

Universidad Técnica Nacional

Sede Central

Ingeniería Electromecánica

Trabajo Final de Graduación para optar por el grado de

Licenciatura en Ingeniería Electromecánica

“Estudio del proceso laminado y medición de obleas en una empresa de manufactura
electrónica en Heredia Costa Rica”

Carlos Fallas Castro

Alajuela, Costa Rica

2025

UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL**Acta de Aprobación 03-2025**

En la ciudad de Alajuela, a los dieciocho días del mes de julio del año 2025 el Tribunal evaluador conformado por las personas: **ING. MARVIN SEGURA TREJOS, ING. RONALD PORRAS ALVARADO, ING. CHARLIE ESPINOZA MATARRITA, ING. DANIEL MONGE MENDEZ e ING. JUAN CARLOS CARDENAS**, proceden a evaluar la presentación del proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Electromecánica del estudiante **Carlos Josué Fallas Castro**, identificación 115830119, titulado "**Estudio del proceso laminado y medición de obleas en una empresa de manufactura electrónica en Heredia Costa Rica**" modalidad proyecto de graduación. El Tribunal Evaluador apegado a las regulaciones y requisitos establecidos en el Reglamento de Trabajos Finales de Graduación de la Universidad Técnica Nacional, realizó la revisión del proyecto del estudiante otorgando una calificación de 10 dando como resultado Aprobado.

Ing. Marvin Segura Trejos

Director Licenciatura en Ingeniería Electromecánica y Lector

Ing. Ronald Porras Alvarado (tutor)

Carlos Josué Fallas Castro (Estudiante)

Ing. Daniel Monge Méndez (Sector Industrial)

Ing. Charlie Espinoza Matarrita (Lector)

Ing. Juan Carlos Cárdenas (Lector)

UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL
LICENCIATURA EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL TUTOR
DEL DOCUMENTO DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Fecha:
Ing. Marvin Segura Trejos
Director Carrera Licenciatura en Ingeniería Electromecánica

Estimado señor:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado:
**“Estudio del proceso laminado y medición de obleas en una empresa de
manufactura electrónica en Heredia Costa Rica”** elaborado por el estudiante:
Carlos Fallas Castro , como requisito para que el citado estudiante pueda optar
por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido
exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo que realice la exposición
oral del mismo ante el Tribunal Evaluador.

Suscribe cordialmente,

RONALD PORRAS ALVARADO (FIRMA)
PERSONA FÍSICA, CPF-01-0657-0230.
Fecha declarada: 29/05/2025 11:03:35 a. m.
Esta es una representación gráfica únicamente,
verifique la validez de la firma.

Ronald Porras Alvarado
Profesor Licenciatura en Ingeniería Electromecánica
Universidad Técnica Nacional.

Fecha: 30 junio 2025

Señores miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado:

"Estudio del proceso laminado y medición de obleas en una empresa de manufactura electrónica en Heredia Costa Rica" elaborado por el estudiante:

Carlos Failas Castro, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su entrega ante el Comité de Trabajos Finales de Graduación.

Se suscribe cordialmente:



Firma del lector

Juan Carlos Cárdenas Román
Nombre del lector

Fecha: 30 junio 2025

Señores miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado:

“Estudio del proceso laminado y medición de obleas en una empresa de manufactura electrónica en Heredia Costa Rica” elaborado por el estudiante:

Carlos Fallas Castro, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su entrega ante el Comité de Trabajos Finales de Graduación.

Se suscribe cordialmente:

CHARLIE ESPINOZA MATARRITA (FIRMA)
PERSONA FÍSICA, CPF-01-1032-0265.
Fecha declarada: 30/06/2025 08:39:06 a.m.
Esta es una representación gráfica únicamente,
verifique la validez de la firma.

Firma del lector

Charlie Espinoza Matarrita
Nombre del lector

UNIVERSIDAD TECNICA NACIONAL LICENCIATURA EN INGENIERÍA
ELECTROMECAÁNICA

CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL FILÓLOGO
DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

San José

Fecha: 2 de julio del 2025

Señores miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

Estimados señores:

Leí y corregí el Trabajo Final de Graduación, modalidad Tesis, denominada “**Estudio del proceso laminado y medición de obleas en una empresa de manufactura electrónica en Heredia Costa Rica**”, documento presentado por el estudiante **Carlos Fallas Castro**, cédula de identidad número 15830119, para optar por el grado académico de **Licenciatura en Ingeniería Electromecánica**.

Corregí el trabajo en aspectos tales como concordancia y construcción de párrafos, vicios del lenguaje que se trasladan a lo escrito, ortografía, puntuación y otros aspectos relacionados con el campo filológico, y desde mi punto de vista considero que este documento está listo para ser presentado, por cuanto cumple con los requisitos establecidos.

Atentamente,

ZAYDA
UREÑA ARAYA
(FIRMA)

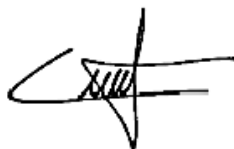
Firmado digitalmente
por ZAYDA UREÑA
ARAYA (FIRMA)
Fecha: 2025.07.02
23:24:06 -06'00'

Licenciada Zayda Ureña Araya
Cédula 104230946
Carné 0163840 del Colegio de Licenciados y Profesores en Letras

DECLARACIÓN JURADA

El suscrito, **Carlos Fallas Castro** con cédula de identidad número 115830119, declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que conlleva el delito de perjurio: Que soy el autor (a) del presente trabajo final de graduación, modalidad proyecto de graduación; para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica Nacional y que el contenido de dicho trabajo es obra original del suscrito.

Fecha: 29 junio 2025



Firma del estudiante

Dedicatoria

Dedico el siguiente trabajo a mis seres queridos, quienes se han preocupado por el desarrollo del mismo y que han deseado mi superación profesional.

En especial, dedico este logro a mi esposa, Angélica Zúñiga, quien ha estado a mi lado desde el primer día en que inicié la Universidad. Ha sido mi apoyo, mi impulso y mi motivación en cada etapa, hasta la conclusión del camino de la Licenciatura en Ingeniería Electromecánica.

Agradecimientos

Agradezco a Dios y a cada una de las personas que me han impulsado a dar cada paso en el camino del estudio y del aprendizaje diario.

También agradezco al personal de la Universidad Técnica Nacional, cuyos miembros han facilitado mi proceso de aprendizaje y han contribuido al desarrollo de mi formación como estudiante, persona y profesional.

Expreso mi gratitud al personal de la empresa en la que laboro, en especial a Roney Robles y Juan Carlos Cárdenas, por brindarme la oportunidad de aportar mi talento a la organización, permitirme crecer a lo largo de los años y brindarme el soporte necesario en el desarrollo del presente trabajo.

Índice de Contenidos

Dedicatoria	8
Índice de Figuras	12
Índice de Tablas.....	15
Resumen	16
Introducción	18
Línea de investigación	20
Área temática	20
Tema de investigación	20
Objeto de estudio.....	20
Problemática.....	21
Problema	23
Justificación	33
Alcance.....	34
Estado de la Cuestión.....	35
Objetivo General.....	39
Objetivos Específicos.....	39
Marco metodológico.....	51
Tabla Objetivos, variables e indicadores	51
Presentación y análisis de los resultados.....	61

Definiendo el estado actual.....	61
Definición del equipo de trabajo.....	71
Evaluación de medida de contención actual	72
Determinación de causa raíz	73
Diagrama de flujo específico para encontrar el punto de ocurrencia de los fallos	73
Análisis de Causa Raíz espina de pescado medición manual.....	75
Análisis de Causa Raíz espina de pescado laminado	77
Generación del concepto	92
Resultados.....	131
Evaluación de final de los indicadores propuestos en la Tabla 1	149
Conclusiones	150
Recomendaciones	151
Referencias bibliográficas	152
Anexos	156
Anexo 1	156
Anexo 2	157
Anexo 3	158

