Símbolo	Símbolo	Mano derecha	Tiempo
0.01	Tomar tiras de ribbon de la tina de flux	RE, G	RE, G	Tomar tiras de ribbon de la tina de flux	0.01
0.06	Mover tiras de ribbon fuera de la tina de flux	M	M	Mover tiras de ribbo fuera de la tina de flux	0.06
Total					0.07

Tabla 3.4 Diagrama SIMO operación 4

Operación: Transporte de tiras de ribbon a mesa de trabajo					
Tiempo	Mano izquierda	Símbolo	Símbolo	Mano derecha	Tiempo
0.01	Sostener tiras de ribbon	H	H	Sostener tiras de ribbon	0.01
0.1	Mover tiras de ribbon a mesa de trabajo	M	M	Mover tiras de ribbo a mesa de trabajo	0.1

0.01	Soltar tiras de ribbon en mesa de trabajo	P, RL	P, RL	Soltar tiras de ribbon en mesa de trabajo	0.01
				Total	0.12

Tabla 3.5 Diagrama SIMO operación 5

Operación: Secado de tiras de ribbon					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
60	Espera	UD	UD	Espera	60
				Total	60

El tiempo de la operación de secado es un tiempo asignado por el jefe de área, el cual se le brinda una espera de 60 minutos, y una actividad con un therblig denominado UD (retraso inevitable).

Tabla 3.6 Diagrama SIMO operación 6

Operación: Transporte de tiras de ribbon a estaciones de trabajo					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.01	Tomar tiras de ribbon	RE, G	RE, G	Tomar tiras de ribbon	0.01
0.1	Mover tiras de ribbon a estación de trabajo	M	M	Mover tiras de ribbon a estación de trabajo	0.1
0.01	Soltar tiras de ribbon en estación de trabajo	P, RL	P, RL	Soltar tiras de ribbon en estación de trabajo	0.01
				Total	0.12

El tiempo total del proceso de cortado de ribbon fue de 60.53 minutos, dentro de los cuales, el tiempo que ocasiona un retraso considerable en el proceso, es el secado de las tiras de ribbon, con 60 minutos, pues es un tiempo asignado por el jefe de área, de igual modo, esta actividad se realiza dos veces en el día, dedicándose por completo durante 1 hora en la actividad sumando la hora de secado. Esta actividad es de las más importantes, debido a

que, sí se acaban las tiras de ribbon utilizadas para soldar la celda fotovoltaica, se para por completo la producción, atrasando todas las actividades hasta que se corten y sequen nuevamente las tiras.

Una vez descrito el proceso, se prosiguió con el desglosado de pasos junto con su toma de tiempo del segundo proceso, que es el soldado de las celdas solares, el cual se encuentra en el anexo de la tesis, así como el resto de procesos. Finalizando la descripción de los procesos junto con la toma de tiempos para los therbligs, se obtuvo un tiempo aproximado total del proceso, los cuales se visualizan en tabla 3.7.

Tabla 3.7 Tiempos total mediante diagrama SIMO

Actividad	Tiempos total
Cortado ribbon	60.53
Soldadura manual	11.05
Prelaminado	23.61
Laminado	25.64
Rasurado	5.91
Relleno de marco	6.18
Enmarcadora	5.61
Caja de diodos	68.38

3.1.2.2 Determinación de tiempos estándar

Teniendo como referente un tiempo total presente en cada procedimiento, se prosiguió con la toma de tiempos dependiendo del número de ciclo correspondido, la cual se obtuvo de la siguiente manera:

$$n = \frac{z^2 * \sigma^2}{e^2}$$

En la cual se consideró un nivel de confianza del 95%, y tras realizar una prueba de 3 tomas de tiempo en el primer procedimiento, se obtuvo como resultado que el número de muestra debía de ser en un total de 7 observaciones. En la siguiente tabla se pueden observar los parámetros considerados y el resultado obtenido.

Tabla 3.8 Número de ciclos en procedimiento 1

Valor de Z	1.96	3.8416
Desviación estándar	22.9693333	527.590272
e	17.0159202	289.541541
Número de muestra		7

Elevando al cuadrado el nivel de confianza, la desviación estándar obtenida en las 3 tomas de prueba y el margen de error considerado, aplicando la formula antes mencionada, se obtuvo el número de ciclos por tomar, para así, proseguir con la toma de tiempos en un total de 7 veces de las 6 actividades del primer procedimiento, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3.9 Tiempo observado en procedimiento 1

Tarea	Operadora						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Cortado de tiras de ribbon	0.13	0.12	0.13	0.13	0.1	0.15	0.15
Almacenamiento de tiras de ribbon en tina	0.04	0.11	0.11	0.13	0.07	0.07	0.13
Retirado de tiras de ribbon de la tina de flux	0.07	0.1	0.011	0.05	0.02	0.03	0.06
Transporte de tiras de ribbon a mesa de trabajo	0.1	0.11	0.16	0.17	0.14	0.03	0.13
Secado de tiras de ribbon	60	60	60	60	60	60	60
Transporte de tiras de ribbon a estaciones de trabajo	0.15	0.07	0.13	0.03	0.08	0.23	0.09

T1,...T7 significa el número de tiempos tomados en cada actividad por una operadora, los cuales sirvieron para calcular el tiempo observado (tiempo sin ninguna operación), el tiempo normal (multiplicación entre el tiempo observado y el rendimiento), y el tiempo tipo (multiplicación entre el tiempo normal por el porcentaje de holgura más 1), considerando un rendimiento acorde a las habilidades de la operadora en cada actividad que realizaba, pues demostró ser más hábil en determinadas operaciones de sus tareas.

Tabla 3.10 Tiempo estándar procedimiento 1

Tiempo observado	Rendimiento	Tiempo normal	Tiempo tipo
0.13162643	1	0.13162643	0.16453304
0.09551067	1.25	0.11938834	0.14923543
0.04648275	1	0.04648275	0.05810343
0.11893746	1.25	0.14867182	0.18583978
60	1	60	60
0.11262614	1.25	0.14078268	0.17597834
Tiempo estándar			60.73369

Se llegó a considerar el rendimiento bajo la norma británica, el cual, en su mayoría la operaria cumple con el ritmo tipo (100), pues demostró estar capacitada para sus operaciones por su tiempo laborando en la empresa.

Tabla 3.11 Valoración de rendimiento

0-100	Actividad
50	Muy lento, movimientos torpes, inseguro
75	Sin prisa, lento pero sin perder tiempo
100	Activo, capaz, nivel de calidad intermedio
125	Muy rápido, alta seguridad y destreza
150	Excepcionalmente rápido, sobresaliente

De igual modo, para este procedimiento se consideraron los siguientes suplementos, acorde al trabajo que desempeña la operaria u operario, los cuales, se muestran en la tabla 3.12.

Tabla 3.12 Suplementos procedimiento 1

Suplementos constantes	%	
A. Suplementos por necesidades	5	0.05
B. Suplementos por fatiga	4	0.04
Suplementos variables		
A. Suplemento por trabaja de pie	2	0.02
B. Suplementos por postura anormal	2	0.02
C. Suplementos por atención	2	0.02
D. Suplementos por esfuerzo mental	4	0.04
E. Suplementos por monotonía	4	0.04
F. Suplementos por tedio	2	0.02
	25	0.25

El tiempo estándar resultó ser similar al tiempo tomado mediante el diagrama SIMO, sin embargo, existen variaciones con respecto al resto de tiempos tomados en los demás procesos, ya que, por el porcentaje del rendimiento y de los suplementos u holguras, se llegó a aumentar el tiempo estándar, lo cual significa que al trabajador se le consideró aquellos momentos de cansancio y estrés acumulado por sus actividades realizadas. La tabla 3.13 muestra el tiempo estándar obtenido bajo este procedimiento así como el resto de los procesos.

Tabla 3.13 Tiempos estándar actuales

Actividad	Tiempos estándar
Cortado ribbon	60.73369002
Soldadura manual	17.19661205
Prelaminado	38.76064018
Laminado	25.9591811
Rasurado	8.495306025
Relleno de marco	9.170875708
Enmarcadora	6.203227924
Caja de diodos	70.37704263

En los anexos se pueden encontrar el resto de los tiempos obtenidos para cada uno de los procesos, con sus respectivos parámetros y holguras dependiendo de la actividad que se realizó.

3.1.3 Mapa de valor actual

Una vez obtenido la descripción de todos los procesos y procedimientos realizados en la planta, así como sus respectivos tiempos estándar, se consiguió el cálculo del tack time. No fue necesario determinar la familia de productos porque la empresa solamente trabaja con el armado de 1 sólo tipo de panel fotovoltaico, de este modo, fue preciso analizar la logística para la obtención de la materia prima, así como su demanda mensual.

3.1.3.1 Cálculo de tack time

La manera en que opera y distribuye el número de los paneles fotovoltaicos en los lotes, dependen totalmente de los proyectos que se lleguen a ejercer, por lo tanto, se sumó la cantidad total de paneles fotovoltaicos pedidos entre los 12 meses del año para obtener la demanda mensual, consiguiendo una demanda de 55 paneles, y, considerando que gran parte de los lotes son de 100 paneles fotovoltaicos, en una jornada de 8 horas durante 22 días al mes, toma un total de 10500 minutos para la fabricación de estos. En la tabla 3.14 se muestran los cálculos realizados.

Tabla 3.14 Cálculo de Tack Time

Variable	Operación	Resultado	Medida
Jornada laboral		8	Horas
Tiempo de almuerzo		1	Horas
Número de turnos		1	Diario
Días al mes de trabajo		22	Días
Demanda mensual		100	Paneles fotovoltaicos
Tiempo disponible	8 horas - 1 hora	7	Horas
Tiempo disponible	7 horas * 60	420	Minutos por día
Tiempo disponible	420 minutos * 60	25200	Segundos por día
Demanda diaria	100 paneles/ 22 días	4.0	Páneles por día
Tiempo Tack seg	25200/4	6300	segundos por panel
Tiempo tack min	(6300/60)*100	10500	min por 100 paneles

3.1.3.2 VSM actual

Siguiendo con el procedimiento de la metodología del VSM, se realizó el diagrama para visualizar la cadena de suministro, considerando su demanda, maquinaria disponible, tiempos de ciclo y preparación, inventario, etc., los cuales se pueden visualizar en la figura 3.5.

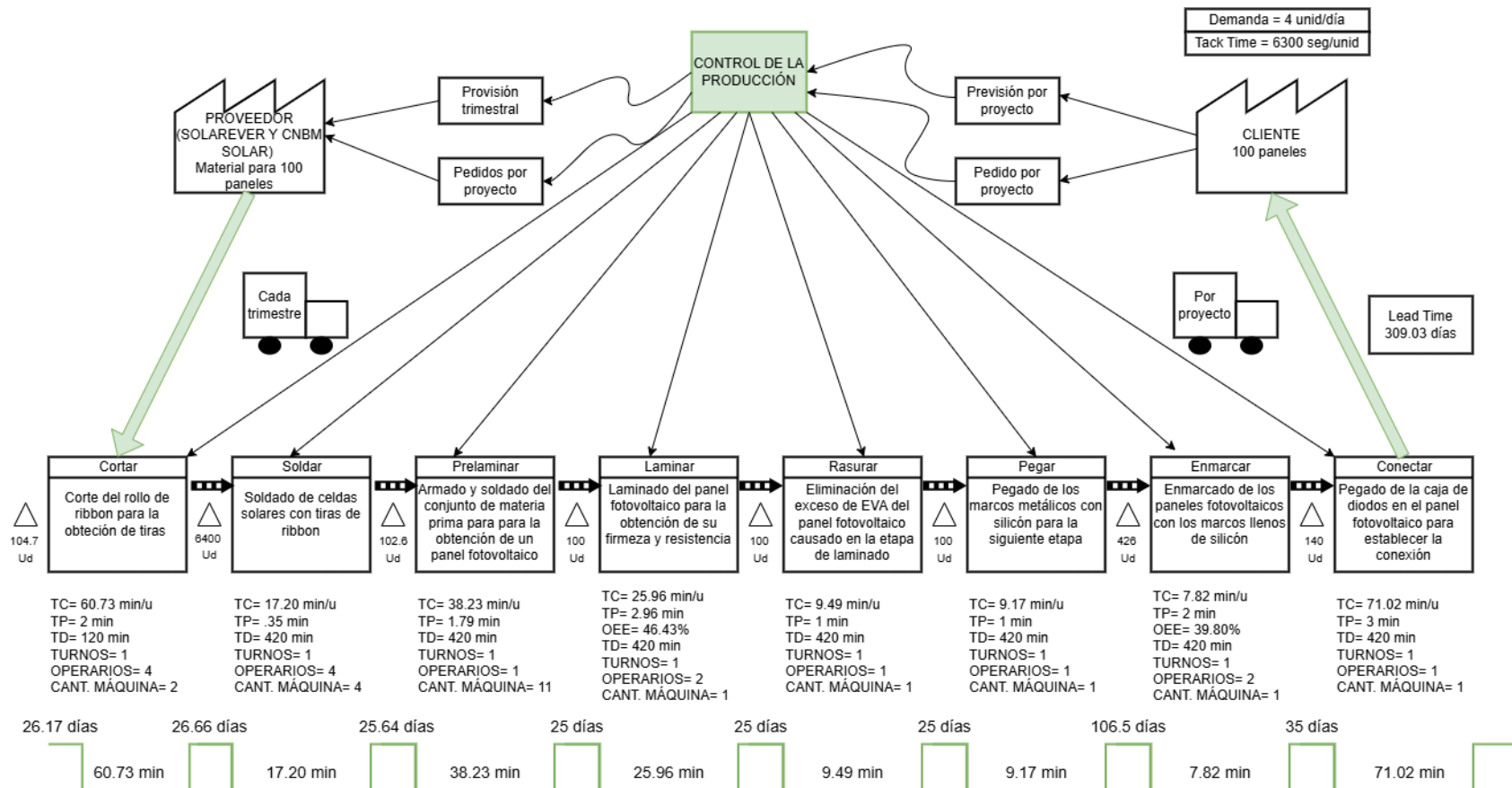


Figura 3.5 VSM actual de la empresa

3.1.3.3 Análisis del VSM actual

Se determinó que el tiempo de ciclo total es de 239.62 minutos, lo cual, para satisfacer la demanda de los 100 paneles entre los 420 minutos al día, da un total de 57.05 días laborales, sin embargo, para los 25 días disponibles al mes resulta imposible lograrlo, de igual manera, hay una gran variación entre los tiempos de ciclo de cada proceso, por ejemplo, el tiempo de ciclo en la etapa de laminado es significativamente mayor (25.96 min/u) en comparación con otros como Rasurar (9.49 min/u) o Pegar (9.17 min/u), esto genera cuellos de botella, especialmente en el proceso de laminado, que impacta negativamente en el flujo de producción y aumenta el Lead Time general.

El Lead Time total es de 309.03 días lo cual es bastante alto en relación a la demanda de 4 unidades por día, indicando ineficiencias que aumentan el tiempo necesario para completar un panel, por último, el inventario acumulado entre procesos es alto en algunas etapas, lo que ocasiona desperdicio de tiempo y recursos. Mantener tanto inventario entre procesos genera mayores tiempos de espera y costos adicionales.

3.2 Etapa II. Diseño

3.2.1 Kaizen en proceso de corte de ribbon

3.2.1.1 Análisis

En el primer proceso denominado “**Corte de ribbon**”, se opera de manera manual, midiendo y cortando las tiras de ribbon dependiendo de la habilidad y precisión del operador, provocando que, en ocasiones, las tiras de ribbon no salgan de la medida requerida, o, salgan en mal estado por una mala manipulación. En tabla 3.15 muestra las observaciones realizadas y el número de tiras de ribbon que fueron desechadas según los estados de la tabla 3.16:

Tabla 3.15 Observaciones de tiras de ribbon

Manera manual	
Observación	Estado del ribbon
1	Bueno
2	Bueno
3	Bueno
4	Bueno
5	Bueno
6	Medida incorrecta
7	Bueno
8	Bueno
9	Mal secado
10	Mal estado
11	Bueno
12	Bueno
13	Bueno
14	Bueno
15	Bueno
16	Mal estado
17	Bueno
18	Bueno
19	Medida incorrecta
20	Bueno

Tabla 3.16 Estados de las tiras de ribbon

Estados del ribbon
Bueno
Medida incorrecta
Mal secado
Mal estado (arrugado, cortado)

Obteniendo un 75% de efectividad en las tiras de ribbon de las 20 observaciones realizadas, indicando que existe un 25% de materia defectuosa lograda por 3 causas, que son, la mala toma de medida de las tiras, un mal secado por parte de la tina de Flux y la incorrecta manipulación de las tiras, consiguiendo una ruptura o deformación.

3.2.1.2 Modificación

La máquina conocida como "stringer" estaba originalmente diseñada para cumplir dos funciones principales: corte y soldado de ribbon, no obstante, presentaba limitaciones en su operación debido a las especificaciones de las celdas fotovoltaicas utilizadas en la empresa, ya que, la máquina está diseñada para trabajar con celdas fotovoltaicas de 2 bus-bars, sin embargo, en la empresa se utilizan celdas de 4 bus-bars, lo que hacía inviable su operación en el contexto actual de producción, como consecuencia esta máquina permanecía inhabilitada obligando a realizar el corte de ribbon de manera manual. Las tareas que se realizan son las que se muestran en la tabla 3.17.

Tabla 3.17 Tareas realizadas en el procedimiento de cortado de ribbon

Tarea
Cortado de tiras de ribbon
Almacenamiento de tiras de ribbon en tina
Retirado de tiras de ribbon de la tina de flux
Transporte de tiras de ribbon a mesa de trabajo
Secado de tiras de ribbon
Transporte de tiras de ribbon a estaciones de trabajo

De esta forma, se llevó a cabo una propuesta de mejora enfocado en adaptar la funcionalidad de la máquina stringer al nuevo contexto productivo, donde el objetivo principal era habilitar al menos una de las funciones de la máquina para incrementar la eficiencia y reducir tiempos de producción, por lo que, se rediseñó parcialmente el sistema de corte de ribbon de la máquina para que pudiera realizar cortes adecuados para celdas de 4 bus-bars. La modificación incluyó ajustes en los mecanismos de corte, logrando que la máquina pudiera cortar 4 líneas de ribbon simultáneamente. Si bien el sistema de corte de ribbon fue exitosamente modificado, la función de soldado de ribbon no pudo ser habilitada, debido a restricciones presupuestarias, esto implicó que el soldado de ribbon continuara realizándose de manera manual o con otros equipos, de esta manera, se realizó

un manual de procedimientos para las nuevas tareas que se desempeñan en la utilización de la máquina stringer, donde las actividades son las de la tabla 3.18.

Tabla 3.18 Nuevas actividades del procedimiento de cortado de ribbon

Tarea
Liberación de ribbon
Presionado de padel
Jalado del ribbon
Jalado del carrito
Pulsado de botones bimanuales

3.2.1.3 Resultado

La implementación de la máquina stringer tuvo como propósito aumentar el porcentaje de efectividad de la obtención de tiras de ribbon, además de brindar una mayor estandarización de las tiras para su uso posterior, así como reducir de manera significativa en los tiempos del procedimiento de corte de ribbon, aumentando la eficiencia del proceso, por último, reutilizar un equipo que previamente estaba inactivo utilizando el uso de los recursos disponibles. En la tabla 3.19 se muestra las nuevas observaciones realizadas y el estado de estas tras 20 observaciones, donde se muestra que la introducción de la máquina stringer para el corte semiautomático de ribbon, generó una mejora 15%, además de reducir a únicamente 2 estados: bueno y mal secado.