Índice de Figuras

Figura 1 Características físicas del material de la línea WLP.....	24
Figura 2 Equipo SHIMADZU medidor Fuerza de Rotura.....	25
Figura 3 Posiciones de prueba Fuerza de Rotura.....	25
Figura 4 Gráfico obtenido Fuerza para la Rotura.....	26
Figura 5 Diagrama de flujo del área de WLP.....	28
Figura 6 Diagrama de flujo con afectación detectada.....	29
Figura 7 Paso 5 afectación en corte.....	30
Figura 8 Motivos y cantidades de rechazos periodo 2023-2024 en el área de corte.....	31
Figura 9 Motivos y cantidades de rechazos periodo 2023-2024 en el área de desgaste..	32
Figura 10 Constitución oblea WLP.....	42
Figura 11 Diagrama de esfuerzo-deformación para un material frágil.....	49
Figura 12 Quebrado en medición de material.....	61
Figura 13 Daño por manipulación.....	63
Figura 14 Daño luego de laminado.....	67
Figura 15 Remapeo de seguridad.....	68
Figura 16 Comparación conexión con daños.....	69
Figura 17 Puntos de ocurrencia de los fallos.....	73
Figura 18 Análisis Espina de pescado medición manual.....	75
Figura 19 Análisis Espina de pescado laminado.....	77
Figura 20 Opción 1 de manipulador de obleas.....	81
Figura 21 Opción 2 de manipulador de obleas.....	82
Figura 22 Selección Sensor óptico 1.....	83
Figura 23 Selección Sensor óptico 2.....	84
Figura 24 Selección Sensor óptico 3.....	85
Figura 25 Selección Sensor óptico 4.....	86

Figura 26 Selección Sensor óptico 5.....	87
Figura 27 Selección Sensor óptico 6.....	88
Figura 28 Laminadora	89
Figura 29 Manipuladores para Obleas y Aro	90
Figura 30 Proceso de Laminado	91
Figura 31 Concepto paso 1	92
Figura 32 Concepto paso 2.....	93
Figura 33 Concepto paso 3.....	94
Figura 34 Concepto paso 3.....	95
Figura 35 Concepto paso 5.A	96
Figura 36 Concepto paso 5.B	97
Figura 37 Concepto paso 5.C	98
Figura 38 Pasos conceptuales elegidos.....	99
Figura 39 Conexión PLC 1	106
Figura 40 Conexión PLC 2.....	107
Figura 41 Diagrama Grafcet primera Parte	108
Figura 42 Diagrama Grafcet segunda Parte.....	111
Figura 43 Diagrama Electromecánico	114
Figura 44 Diseño Mecánico en Autodesk Fusión 1	115
Figura 45 Diseño Mecánico en Autodesk Fusión 1	116
<i>Figura 46 Vista Frontal Diseño.....</i>	<i>117</i>
Figura 47 Ubicación de los elementos vista frontal isométrica	117
Figura 48 Ubicación de los elementos vista trasera isométrica	118
Figura 49 Ubicación de los elementos vista Inferior	120
Figura 50 Masa del manipulador.....	121
Figura 51 Masa del pistón vertical.....	121

Figura 52 Masa ensamble entre pistones	121
Figura 53 Masa de la Oblea.....	123
Figura 54 Pandeo del punto crítico del pistón horizontal	124
Figura 55 Masa del pistón horizontal	124
Figura 56 Masa del ensamble pistón-cuchilla	125
Figura 57 Masa pistón corte cuchilla.....	125
Figura 58 Masa del perfil de aluminio que sostiene el pistón de la cuchilla	127
Figura 59 Pandeo de los perfiles de aluminio	127
Figura 60 Coeficiente de seguridad	128
Figura 61 Pandeo del tornillo M5	128
Figura 62 Factor de seguridad para tonillo M5.....	132
Figura 63 Base para casete.....	132
Figura 64 Elevador con pistón	133
Figura 65 Posiciones del elevador	133
Figura 66 Roscado interno Perfiles de aluminio.....	134
Figura 67 Posición del pistón horizontal.....	134
Figura 68 Ensamble transportador de oblea	135
Figura 69 Medición óptica.....	136
Figura 70 Intefaz LK Navigator, parámetros 1	137
Figura 71 Intefaz LK Navigator, parámetros 2.....	138
Figura 72 Intefaz LK Navigator, medición.....	139
Figura 73 Comparación microscopio Keyence.....	140
Figura 74 Valores obtenidos, comparativa	156
Figura 75 Plano Vista Superior	157
Figura 76 Figura 76	158
Figura 77 Plano Vista Inferior.....	1580

Índice de Tablas

Tabla 1 Objetivos. variables e Indicadores	51
Tabla 2 Cantidad de rechazos, su código y cantidad del área de Desgaste	64
Tabla 3 Cantidad de rechazos, su código y cantidad del área de Corte	70
Tabla 4 Rechazos generales relacionados con manipulación manual.....	70
Tabla 5 Definición del equipo de trabajo	71
Tabla 6 Efectividad del Remapeo.....	72
Tabla 7 Evaluación posibles causas medición manual	76
Tabla 8 Evaluación posibles causas laminado	78
Tabla 9 Entradas propuestas	103
Tabla 10 Salidas propuestas	103
Tabla 11 Lista de Materiales y gastos.....	112
Tabla 12 Elementos figuras 47, 48 y 49	119
Tabla 13 Análisis fuerza pistón horizontal.....	122
Tabla 14 Sumatoria masa de elementos sostenidos en los perfiles de aluminio.....	126
Tabla 15 Comprobación diámetro del tornillo	130
Tabla 16 Cálculo desviación estándar.....	141
Tabla 17 Evaluación de tasa de quebraduras	144
Tabla 18 Tasa de quebraduras con base en los datos históricos.....	145
Tabla 19 Evaluación de la propuesta	145
Tabla 20 Datos iniciales y ventas anuales.....	146
Tabla 21 Cálculo de flujo.....	146
Tabla 22 Resultados financieros	147
Tabla 23 Indicadores del proceso actual y con la propuesta evaluada	149

Resumen

Esta investigación se llevó a cabo en una empresa de manufactura electrónica ubicada en Heredia, Costa Rica, con el objetivo de entender por qué las obleas se dañan durante los procesos de laminado y medición. A través del análisis de datos históricos de producción y la aplicación de herramientas de causa-raíz, se encontró que la manipulación manual es una de las principales razones detrás de las fracturas y rechazos en la línea. Además, se identificaron debilidades en el sistema actual de medición del espesor, que no solo complica la recolección de datos, sino que también impide una integración eficiente con el proceso de laminado. Frente a esta situación, se propuso una solución automatizada: un sistema electromecánico que combine ambos procesos en un solo sistema. Esta propuesta busca simplificar las operaciones, reducir errores, asegurar la calidad del producto final y facilitar el seguimiento de datos clave. Más allá de resolver un problema técnico, la iniciativa apunta a modernizar el proceso, generar ahorros en costos operativos y mejorar la eficiencia general. También representa una oportunidad para que la empresa incorpore nuevas tecnologías que impulsen la mejora continua y la optimización de procesos.

Palabras clave: Laminado, Obleas, Sistema electromecánico, Medición de espesor, Mejora de procesos.

Abstract

This research was conducted at an electronics manufacturing company located in Heredia, Costa Rica, with the aim of understanding why wafers become damaged during the lamination and measurement processes. Through the analysis of historical production data and the application of root cause analysis tools, it was found that manual handling is one of the main reasons behind fractures and rejections on the production line. Additionally, weaknesses were identified in the current thickness measurement system, which not only complicates data collection but also prevents effective integration with the lamination process. In response to this situation, an automated solution was proposed: an electromechanical system that combines both processes into a single unit. This proposal seeks to streamline operations, reduce errors, ensure the quality of the final product, and facilitate the tracking of key data. Beyond addressing a technical issue, the initiative aims to modernize the process, achieve operational cost savings, and improve overall efficiency. It also represents an opportunity for the company to incorporate new technologies that drive continuous improvement and process optimization.

Keywords: Lamination, Wafers, Electromechanical system, Thickness measurement, Process improvement.

Introducción

La automatización en la industria de manufactura ha revolucionado la forma en que las empresas abordan sus procesos productivos, permitiendo una mayor precisión, reducción de errores y optimización de recursos. En este contexto, la "Empresa XXXX", dedicada a la producción de filtros de radiofrecuencia, enfrenta desafíos significativos en el manejo manual de obleas de WLP, Wafer Level Package (empaquetado a nivel de oblea), durante los procesos de laminado y medición de espesor. Estas obleas, componentes críticos en la fabricación de chips, son delicadas, con espesores que rondan los 250 micrómetros, lo que exige un manejo preciso y controlado. Sin embargo, la manipulación manual ha resultado en una alta incidencia de quebraduras, generando no solo pérdidas económicas, sino también afectando la calidad y confiabilidad de los productos finales.

El proceso actual de laminado y medición en la "Empresa XXXX" implica una serie de operaciones manuales que, aunque supervisadas por operarios capacitados, no están exentas de errores. Desde la colocación de la oblea en la laminadora hasta la medición de su espesor, cada etapa conlleva riesgos de daño que pueden propagarse a lo largo de la cadena de producción. Estos defectos, a menudo imperceptibles a simple vista, comprometen la integridad del material, provocando rechazos que impactan negativamente en la eficiencia del proceso y en la satisfacción del cliente. Además, el rechazo de obleas debido a daños durante la manipulación manual representa un costo significativo para la empresa, tanto en términos de material desperdiciado como en tiempo perdido.

En la era de la Industria 4.0, donde la automatización y la digitalización son fundamentales para mantener la competitividad, es imperativo que las empresas reevalúen sus procesos manuales y busquen soluciones que minimicen la intervención humana en operaciones críticas. Este estudio se centra en analizar el impacto de las operaciones manuales en los procesos de laminado y medición de obleas WLP, Wafer Level Package

El nombre de "Empresa XXXX" hace referencia a la confidencialidad de la misma.

(empaquetado a nivel de oblea), evaluando la viabilidad de implementar un sistema electromecánico que integre ambas operaciones. Se espera que esta solución no solo reduzca la incidencia de quebraduras, sino que también mejore la consistencia del proceso, optimizando la producción y reduciendo los costos operativos.

La investigación se estructura en torno a la identificación de las causas raíz de los defectos observados, la evaluación del estado actual del proceso, y el diseño de un sistema que aborde las deficiencias identificadas. Además, se realizará un análisis costo-beneficio, para determinar la factibilidad económica de la implementación del sistema propuesto. A través de este enfoque, se busca no solo solucionar un problema técnico, sino también alinear la producción con los estándares de calidad exigidos por el mercado, asegurando la sostenibilidad y el crecimiento de la empresa en un entorno cada vez más competitivo.

En resumen, la transición hacia un proceso con menos defectos en la preparación y medición de obleas es una necesidad imperante para la compañía. El diseño electromecánico ofrece una vía prometedora para mejorar procesos, reducir el desperdicio y asegurar la calidad del producto final, factores cruciales para mantener la competitividad en la industria manufacturera electrónica.

Línea de investigación

Automatización.

Área temática

Automatización aplicada en procesos manuales productivos, en la industria de manufactura electrónica.

Tema de investigación

Procesos automáticos para la preparación y medición de obleas de chips.

Objeto de estudio

El efecto que tienen las quebraduras de obleas sobre el funcionamiento de las unidades producidas de la línea de material de WLP, y la frecuencia de fallos, en la "Empresa XXXX", con base en las métricas de producción del área.

Problemática

La "Empresa XXXX", como suministradora de filtros de radiofrecuencia, ofrece al mercado variedad de tecnologías de conexión inalámbrica para diferentes ramas como móviles, wifi, industria, aeroespacial, IoT y comunicación para medios de transporte. En Costa Rica la producción se enfoca en los filtros para la industria telefónica y conexiones de internet. El factor existente de la interrupción de alguno de los dispositivos puede afectar en varios aspectos:

El problema de la manipulación inadecuada y los defectos en dispositivos tecnológicos tiene consecuencias profundas, tanto a nivel individual como global. La fiabilidad de estos productos es crucial, ya que afectan la capacidad de los usuarios para mantenerse conectados en un mundo cada vez más interdependiente. Según la Oficina de las Naciones Unidas en Ginebra (2023), más del 75% de la población mundial posee un teléfono celular y más del 65% utiliza internet, lo que resalta la dependencia masiva de la tecnología para la comunicación diaria. Además, la UIT indica que un 97.9% de las personas tienen cobertura de alguna red móvil celular, y un 67.4% de los individuos a nivel global utilizan internet, con un consumo promedio de 3086.2 GB anuales por usuario. Esta dependencia también se refleja en el ámbito financiero, pues en 2023 se realizaron 266.2 billones de transacciones bancarias en todo el mundo, de acuerdo con ACI Worldwide (2024), lo que subraya aún más la importancia de la tecnología confiable en una economía digital global.

Las fallas en estos dispositivos no solo afectan la vida diaria de las personas, sino que también tienen un impacto económico significativo. Cuando una empresa no cumple con los estándares de calidad, los costos de las deficiencias se vuelven evidentes, tanto interna como externamente. Como indica Gutiérrez Pulido (2020), los costos asociados a fallas internas incluyen el desperdicio, los reprocesos, las reinspecciones y las

reparaciones. Por otro lado, las fallas externas pueden resultar en atención a quejas de clientes, servicios de garantía, devoluciones, pérdida de imagen corporativa, disminución en ventas y, en casos más graves, demandas legales.

Estas implicaciones financieras pueden llevar a pérdidas de contratos importantes y a una reducción en la confianza de los clientes, lo que a su vez puede provocar la reestructuración de la empresa, o incluso despidos masivos. Las personas que trabajan en áreas directamente afectadas, como producción, control de calidad y atención al cliente, son especialmente vulnerables a la pérdida de empleo cuando una empresa enfrenta crisis de esta naturaleza.

Un ejemplo ilustrativo de las repercusiones financieras de estos problemas es el caso de Samsung con el modelo Galaxy Note 7. La retirada global del dispositivo, debido a defectos en la batería que provocaban incendios, costó a la compañía aproximadamente 5.3 mil millones de dólares. Aunque este ejemplo involucra un dispositivo diferente, subraya el impacto devastador que las fallas tecnológicas pueden tener en una empresa, incluidas las posibles pérdidas de empleo en diversos departamentos. Otro caso notable es el de Apple, que enfrentó una demanda colectiva a causa de problemas con la pantalla táctil de los iPhone 6 y iPhone 6 Plus, conocida como "touch disease". Para resolver la demanda, Apple tuvo que desembolsar 25 millones de dólares, lo que también pudo afectar la estabilidad laboral de algunos empleados.

Más allá de los impactos económicos y laborales, la falla de dispositivos también tiene repercusiones ambientales. El reemplazo de productos defectuosos conlleva un mayor consumo de materias primas y una mayor explotación de los recursos naturales. Según un estudio del Monitor Global de Residuos Electrónicos, la producción de dispositivos electrónicos generó 53.6 millones de toneladas de residuos electrónicos a nivel

mundial en el 2019. Este aumento en los residuos no solo representa un desafío para la gestión de desechos, sino que también agrava la crisis ambiental global.

En resumen, la problemática de la calidad y fiabilidad de los dispositivos tecnológicos afecta no solo la experiencia del usuario, sino también tiene implicaciones económicas, laborales, sociales y ambientales significativas, lo que subraya la importancia de mantener altos estándares en la producción y control de calidad.

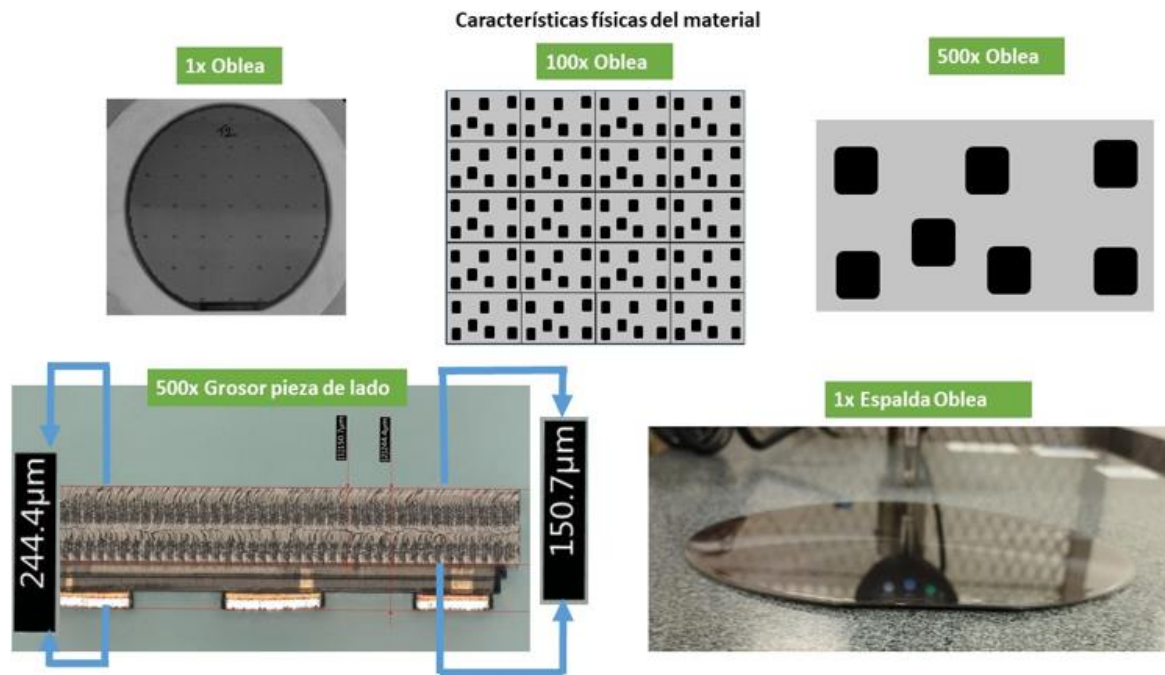
Problema

En el proceso de obleas, específicamente en el área de laminado y prelamado, se da la manipulación, de parte del operario, de un material cuyo espesor total es cercano a los 250 micrómetros; dicho material posee un cristal de espesor de 150 micrómetros; el mismo debe ser manejado con movimientos lentos, y se debe utilizar protección contra descarga electrostática todo el tiempo en el que se manipula. Si el material se maneja sin protección, o recibe algún golpe, se daña o se quiebra, y su afectación puede llegar a impactar la totalidad de la oblea.