Tabla 3.19 Nuevas Observaciones de tiras de ribbon

Stringer	
Observación	Estado del ribbon
1	Bueno
2	Bueno
3	Bueno
4	Bueno
5	Bueno
6	Bueno
7	Bueno
8	Bueno
9	Bueno
10	Bueno
11	Bueno
12	Bueno
13	Mal secado
14	Mal secado
15	Bueno
16	Bueno
17	Bueno
18	Bueno
19	Bueno
20	Bueno

3.2.2 Estudio de repetibilidad y reproducibilidad en proceso de soldadura manual

3.2.2.1 Diseño de R&R en proceso de soldadura manual

Para la evaluación del sistema de medición en el **proceso de soldadura manual** de celdas fotovoltaicas, se llevó a cabo un estudio R&R con el propósito de asegurar que la variabilidad del sistema de medición no sobrepase la variabilidad propia del proceso. Este procedimiento de soldadura es fundamental en la formación de los strings, que son hileras de celdas solares unidas con tiras de ribbon, y debido a que se realiza de manera manual, resulta más propenso a variaciones, por lo tanto, contar con un sistema de medición confiable es esencial para lograr una mayor consistencia en la calidad del producto final.

3.2.2.2 Selección de factores

Antes de realizar el estudio, se identificaron tres factores clave que influyen directamente en la calidad y la consistencia del proceso de soldadura manual de las celdas: la presión ejercida durante la soldadura, el tiempo requerido para completar la unión de la tira de ribbon a la celda, y la temperatura del cautín al finalizar su recorrido. Estos factores fueron seleccionados no sólo por su impacto en el resultado final, sino también porque representan aspectos críticos de la técnica utilizada por el operador, influyendo en la formación adecuada de la unión, y determinan el estado del ribbon, y de la celda al concluir el proceso. Al comprender la relevancia de cada uno, se estableció una base de datos para el análisis estadístico posterior, permitiendo así que los datos duros recolectados tuvieran un contexto claro y estuvieran alineados con los objetivos del estudio.

3.2.2.3 Selección de replicas y partes

En cuanto al número de réplicas y partes seleccionadas, se estableció que cada operador realizaría dos réplicas por cada una de las seis partes medidas, generando un total de 24 observaciones por factor. Esta elección se debió principalmente a la disponibilidad limitada de celdas fotovoltaicas, que son componentes costosos y delicados, por lo que resultaba difícil aumentar indefinidamente la cantidad de muestras. Las dos réplicas por parte fueron suficientes para obtener una medición representativa y confiable sin comprometer el material disponible, de esta manera, se equilibró la necesidad de contar con datos adecuados para el análisis estadístico con la salvaguarda del recurso limitado, manteniendo la integridad del estudio y evitando el desperdicio de celdas.

3.2.2.4 Método de R&R

Una vez definidos estos parámetros, se realizaron las mediciones en el área de trabajo. Los datos obtenidos para cada uno de los factores se recopilaron y se organizaron en una hoja de trabajo para su análisis en el software estadístico. Este software permitió llevar a cabo un estudio de análisis cruzado (Xbarra y R), en el cual se evaluaron los componentes de variación para el sistema de medición.

3.2.2.5 Análisis de datos y resultados obtenidos en factor de tiempo

Con respecto a el factor de tiempo de soldado, los resultados mostraron que el porcentaje de contribución total del sistema de medición, representado por el valor de Gage R&R total, fue de 43.65%, esto indica que el sistema de medición tiene una participación moderada en

la variabilidad total del proceso. Dentro del sistema de medición, la repetibilidad representó el 43.65% de la contribución total, mientras que la reproducibilidad fue de 0%, lo que indica que no hubo diferencias significativas entre los operadores al realizar las mediciones. La variación parte a parte fue la mayor fuente de variación, con un valor de 56.35%, lo que indica que el sistema de medición puede diferenciar adecuadamente entre las diferentes partes medidas.

En la evaluación del sistema de medición, el porcentaje de variación del estudio (“%Varianza del Estudio”) para el Gage R&R total fue de 66.07%, lo que indica que más del 60% de la variación total es atribuible al sistema de medición, este valor está por encima del umbral recomendado del 30%, lo que sugiere que el sistema de medición requiere mejoras para reducir su impacto en la variabilidad total del proceso.

En los gráficos generados para este factor, mostrados en la imagen 3.6, se observó en la gráfica Xbarra por operadores que los promedios de las mediciones para cada parte están alineados dentro de un rango consistente, lo que indica que no hay diferencias significativas entre los operadores al medir el tiempo de soldadura, sin embargo, también se aprecia una dispersión moderada dentro de cada operador, lo que contribuye a la variabilidad total del sistema. En la gráfica R por operadores, los rangos de las mediciones para cada parte son bajos y consistentes, lo que refuerza que la repetibilidad es aceptable dentro de un mismo operador. En el gráfico de interacción partes por operadores se aprecia que las diferencias entre partes son perceptibles, pero la variabilidad dentro del sistema de medición limita su capacidad para distinguir estas diferencias con mayor precisión.

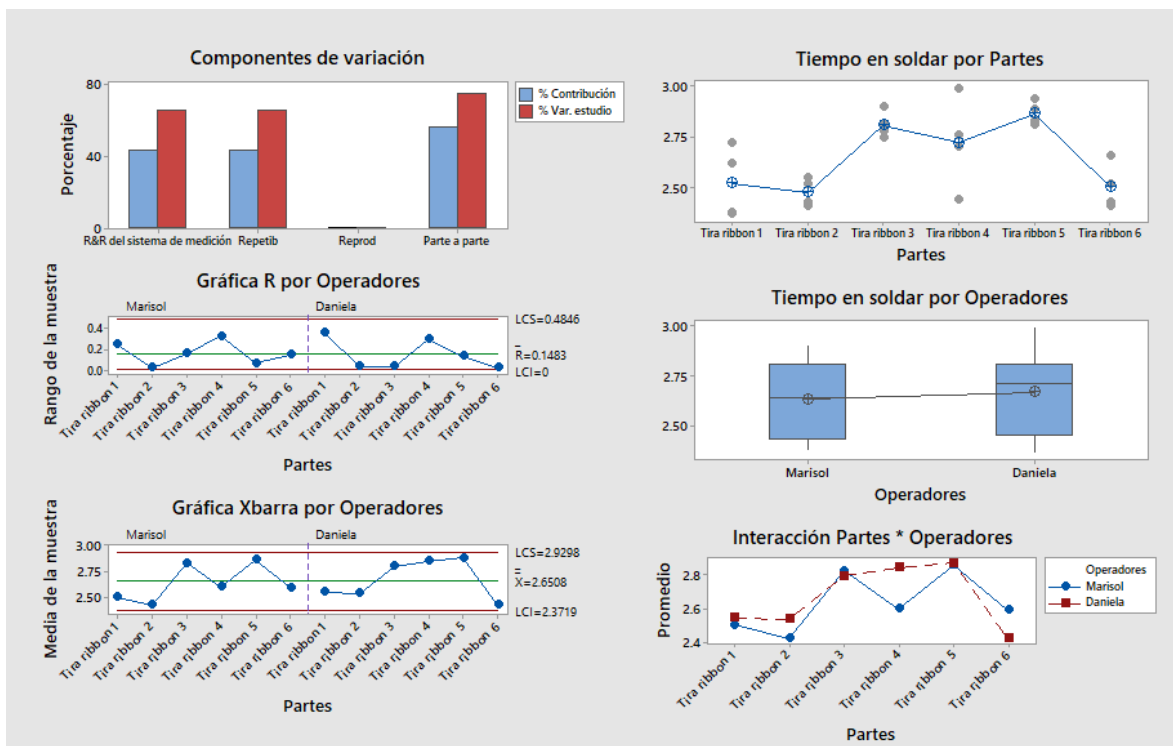


Figura 3.6 gráficos R&R en factor del tiempo de soldado

3.2.2.6 Análisis de datos y resultados obtenidos en factor de presión

El análisis del sistema de medición para el factor presión ejercida durante la soldadura de tiras de ribbon, mostró resultados que reflejan un sistema con problemas significativos en su capacidad de medición. El porcentaje de contribución total del Gage R&R fue de 76.84%, lo que indica que el sistema de medición introduce una variabilidad considerable en el proceso. Dentro de este porcentaje, la repetibilidad representó el 76.84%, mientras que la reproducibilidad fue del 0%, lo que reafirma que los operadores no son una fuente de variabilidad significativa. La variación parte a parte tuvo un valor de 23.16%, lo que refleja que, aunque existe diferenciación entre las partes, esta se ve opacada por la alta contribución del sistema de medición.

En la evaluación del sistema de medición, el porcentaje de variación del estudio (“%Varianza del Estudio”) para el Gage R&R fue de 87.66%, un valor que excede ampliamente el umbral recomendado del 30%. Esto confirma que el sistema de medición no es adecuado para garantizar mediciones confiables del factor presión.

Los gráficos generados para este factor, como se muestra en la imagen 3.7, reflejan estos problemas de variabilidad. En la gráfica Xbarra por operadores, los promedios de las mediciones muestran cierta alineación, pero también una notable dispersión dentro de las mediciones realizadas por un mismo operador. En la gráfica R por operadores, los rangos entre las mediciones son altos, lo que refuerza que la variabilidad dentro de un mismo operador es una de las principales fuentes de error en el sistema. La gráfica de interacción partes por operadores muestra una falta de consistencia en las mediciones, aunque no hay un sesgo evidente entre operadores, las interacciones destacan una variabilidad significativa en la presión medida para las diferentes partes.

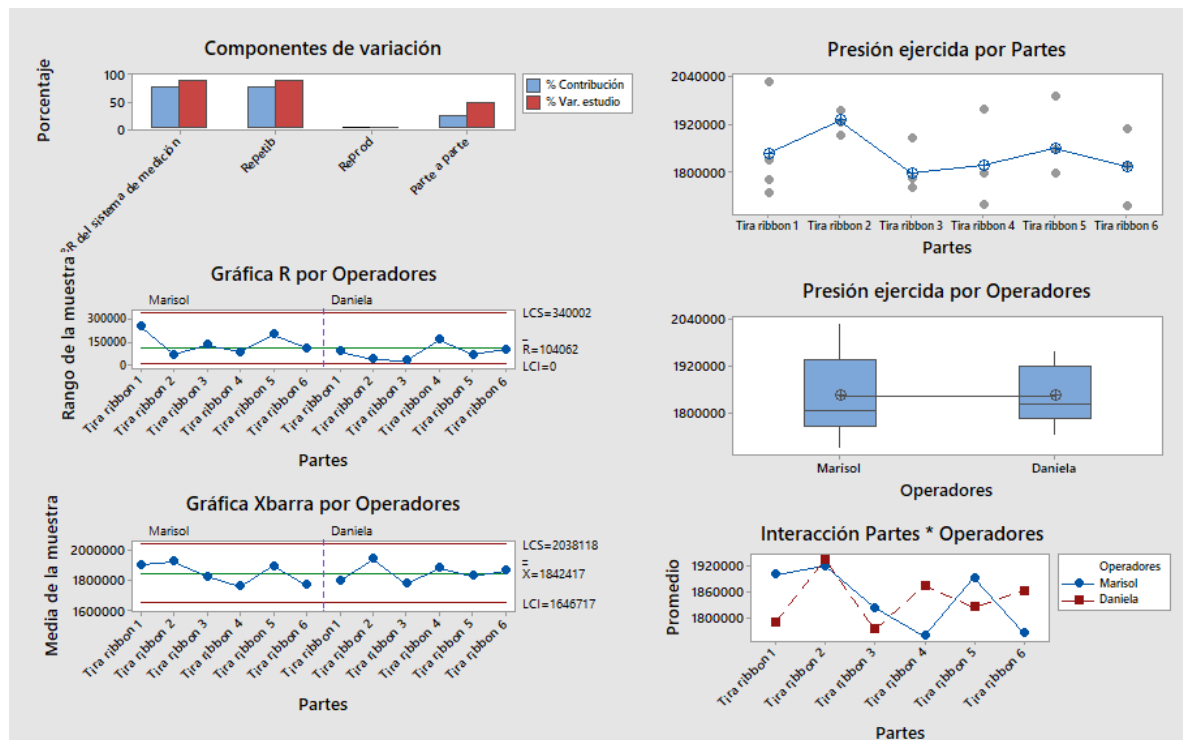


Figura 3.7 gráficos R&R en factor de la presión de soldado

3.2.2.7 Análisis de datos y resultados obtenidos en factor de temperatura

El análisis del sistema de medición para el factor temperatura del cautín en el proceso de soldadura manual, arrojó resultados que reflejan un sistema con una capacidad adecuada para distinguir entre las diferentes partes medidas. El porcentaje de contribución total del Gage R&R fue de 6.20%, indicando que el sistema de medición introduce una variabilidad muy baja en el proceso, y cumple con los criterios aceptables para un sistema confiable. Dentro de este porcentaje, la repetibilidad representó el 6.20%, mientras que la

reproducibilidad fue del 0%, lo que confirma que no existen diferencias significativas entre los operadores al realizar las mediciones. La variación parte a parte tuvo un valor destacado del 93.80%, lo que refleja que el sistema de medición es altamente capaz de diferenciar entre las partes medidas.

En la evaluación del sistema de medición, el porcentaje de variación del estudio (“%Varianza del Estudio”) para el Gage R&R fue de 24.90%, un valor que está dentro de los límites recomendados y que demuestra que el sistema tiene un impacto reducido en la variabilidad total del proceso, de igual modo, el número de categorías distintas (“NDC”) fue igual a 5, lo que evidencia que el sistema de medición tiene la resolución suficiente para distinguir entre las diferentes partes evaluadas, cumpliendo con los estándares mínimos para un sistema de medición adecuado.

Los gráficos de la imagen 3.8, proporcionan información complementaria al análisis cuantitativo. En la gráfica Xbarra por operadores, los promedios de las mediciones para cada parte están alineados dentro de un rango estrecho, lo que indica que ambos operadores miden de manera consistente y que no hay variación significativa entre ellos. En la gráfica R por operadores, los rangos entre las mediciones son bajos, lo que confirma que la repetibilidad del sistema es aceptable y que la variabilidad dentro de un mismo operador es mínima. La gráfica de interacción partes por operadores muestra una ligera variabilidad en la interacción entre operadores y partes, pero esta es insignificante en comparación con la variación por parte, lo que refuerza la capacidad del sistema para capturar diferencias reales entre las partes.

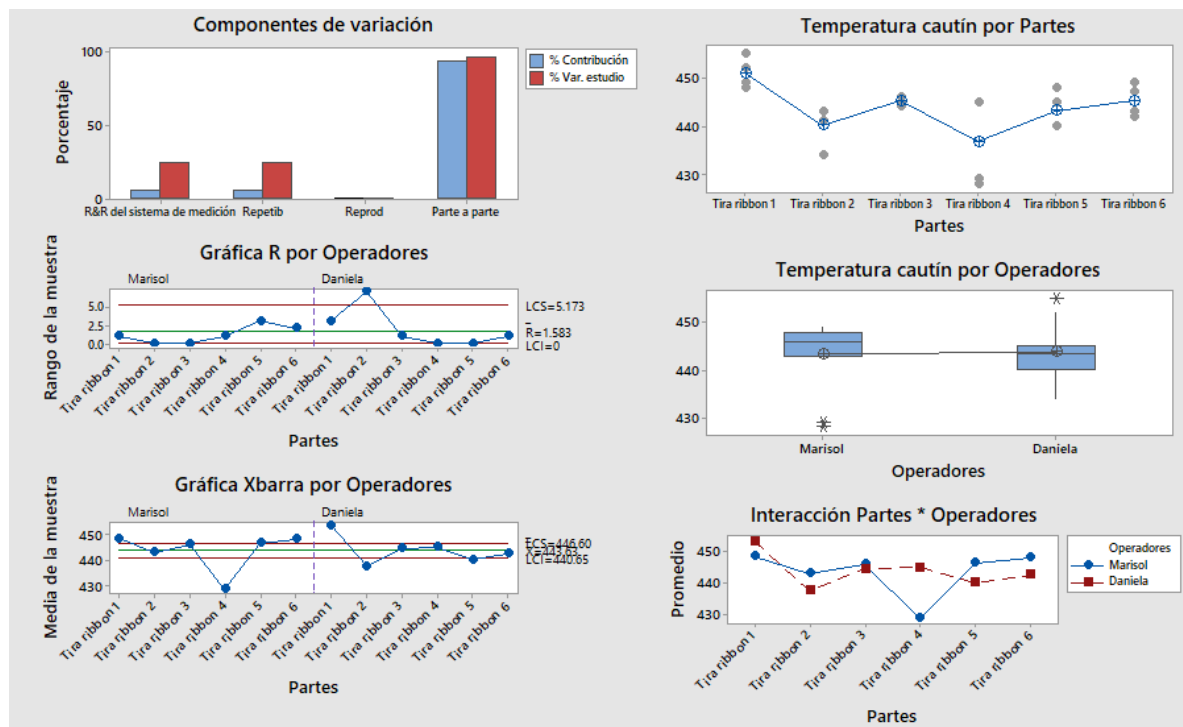


Figura 3.8 gráficos R&R en factor de la temperatura del cautín

3.2.2.8 Conclusiones de proceso R&R en proceso de soldadura manual

Al considerar los resultados obtenidos para los tres factores analizados (tiempo de soldadura, presión ejercida y temperatura del cautín), se observó que, por un lado, el factor temperatura del cautín demostró un sistema de medición con alta confiabilidad, capaz de distinguir claramente las diferencias entre las partes y, cumpliendo con las recomendaciones establecidas para un sistema de medición adecuado. Esta situación favorece la consistencia en la identificación de variaciones reales y permite mantener un control sobre el proceso, por lo cual, se recomendó mantener las buenas prácticas demostradas en el factor temperatura, lo que incluye una calibración regular de los equipos de medición que asegure su precisión a lo largo del tiempo, así como la capacitación periódica de los operadores para fortalecer su conocimiento y habilidad en la toma de mediciones.

En contraste, los factores tiempo de soldadura y presión ejercida presentan un desafío más complejo, puesto que, la medición manual introdujo una variabilidad considerable que dificulta la diferencia efectiva entre partes, lo que se reflejó en valores elevados de Gage R&R y porcentajes de variación del estudio superiores a los recomendados. Estas

circunstancias indican que, la metodología actual no resulta suficiente para brindar la precisión requerida, principalmente debido a que el proceso es manual, depende de la destreza de los operadores y carece de las condiciones necesarias para automatizarlo. Además, los intentos por aplicar estándares estrictos de tiempos y presiones durante la soldadura manual resultaron contraproducentes, ya que llevar a los operadores a seguir parámetros fijos generó soldaduras inadecuadas, dificultando aún más la estabilización del proceso.