El material de proceso es llamado WLP, Wafer Level Package (empaquetado a nivel de oblea); sus características pueden observarse en la siguiente figura:

Figura 1

Características físicas del material de la línea WLP



Nota: Elaboración propia.

En la Figura 1, se muestra la apariencia física de una oblea a simple vista. Al observarla bajo un microscopio, se puede apreciar la cantidad de piezas ensambladas en su superficie. Con un aumento de 500x, se detalla la representación de una pieza desde su parte frontal, mientras que, al observarla de lado, se distinguen el grosor del cristal y el grosor total de la pieza. Esto resalta la importancia de manejar la oblea con sumo cuidado, debido a su delicadeza.

Con respecto a la fuerza necesaria para provocar daños en las obleas, la compañía realizó mediciones en el equipo llamado SHIMADZU, donde se desarrolló una prueba de fuerza necesaria para rotura. El equipo posee un martillo, el cual se mueve hacia abajo hasta producir el quiebre del material, extrayendo el valor en newtons.

Figura 2

Equipo SHIMADZU medidor Fuerza de Rotura







Nota: Elaboración propia.

Se desarrollaron varias mediciones con el equipo SHIMADZU; en estas se tomaron las piezas y se evaluaron en cuatro posiciones:

Figura 3

Posiciones de prueba Fuerza de Rotura

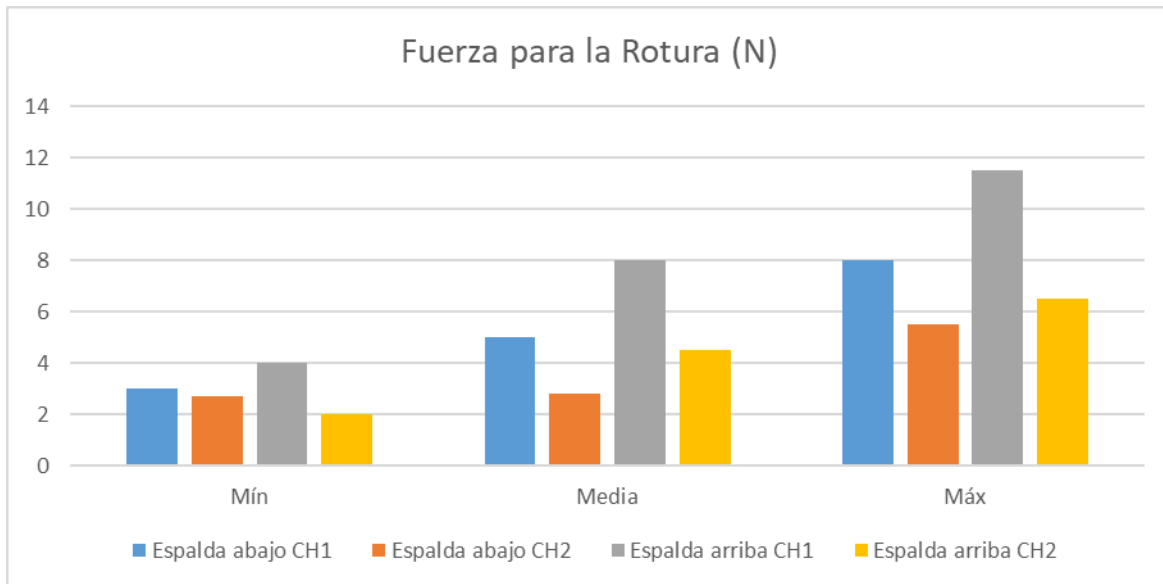
Posiciones de prueba	
Espalda abajo CH1	
Espalda abajo CH2	
Espalda arriba CH1	
Espalda arriba CH2	

Nota: Elaboración propia.

Luego de las mediciones tomadas en el equipo que se ilustra en la Figura 2, se obtiene:

Figura 4

Gráfico obtenido Fuerza para la Rotura



Nota: Elaboración propia.

De las mediciones obtenidas en las diferentes mediciones se toma el valor menor, debido a que es la fuerza mínima en la que se puede quebrar una oblea. Por ende, se toman los 2 N como valor referente de fuerza mínima para el quiebre de la materia prima, lo que se traduce en que se requieren 200 gramos aplicados sobre la oblea para provocar el daño en la misma.

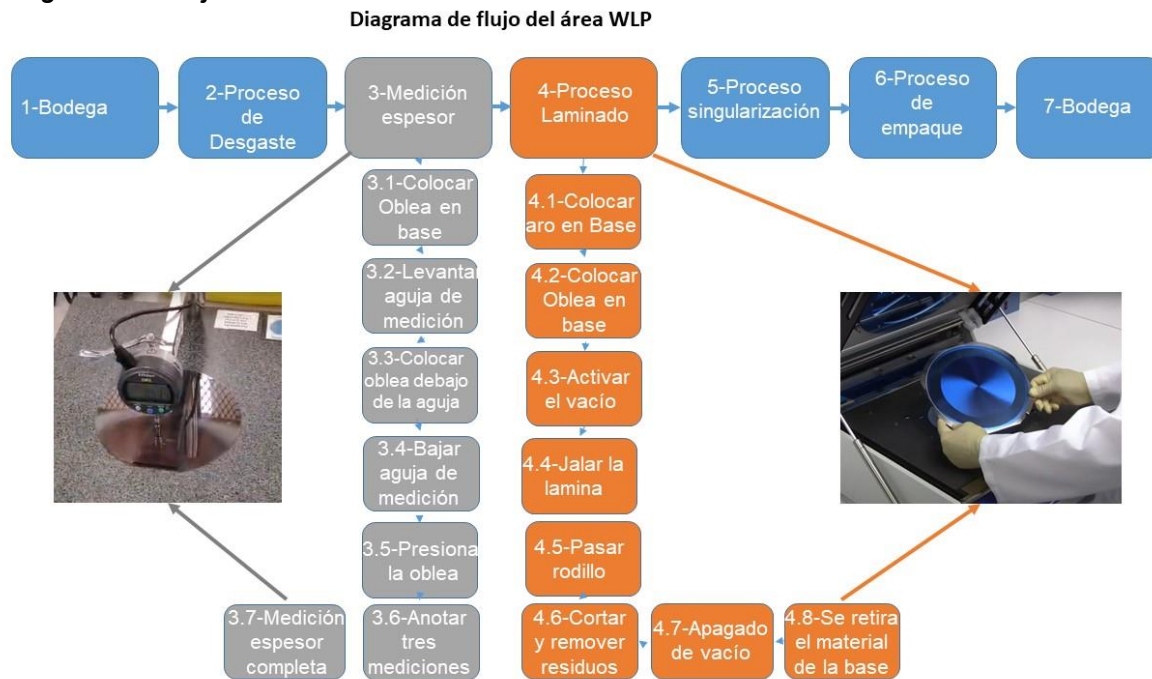
Luego del proceso de desgaste de la oblea, donde se obtuvo el grosor deseado, el siguiente proceso es el corte del material. Si en operaciones anteriores las obleas se dañan, se realiza el rechazo correspondiente a la afectación y el porcentaje afectado se convierte en desecho. Además, no en todos los casos el material puede continuar siendo procesado.

Desde que la línea de proceso de obleas se instaló en el 2014, la compañía ha ensamblado millones de piezas. A su vez, se han reportado, entre sus cifras de producción, pérdidas de material por procesos manuales desde el inicio de la línea, siendo la tarea de laminado y el proceso de medición previo donde más se producen dichos rechazos, y cuya afectación se puede incrementar en los siguientes pasos de la línea.