Dada la imposibilidad de estandarizar estrictamente las condiciones de tiempo y presión, debido tanto a limitaciones económicas como a la naturaleza manual del procedimiento que impiden la automatización, se optó por aplicar control de calidad en las celdas utilizando un dinamómetro para medir la fuerza de adherencia de la soldadura del ribbon, asegurando que soporte una fuerza mínima de ≥ 5 N. Basándose en la normativa ISO 2859-1 (ANSI/ASQC Z1.4), y considerando un tamaño de lote de 240 celdas (correspondientes a los 4 paneles que se deben producir diariamente), se implementó un Nivel de Inspección General I y un Nivel de Calidad Aceptable (AQL) del 2.5%, de este modo, se examinan 13 celdas de manera aleatoria, aceptando un máximo de una celda defectuosa y rechazando el lote si se encuentran dos o más celdas en mal estado.

3.2.3 Estudio de repetibilidad y reproducibilidad en proceso de pre laminado

3.2.3.1 Diseño de R&R en proceso de pre laminado

Para la evaluación del sistema de medición en el **proceso de pre laminado** de los 6 strings, se llevó a cabo otro estudio R&R, con el propósito de asegurar que la variabilidad introducida por el sistema de medición no sobrepase la variabilidad del proceso. Este procedimiento es importante para la calidad final del producto, ya que implica el ensamble previo a la laminación del panel fotovoltaico, un momento clave en el que preparar correctamente los componentes y, acomodarlos con cuidado, asegurará que el panel funcione de manera eficiente una vez finalizado.

3.2.3.2 Selección de factores

Antes de iniciar el estudio, se definieron tres factores fundamentales que influyen directamente en la calidad del pre laminado: la temperatura de la antorcha para soldar el TAP, el tiempo durante el cual la antorcha se presiona sobre el TAP y, la medición del voltaje que estos generan. Estos factores fueron seleccionados por su impacto directo en

la fiabilidad de la unión y en la capacidad del panel para operar adecuadamente bajo las condiciones específicas de funcionamiento.

3.2.3.3 Selección de replicas y partes

Con la finalidad de equilibrar el rigor estadístico con la disponibilidad de recursos, y reconociendo que el material y las condiciones no permiten un número alto de ensayos, se optó por un número razonable de 2 réplicas y 5 partes, de manera que las mediciones resultaran representativas sin comprometer la integridad de los componentes.

3.2.3.4 Método de R&R

El análisis del sistema de medición para los factores seleccionados, se realizó utilizando el método de ANOVA debido a la configuración de un solo operador.

3.2.3.5 Análisis de datos y resultados obtenidos en factor de temperatura

Los resultados obtenidos muestran que el sistema de medición tiene una contribución significativa a la variabilidad total del proceso. En los resultados del ANOVA, el valor de la significancia indica que la variabilidad entre las partes es marginalmente significativa, lo que implica que el sistema no logra diferenciar claramente entre las diferentes partes evaluadas.

El porcentaje de contribución del sistema de medición, representado por el Gage R&R total, fue de 56.65%, lo que indica que más de la mitad de la variabilidad total es atribuible al sistema de medición. Dentro de este valor, la repetibilidad tuvo una contribución del 56.65%, mientras que no se detectó reproducibilidad debido a la participación de un único operador.

En la evaluación del sistema de medición, el porcentaje de variación del estudio (“%Varianza del Estudio”) fue del 75.27% para el Gage R&R total. Este valor excede ampliamente el límite recomendado del 30%, indicando que el sistema de medición no es confiable para evaluar este factor.

Los gráficos generados mostrado en la imagen 3.9, respaldan estos resultados. En la gráfica Xbarra, las medias de las mediciones muestran una variabilidad entre partes, pero esta se ve afectada por la alta contribución de la repetibilidad. La gráfica R por partes refleja una variabilidad considerable en los rangos dentro de las mediciones realizadas para cada parte, lo que sugiere inconsistencias dentro del mismo operador. Además, el gráfico de temperatura de la antorcha por partes muestra una dispersión significativa, lo que refuerza la falta de precisión del sistema para capturar las diferencias reales entre las partes.

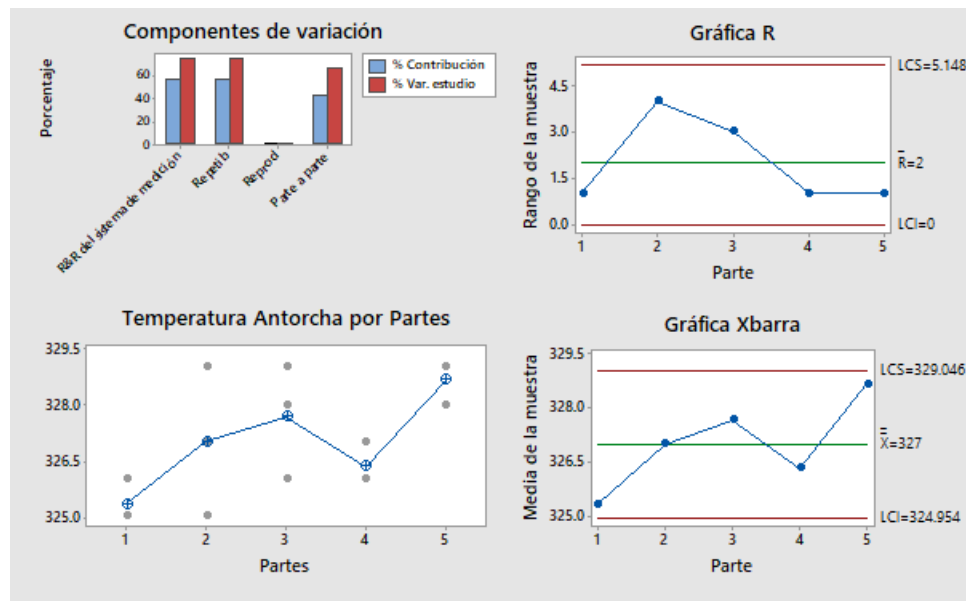


Figura 3.9 gráficos R&R en factor de temperatura de la antorcha

3.2.3.6 Análisis de datos y resultados obtenidos en factor de voltaje

El análisis del sistema de medición para el factor de voltaje arrojó resultados que reflejan un sistema de medición con un rendimiento adecuado. En los resultados del ANOVA, el valor indica que existen diferencias significativas entre las partes medidas, lo que sugiere que el sistema de medición es capaz de distinguir efectivamente entre las diferentes partes. El porcentaje de contribución del Gage R&R total fue de 8.74%, lo que cumple con los criterios recomendados para un sistema de medición confiable. La mayor parte de la variación total fue atribuible a la variabilidad parte a parte, con un porcentaje de contribución del 91.26%, lo que refuerza la capacidad del sistema para captar las diferencias reales en el voltaje de las partes evaluadas.

En la evaluación del sistema de medición, el porcentaje de variación del estudio (“%Varianza del Estudio”) para el Gage R&R total fue de 29.56%, un valor que está dentro del límite aceptable del 30%. Además, el número de categorías distintas (“NDC”) fue igual a 5, lo que confirma que el sistema de medición tiene la resolución suficiente para distinguir entre las diferentes partes medidas.

Los gráficos de la imagen 3.10, complementan estos resultados. En la gráfica Xbarra, los promedios de las mediciones muestran diferencias claras entre las partes, mientras que la gráfica R indica que la variabilidad dentro de las mediciones es baja y consistente.

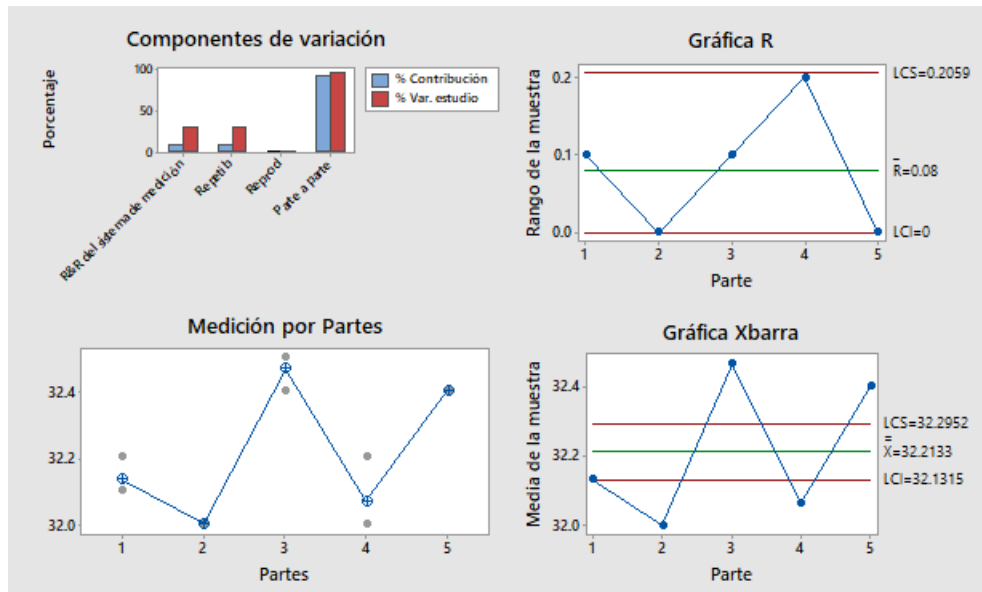


Figura 3.10 gráficos R&R en factor del voltaje del multímetro

3.2.3.7 Análisis de datos y resultados obtenidos en factor de tiempo

Por último, el análisis del sistema de medición para el factor tiempo de soldado indica que el porcentaje de contribución del Gage R&R total fue de 49.18%, mientras que la variabilidad parte a parte representó el 50.82%. Esto sugiere que el sistema tiene dificultades para distinguir completamente las diferencias reales entre las partes debido a una contribución relativamente alta de la repetibilidad.

En la evaluación del sistema de medición, el porcentaje de variación del estudio (“%Varianza del Estudio”) para el Gage R&R total fue del 70.13%, lo que excede el límite recomendado del 30% y confirma que el sistema no es confiable para este factor.

Los gráficos mostrados en la figura 3.11, muestran una notable variabilidad en las mediciones. En la gráfica Xbarra, los promedios muestran diferencias perceptibles entre las partes, pero el rango de la gráfica R destaca una variabilidad dentro de las mediciones que limita la precisión del sistema. En el gráfico de tiempo de soldado por partes, las mediciones individuales presentan dispersión, reflejando la necesidad de mejorar la consistencia del sistema.

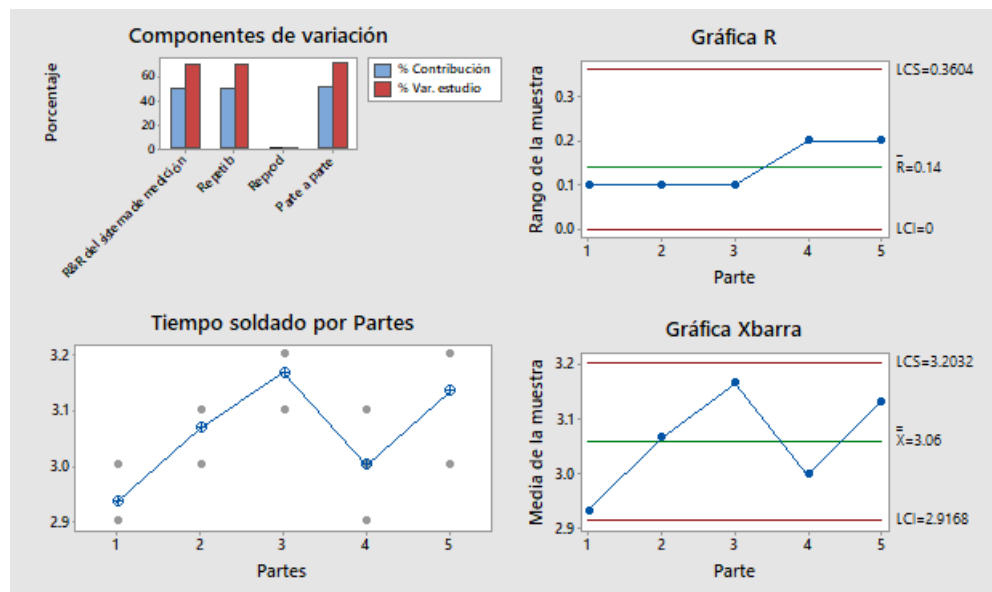


Figura 3.11 gráficos R&R en factor del tiempo de soldado

3.2.3.8 Conclusiones del estudio R&R en proceso de prelamado

Con base en los resultados obtenidos del factor de temperatura, se recomendó realizar una calibración periódica del equipo para minimizar el impacto de la variabilidad técnica, pues el mantenimiento en estos equipos es nulo, lo que ocasiona que, además de las altas variaciones, las antorchas se descompongan de manera continua.

Con respecto a los resultados del factor de voltaje, el sistema de medición cumple con los criterios recomendados y presenta un buen desempeño en la medición del voltaje, no se requieren mejoras significativas, no obstante, se recomendó mantener las buenas prácticas actuales, como la calibración regular del equipo.

Las altas variabilidades del factor de tiempo son debido a que, el procedimiento se hace de manera manual, ocasionando que el tiempo de soldado del operario sea muy variable, pues mantener un tiempo estándar es difícil por la habilidad y el equipo limitado, además de que, debido a los otros factores medidos, suman a que la variabilidad sea más notable, puesto que, aún que se encuentran con variabilidad mínima o aceptable, la falta de programas de mantenimiento hacen que existan problemas continuos en los equipos utilizados, de esta manera, se propuso un programa de mantenimiento y verificación para los equipos, con el propósito de que se mantengan calibrados y en buen estado, reduciendo la variabilidad del tiempo de soldado, puesto que ocasionalmente hay problemas en la antorcha, también, se

consideró beneficioso realizar capacitaciones adicionales para el operador, asegurando que las mediciones sean realizadas de manera uniforme y precisa.

3.2.4 Diseño de experimentos

3.2.4.1 Análisis del proceso

Durante el proceso de fabricación de los paneles fotovoltaicos, se detectó un problema en los paneles fotovoltaicos que salían de la laminadora debido a un calentamiento excesivo, lo que generaba variaciones en el voltaje, puesto que parte de los paneles fotovoltaicos presentaban signos de quemadura en los bordes de la celda, en la siguiente tabla muestra el número de paneles observados en 3 corridas, y que parte de ellos presentaban este tipo de defectos.

Tabla 3.20 Observaciones de paneles fotovoltaicos con el método actual

Observación	Estado del ribbon
1	Bueno
2	Bueno
3	Quemadura
4	Bueno
5	Bueno
6	Bueno
7	Bueno
8	Quemadura
9	Bueno

3.2.4.2 Selección del diseño factorial

Este problema originó investigar y modificar los dos factores principales de la laminadora: tiempo y temperatura. Basado en la ficha técnica del EVA, se definieron tres niveles experimentales para la temperatura: 115 °C, 120 °C y 125 °C. Para el tiempo, se establecieron tres niveles: 12.6 segundos, 13.4 segundos y 14.2 segundos, sin embargo, se sospechó que las tolerancias de ± 5 grados causaban inconsistencias, por lo que se diseñaron pruebas con un diseño factorial completo y dos corridas. En la tabla 3.21 se muestran los valores considerados junto con el voltaje registrado mediante el software estadístico.

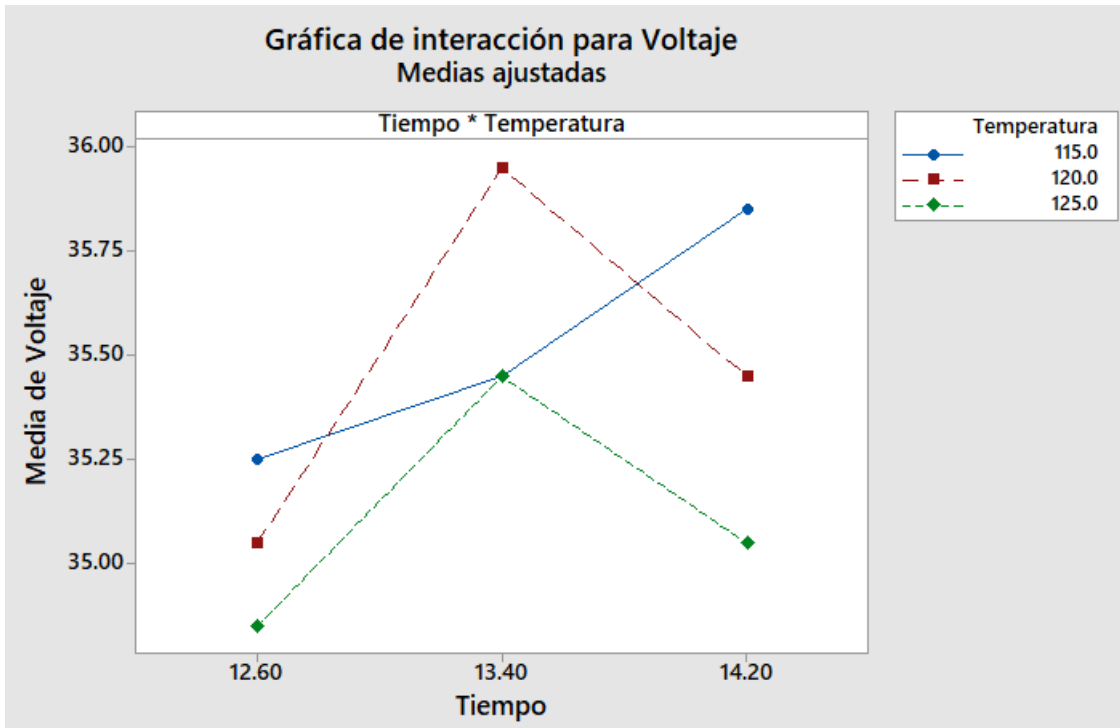
Tabla 3.21 Parámetros registrados para el diseño de experimentos

OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	Tiempo	Temperatura	Voltaje
1	1	1	1	12.6	115	35.2
2	2	1	1	12.6	120	35.1
3	3	1	1	12.6	125	34.9
4	4	1	1	13.4	115	35.3
5	5	1	1	13.4	120	35.9
6	6	1	1	13.4	125	35.5
7	7	1	1	14.2	115	35.8
8	8	1	1	14.2	120	35.4
9	9	1	1	14.2	125	35.0
10	10	1	1	12.6	115	35.3
11	11	1	1	12.6	120	35.0
12	12	1	1	12.6	125	34.8
13	13	1	1	13.4	115	35.6
14	14	1	1	13.4	120	36.0
15	15	1	1	13.4	125	35.4
16	16	1	1	14.2	115	35.9
17	17	1	1	14.2	120	35.5
18	18	1	1	14.2	125	35.1

3.2.4.3 Análisis del diseño factorial

El análisis de varianza indicó que tanto el tiempo como la temperatura, y su interacción, tienen efectos significativos en el voltaje del panel. El modelo general fue altamente significativo (valor p de 0.000), confirmando que estos factores explican una proporción importante de la variabilidad en el voltaje. Los niveles extremos de tiempo (12.6 y 14.2 segundos) mostraron efectos negativos, mientras que el nivel intermedio (13.4 segundos) fue el más favorable. La temperatura de 120 °C maximizó el voltaje, mientras que incrementarla a 125 °C lo redujo ligeramente debido al riesgo de quemaduras. La combinación de 13.4 segundos y 120 °C maximizó el voltaje sin comprometer la calidad. Combinaciones altas en tiempo y temperatura disminuyeron el voltaje por sobrecalentamiento, mientras que combinaciones bajas (como se muestra en la imagen 3.12) aumentaron el voltaje pero comprometieron la integridad del panel.

Figura 3.12 Interacción para el voltaje con los factores de tiempo y temperatura



3.2.4.4 Resultados

Este estudio permitió asegurar los parámetros óptimos de operación para la laminadora, estableciendo que niveles intermedios de tiempo y temperatura son ideales para garantizar un voltaje estable y evitar defectos, de igual modo, gracias a estos hallazgos, se redujeron las tolerancias del panel a ± 3 grados, mejorando la consistencia y calidad de los paneles fotovoltaicos. En la tabla 3.22 muestra el estado de los paneles fotovoltaicos tras 3 corridas.

Tabla 3.22 Observaciones de paneles fotovoltaicos tras aplicar nuevos parámetros

Observación	Estado del ribbon
1	Bueno
2	Bueno
3	Bueno
4	Bueno
5	Bueno
6	Bueno
7	Bueno
8	Bueno
9	Bueno

Tras obtener parámetros óptimos a partir del diseño de experimentos, fue evidente que, si bien se habían determinado condiciones favorables para mejorar la calidad y la estabilidad del laminado, aún subsistían ineficiencias en el flujo operativo que dificultaban aprovechar plenamente dichos ajustes, de este modo, la aplicación de la metodología **SMED** surgió como una herramienta complementaria fundamental, ya que su enfoque no consiste en alterar las variables críticas del proceso (como tiempo o temperatura), sino en mejorar la secuencia y la organización de las actividades necesarias antes, durante, y después de la laminación, donde se buscó disminuir el tiempo total de ciclo del laminado, incrementar la disponibilidad de la máquina y, en consecuencia, generar un entorno más eficiente y coherente con los resultados favorables alcanzados mediante el diseño de experimentos.

3.2.5 SMED

3.2.5.1 Separación de operaciones internas y externas

El procedimiento de laminado, el cual consiste principalmente de 4 actividades (transporte de paneles, colocación de paneles, proceso de laminado y proceso de enfriado) se detectó que, la actividad del proceso de enfriado causa retrasos debido al tiempo que requiere dentro del flujo principal, por lo que, para mejorar el mejorar el ciclo de este procedimiento, se aplica la metodología SMED con el objetivo de disminuir el tiempo total de ciclo. Como primer paso, se colocan las actividades de preparación de la máquina, clasificándolas en internas y externas, como se muestra en la tabla 3.23, además, de los tiempos en que se llegan a realizar.

Tabla 3.23 Realización de actividades del SMED

Paso	Actividad	Descripción	Actividad Interna/Externa	Tiempo Estimado (min)	Tiempo Real (min)
1	Limpieza del área de laminado	Limpiar los residuos o restos del proceso anterior para evitar contaminación.	Interna	0.33	0.38
2	Preparación de nuevos paneles	Inspección y preselección de los paneles nuevos antes de iniciar el cambio de formato.	Externa	1.50	1.55
3	Verificación de seguridad	Comprobación de que todas las configuraciones cumplen con los estándares	Interna	0.75	1.03

3.2.5.2 Modificación de operaciones internas en externas

Posteriormente, para el apartado de mejoras propuestas, la actividad de enfriado antes mencionada del procedimiento de laminado, se decide modificarla para que forme parte del proceso de preparación, colocándola como una actividad interna, de este modo, permite que el ciclo productivo continúe mientras los paneles se enfrían fuera del flujo principal de producción. Este ajuste logra reducir el tiempo de ciclo del laminado, aumentando la disponibilidad de la máquina para el siguiente lote, asimismo, se propone y aplica las mejoras de las actividades del proceso de preparación restantes. En la tabla 3.24 se muestra las mejoras y los nuevos tiempos de las actividades.

Tabla 3.24 Mejoras propuestas del SMED

Paso	Actividad	Mejora Propuesta	Tiempo después de la Mejora (min)
1	Traslado de paneles enfriados	Convertirla en una actividad externa, trasladando los paneles enfriados a un área	10.00
2	Limpieza del área de laminado	Asignar a un operario adicional para hacer la limpieza de manera anticipada	0.16
3	Preparación de nuevos paneles	Preparar los paneles en una estación previa cerca de la laminadora y mantener un	1.25
4	Verificación de seguridad	Estandarizar la verificación con un checklist.	0.50

3.2.6 Kaizen en proceso de colocación de caja de conexiones

3.2.6.1 Análisis

Tras optimizar las condiciones del laminado y agilizar el flujo mediante la aplicación del SMED, se identificó que el último procedimiento denominado “colocación de la caja de conexiones” aún persistía un punto crítico que afectaba el tiempo total del ciclo productivo.

3.2.6.2 Modificación

Este procedimiento, el cual consiste en 4 actividades como se muestra en la tabla 3.25, el tiempo de secado del adhesivo de la tercera actividad es de 65 minutos, el cual, causa un retraso significativo en el ciclo de producción. Aunque este paso no puede eliminarse debido a su importancia en la integridad del panel, se logró adaptar al proceso para que el secado no interfiriera en el flujo general. Para realizar esto, los paneles se ubicaban en un rack hasta que el último panel del lote diario (cuatro paneles) finalizara el secado, momento en

el cual se realizaba la instalación final de las cajas de diodos, permitiendo así un flujo continuo en el ciclo productivo y minimizando los tiempos de espera.

3.2.6.3 Resultado

De este modo, se realizan ajustes en la toma de tiempos para reflejar con mayor rapidez en el nuevo flujo. Se agrega una columna de "Tiempo Superpuesto" en el registro de tiempos, la cual indica qué actividades se realizan en paralelo, lo que permite calcular el tiempo real del proceso sin contar el tiempo de enfriamiento como adicional. Con esta nueva estructura, el "Tiempo Estándar" se actualiza para que el tiempo de enfriamiento ya no sume de forma independiente.

Tabla 3.25 Agregado del tiempo superpuesto en actividades del procedimiento de pegado de caja de diodos

Tarea	Operario 1					Tiempo observado	Rendimiento	Tiempo normal	Tiempo tipo	Tiempo superpuesto
	T1	T2	T3	T4	T5					
Selección de caja de diodos	0.06	0.08	0.07	0.08	0.08	0.074	1	0.074	0.08362	No
Colocación de silicón	2.86	2.81	2.82	2.73	2.71	2.786	1.25	3.4825	3.935225	No
Espera de pegado	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65	1	65	65	Si
Instalación de conexiones	2.02	2.20	2.05	2.01	2.09	2.074	1	2.074	2.34362	No
Tiempo estándar									6.362465	

3.2.7 AMEF

3.2.7.1 Análisis de procesos

La identificación y prevención de fallas potenciales resultan fundamentales para asegurar la calidad y confiabilidad del producto final, con este objetivo, se decidió aplicar el Análisis Modal de Efectos y Fallas (AMEF) a lo largo de los procesos que involucran maquinaria para la realización de la actividad, ya que esta herramienta permite anticipar, comprender y mitigar los riesgos que podrían surgir, incluso antes de que causen defectos en el panel fotovoltaico, además, al tratarse de un equipo sin manuales de trabajo ni fichas técnicas, el AMEF se convierte en un recurso valioso para establecer parámetros de operación seguros y robustos, garantizando la estabilidad del proceso y la integridad del producto.

3.2.7.2 Identificación de fallas potenciales

Para llevar a cabo este análisis, se siguió un proceso estructurado, primero, en el procedimiento inicial de corte de las tiras de ribbon, se observó la máquina recién instalada

durante varias semanas, documentando en conjunto con su operador los distintos problemas que se presentaban, así como las condiciones y situaciones que podrían originar fallas futuras. Esta etapa de recolección de datos permitió conocer el comportamiento real de la máquina en operación, identificando las fuentes potenciales de defectos.

Posteriormente, se aplicó la misma metodología a la laminadora, contando con la experiencia del operador para recopilar información acerca de las posibles inconsistencias que pudieran afectar el laminado del panel, tales como variaciones en las condiciones de calor, presión, o tiempos del proceso, de este modo, se integró la perspectiva del personal de operación, garantizando que la experiencia en campo se reflejara en la detección de modos de falla.

Por último, se replicó el enfoque en la enmarcadora, trabajando en estrecha colaboración con el operador responsable mediante entrevistas, observaciones directas y el análisis de reportes de incidencias previas, y así, se logró identificar los factores que podrían comprometer la correcta sujeción y alineación del panel durante el enmarcado. En la imagen 3.13 se muestra el resultado.

Función del Proceso /Pasos del Proceso	Requerimiento	Modo potencial de falla	Efecto potencial de falla	SEV	Causa(s) potencial de la falla	OCU	Controles actuales del proceso de prevención?	DET	Controles actuales de detección?	NPR	Acciones recomendadas	Responsabilidad y día de culminación
Pasos del proceso a analizar / describir el propósito de dicho paso	Son las entradas especificadas del proceso para cumplir los requerimientos de los clientes	¿De qué maneras puede fallar potencialmente el proceso para cumplir con los requerimientos?	¿Cuál es el efecto o consecuencia del modo de falla en las salidas y/o los requerimientos del cliente?	¿Qué tan severo es el efecto para el cliente?	¿Cómo puede ocurrir la falla? Describir en términos de algo que se pueda corregir o controlar. Sea Específico.	¿Qué tan frecuente ocurre el modo o causa de la falla?	¿Cuáles son los controles y procedimientos existentes (inspección y prueba) que previenen o detectan la ocurrencia?	¿Qué tan bien se puede detectar la causa o el Efecto?		SEV x OCU x DET	¿Cuáles son las acciones para reducir la ocurrencia, mejorar la detección o para identificar la causa raíz si es desconocida? Se deben tomar acciones solo en NPR's altos o fáciles de arreglar.	¿Quién es responsable de las acciones recomendadas?
Stringer	Cortado de ribbon	Poca presión del aire	No tenga el funcionamiento correcto / trabas en la stringer	8	El compresor no cumple con las especificaciones requeridas	7	Parar actividad por 5 minutos	6	Verificar el manometro cada 30 minutos	336	Cambiar compresor de aire por uno que cumpla los requerimiento de stringer	Ingeniero de Mantenimiento
		Mal posicionamiento del sensor	No corte las tiras de ribbon / baja eficiencia en la stringer	2	Uso constante del sensor lo que provoca que pierda sujeción	5	Calibración y ajuste de la tuerca cada inicio de turno	5	Ninguna	50	Ninguna	Ingeniero de procesos
		Se enreda el ribbon por liberar más de lo debido	Se pierde la línea del ribbon / produce merma	2	Exceso de ribbon lo que produce que se tuerca o un nudo	7	Limpieza y ajuste del rollo de ribbon	6	Ninguna	84	Ninguna	Ingeniero de procesos
Laminadora	Laminado de panel fotovoltaico	Poca presión del aire	No tenga el funcionamiento correcto / paro de línea	8	El compresor no cumple con las especificaciones requeridas	7	Para actividad cuando la presión sea baja	7	La máquina te arroja las advertencia	392	Cambiar compresor de aire por uno que cumpla los requerimiento de stringer	Ingeniero de Mantenimiento
		El calefactor se apaga	Perdida de tiempo	1	Falta de mantenimiento preventivo / aceite perdió sus propiedades	6	Mantenimiento de calefactor cada 6 meses	7	Ninguna	42	Ninguna	Ingeniero de procesos
Enmarcadora	Enmarcado de panel fotovoltaico	Las ventosas se quedan succionando el panel por error del sensor	No deja avanzar el proceso	2	Posible falla de una electroválvula	7	Mantenimiento y ajuste cada 6 meses	6	La máquina te arroja las advertencia	84	Cumplir con periodo de mantenimiento	Ingeniero de procesos
		Mal calibración del bush	Aplastamiento del panel	8	Exceso de presión	5	Mantenimiento y limpieza del bush cada 3 meses	7	La máquina te arroja las advertencia	280	Ninguna	Ingeniero de procesos

Figura 3.13 AMEF realizado para la maquinaria de la empresa

3.2.7.3 Revisión de resultados parciales

Además de estos pasos, se consideró la documentación de las acciones correctivas y preventivas propuestas, así como la evaluación periódica de las mismas, asegurando su efectividad en el tiempo. Se establecieron planes de mantenimiento, inspecciones regulares y controles adicionales que permitieran minimizar la probabilidad de ocurrencia y la severidad de los defectos, ocasionando que, el AMEF no sólo se utilizara para identificar fallas potenciales, sino también para diseñar e implementar medidas que reforzaran la confiabilidad del equipo y la calidad del panel fotovoltaico.

3.2.8 OEE

3.2.8.1 Análisis

Como parte del esfuerzo por incrementar la eficiencia en la producción de paneles fotovoltaicos, se decidió analizar el desempeño integral de las tres máquinas clave involucradas en el proceso: la stringer, la laminadora y la enmarcadora. Para ello, se aplicó el indicador OEE, el cual integra datos de disponibilidad, rendimiento y calidad, ofreciendo una visión completa del desempeño operativo.

3.2.8.2 Registro y cálculo de componentes

En primer lugar, se registraron los tiempos planificados y los tiempos muertos, detallando las causas de las paradas y demoras, lo que permitió determinar el porcentaje de disponibilidad de cada equipo, luego, se evaluaron la velocidad de la máquina, su capacidad productiva y la producción real obtenida, comparándolas con el estándar esperado para calcular el rendimiento. Finalmente, se analizaron las piezas producidas, identificando el número de unidades defectuosas y sus causas, lo que facilitó el cálculo del porcentaje de calidad. En la tabla 3.26 se muestra el porcentaje general después de 5 días de registrar la información.

Tabla 3.26 Porcentajes generales para la obtención del OEE

Mes	Proceso	Maquina	%DISPONIBILIDAD	% Rendimiento	%CALIDAD	OEE
Octubre	Cortado ribbo	Stringer	96.55%	38.75%	99.82%	37.34%
Octubre	Laminado	Laminadora	92.86%	50.00%	100.00%	46.43%
Octubre	Enmarcado	Enmarcadora	83.33%	47.76%	100.00%	39.80%

3.2.8.3 Resultados

Esta información no sólo permitió identificar las partes en las que el desempeño de las máquinas era menor a lo esperado, sino que también reveló niveles de OEE por debajo de los estándares deseados, con porcentajes del 37%, 46% y 39% en la stringer, laminadora y enmarcadora respectivamente, ante estos resultados, se tomaron medidas específicas para mejorar las condiciones de operación, por una parte, se reforzó la planificación del mantenimiento preventivo para reducir las paradas no programadas y el tiempo muerto, asegurando que las máquinas se encuentren siempre en condiciones óptimas. Se implementaron también ajustes en la velocidad y parámetros de las máquinas de acuerdo con los hallazgos del diseño de experimentos y el AMEF, con el objetivo de alcanzar un ritmo de producción más constante y confiable, de igual manera, se llevaron a cabo capacitaciones adicionales para el personal, orientadas a mejorar la ejecución de las operaciones manuales y el cumplimiento de las mejores prácticas identificadas en el proceso.

Estas acciones, integradas con el resto de las mejoras previamente introducidas, buscaron incrementar de manera sostenida el OEE de las máquinas, con el objetivo de elevar la eficiencia y la calidad final de los paneles fotovoltaicos.

3.2.9 Mapa de Valor Propuesto

La implementación de herramientas de mejora continua en el entorno de manufactura generó cambios en los procesos, pues se aplicó metodologías y herramientas de calidad, tales como Diseño de Experimentos (DOE), Estudios de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R), Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF), etc.

Al aplicar estas herramientas, se identificaron oportunidades para la mejora y, se efectuaron ajustes precisos que impactaron directamente en la eficiencia del proceso. Estos resultados se pueden visualizar en la figura 3.14, mediante un Value Stream Mapping (VSM), permitiendo obtener una visión clara de las áreas de mejora y los avances conseguidos.

Se logró modificar los tiempos de ciclo de procesos como cortado de ribbon, laminado y colocación de caja de conexiones, además del tiempo su tiempo de preparación, así como el tiempo de entrega (Lead Time).

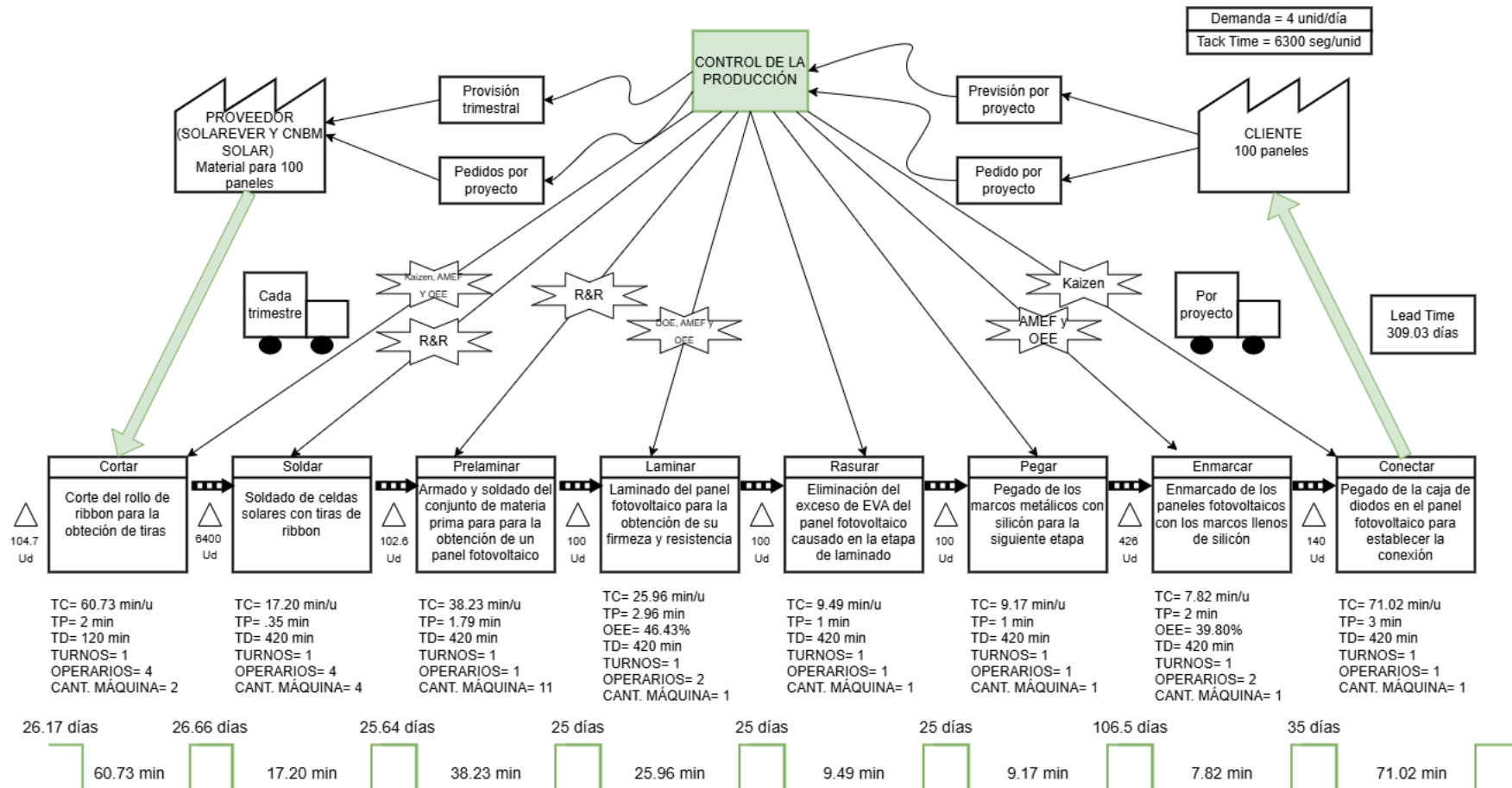


Figura 3.14 VSM propuesto de la empresa

3.3 Etapa III. Análisis

Tras haber identificado y abordado las fuentes de variabilidad y desperdicio a través de las mejoras implementadas en la Etapa 2, la actual fase del proyecto se centró en asegurar la estandarización y sostenibilidad de los avances logrados. En esta Etapa, el objetivo específico es “Implementar el piloto propuesto para estandarizar los procesos de la planta”.