Durante el proceso de laminado, se requiere un operario todo el tiempo del proceso realizando la operación total. Primero: se coloca un aro sobre la laminadora, toma la oblea con las manos, se coloca en la mesa de laminado, se acciona el vacío manualmente, se jala el tape, se presiona un botón que acciona un rodillo, el cual pasa a lo largo de la oblea para adherir el mismo al aro. Luego se pasa una cuchilla alrededor del aro, para dejar el aro con la oblea y el tape unidos; durante la colocación, el halado del tape y el retiro del aro, se puede dar la afectación por movimientos erróneos del operario. Además, en el proceso previo, se utiliza un método de medición con una herramienta tipo micrómetro, que está colocado sobre una base de granito; la medición y recolección de datos se realiza de manera manual, para luego ser enviada a una base de datos. En este paso, la afectación se da por la manipulación errónea del operario y por la caída abrupta del instrumento de medición. Aquí se muestra un diagrama de flujo del proceso y subprocesos implicados:

Figura 5

Diagrama de flujo del área de WLP

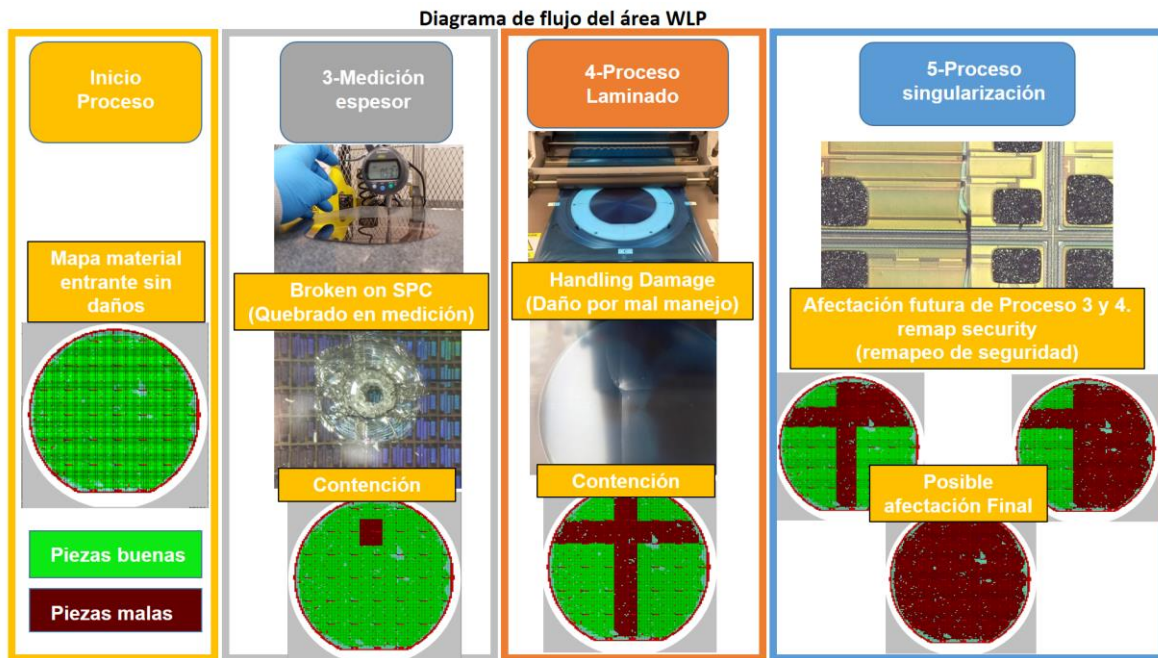


Nota: Elaboración propia.

La afectación inmediata se da cuando la oblea, al quebrarse, puede dejar restos de cristal sobre la mesa de trabajo; la cantidad dañada a nivel de sistemas de reporte debe ser restada de la cantidad de piezas iniciales del proceso.

Figura 6

Diagrama de flujo con afectación detectada

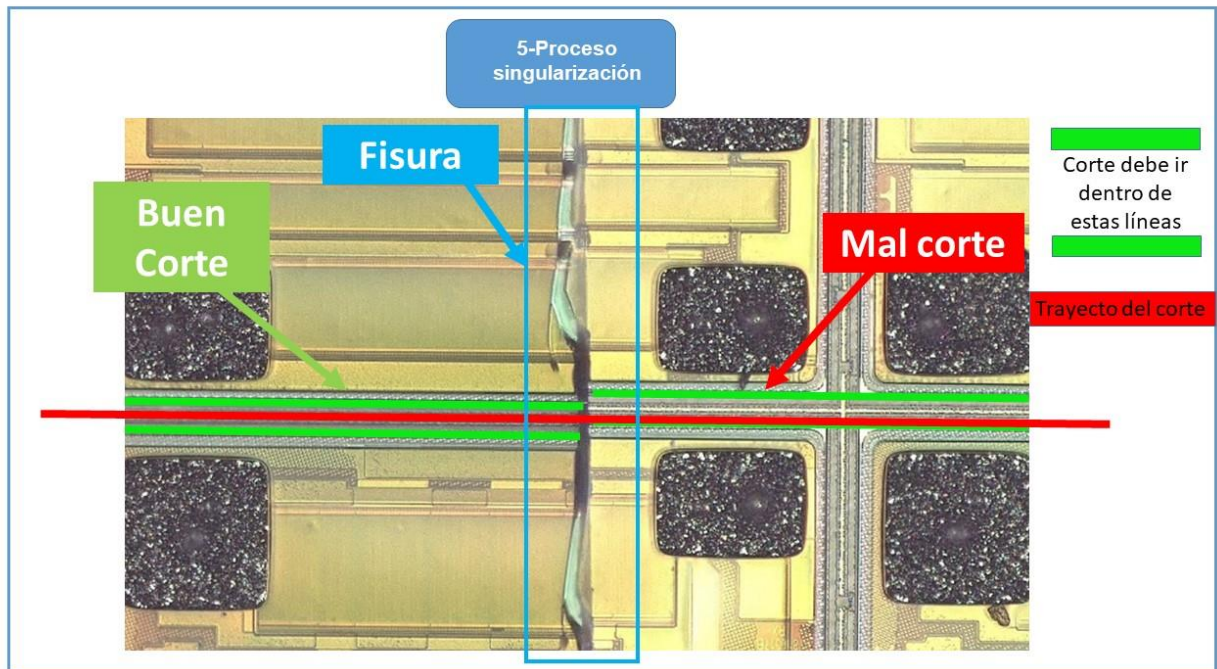


Nota: Elaboración propia.

En la Figura 6 se presenta un diagrama de flujo, que destaca las operaciones donde se producen quebraduras debido a procesos manuales. El proceso comienza con material sin rechazos, representado por piezas verdes (buenas). En el punto 3 de la Figura 6, se señala el daño que puede surgir tras la medición de espesor, lo que requiere rechazar el material afectado, representado con piezas rojas (dañadas). En el punto 4 de la Figura 6, se muestran los posibles daños durante el laminado y la medida de contención, que consiste en identificar las piezas afectadas.

Figura 7

Paso 5 afectación en corte

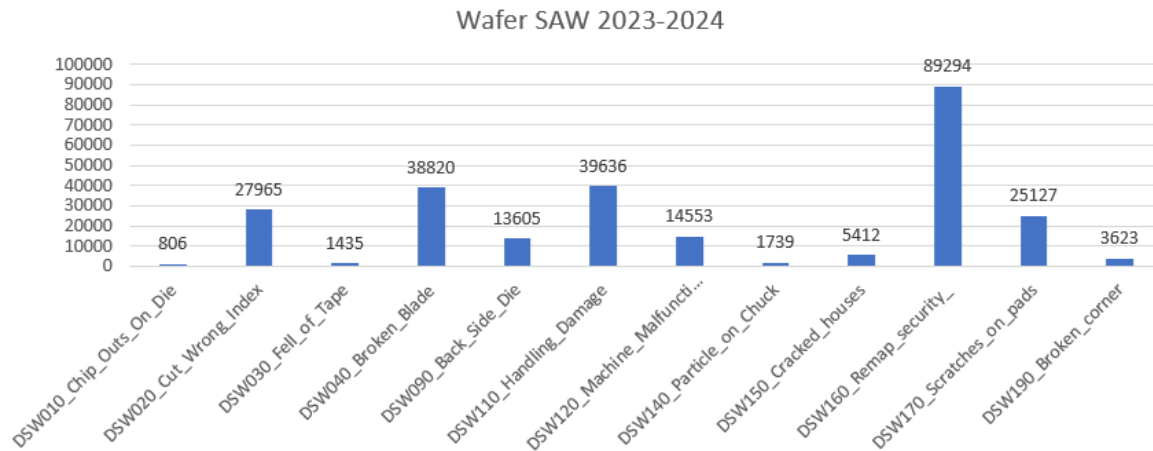


Nota: Elaboración propia.

Al hacer énfasis en el punto 5, la Figura 7 muestra cómo los daños creados en la medición o en el laminado pueden afectar etapas futuras del proceso. En este caso, el proceso de corte se realiza en línea recta de izquierda a derecha, y al pasar al área que está luego de la fisura, se producirá mal corte y el material restante deberá ser rechazado. Además del rechazo inicial que solo incluía la fisura, como se observa en la Figura 6, punto 5, las piezas rojas (piezas dañadas) se vieron incrementadas.