3.3.1 Determinación de nuevos Tiempos Estándar

Como parte del proceso de mejora y para evaluar la efectividad de las acciones implementadas, se llevó a cabo un nuevo estudio de tiempos, como se muestra en la tabla 3.27, tras la introducción de los ajustes en el flujo de producción. Este análisis permitió cuantificar con mayor precisión la reducción lograda en los tiempos de ciclo y la reducción de cuellos de botella. A partir de esta comparación con los valores iniciales, se establecieron nuevos tiempos estándar acordes a las condiciones mejoradas del proceso, brindando una referencia más realista y útil para la programación de la producción, el cálculo de la capacidad y la asignación de recursos, posteriormente, se registró la información en el Mapa de Proceso Final (VSM propuesto) mostrado en la imagen 3.14, el cual, permitió visualizar de forma clara y sistemática el proceso mejorado de fabricación del panel fotovoltaico, reflejando los cambios implementados y los resultados obtenidos.

Tabla 3.27 Tiempos estándar finales

Procedimiento	Tiempo tipo (en minutos)
Cortadura de ribbon	0.35
Soldado manual	16.90
Prelaminado	39.79
Laminado	15.98
Rasurado	9.36
Pegado	9.41
Enmarcado	7.35
Conectado	6.36
	105.50

3.3.1.1 Resultados

Tras la implementación de las mejoras en el VSM propuesto, se observó un cambio significativo en el tiempo total de ciclo, el cual disminuyó de 239 minutos a 105 minutos. Esta reducción permitió acercarse al objetivo de cumplir con la demanda de 100 paneles en los 25 días disponibles al mes. Con el ciclo anterior de 239 minutos, resultaban necesarios aproximadamente 57 días laborales, lo que hacía imposible satisfacer la demanda con los recursos y el tiempo asignado, en cambio, con el nuevo tiempo total de ciclo de 105 minutos, el cálculo indica que se requieren alrededor de 25.12 días laborales, un valor prácticamente dentro del límite disponible, lo que representa una mejora sustancial.

Además, las variaciones entre las operaciones se han equilibrado, puesto que, en el escenario inicial, existía un alto contraste, sobre todo en la etapa de laminado, que con 25.96 min/unidad generaba cuellos de botella al compararse con otras etapas más ágiles, como “Rasurar” (9.49 min/u) o “Pegar” (9.17 min/u), ahora, gracias a la adaptación de los tiempos de preparación y, a la optimización de las condiciones de cada proceso, las actividades de cortado de ribbon y colocación de la caja de diodos han disminuido significativamente su duración. Aunque el tiempo de preparación del laminado aumentó, el efecto neto sobre el ciclo fue positivo, ya que se lograron condiciones más estables que agilizaron el tiempo unitario.

3.3.2 Mapa de valor Final

Es importante destacar que se implementaron 6 mejoras clave a lo largo del VSM, las cuales contribuyeron a equilibrar los procesos, y como resultado, el VSM final, el cual está representado en la figura 3.15, muestra un flujo de producción más homogéneo y controlado, más cercano a la demanda real de 4 unidades al día, con un tiempo total sustancialmente menor y una utilización más efectiva de los recursos disponibles.

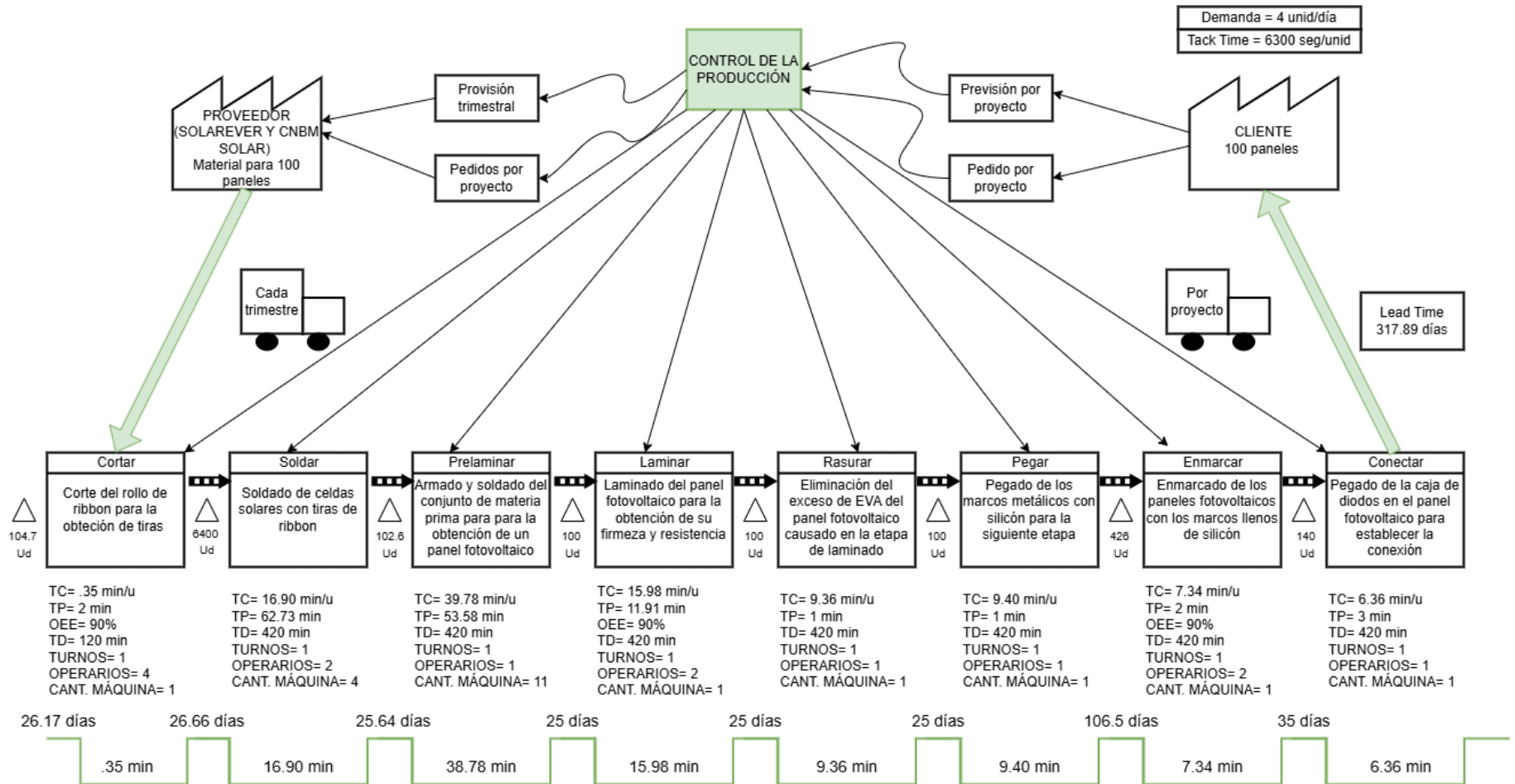


Figura 3.15 VSM final de la empresa

3.3.3 Estandarización

Además de la elaboración del Mapa de Proceso Final, se dio especial atención a la documentación y estructuración clara de los procedimientos, con el objetivo de asegurar que las mejores prácticas se mantengan en el tiempo y que el personal cuente con guías precisas para ejecutar cada actividad. Para lograr esto, se elaboraron manuales detallados que abarcan las tareas de preparación, operación, mantenimiento preventivo, calibración de equipos y actividades de control de calidad. Estos manuales incluyen instrucciones paso a paso, listas de verificación, especificaciones técnicas, recursos requeridos y responsabilidades asignadas a cada rol dentro del proceso, asegurando así que el conocimiento no dependa únicamente de la experiencia de los operadores, sino que quede formalizado y accesible a todos.

Como ejemplo de esta labor de estandarización, se presenta en la figura 3.16 parte del manual de procedimiento correspondiente a la operación de cortado de ribbon en la nueva máquina stringer. Este documento describe las secuencias a seguir, las herramientas necesarias, los criterios para validar la calidad del corte, así como las medidas de seguridad que se deben tomar antes, durante y después del proceso. La existencia de manuales similares para las demás etapas del flujo productivo ayuda a uniformar el trabajo del personal, minimizando variaciones no deseadas en el producto final.

Además, se establecieron calendarios de calibración y verificación periódica de los equipos empleados en la soldadura semi-automática y en el sistema de medición, garantizando así el funcionamiento óptimo y la precisión continua de las herramientas clave. Este enfoque preventivo permite detectar desajustes antes de que generen defectos o ineficiencias, reforzando la confiabilidad del proceso. Con esta documentación y disciplina operacional, la Etapa 3, no sólo consolida las mejoras introducidas, sino que también crea las condiciones necesarias para un desempeño estable y eficiente, contribuyendo directamente al objetivo de incrementar la eficiencia y la calidad del producto final.

Manual de Procedimientos: Máquina Stringer para Corte de Ribbon				
Objetivo				
Establecer los pasos necesarios para la operación de la máquina stringer en el corte de ribbon, asegurando el cumplimiento de calidad y seguridad en el proceso de preparación de tiras de ribbon para paneles fotovoltaicos.				
Equipo y materiales requeridos				
Máquina stringer				
Compresor de aire				
Rollo de ribbon				
Procedimiento de Operación:				
Encender el Compresor de Aire: Asegurarse de que el compresor de aire esté conectado a la fuente de energía y encendido. Este paso es fundamental para suministrar la presión de aire necesaria en la máquina.				
Encender la Máquina Stringer: Verificar que la máquina stringer esté conectada a la fuente de alimentación, presionar el botón de encendido y esperar hasta que la pantalla de control se active.				
Abrir la Válvula de Aire: Localizar la válvula de aire en la máquina y abrirla para permitir el flujo de aire. Esto garantizará que los sistemas neumáticos funcionen correctamente durante el proceso.				
Verificar el Nivel de Flux: Revisar la tina de Flux y verificar que haya una cantidad suficiente para el proceso de mojado del ribbon, si el nivel es bajo, rellenar la tina con Flux hasta alcanzar la cantidad recomendada por el fabricante.				
Ingresar Usuario y Contraseña: En la pantalla de control, ingresar las credenciales asignadas para iniciar sesión y acceder a la configuración de la máquina.				

Figura 3.16 Manual de procedimiento de la máquina stringer

CAPITULO IV Discusión y resultados

En la fase de discusión y resultados, se analizaron las mediciones del voltaje de los paneles solares antes y después de implementar las mejoras propuestas, con el fin de evaluar el impacto real de las acciones tomadas, se realizó un nuevo estudio de mediciones sobre los paneles producidos bajo las nuevas condiciones. Estos datos permitieron comparar directamente el desempeño del sistema anterior (modelo actual), con el resultado obtenido tras la aplicación de los ajustes y estandarizaciones (modelo propuesto).

Los resultados evidenciaron una mejora significativa en el comportamiento del voltaje. El promedio del voltaje de salida de los paneles aumentó de 35.1 V en el modelo actual a 35.6 V en el modelo propuesto. Este incremento en el valor promedio indica que el panel fotovoltaico no sólo cumple con las especificaciones deseadas, sino que además se aproxima de manera más consistente al valor óptimo de funcionamiento.

Asimismo, se observó una importante reducción en la dispersión de los datos. El rango de variación del voltaje disminuyó de 1.2 V a 0.5 V, reflejando así un proceso más estable y controlado. Esta reducción de la variabilidad es particularmente relevante, ya que implica que un mayor número de paneles cumplen con los rangos de calidad establecidos, disminuyendo el riesgo de piezas defectuosas y mejorando la confiabilidad del producto.

Cabe destacar que estos resultados no sólo representan un incremento en la calidad promedio, sino también en la uniformidad del proceso productivo. Al contar con un rango de variación más reducido, se garantiza que la mayoría de los paneles producidos ofrezcan un voltaje dentro de un intervalo más estrecho, mejorando la predictibilidad y, por ende, la satisfacción del cliente.

Conclusiones

El presente trabajo permitió abordar el proceso de fabricación de paneles fotovoltaicos desde una visión integral, combinando metodologías y herramientas de mejora continua, análisis estadístico, diseño de experimentos y técnicas de estandarización. A lo largo del proyecto, se identificaron las principales fuentes de variabilidad y desperdicio, se evaluaron las condiciones iniciales de los procesos clave (corte, soldadura, laminado, enmarcado, entre otros) y se propusieron estrategias concretas orientadas a mejorar la eficiencia y la calidad del producto final, aumentando el voltaje, reduciendo su variación y contribuyendo a la sustentabilidad energética y ambiental de la región de las altas montañas, cumpliendo con el objetivo general.

Herramientas como Tiempos y Movimientos y el Mapa de Flujo de Valor permitieron evaluar, registrar y conocer las áreas de oportunidad en la empresa, logrando proponer y efectuar 6 proyectos de mejora, modificando 6 de los 8 procesos que se llevan a cabo para el armado del panel fotovoltaico, logrando con éxito el objetivo específico número 1.

Con respecto a las herramientas estadísticas como el diseño de experimentos, permitieron establecer un control en la influencia de factores críticos como tiempo, temperatura y presión, generando información valiosa para optimizar parámetros clave en la producción del panel fotovoltaico, efectuando el objetivo específico número 2. Si bien se integró la herramienta OEE para medir de manera integral la eficiencia del equipo, aún no se dispone de datos posteriores a la mejora que confirmen un incremento en este indicador, no obstante, contar con este índice proporciona una referencia sólida para el seguimiento futuro de la productividad, calidad y disponibilidad del equipo.

Para el cumplimiento del objetivo específico número 3 relacionado con la estandarización de procedimientos, el mantenimiento documentado de las actividades y la implementación de calendarios de calibración aseguraron que las mejoras introducidas no fueran transitorias, sino que se consolidaran en la rutina diaria de la planta. La generación de manuales, por ejemplo, para la máquina stringer, sentó las bases para que el conocimiento y las prácticas adecuadas permanezcan estables en el tiempo, reduciendo la dependencia del operador y garantizando la reproducibilidad de los resultados.

Los resultados finales confirman que las estrategias aplicadas propiciaron un mayor control del proceso, evidenciado en la mejora del voltaje promedio del panel y en una disminución del rango de variación, acercando así la operación a las especificaciones técnicas deseadas. Si bien la reducción de tiempos no era el objetivo principal, surgió como un efecto secundario positivo de la aplicación de las mejoras, reduciendo el ciclo de producción y haciendo el proceso más ágil, estas acciones, en conjunto, crean un ambiente productivo más robusto y estable, coherente con la visión planteada al inicio, y sirven como base para la mejora continua y el desarrollo futuro de nuevos proyectos que fortalezcan aún más la competitividad de la organización.

Referencias bibliográficas

- Alayo, C. (s.f.). Tesis de licenciatura. *Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para mejorar la productividad en el proceso de fabricación de tuberías PVC en una empresa industrial de la ciudad de Trujillo*. Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.
- Bahena, M. (s.f.). Tesis de maestría. *Aplicación de la metodología seis sigma para mejorar la calidad y productividad de una planta de bebidas*. Universidad Iberoamericana Puebla, Puebla.
- Barcia, K., Verdezoto, Á., & Abad, J. (2019). Efecto de la metodología lean six sigma en el tiempo de cambio de moldes en el área de termoformado foam. *Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información*, 494-506.
- Birol, F. (2022). *World Energy Outlook 2022*. International Energy Agency.
- Calderón, S., & Ortega, J. (2009). *Guía para la elaboración de diagramas de flujo*. Obtenido de DSpace: http://148.202.167.116:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3690/Gu%C3%ada_para_elaboraci%C3%B3n_diagramas_flujo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Carrera, R. (2019). Mejoramiento del proceso de producción de losas alveolares bajo metodología Lean Six Sigma en la empresa pública cementera EPCE. *Digital Novasinergia*.
- certificación "yellow belt". (s.f.). Lean Six Sigma Institute .

-
- Cevallos, S., & Hidrovo, S. (s.f.). Tesis de licenciatura. *Implementación de la metodología Six Sigma en los procesos de gestión dentro del departamento de colisiones de corporación Chevrolet*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito.
- Comprender la implantación de la función de calidad (QFD)*. (18 de Mayo de 2023).
Obtenido de Safety Culture: <https://safetyculture.com/es/temas/qfd/>
- de Souza, I. (20 de Julio de 2019). *Descubre qué es el diagrama de Pareto y sus múltiples utilidades*. Obtenido de Rockcontent: <https://rockcontent.com/es/blog/diagrama-de-pareto/>
- Edge, J. (2019). *Lean Seis Sigma: La guía definitiva sobre Lean Seis Sigma, Lean Enterprise y Lean Manufacturing, con herramientas para incrementar la eficiencia y la satisfacción del cliente*. James Edge.
- Escalante, A., & González, J. (2015). *Ingeniería Industrial. Métodos y tiempos con manufactura ágil*. México: Alfaomega Grupo Editor.
- Felizzola, H., & Luna, C. (2014). Lean Six Sigma en pequeñas y medianas empresas: un enfoque metodológico. *Ingeniare*, 263-277.
- Gomez, E., & Muñoz, O. (2023). Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para el mejoramiento en el proceso de atención al cliente ITS. *Ingeniería Industrial*, 1-11.
- Gutierrez, H., & de la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw Hill.
- Humberto, G., & de la Vara, R. (2013). *Control estadístico de la calidad y seis sigma*. México: McGraw Hill.
- Kanawaty, G. (1997). *Introducción al estudio del trabajo*. Suiza: OIT.

Lean six sigma yellow belt certification. (2018). Council for six sigma certification.

Lean Solution. (s.f.). Obtenido de Value Stream Mapping:
https://www.bing.com/search?pglt=41&q=c%C3%A1lculo+de+lead+time+vsm&cvid=005deda725b642b18ac19571d277dbf7&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIGCAEQABhAMgYIAhAAGEAyBggDEAAYQDIGCAQQABhAMgYIBRAAGEAyBggGEAAYQDIGCAcQABhAMgYICBAAGEDSAQkxMTMzMGoAgCwAgA&FORM=ANNT

Malpartida, J., Olmos, D., Quiñones, S., Ledesma, M., García, G., & Díaz, J. (2021). Estrategia de mejora de procesos Six Sigma aplicado a la industria textil. *Alpha Centauri*, 72-90.

Medina, G., & Montalvo, G. (s.f.). Tesis de licenciatura. *Mejora de la productividad mediante un sistema de gestión basado en Lean Six Sigma en el proceso productivo de pallets en la empresa Madererera Nuevo Perú*. Universidad señor de Sipán, Pimentel.

Montecinos, S., & Carvajal, D. (2018). *Energías renovables: Escenario actual y perspectivas futuras*. La Serena: Universidad de La Serena.

Mukherjee, J. (s.f.). *Mapas del flujo de valor*. Obtenido de Atlassian:
<https://www.atlassian.com/es/continuous-delivery/principles/value-stream-mapping>

Nahle, N. (2022). *Balance Nacional de Energía*. México: Secretaría de Energía.

Niebel, B., & Freivalds, A. (2009). *Ingeniería industrial: Métodos, estándares y diseño del trabajo*. México: McGraw-Hill.

Palacios, L. (2016). *Ingeniería de métodos, movimientos y tiempos*. Bogotá: Ecoe ediciones.

Paso 1 DMAIC- Definir. (s.f.). Obtenido de Capacitación y Certificación Lean Six Sigma:

<https://www.sixsigmaespanol.com/dmaic-step-one/>

Romero, Á. (6 de 10 de 2015). *La herramienta Smed*. Obtenido de aar Management:

[http://www.angelantonioromero.com/la-herramienta-](http://www.angelantonioromero.com/la-herramienta-smed/#:~:text=La%20aplicaci%C3%B3n%20de%20la%20herramienta%20SMED%20se%20suele,externas.%204%20Optimizar%20todas%20estas%20operaciones%20al%20m%C3%A1ximo.)

[smed/#:~:text=La%20aplicaci%C3%B3n%20de%20la%20herramienta%20SMED%20se%20suele,externas.%204%20Optimizar%20todas%20estas%20operaciones%20al%20m%C3%A1ximo.](http://www.angelantonioromero.com/la-herramienta-smed/#:~:text=La%20aplicaci%C3%B3n%20de%20la%20herramienta%20SMED%20se%20suele,externas.%204%20Optimizar%20todas%20estas%20operaciones%20al%20m%C3%A1ximo.)

Salazar, B. (4 de Noviembre de 2019). *Eficiencia Global de los Equipos (OEE)*. Obtenido

de Ingeniería Industrial Online: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/gestion-de-mantenimiento/eficiencia-global-de-los-equipos-oeel>

Socconini, L. (2015). *Lean Six Sigma Green Belt para la excelencia en los negocios*.

Barcelona: Marge books.

Socconini, L. (2021). *Lean Six Sigma Yellow Belt Certification Manual*. Barcelona: Marge

Books.

Socconini, L., & Reato, C. (2019). *Lean Six Sigma sistema de gestión para liderar empresas*.

Barcelona: Marge books.

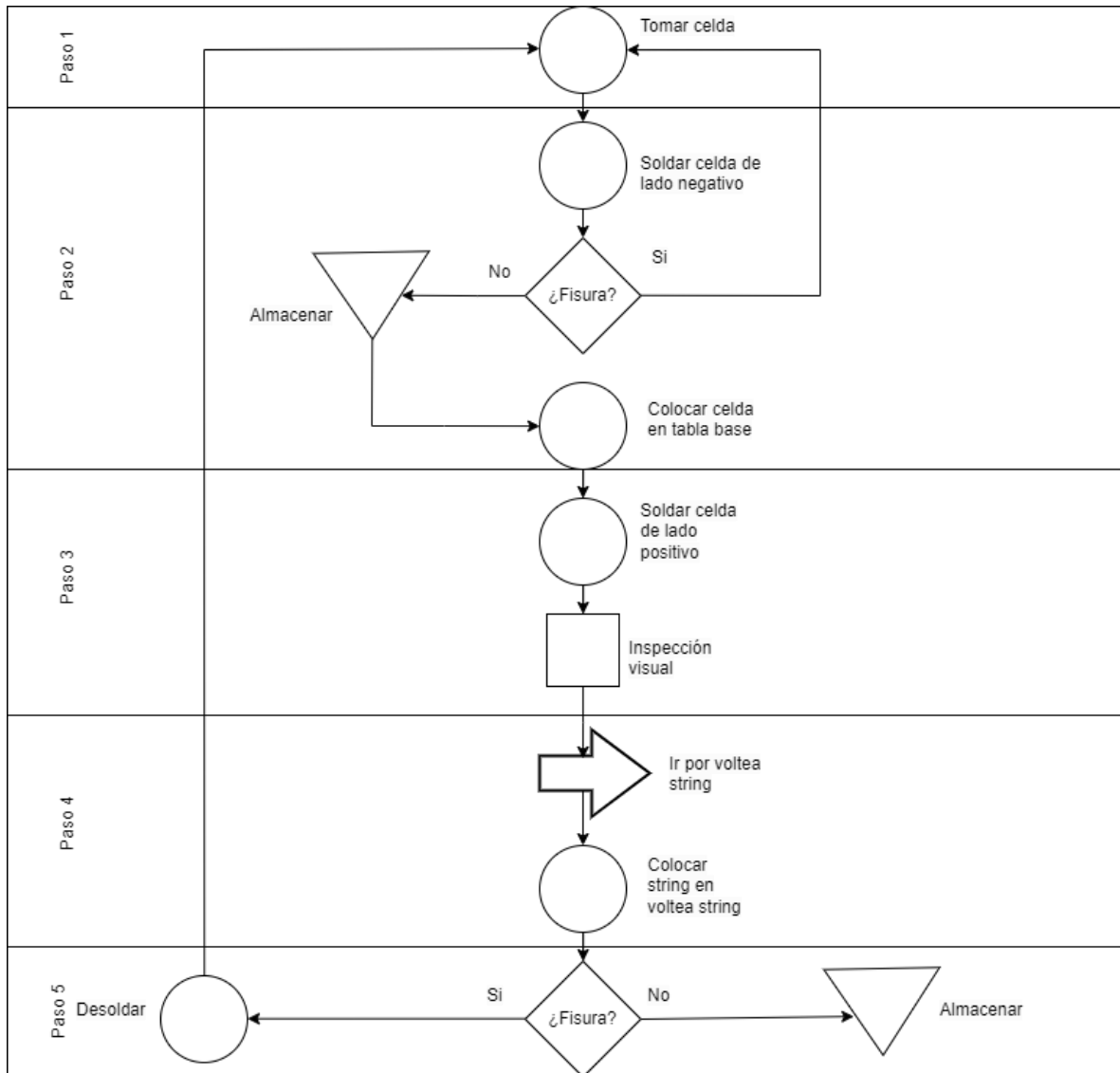
Teiler, J., Traverso, M., & Bustos, C. (2021). Optimización de procesos relacionados con la gestión del inventario de una farmacia hospitalaria mediante el uso de la metodología Lean Six Sigma. *OFIL*.

Ticona, H. (2022). Aplicación de Lean Six Sigma para mejorar el subproceso de reparación de averías en enlaces de comunicaciones. *Industrial Data*.

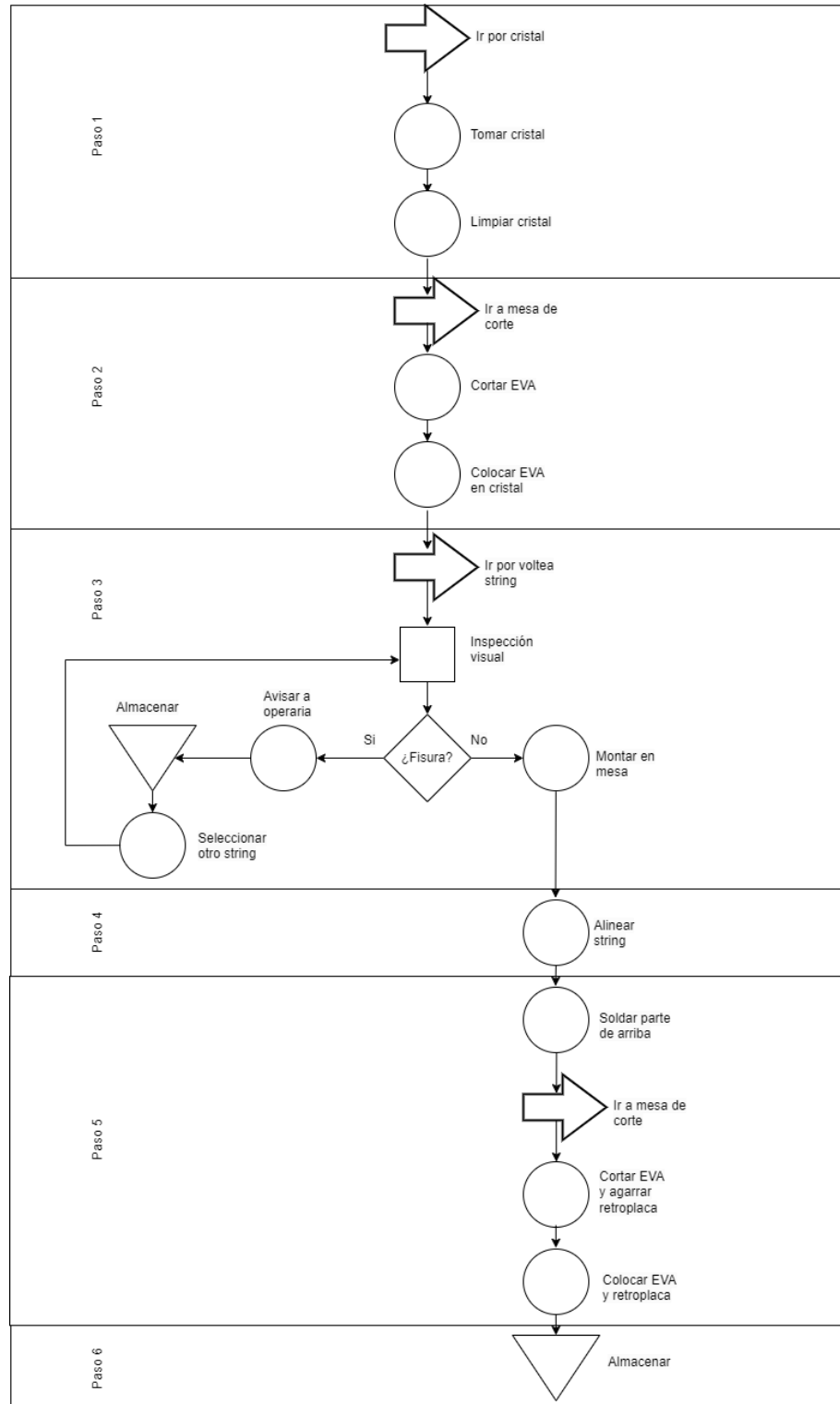
Anexos

1. Flujogramas de procedimientos de la empresa

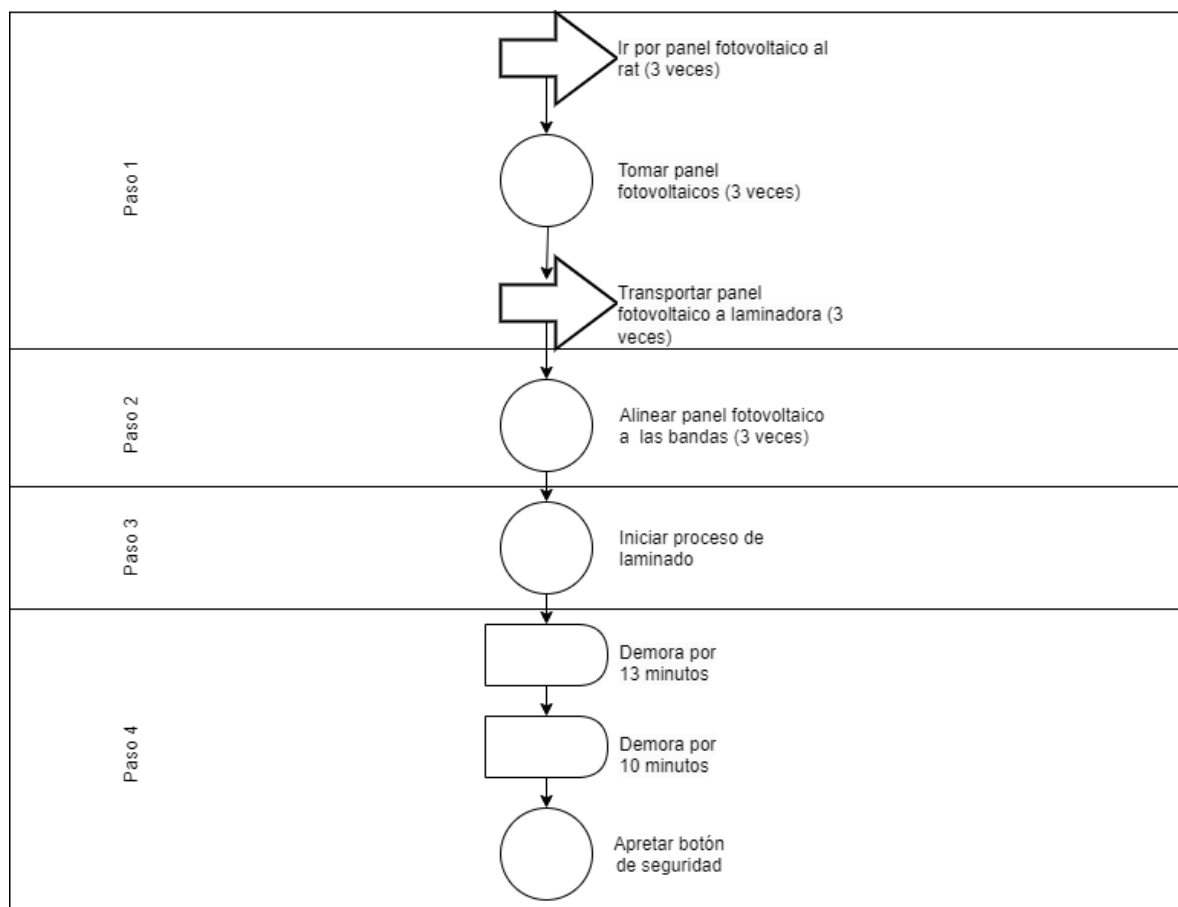
Soldadura manual



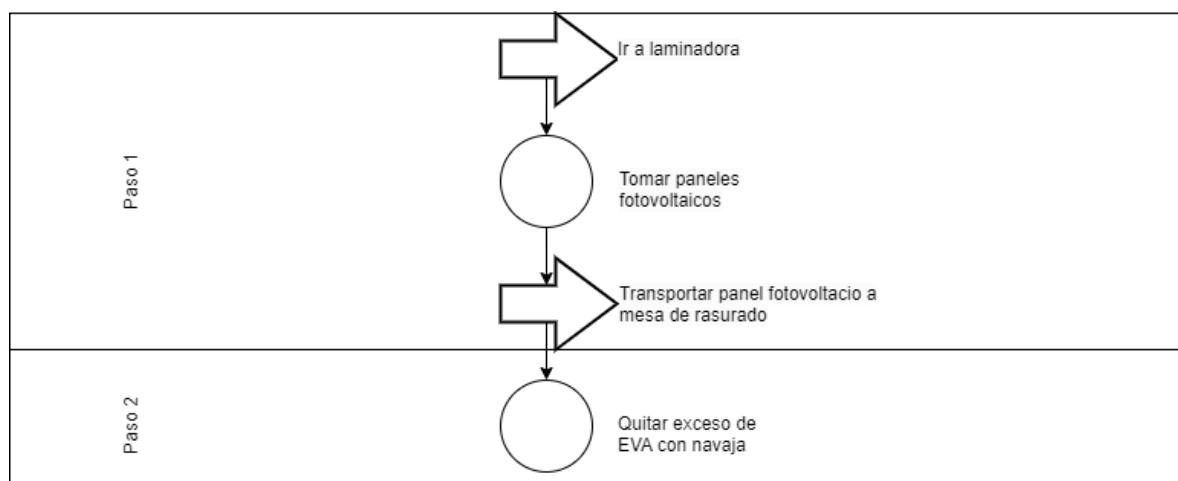
Prelaminado



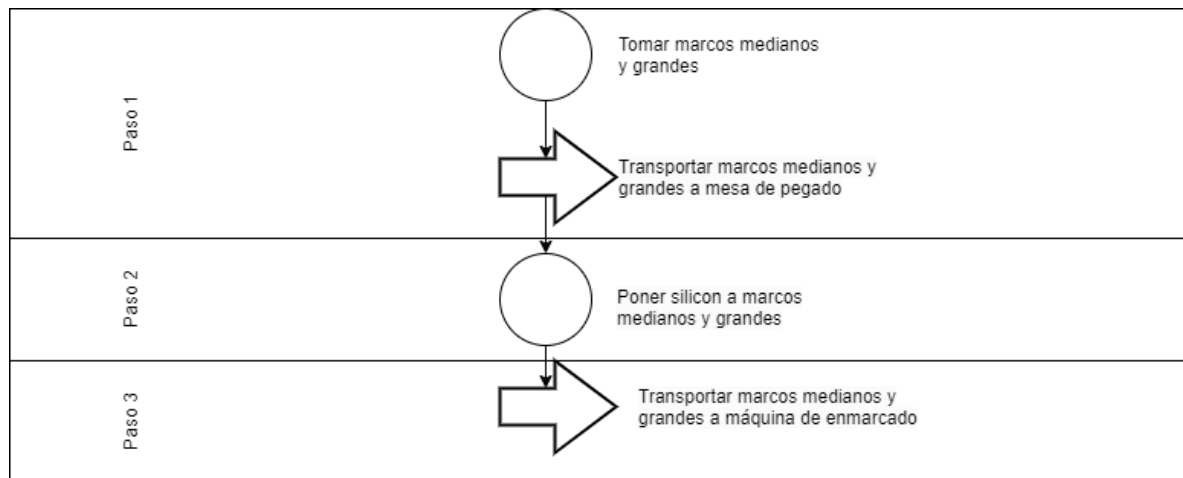
Laminado



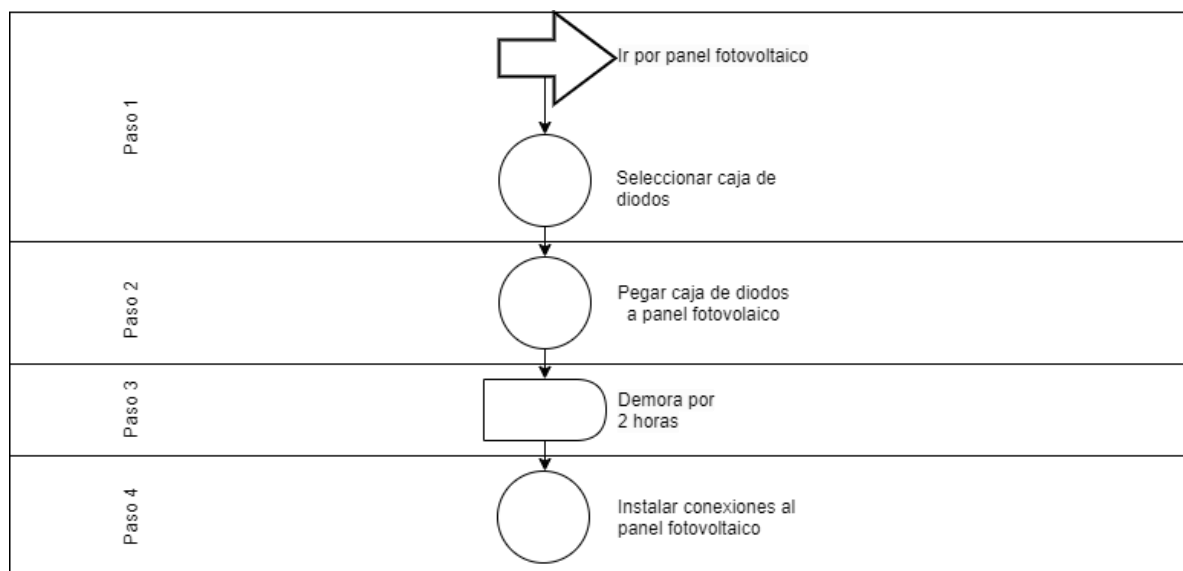
Rasurado



Pegado de marcos



Caja de diodos



2. Diagramas SIMO de procedimientos de Sol y Litio de México

Soldadura manual

Operación: Selección de celda					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.11	Tomar celda solar	RE, S, SE, G	RE, S, SE, G	Tomar celda solar	0.11
0.05	Transportar celda solar	M	M	Transportar celda solar	0.05
0.03	Soltar celda solar	P, RL	P, RL	Soltar celda solar	0.03
				Media	0.19