Figura 8

Motivos y cantidades de rechazos en el periodo 2023-2024 en el área de corte

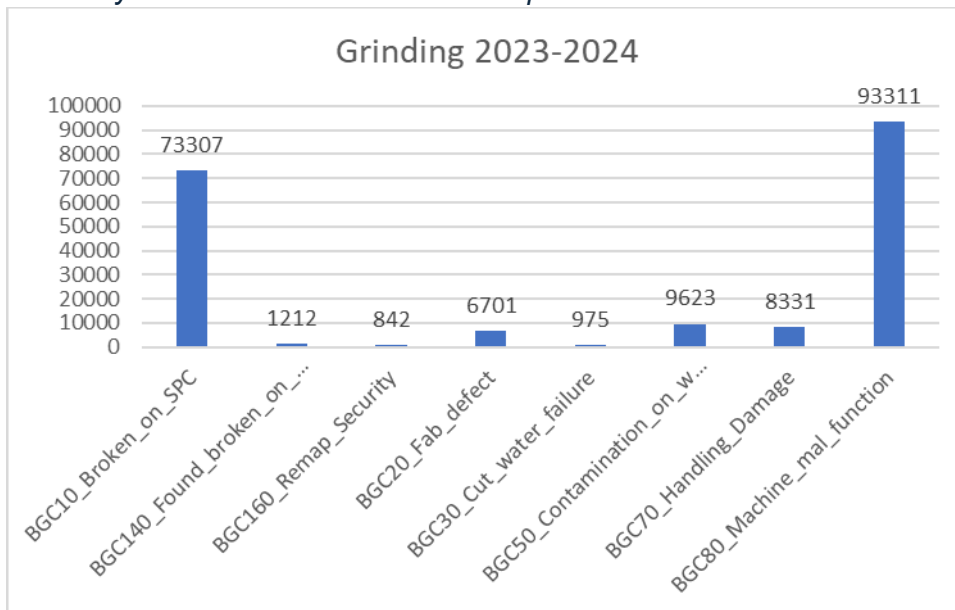


Nota: Elaboración propia.

En la Figura 8 se muestran las causas principales de rechazo en el corte de obleas: daño por mal manejo ("handling damage"), rayones en los pads ("scratches on pads"), remapeo de seguridad ("remap security"). En la Figura 6, se ilustra cómo la primera causa se debe a la manipulación incorrecta del material por parte del operario, y la segunda surge al intentar salvar material comprometido, lo que resulta en un corte defectuoso. Estos rechazos son consecuencia directa de la mala manipulación en el proceso de laminado. El valor total de las piezas afectadas por manipulación manual, en la Figura 8, asciende a \$23,108.55 (calculado con valor unitario de \$0.15).

Figura 9

Motivos y cantidades de rechazos en el periodo 2023-2024 en el área de desgaste



Nota: Elaboración propia.

En la Figura 9, se presenta la afectación por rechazos en el área previa al laminado. Las principales causas son el mal funcionamiento de la máquina de rectificado ("machine malfunction"), daño por mal manejo ("handling damage"), y las quebraduras durante la medición ("broken on SPC"), siendo esto último ilustrado en la Figura 6. Estas causas de rechazo representan un porcentaje alto de piezas dañadas en el área, y están relacionadas con la manipulación directa del operador. El valor total de las piezas afectadas, en la Figura 9, es de \$12,245.7 Al combinar los datos de las figuras 8 y 9, la afectación monetaria directa asciende a \$35,354.25 (monto calculado con valor unitario de \$0.15) en el último año, para la compañía.

$$\text{\$ en pérdidas} = \text{valor unitario} * \text{cantidad de defectos}$$

Justificación

En Costa Rica, la compañía se ubica en la Zona Franca Metropolitana, Edificio XXXX, Ulloa, Heredia, Heredia, Costa Rica. Los productos XXXX funcionan conectando, protegiendo y alimentando el planeta. Aportan tecnologías y soluciones centrales de radiofrecuencia (RF) y energía a los mercados de infraestructura móviles, IoT, defensa/aeroespacial y de gestión de energía.

Esta compañía procesa grandes cantidades de filtros a diario; en el año 2024, se procesaron cerca de ocho millones de piezas diarias como meta de producción en el área final.

El material WLP debe cumplir condiciones de calidad predefinidas por los clientes y por la misma compañía, por lo que las piezas, sin importar la meta de producción y la diversidad de modelos por procesar, deben llegar a los clientes en óptimas condiciones; su tiempo de proceso y entrega son muy valiosos para la empresa.

En el proceso de producción previo al laminado se da la medición del espesor, donde el espesor de la oblea es evaluado y se espera un grosor de más menos 10 micrómetros de lo esperado según la receta de la máquina. El proceso de laminado consiste en poner la oblea sobre un aro con tape; esta unión de estos tres elementos funcionará como un transportador que ayuda a ser procesado en los siguientes pasos, y dicho material debe llegar íntegro a la siguiente operación.

Para encontrar una solución viable, se tendrá en cuenta la cantidad de rechazos afectados por este motivo, para determinar una evaluación económica. A nivel técnico se evaluará la efectividad de la solución planteada en este proyecto; ambos casos consideran

las pérdidas históricas y el panorama para obtener un área de laminado con baja o ninguna afectación operativa.

En el área de Láser del material WLP (empaquetado a nivel de oblea) se cuenta con tres laminadoras, de las cuales dos están en uso y una se encuentra en ahorro energético, que está configurada en un tamaño diferente al regularmente usado, y se encuentra disponible para pruebas de ingeniería.

La condición ideal en un área de laminado consiste en mantener los rechazos a un nivel mínimo, asegurando que el proceso de medición manual no contribuya a aumentar los rechazos. Esto implica implementar estrategias y tecnologías que reduzcan la dependencia de la intervención directa de los operarios. Se deben encontrar e introducir nuevos métodos de control de calidad y medición que disminuyan la probabilidad de error humano. Además, es fundamental capacitar adecuadamente a los operarios para que, cuando sea necesaria su intervención, esta se realice de manera eficiente y precisa. La combinación de una nueva solución o herramienta y la formación adecuada, puede resultar en un proceso de laminado más consistente y con menos desperdicio, optimizando así la eficiencia y la productividad de la planta.

Alcance

Encontrar el método de fallo que afecta el material en las laminadoras y su proceso previo (medición de oblea), la afectación global en ambos casos, para, de esta manera, poder encontrar cuál es la opción que mitigue o elimine la problemática estudiada, teniendo en cuenta las variables de interés para la compañía.

Con base en lo antes descrito, se buscará demostrar que opción logra las condiciones deseadas para el proceso, cumpliendo con:

- Investigación bajo la metodología A3, que incluye: establecimiento del problema, estado actual, estado objetivo, antecedentes, causa raíz, medidas de contención.
- Evaluación del proceso existente, identificando todas las oportunidades de mejora posibles.
- Crear un estudio económico con base en las opciones de laminado.
- Justificar la solución óptima que cumple con los requerimientos de la compañía, de acuerdo con el estudio realizado.
- Planos, diagramas, programación requerida para el desarrollo del trabajo.
- Simulación de la solución presentada.
- Pruebas con prototipos que colaboren con la simulación de escenarios.
- Evaluación de las propuestas generadas.

Estado de la Cuestión

La tesis de Vélez-Danel (2021), sobre la optimización del proceso de embalaje en la empresa Phillips, muestra cómo la implementación de un PLC, una interfaz HMI, un alimentador automático y diversos actuadores neumáticos puede convertir un proceso manual en uno automatizado, logrando así un aumento en la producción. Esta investigación resulta especialmente relevante como referencia en estudios sobre automatización industrial, ya que ofrece un caso exitoso que permite argumentar sobre la eficiencia, la reducción de errores y el incremento en la productividad al implementar tecnologías similares. Además, proporciona una guía metodológica y un análisis de costos, que pueden ser utilizados para respaldar argumentos sobre los beneficios de la automatización en otros procesos.

En el diseño de un sistema automático para la creación y extracción de marquetas de hielo, desarrollado por Araya-Rojas (2020), se identificó que tres operadores dedicaban

el 75% de su tiempo a realizar esta tarea manualmente con el uso de una grúa, lo que impulsó la creación de una solución automatizada mediante un controlador lógico programable (PLC), interfaces hombre-máquina (HMI), sensores y actuadores. Esta automatización permite ejecutar las tareas con mayor eficiencia y controlar variables críticas del proceso, como la temperatura y la conductividad eléctrica, mejorando la precisión y reduciendo la dependencia en la intervención humana en labores repetitivas y demandantes. Este enfoque puede ser relevante para el proyecto, ya que la incorporación de tecnologías de automatización similares podría optimizar procesos manuales, aumentar la eficiencia operativa y garantizar un mayor control sobre las variables fundamentales del proceso, proporcionando así una solución más sostenible y eficaz.