Operación: Soldado de la parte negativa de la celda					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.03	Tomar celda solar	SE, G	SE, G	Tomar celda solar	0.03
0.06	Colocar celda solar	M, P	M, P	Colocar celda solar	0.06
0.03	Soltar celda solar	RL	RL	Soltar celda solar	0.03
0.01	Tomar ribbon	RE, G	RE, G, M	Tomar cautín	0.01
0.03	Colocar ribbon en celda solar	M, P	H	Sostener cautín	0.03
0.08	Sostener ribbon	H	PP, U	Soldar celda solar	0.13
0.01	Espera	AD	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01

0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.06	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.06
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.01	Tomar celda solar	SE, G	SE, G	Tomar celda solar	0.01
0.05	Colocar celda solar	M, P	M, P	Colocar celda solar	0.05
0.01	Soltar celda solar	RL	RL	Soltar celda solar	0.01
0.01	Tomar ribbon	RE, G	RE, G, M	Tomar cautín	0.01
0.03	Colocar ribbon en celda solar	M, P	H	Sostener cautín	0.03
0.1	Sostener ribbon	H	PP, U	Soldar celda solar	0.16
0.01	Espera	AD	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.06	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.06
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01

0.03	Tomar celda solar	SE, G	SE, G	Tomar celda solar	0.03
0.05	Colocar celda solar	M, P	M, P	Colocar celda solar	0.05
0.01	Soltar celda solar	RL	RL	Soltar celda solar	0.01
0.01	Tomar ribbon	RE, G	RE, G, M	Tomar cautín	0.01
0.03	Colocar ribbon en celda solar	M, P	H	Sostener cautín	0.03
0.08	Sostener ribbon	H	PP, U	Soldar celda solar	0.15
0.01	Espera	AD	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.05	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.05
0.06	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.06
0.03	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.03
0.05	Tomar celda solar	SE, G	SE, G	Tomar celda solar	0.05
0.03	Colocar celda solar	M, P	M, P	Colocar celda solar	0.03
0.03	Soltar celda solar	RL	RL	Soltar celda solar	0.03
0.01	Tomar ribbon	RE, G	RE, G, M	Tomar cautín	0.01

0.03	Colocar ribbon en celda solar	M, P	H	Sostener cautín	0.03
0.11	Sostener ribbon	H	PP, U	Soldar celda solar	0.15
0.01	Espera	AD	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.05	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.05
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.05	Tomar celda solar	SE, G	SE, G	Tomar celda solar	0.05
0.03	Colocar celda solar	M, P	M, P	Colocar celda solar	0.03
0.01	Soltar celda solar	RL	RL	Soltar celda solar	0.01
0.01	Tomar ribbon	RE, G	RE, G, M	Tomar cautín	0.01
0.03	Colocar ribbon en celda solar	M, P	H	Sostener cautín	0.03
0.1	Sostener ribbon	H	PP, U	Soldar celda solar	0.15
0.01	Espera	AD	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01

0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.06	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.06
0.03	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.03
0.03	Tomar celda solar	SE, G	SE, G	Tomar celda solar	0.03
0.05	Colocar celda solar	M, P	M, P	Colocar celda solar	0.05
0.01	Soltar celda solar	RL	RL	Soltar celda solar	0.01
0.01	Tomar ribbon	RE, G	RE, G, M	Tomar cautín	0.01
0.03	Colocar ribbon en celda solar	M, P	H	Sostener cautín	0.03
0.1	Sostener ribbon	H	PP, U	Soldar celda solar	0.13
0.01	Espera	AD	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.06	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.06
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.05	Tomar celda solar	SE, G	SE, G	Tomar celda solar	0.05

0.05	Colocar celda solar	M, P	M, P	Colocar celda solar	0.05
0.01	Soltar celda solar	RL	RL	Soltar celda solar	0.01
0.01	Tomar ribbon	RE, G	RE, G, M	Tomar cautín	0.01
0.03	Colocar ribbon en celda solar	M, P	H	Sostener cautín	0.03
0.11	Sostener ribbon	H	PP, U	Soldar celda solar	0.16
0.01	Espera	AD	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.03	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.03
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.05	Tomar celda solar	SE, G	SE, G	Tomar celda solar	0.05
0.05	Colocar celda solar	M, P	M, P	Colocar celda solar	0.05
0.03	Soltar celda solar	RL	RL	Soltar celda solar	0.03
0.01	Tomar ribbon	RE, G	RE, G, M	Tomar cautín	0.01

0.05	Colocar ribbon en celda solar	M, P	H	Sostener cautín	0.05
0.08	Sostener ribbon	H	PP, U	Soldar celda solar	0.16
0.01	Espera	AD	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.05	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.05
0.05	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.05
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.03	Tomar celda solar	SE, G	SE, G	Tomar celda solar	0.03
0.03	Colocar celda solar	M, P	M, P	Colocar celda solar	0.03
0.01	Soltar celda solar	RL	RL	Soltar celda solar	0.01
0.01	Tomar ribbon	RE, G	RE, G, M	Tomar cautín	0.01
0.03	Colocar ribbon en celda solar	M, P	H	Sostener cautín	0.03
0.08	Sostener ribbon	H	PP, U	Soldar celda solar	0.13
0.01	Espera	AD	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03

0.05	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.05
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.03	Tomar celda solar	SE, G	SE, G	Tomar celda solar	0.03
0.03	Colocar celda solar	M, P	M, P	Colocar celda solar	0.03
0.01	Soltar celda solar	RL	RL	Soltar celda solar	0.01
0.01	Tomar ribbon	RE, G	RE, G, M	Tomar cautín	0.01
0.03	Colocar ribbon en celda solar	M, P	H	Sostener cautín	0.03
0.1	Sostener ribbon	H	PP, U	Soldar celda solar	0.15
0.01	Espera	AD	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.06	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.06
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
Media					3.96

Operación: Soldado de la parte positiva de la celda					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.05	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.05
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.05	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.05
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.05	Acomodar celdas solares	SE, G, M, P	SE, G, M	Tomar cautín	0.05
0.31	Sostener celdas solares	H	PP, U	Soldar celdas solares	0.31
0.06	Soltar celdas solares	P, RL	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.06
0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.05	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.05
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.05	Acomodar celdas solares	SE, G, M, P	SE, G, M	Tomar cautín	0.05

0.3	Sostener celdas solares	H	PP, U	Soldar celdas solares	0.53
0.01	Soltar celdas solares	P, RL	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.05	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.05
0.06	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.06
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.05	Acomodar celdas solares	SE, G, M, P	SE, G, M	Tomar cautín	0.05
0.33	Sostener celdas solares	H	PP, U	Soldar celdas solares	0.51
0.01	Soltar celdas solares	P, RL	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.05	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.05
0.03	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.03
0.06	Acomodar celdas solares	SE, G, M, P	SE, G, M	Tomar cautín	0.06
0.31	Sostener celdas solares	H	PP, U	Soldar celdas solares	0.57

0.01	Soltar celdas solares	P, RL	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.05	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.05
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.05	Acomodar celdas solares	SE, G, M, P	SE, G, M	Tomar cautín	0.05
0.3	Sostener celdas solares	H	PP, U	Soldar celdas solares	0.61
0.01	Soltar celdas solares	P, RL	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.05	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.05
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.05	Acomodar celdas solares	SE, G, M, P	SE, G, M	Tomar cautín	0.05
0.31	Sostener celdas solares	H	PP, U	Soldar celdas solares	0.46
0.01	Soltar celdas solares	P, RL	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.05	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.05

0.06	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.06
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.05	Acomodar celdas solares	SE, G, M, P	SE, G, M	Tomar cautín	0.05
0.3	Sostener celdas solares	H	PP, U	Soldar celdas solares	0.5
0.01	Soltar celdas solares	P, RL	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.05	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.05
0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.05	Acomodar celdas solares	SE, G, M, P	SE, G, M	Tomar cautín	0.05
0.31	Sostener celdas solares	H	PP, U	Soldar celdas solares	0.56
0.01	Soltar celdas solares	P, RL	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
0.03	Tomar celda solar soldada	SE, G	SE, G	Tomar celda solar soldada	0.03
0.05	Colocar celda solar soldada	M, P	M, P	Colocar celda solar soldada	0.05

0.01	Soltar celda solar soldada	RL	RL	Soltar celda solar soldada	0.01
0.05	Acomodar celdas solares	SE, G, M, P	SE, G, M	Tomar cautín	0.05
0.31	Sostener celdas solares	H	PP, U	Soldar celdas solares	0.48
0.01	Soltar celdas solares	P, RL	M, P, RL	Colocar cautín en base	0.01
Media					6.11

Operación: Traslado del string al voltea string					
Tiempo	Mano izquierda	Símbolo	Símbolo	Mano derecha	Tiempo
0.16	Tomar voltea string	SE, G	SE, G	Tomar voltea string	0.16
0.13	Transportar voltea string	M	M	Transportar voltea string	0.13
0.03	Soltar voltea string	P, RL	P, RL	Soltar voltea string	0.03
0.08	Tomar string	SE, G	SE, G	Tomar string	0.08
0.15	Transportar string	M	M	Transportar string	0.15
0.03	Soltar string en voltea string	P, RL	P, RL	Soltar string en voltea string	0.03
Media					0.58

Operación: Traslado del voltea string al rat
--

Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.05	Tomar voltea string	SE, G	SE, G	Tomar voltea string	0.05
0.13	Transportar voltea string	M	M	Transportar voltea string	0.13
0.03	Soltar voltea string	P, RL	P, RL	Soltar voltea string	0.03
Media					0.21

Prelaminado

Operación: Colocación de vidrio					
Tiempo	Mano izquierda	Símbolo	Símbolo	Mano derecha	Tiempo
0.1	Tomar cristal templado	RE, G	RE, G	Tomar cristal templado	0.1
0.08	Transportar cristal templado	M	M	Transportar cristal templado	0.08
0.05	Soltar cristal templado	P, RL	P, RL	Soltar cristal templado	0.05
0.03	Tomar trapo	RE, G	RE, G	Tomar windex	0.03
0.2	Espera	H	P, U	Usar windex	0.2
1.38	Usar trapo	P, U	H	Espera	1.38
0.03	Dejar trapo	P, RL	P, RL	Dejar windex	0.03
				Media	1.87

Operación: Cortado de EVA y retroplaca					
Tiempo	Mano izquierda	Símbolo	Símbolo	Mano derecha	Tiempo
0.13	Tomar EVA	RE, G	RE, G	Tomar EVA	0.13
0.4	Desprender EVA	M	M	Desprender EVA	0.4
0.05	Soltar EVA	P, RL	P, RL	Soltar EVA	0.05
0.01	Tomar cuchilla	RE, G	RE, G	Tomar cuchilla	0.01

0.38	Usar cuchilla	M, U	M, U	Usar cuchilla	0.38
0.01	Soltar cuchilla	P, RL	P, RL	Soltar cuchilla	0.01
0.03	Tomar lámina de EVA	RE, G	RE, G	Tomar lámina de EVA	0.03
0.11	Transportar lámina de EVA	M	M	Transportar lámina de EVA	0.11
0.3	Soltar lámina de EVA en cristal	P, RL	P, RL	Soltar lámina de EVA en cristal	0.3
0.05	Tomar baquelita	RE, G	RE, G	Tomar baquelita	0.05
0.13	Colocar baquelita	M, PP, RL	M, PP, RL	Colocar baquelita	0.13
0.03	Espera	UD	RE, G	Tomar pinzas mariposa	0.03
0.15	Espera	UD	M, PP, RL	Colocar pinzas mariposa	0.15
Media					1.78

Operación: Colocación de strings					
Tiempo	Mano izquierda	Símbolo	Símbolo	Mano derecha	Tiempo
	Tomar voltea string	RE, G	RE, G	Tomar voltea string	0.18
	Transportar voltea string	M	M	Transportar voltea string	0.15

	Soltar voltea string	P, RL	P, RL	Soltar voltea string	0.03
	Tomar string	RE, G	RE, G	Tomar string	0.1
	Colocar string	M, PP	M, PP	Colocar string	0.2
	Soltar string	RL	RL	Soltar string	0.03
	Tomar voltea string	RE, G	RE, G	Tomar voltea string	0.2
	Transportar voltea string	M	M	Transportar voltea string	0.11
	Soltar voltea string	P, RL	P, RL	Soltar voltea string	0.03
	Tomar string	RE, G	RE, G	Tomar string	0.1
	Colocar string	M, PP	M, PP	Colocar string	0.21
	Soltar string	RL	RL	Soltar string	0.03
	Tomar voltea string	RE, G	RE, G	Tomar voltea string	0.16
	Transportar voltea string	M	M	Transportar voltea string	0.1
	Soltar voltea string	P, RL	P, RL	Soltar voltea string	0.03
	Tomar string	RE, G	RE, G	Tomar string	0.1

	Colocar string	M, PP	M, PP	Colocar string	0.21
	Soltar string	RL	RL	Soltar string	0.03
	Tomar voltea string	RE, G	RE, G	Tomar voltea string	0.2
	Transportar voltea string	M	M	Transportar voltea string	0.1
	Soltar voltea string	P, RL	P, RL	Soltar voltea string	0.03
	Tomar string	RE, G	RE, G	Tomar string	0.13
	Colocar string	M, PP	M, PP	Colocar string	0.23
	Soltar string	RL	RL	Soltar string	0.03
	Tomar voltea string	RE, G	RE, G	Tomar voltea string	0.2
	Transportar voltea string	M	M	Transportar voltea string	0.1
	Soltar voltea string	P, RL	P, RL	Soltar voltea string	0.03
	Tomar string	RE, G	RE, G	Tomar string	0.11
	Colocar string	M, PP	M, PP	Colocar string	0.21

	Soltar string	RL	RL	Soltar string	0.03
	Tomar voltea string	RE, G	RE, G	Tomar voltea string	0.18
	Transportar voltea string	M	M	Transportar voltea string	0.1
	Soltar voltea string	P, RL	P, RL	Soltar voltea string	0.18
	Tomar string	RE, G	RE, G	Tomar string	0.11
	Colocar string	M, PP	M, PP	Colocar string	0.08
	Soltar string	RL	RL	Soltar string	0.03
Media					4.08

Operación: Alineación de strings					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
	Esperar	AD	RE, G	Tomar cinta métrica	0.03
	Estirar cinta métrica	RE, G, M, PP, U	H	Sujetar cinta métrica	5.53
	Soltar cinta acrílica	RL	M, P, RL	Soltar cinta métrica	0.01
	Esperar	AD	RE, G	Tomar clemero	0.01
	Esperar	AD	M, P, U	Utilizar clemero	2.88

	Esperar	AD	M, P, RL	Soltar clemetro	0.01
	Esperar	AD	RE, G	Tomar cinta acrílica	0.03
	Cortar cinta acrílica	RE, G, U	U	Cortar cinta acrílica	0.05
	Sostener cinta acrílica	H	M, P	Colocar pedazo de cinta	0.1
	Soltar cinta acrílica	M, P, RL	RL	Soltar pedazo de cinta	0.01
				Media	8.66

Operación: Soldado de TAP					
Tiempo	Mano izquierda	Símbolo	Símbolo	Mano derecha	Tiempo
0.05	Tomar TAP	RE, G	RE, G	Tomar antorcha	0.05
2.35	Sujetar TAP	H	M, PP, U	Usar antorcha	1.7
0.03	Soltar TAP	RL	M, RL	Soltar antorcha	0.03
0.03	Tomar TAP	RE, G	RE, G	Tomar antorcha	0.03
3.18	Sujetar TAP	H	M, PP, U	Usar antorcha	2.13

0.03	Soltar TAP	RL	M, RL	Soltar antorcha	0.03
0.16	Tomar EVA	RE, G	RE, G	Tomar EVA	0.16
0.43	Desprender EVA	M	M	Desprender EVA	0.43
0.05	Soltar EVA	P, RL	P, RL	Soltar EVA	0.05
0.03	Tomar cuchilla	RE, G	RE, G	Tomar cuchilla	0.03
0.28	Usar cuchilla	M, U	M, U	Usar cuchilla	0.28
0.01	Soltar cuchilla	P, RL	P, RL	Soltar cuchilla	0.01
0.03	Tomar lámina de EVA	RE, G	RE, G	Tomar lámina de EVA	0.03
0.11	Transportar lámina de EVA	M	M	Transportar lámina de EVA	0.11
0.21	Soltar lámina de EVA en strings	P, RL	P, RL	Soltar lámina de EVA en strings	0.21
0.03	Tomar EVA	RE, G	RE, G	Tomar navaja	0.03
0.1	Sujetar EVA	H	M, P, U	Cortar ranura de EVA con navaja	0.1
0.01	Soltar EVA	RL	M, P, RL	Soltar navaja	0.01
0.18	Tomar retroplaca	RE, G	RE, G	Tomar retroplaca	0.18

0.2	Desprender retroplaca	M	M	Desprender retroplaca	0.2
0.05	Soltar retroplaca	P, RL	P, RL	Soltar retroplaca	0.05
0.01	Tomar cuchilla	RE, G	RE, G	Tomar cuchilla	0.01
0.21	Usar cuchilla	M, U	M, U	Usar cuchilla	0.21
0.01	Soltar cuchilla	P, RL	P, RL	Soltar cuchilla	0.01
0.03	Tomar lámina de retroplaca	RE, G	RE, G	Tomar lámina de retroplaca	0.03
0.11	Transportar lámina de retroplaca	M	M	Transportar lámina de retroplaca	0.11
0.23	Soltar lámina de retroplaca en cristal	P, RL	P, RL	Soltar lámina de retroplaca en cristal	0.23
0.03	Tomar EVA	RE, G	RE, G	Tomar navaja	0.03
0.31	Sujetar EVA	H	M, P, U	Cortar ranura de EVA con navaja	0.31
0.01	Soltar EVA	RL	M, P, RL	Soltar navaja	0.01
0.01	Tomar TAP	RE, G	RE, G	Tomar TAP	0.01
0.06	Introducir TAP	M, P	M, P	Introducir TAP	0.06