Como mencionan Madriz et al. (2022), en su estudio sobre la "Influencia de la intervención humana en procesos modernos de manufactura", es fundamental para las empresas romper la cadena de acciones que pueden llevar al error relacionado con los operarios, mediante un enfoque de simulación de procesos centrado en el factor humano. Este estudio demuestra que los fallos manuales pueden reducirse significativamente utilizando herramientas que minimicen el error humano. Esta perspectiva es relevante para el proyecto, ya que refuerza la necesidad de implementar tecnologías de automatización y simulación que optimicen los procesos operativos, disminuyan la dependencia de la intervención manual y reduzcan los riesgos de errores asociados con los operadores, asegurando así un mayor control y eficiencia en el proceso de manufactura.

En el caso de la empresa Jaleas AltoBarrantes (Barrantes-Murillo, 2022), se abordó un proceso de llenado manual ineficiente y el mal funcionamiento de una máquina existente mediante su rediseño, implementando procesos automáticos y mejoras en el sistema de dosificación. Esto permitió aumentar significativamente la productividad y la precisión del llenado, reduciendo la necesidad de intervención manual y los errores asociados. Además,

se utilizaron componentes existentes y disponibles para disminuir la inversión inicial, demostrando que la automatización y la optimización de equipos pueden transformar procesos manuales ineficientes en operaciones más precisas, ágiles y rentables, maximizando la eficiencia y aprovechando los recursos disponibles de manera efectiva. Este enfoque es relevante para el proyecto, ya que evidencia cómo aplicar estrategias similares puede mejorar significativamente la operación y reducir costos.

Un caso específico que ilustra la necesidad de automatización es la reducción de fisuras en obleas de GaAs, como lo describen Darley et al. (2014). Las micro fisuras causadas durante el procesamiento manual pueden reducir la resistencia de las obleas y aumentar las tasas de rotura. La automatización de ciertas etapas del proceso ha demostrado ser efectiva en la reducción de estos defectos; sin embargo, la intervención humana sigue siendo un factor crítico. En el estudio, se determinó que la carga manual de obleas en domos metálicos contribuye significativamente a la creación de fisuras. Este caso es relevante para el desarrollo del proyecto, ya que resalta cómo la automatización puede minimizar defectos y mejorar la calidad del producto, al reducir la influencia negativa de la intervención manual, evidenciando la importancia de integrar soluciones automáticas para optimizar procesos y mejorar la consistencia en la producción.

Mediante el diseño electromecánico desarrollado por Alvarez-Bejar (2021), se logró resolver el problema de la fabricación manual de estribos para la construcción. Al utilizar programación en PLC con lenguaje ladder, Grafcet, diseño mecánico y actuadores neumáticos, se solventó la demanda de una dobladora automática propuesta. Este sistema autónomo satisfizo de manera efectiva la necesidad mencionada, demostrando cómo la combinación de tecnologías de automatización y diseño mecánico puede transformar procesos manuales en operaciones más eficientes y precisas. Este enfoque es relevante para el proyecto, ya que ilustra cómo la integración de soluciones automáticas puede

mejorar la producción, aumentar la eficiencia y satisfacer las demandas específicas del proceso.

Según Peralta-Abarca (2020), la industria está adoptando herramientas para la automatización y la recolección de datos mediante software y sensores, lo que contribuye a realizar tareas de manera más eficiente y a reducir significativamente la dependencia humana en los procesos actuales. Este enfoque no solo permite crear procesos más confiables, sino que también impulsa la mejora continua de los mismos. Para el proyecto, esto resalta la importancia de integrar tecnologías automatizadas y sistemas de recopilación de datos, ya que permite optimizar las operaciones, reducir el riesgo de errores humanos y fomentar una evolución constante en la calidad y eficiencia de los procesos.

Para abordar un problema de pick and place (recoge y posiciona), Hernández-Marías (2020) realizó y evaluó cinco experimentos en los que utilizó bandas, motores, programación PLC y un tipo específico de robot. A través de estos experimentos, se implementó un sistema de pick and place (recoge y posiciona) que optimizó el proceso al integrar diversas tecnologías. El estudio no solo permitió la implementación efectiva del sistema, sino que también incluyó una serie de pruebas detalladas para comparar las variables implicadas. Gracias a esta metodología, se logró identificar cuál de los experimentos ejecutaba la tarea en el menor tiempo y con la mayor precisión, sin defectos en la ejecución. Este enfoque es relevante para el proyecto, ya que ilustra cómo la combinación de tecnologías automatizadas y la evaluación exhaustiva de diferentes configuraciones pueden llevar a mejoras significativas en la eficiencia y precisión de los procesos industriales, facilitando la implementación de soluciones efectivas para problemas complejos de manufactura.

Objetivo General

Evaluar las causas de los daños que provocan quebraduras en obleas por medio de las métricas de producción históricas del área y análisis causa raíz, para la generación de una propuesta electromecánica de un sistema único de medición y laminación, en el segundo cuatrimestre del 2025.

Objetivos Específicos

- Cuantificar el impacto del proceso de laminado con respecto a los daños de las obleas en la línea de producción de WLP, utilizando métricas de producción que indican los rechazos y áreas implicadas, para la identificación de las causas raíz del problema.
- Evaluar el sistema de medición actual del espesor de las obleas, direccionado a un proceso que minimice los daños y facilite la recolección de datos, garantizando que los productos cumplan con los estándares de calidad establecidos.
- Diseñar un sistema electromecánico único que integre el laminado y la medición del espesor, asegurando el cumplimiento de los requerimientos específicos del proceso de producción, para el cumplimiento del proceso del material de manera íntegra.
- Determinar los beneficios económicos de la solución electromecánica utilizando análisis costo-beneficio basado en datos históricos y proyecciones futuras, mejorando así el proceso de las obleas para la determinación de la factibilidad financiera del proyecto propuesto.

Marco teórico

En el dinámico mundo de la tecnología, las obleas semiconductoras son esenciales para la fabricación de dispositivos electrónicos que se utilizan a diario. Estas finas láminas de material semiconductor, como el silicio, sirven como base para la creación de circuitos integrados y otros componentes microelectrónicos. La constante evolución en los procesos de fabricación y empaquetado, como el Wafer-Level Packaging (empaquetado a nivel de oblea) ha permitido mejorar el rendimiento y reducir el tamaño de estos dispositivos, respondiendo a las crecientes demandas de eficiencia en la electrónica moderna.

Este marco teórico se enfocará en analizar los conceptos fundamentales relacionados con las obleas semiconductoras, explorando los procesos industriales involucrados en su fabricación y las técnicas de medición y control de calidad aplicadas. Además, se abordarán los posibles daños que pueden afectar a estos materiales durante su procesamiento y métodos para mitigarlos, con el objetivo de garantizar la producción de dispositivos semiconductores de alta calidad y fiabilidad.

1. Obleas (Wafers)

1.1 Definición de Obleas

Las obleas, o wafers, son delgadas láminas de material semiconductor, generalmente silicio, que sirven como sustrato base para la fabricación de dispositivos microelectrónicos. El proceso de creación de una oblea comienza con la obtención de un cristal monocristalino de silicio, que luego se corta en discos muy delgados. Estas obleas tienen un papel fundamental en la construcción de circuitos electrónicos, ya que en ellas se integran diversos componentes como transistores, diodos y capacitores. Estos dispositivos forman parte de chips que se utilizan en microprocesadores, memorias, y otros dispositivos, como los de filtrado de radiofrecuencia (RF).

Además de ser la base para los componentes electrónicos, las obleas también son clave en procesos avanzados como la fabricación de circuitos integrados (IC), donde se realizan múltiples etapas de deposición de capas y grabado para crear los patrones que componen los circuitos. Estas obleas deben cumplir con rigurosos estándares de calidad, ya que cualquier imperfección o contaminación puede afectar el rendimiento de los dispositivos finales. En la actualidad, el tamaño y la precisión de las obleas continúan mejorando, permitiendo la creación de dispositivos cada vez más pequeños y eficientes, fundamentales en la tecnología de consumo y en aplicaciones industriales avanzadas (WaferPro, 2024).