0.01	Soltar TAP	RL	RL	Soltar TAP	0.01
0.05	Espera	AD	RE, G	Tomar pinzas mariposa	0.05
0.1	Espera	AD	M	Quitar pinzas mariposa	0.1
0.03	Espera	AD	P, RL	Soltar pinzas mariposa	0.03
0.05	Tomar baquelita	RE, G	RE, G	Tomar baquelita	0.05
0.08	Quitar baquelita	M	M	Quitar baquelita	0.08
0.03	Soltar baquelita	P, RL	P, RL	Soltar baquelita	0.03
Media					7.22

Operación: Almacenamiento					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.1	Tomar panel fotovoltaico	RE, G	RE, G	Tomar panel fotovoltaico	0.1
0.7	Transportar panel fotovoltaico	M	M	Transportar panel fotovoltaico	0.7
0.21	Soltar panel fotovoltaico	P, RL	P, RL	Soltar panel fotovoltaico	0.21
Media					1.01

Laminado

Operación: Transporte de panel fotovoltaico					
Tiempo	Mano izquierda	Símbolo	Símbolo	Mano derecha	Tiempo
0.01	Tomar panel fotovoltaico	RE, G	RE, G	Tomar panel fotovoltaico	0.01
0.25	Transportar panel fotovoltaico a laminadora	M	M	Transportar panel fotovoltaico a laminadora	0.25
0.08	Soltar panel fotovoltaico	P, RL	P, RL	Soltar panel fotovoltaico	0.08
0.26	Tomar panel fotovoltaico	RE, G	RE, G	Tomar panel fotovoltaico	0.26
0.25	Transportar panel fotovoltaico a laminadora	M	M	Transportar panel fotovoltaico a laminadora	0.25
0.08	Soltar panel fotovoltaico	P, RL	P, RL	Soltar panel fotovoltaico	0.08
0.28	Tomar panel fotovoltaico	RE, G	RE, G	Tomar panel fotovoltaico	0.28
0.25	Transportar panel fotovoltaico a laminadora	M	M	Transportar panel fotovoltaico a laminadora	0.25
0.08	Soltar panel fotovoltaico	P, RL	P, RL	Soltar panel fotovoltaico	0.08
				Media	1.54

Operación: Colocación de panel en laminadora					
Tiempo	Mano izquierda	Símbolo	Símbolo	Mano derecha	Tiempo
0.2	Alinear panel fotovoltaico 1	RE, G, PP, RL	RE, G, PP, RL	Alinear panel fotovoltaico 1	0.2

0.25	Alinear panel fotovoltaico 2	RE, G, PP, RL	RE, G, PP, RL	Alinear panel fotovoltaico 2	0.25
0.23	Alinear panel fotovoltaico 3	RE, G, PP, RL	RE, G, PP, RL	Alinear panel fotovoltaico 3	0.23
Media					0.68

Operación: Proceso de laminado					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.06	Espera	UD	RE, SE, U,	Apretar botón de modo automático en módulo	0.06
0.03	Espera	UD	RE, SE, U,	Apretar botón de indicación en módulo	0.03
13.33	Espera	UD	UD	Espera	13.33
Media					13.42

Operación: Proceso de enfriamiento					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
10	Espera	UD	UD	Espera	10
Media					10

Rasurado

Operación: Transporte de panel fotovoltaico					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.03	Tomar panel fotovoltaico a laminadora	RE, G	RE, G	Tomar panel fotovoltaico a laminadora	0.03

0.13	Transportar panel fotovoltaico a mesa de rasurado	M	M	Transportar panel fotovoltaico a mesa de rasurado	0.13
0.01	Soltar panel fotovoltaico	P, RL	P, RL	Soltar panel fotovoltaico	0.01
				Media	0.17

Operación: Rasurado de EVA					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.01	Espera	UD	RE, G	Tomar navaja	0.01
5.68	Sostener panel fotovoltaico	RE, G, H	M, PP, U	Cortar EVA con navaja	5.68
0.05	Soltar panel fotovoltaico	M, P, RL	M, P, RL	Soltar EVA con navaja	0.05
				Media	5.74

Relleno de marcos

Operación: Transporte de panel fotovoltaico					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.1		RE, G	RE, G		0.1

	Tomar 2 marcos medianos y 2 marcos grandes			Tomar 2 marcos medianos y 2 marcos grandes	
0.25	Transportar 2 marcos medianos y 2 marcos grandes	M	M	Transportar 2 marcos medianos y 2 marcos grandes	0.25
0.01	Soltar 2 marcos medianos y 2 marcos grandes	P, RL	P, RL	Soltar 2 marcos medianos y 2 marcos grandes	0.01
				Media	0.36

Operación: Colocación de panel en laminadora					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.01	Espera	UD	RE, G	Tomar marco mediano	0.01
0.05	Espera	UD	PP	Acomodar marco mediano	0.05
0.01	Espera	UD	RL	Soltar marco mediano	0.01
0.01	Tomar pistola de silicón	RE, G	RE, G	Tomar pistola de silicón	0.01
1.18	Sostener pistola de silicón	H	PP, U	Presionar pistola de silicón	1.18
0.01	Soltar pistola de silicón	RL	H	Sostener pistola de silicón	0.01
0.01	Tomar marco mediano	RE, G	H	Sostener pistola de silicón	0.01
0.05	Acomodar marco	PP	H	Sostener pistola de silicón	0.05
0.01	Soltar marco	RL	H	Sostener pistola de silicón	0.01
1.13	Sostener pistola de silicón	G, H	PP, U	Presionar pistola de silicón	1.13
0.01	Soltar pistola de silicón	RL	H	Sostener pistola de silicón	0.01
0.03	Tomar marco grande	RE, G	H	Sostener pistola de silicón	0.03
0.05	Acomodar marco grande	PP	H	Sostener pistola de silicón	0.05

0.01	Soltar marco grande	RL	H	Sostener pistola de silicón	0.01
1.43	Sostener pistola de silicón	G, H	PP, U	Presionar pistola de silicón	1.43
0.01	Soltar pistola de silicón	RL	H	Sostener pistola de silicón	0.01
0.03	Tomar marco grande	RE, G	H	Sostener pistola de silicón	0.03
0.07	Acomodar marco grande	PP	H	Sostener pistola de silicón	0.07
0.01	Soltar marco grande	RL	H	Sostener pistola de silicón	0.01
1.53	Sostener pistola de silicón	G, H	PP, U	Presionar pistola de silicón	1.53
0.01	Soltar pistola de silicón	P, RL	P, RL	Soltar pistola de silicón	0.01
Media					5.66

Operación: Proceso de laminado					
Tiempo	Mano izquierda	Símbolo	Símbolo	Mano derecha	Tiempo
0.05	Tomar 2 marcos medianos y 2 marcos grandes	RE, G	RE, G	Tomar 2 marcos medianos y 2 marcos grandes	0.05
0.1	Transportar 2 marcos medianos y 2 marcos grandes	M	M	Transportar 2 marcos medianos y 2 marcos grandes	0.1
0.01	Soltar 2 marcos medianos y 2 marcos grandes	P, RL	P, RL	Soltar 2 marcos medianos y 2 marcos grandes	0.01
Media					0.16

Enmarcado

Operación: Colocación de panel fotovoltaico					
Tiempo	Mano izquierda	Símbolo	Símbolo	Mano derecha	Tiempo
0.23	Tomar panel fotovoltaico a enmarcadora	RE, G	RE, G	Tomar panel fotovoltaico a enmarcadora	0.23
0.11	Transportar panel fotovoltaico a enmarcadora	M	M	Transportar panel fotovoltaico a enmarcadora	0.11
0.11	Soltar panel fotovoltaico	PP, RL	PP, RL	Soltar panel fotovoltaico	0.11
				Media	0.45

Operación: Proceso de enmarcado					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
	Espera	UD	RE, U	Apretar boton de inicio	0.08
	Espera	UD	UD	Espera	2.58
	Tomar marco mediano	RE, G	RE, G	Tomar marco mediano	0.05
	Acomodar marco mediano	PP	PP	Acomodar marco mediano	0.08
	Soltar marco mediano	RL	RL	Soltar marco mediano	0.01
	Tomar marco grande	RE, G	RE, G	Tomar marco grande	0.03
	Acomodar marco grande	PP	PP	Acomodar marco grande	0.1
	Soltar marco grande	RL	RL	Soltar marco grande	0.03
Media					2.96

Operación: Ajuste de marcos					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.4	Espera	UD	UD	Espera	2.2
Media					2.2

Caja de diodos

Operación: Seleccionar caja de diodos					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.05	Tomar caja de diodos	S, SE, RE, G	S, SE, RE, G	Tomar caja de diodos	0.05
0.05	Mover caja de diodos	M	M	Mover caja de diodos	0.05
0.01	Soltar caja de diodos	P, RL	P, RL	Soltar caja de diodos	0.01
Media					0.11

Operación: Colocación de silicón					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
0.03	Sostener caja de diodos	RE, G	RE, G	Tomar pistola de silicón	0.03
1.75	Sostener caja de diodos	H	PP, U	Presionar pistola de silicón	1.75
0.03	Soltar caja de diodos	M, P, RL	M, P, RL	Soltar pistola de silicón	0.03
Media					1.81

Operación: Espera de pegado					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
65	Espera	UD	UD	Espera	65
Media					65

Operación: Instalación de conexiones					
Tiempo	Mano izquierda	Simbolo	Simbolo	Mano derecha	Tiempo
	Tomar conexiones	RE, G	RE, G	Tomar conexiones	0.03

	Instalar conexiones	M, PP, RL	M, PP, RL	Instalar conexiones	1.43
				Media	1.46

3. Número de ciclos, toma de tiempos, tiempo estándar y suplementos considerados

Soldadura manual

Nivel de confianza	1.96	3.8416
Desviación estándar	2.51055895	6.30290624
Media aritmética	1.10030097	1.21066223
Número de muestra		20

Tarea	Janet					Claudia					Sol					Daniela				
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20
Selección de celda fotovoltaica	0.22	0.21	0.2	0.15	0.11	0.21	0.17	0.2	0.18	0.18	0.19	0.23	0.21	0.14	0.28	0.1	0.2	0.28	0.17	0.14
Soldado de la parte negativa de la celda	4.01	3.96	3.9	4	3.98	4.01	3.99	4	3.97	3.97	3.95	3.92	4	4	3.91	4	4	3.99	3.93	3.91
Soldado de la parte positiva de la celda	6.12	6.11	6.5	6.41	6.19	5.83	6.13	6.1	5.88	6.05	6.08	6.08	6.12	6.27	6.02	6.4	5.9	6.04	6.15	6.27
Translado del string al volteo string	0.59	0.56	0.5	0.65	0.73	0.53	0.56	0.6	0.52	0.65	0.6	0.51	0.52	0.52	0.57	0.6	0.6	0.52	0.67	0.57
Translado del volteo string al rat	0.22	0.2	0.3	0.11	0.18	0.2	0.27	0.1	0.27	0.26	0.21	0.3	0.21	0.3	0.25	0.2	0.2	0.23	0.18	0.15

Tiempo observado	Rendimiento	Tiempo normal	Tiempo tipo
0.18994318	1	0.189943178	0.23742897
3.96848379	1.25	4.960604739	6.20075592
6.13144967	1.25	7.664312087	9.58039011
0.57992122	1.25	0.724901522	0.9061269
0.21752811	1	0.217528115	0.27191014
Tiempo estándar			17.1966121

Suplementos constantes	%	
A. Suplementos por necesidades	5	0.05
B. Suplementos por fatiga	4	0.04
Suplementos variables		
A. Suplemento por trabaja de pie	2	0.02
B. Suplementos por postura anormal	2	0.02
C. Suplementos por atención	2	0.02
D. Suplementos por esfuerzo mental	4	0.04
E. Suplementos por monotonía	4	0.04
F. Suplementos por tedio	2	0.02

	25	0.25
--	----	------

Prelaminado

Nivel de confianza	1.96	3.8416
Desviación estándar	3.01843035	9.11092176
Media aritmética	1.32288543	1.75002585
Número de muestra		20

Tarea	Brennis																			
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20
Colocación de vidrio	2.56	1.77	3.8	2.33	2.18	2.27	2.23	1.7	2.38	1.66	1.35	2.26	2.27	2.16	2.63	3	0.8	2.22	1.59	2.37
Cortado de EVA y retroplaca	1.78	1.7	0.9	1.95	1.84	1.98	1.27	2.2	1.96	2.2	1.68	2.05	2.14	1.67	0.92	2.4	2	1.97	1.63	1.15
Colocación de strings	4.05	4.18	4.1	4.11	4.1	4.19	3.97	4	4.01	4.06	4.09	4.09	4.14	4.23	4.12	4.2	4	4.12	4.08	4.01
Alineación de strings	12.4	6.59	7.2	9.87	5.79	8.06	8.69	12	7.76	9.51	7.68	10.1	9.84	11.3	7.05	5.7	6.3	7.3	8.44	5.99
Soldado de TAP	7.26	7.4	7.3	7.84	6.55	8.04	7.92	6.9	7.33	7.45	7.84	7.59	7.6	7.38	6.87	8	6.6	7.18	6.93	6.79
Almacenamiento	0.61	1.81	0.9	0.82	1.33	1.87	0.78	1.6	0.84	0.52	1.25	1.33	1.13	1.28	1.2	1.4	0.6	1.38	1.12	1

Tiempo observado	Rendimiento	Tiempo normal	Tiempo tipo
2.17817383	1	2.17817383	2.78806251
1.76568787	1.25	2.20710984	2.82510059
4.09105515	1.25	5.11381894	6.54568824
8.37540104	1.25	10.4692513	13.4006417
7.34047899	1.25	9.17559874	11.7447664
1.13779748	1	1.13779748	1.45638078
Tiempo estándar			38.7606402

Suplementos constantes	%	
A. Suplementos por necesidades	5	0.05
B. Suplementos por fatiga	4	0.04
Suplementos variables		
A. Suplemento por trabaja de pie	2	0.02
B. Suplementos por postura anormal	2	0.02
C. Suplementos por fuerza	3	0.03
D. Suplementos por atención	2	0.02
E. Suplementos por esfuerzo mental	4	0.04
F. Suplementos por monotonía	4	0.04
G. Suplementos por tedio	2	0.02
	28	0.28

Laminado

Nivel de confianza	1.96	3.8416
Desviación estándar	5.68720382	32.3442873
Media aritmética	4.98505394	24.8507628
Número de muestra		5

Tarea	Operario 1 y 2				
	T1	T2	T3	T4	T5
Transporte de 3 paneles fotovoltaicos	1.56	1.54	1.47	1.4	1.53
Colocación de 3 paneles en laminadora	0.72	0.65	0.7	0.7	0.66
Proceso de laminado	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4
Proceso de enfriamiento	10	10	10	10	10

Tiempo observado	Rendimiento	Tiempo normal	Tiempo tipo
1.50232089	1	1.50232089	1.74269223
0.68662833	1	0.68662833	0.79648887
13.42	1	13.42	13.42
10	1	10	10
Tiempo estándar			25.9591811

Suplementos constantes		%	
A. Suplementos por necesidades		5	0.05
B. Suplementos por fatiga		4	0.04
Suplementos variables			
A. Suplemento por trabaja de pie		2	0.02
B. Suplementos por postura anormal		2	0.02
C. Suplementos por fuerza		3	0.03
		16	0.16

Rasurado

Nivel de confianza	1.96	3.8416
Desviación estándar	3.43740118	11.8157269
Media aritmética	2.66394311	7.09659287
Número de muestra		6.39620973

Tarea	Operario 1						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Transporte de panel fotovoltaico	0.23	0.19	0.1	0.28	0.14	0.16	0.19
Rasurado de EVA	8.71	2.66	7.9	0.91	5.5	10.1	4.15

Tiempo observado	Rendimiento	Tiempo normal	Tiempo tipo
0.18235046	1	0.18235046	0.21152653
5.71295138	1.25	7.14118922	8.2837795
Tiempo estándar			8.49530602

Suplementos constantes	%	
A. Suplementos por necesidades	5	0.05
B. Suplementos por fatiga	4	0.04
Suplementos variables		
A. Suplemento por trabaja de pie	2	0.02
B. Suplementos por postura anormal	2	0.02
C. Suplementos por fuerza	3	0.03
	16	0.16

Relleno de marcos

Nivel de confianza	1.96	3.8416
Desviación estándar	2.50622674	6.28117246
Media aritmética	1.98271958	3.93117693
Número de muestra		6.13804785

Tarea	Operario 1						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Transporte marcos de aluminio	0.41	0.46	0.4	0.37	0.31	0.25	0.35
Colocación de silicón	5.96	5.73	4.7	5.61	4.88	5.54	5.36
Transporte de marcos a enmarcadora	0.14	0.21	0.2	0.18	0.16	0.18	0.18

Tiempo observado	Rendimiento	Tiempo normal	Tiempo tipo
0.35739402	1	0.35739402	0.44674253
5.40002208	1.25	6.75002759	8.43753449
0.18342316	1.25	0.22927895	0.28659869
Tiempo estándar		9.17087571	

Suplementos constantes	%	
A. Suplementos por necesidades	5	0.05
B. Suplementos por fatiga	4	0.04
Suplementos variables		
A. Suplemento por trabaja de pie	2	0.02
B. Suplementos por postura anormal	2	0.02
D. Suplementos por atención	2	0.02
E. Suplementos por esfuerzo mental	4	0.04
F. Suplementos por monotonía	4	0.04
G. Suplementos por tedio	2	0.02
	25	0.25

Enmarcado

Nivel de confianza	1.96	3.8416
Desviación estándar	0.90787379	0.82423483
Media aritmética	0.67256232	0.45234007
Número de muestra		7

Tarea	Operario 1						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Colocación de panel fotovoltaico a la máquina	0.45	0.33	0.5	0.56	0.47	0.49	0.44
Proceso de enmarcado	2	0.9	1.8	3.22	1.47	1.86	4.58
Ajuste de marcos	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2

Tiempo observado	Rendimiento	Tiempo normal	Tiempo tipo
0.45961476	1.25	0.57451844	0.67793176
2.25443807	1.25	2.81804759	3.32529616
2.2	1	2.2	2.2
Tiempo estándar			6.20322792

Suplementos constantes		%	
A. Suplementos por necesidades		5	0.05
B. Suplementos por fatiga		4	0.04
Suplementos variables			
A. Suplemento por trabaja de pie		2	0.02
B. Suplementos por postura anormal		2	0.02
C. Suplementos por fuerza		3	0.03
D. Suplementos por atención		2	0.02
		18	0.18

Caja de diodos

Nivel de confianza	1.96	3.8416
Desviación estándar	28.7258827	825.176337
Media aritmética	25.1793464	633.999483
Número de muestra		5

Tarea	Operario 1				
	T1	T2	T3	T4	T5
Selección de caja de diodos	0.09	0.09	0.1	0.05	0.11
Colocación de silicón	2.9	2.15	3	2.11	1.12
Espera de pegado	65	65	65	65	65
Instalación de conexiones	0.93	2.18	2.3	1.75	2.1

Tiempo observado	Rendimiento	Tiempo normal	Tiempo tipo
0.08724368	1	0.08724368	0.09858535
2.25036801	1.25	2.81296001	3.17864481
65	1.25	65	65
1.85824112	1	1.85824112	2.09981247
Tiempo estándar			70.3770426

Suplementos constantes	%	
A. Suplementos por necesidades	5	0.05
B. Suplementos por fatiga	4	0.04
Suplementos variables		
A. Suplemento por trabaja de pie	2	0.02
B. Suplementos por postura anormal	2	0.02
	13	0.13