1.2 Wafer-Level Packaging (WLP)

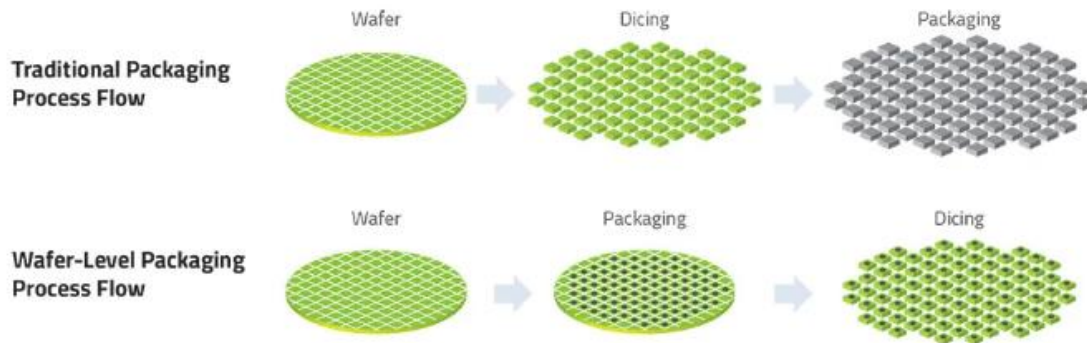
El empaquetado a nivel de oblea (WLP) es una técnica avanzada que se diferencia del método tradicional en la manera en que se empaquetan los chips. En el proceso convencional, la oblea se corta en chips individuales y luego se empaquetan. Sin embargo, en el WLP, el chip se empaca mientras todavía está en la oblea. Durante este proceso, se añaden capas protectoras y se realizan las conexiones eléctricas necesarias mientras la oblea permanece intacta, antes de ser troceada en los chips finales.

Una de las principales ventajas de este enfoque es que los chips resultantes son más pequeños, pues no se recubren completamente en los lados, lo que permite optimizar el espacio en dispositivos electrónicos que requieren un diseño compacto, como los teléfonos inteligentes. Además, al realizar el empaquetado antes del corte, el WLP mejora la eficiencia de la fabricación, ya que permite probar la funcionalidad de cada chip antes de ser separado de la oblea. Esto no solo facilita detectar problemas en una etapa temprana, sino que también reduce costos y defectos en la producción, al evitar desperdicios de material y asegurar una mayor calidad de los chips fabricados (SemiEngineering, 2025).

En la siguiente figura se ilustra la composición de una oblea de WLP:

Figura 10

Constitución oblea WLP



Nota: Obtenido de <https://semiengineering.com/whats-what-in-advanced-packaging/>

1.3 Niobato de Litio

El niobato de litio (LiNbO_3) es un material ampliamente utilizado en aplicaciones ópticas y de radiofrecuencia, debido a sus propiedades piezoeléctricas y electroópticas. En el campo de la comunicación óptica, se emplea como modulador óptico, integrándose con componentes pasivos de sílice, para mejorar la eficiencia en la transmisión de señales a través de fibras ópticas. Aunque su alto costo y menor fiabilidad en el proceso de fabricación representan desafíos, sigue siendo una opción clave en esta área.

Además de sus aplicaciones ópticas, el niobato de litio desempeña un papel fundamental en dispositivos de radiofrecuencia (RF), particularmente en los filtros de ondas acústicas superficiales (SAW) y de ondas acústicas de volumen (BAW). Gracias a su capacidad para convertir señales eléctricas en ondas acústicas y viceversa, estos filtros permiten la selección y amplificación de frecuencias específicas, mejorando la calidad de las telecomunicaciones, especialmente en estaciones base de telefonía móvil.

A pesar de las limitaciones en su fabricación, el niobato de litio sigue siendo un material clave en el desarrollo de tecnologías avanzadas. Su estabilidad térmica y amplio rango de frecuencias lo hacen ideal para sistemas de comunicación inalámbrica, donde la precisión y fiabilidad en la gestión de señales RF son esenciales. Su versatilidad y alto rendimiento aseguran su relevancia en el futuro de las telecomunicaciones y la fotónica (Kaushik, 2018).

1.4 Tantalato de Litio

El tantalato de litio (LiTaO_3) es un material piezoeléctrico utilizado principalmente en la fabricación de filtros de radiofrecuencia (RF), aunque su uso es más limitado en comparación con el niobato de litio. A pesar de ser menos común, el LiTaO_3 se destaca en aplicaciones de alta frecuencia, donde sus características específicas de filtrado son cruciales. Al igual que el niobato de litio, el tantalato de litio ofrece una excelente eficiencia en la conversión de señales acústicas a eléctricas y viceversa.

Una de las principales ventajas del tantalato de litio es su estabilidad térmica, lo que lo hace ideal para aplicaciones en entornos exigentes. Este material es particularmente útil en sistemas de comunicación satelital y en dispositivos que operan en condiciones extremas, como antenas y equipos de RF utilizados en el espacio exterior. Su capacidad para mantener un rendimiento fiable a altas frecuencias y en entornos con variaciones térmicas significativas lo convierte en una elección preferida en estos sectores.

Además, el tantalato de litio juega un papel fundamental en el desarrollo de tecnologías avanzadas que requieren una alta precisión en el filtrado de señales. Su resistencia a las altas temperaturas y su capacidad para operar eficientemente en el rango de frecuencias más altas lo hacen indispensable para mejorar la calidad y fiabilidad de las comunicaciones, especialmente en aplicaciones donde las señales deben mantenerse

limpias y sin interferencias, como en las comunicaciones satelitales y en sistemas de radar de alta frecuencia (Kaushik, 2018).

2. Procesos Industriales

2.1 Definición de Procesos Industriales

Los procesos industriales son una serie de operaciones organizadas que transforman materias primas en productos de mayor valor agregado. Estos procesos, presentes en sectores como manufactura, minería y agroindustria, incluyen la manipulación, transformación y ensamblaje de recursos. Se originaron con la Segunda Revolución Industrial, y su objetivo principal es la producción en masa de bienes destinados al consumo.

Estos procesos varían dependiendo de la naturaleza del producto, e incluyen operaciones químicas, físicas, eléctricas o mecánicas. Ejemplos comunes son la producción de papel, la transformación de la leche y la fabricación de electrodomésticos. Los procesos industriales son fundamentales para la economía, ya que permiten la producción de los bienes que se utilizan a diario (López & Pérez, 2020).

La fabricación de obleas y filtros de RF requiere un control riguroso de los procesos industriales, para garantizar que cada dispositivo cumpla con los estándares de calidad y rendimiento. La implementación de estos procesos asegura que las obleas sean procesadas sin defectos, y que los componentes de RF fabricados funcionen dentro de los parámetros de diseño.

2.2 Procesos Manuales

A pesar del creciente uso de la automatización en la industria de semiconductores, los procesos manuales aún juegan un papel en la fabricación, especialmente en etapas críticas como la inspección visual de obleas y el manejo de componentes delicados. Sin embargo, la manipulación manual también introduce el riesgo de defectos debido a la variabilidad humana (Lauri, 2023).

El control manual es más propenso a errores como arañazos o deformaciones en las obleas, lo que puede afectar el rendimiento del dispositivo. Por esta razón, muchas empresas de semiconductores están buscando automatizar la mayoría de los procesos que involucran contacto directo con las obleas.

2.3 Procesos Semiautomáticos

Los procesos semiautomáticos combinan la precisión de las máquinas con la supervisión humana en puntos clave del proceso de fabricación. Esto reduce la probabilidad de errores causados por la intervención manual, pero permite ajustes finos en casos donde la tecnología automatizada aún no puede reemplazar completamente el juicio humano.

Estos procesos son particularmente útiles en etapas donde la precisión es crítica, pero donde la flexibilidad o el control manual son necesarios, como en la configuración de herramientas de procesamiento o la calibración de equipos (Lauri, 2023).

2.4 Procesos Automáticos

La automatización en la fabricación de semiconductores ha revolucionado la industria, permitiendo la producción en masa de dispositivos con altos niveles de precisión y consistencia. Los sistemas automáticos, que incluyen robots y equipos de manipulación,

reducen la intervención humana, minimizando así los errores y defectos que podrían resultar del manejo manual de obleas delicadas.

Además, los avances en la visión artificial permiten la detección en tiempo real de defectos y problemas durante el procesamiento, lo que asegura que las obleas y los filtros de RF se fabriquen dentro de los parámetros establecidos. Esto no solo mejora la calidad del producto final, sino que también reduce los costos asociados con el desperdicio de materiales defectuosos (Lauri, 2023).

3. Medición

3.1 Definición de Medición

La medición en la fabricación de semiconductores es un proceso esencial para garantizar la calidad y el rendimiento de los dispositivos en cada etapa de producción. Las obleas de semiconductores y los filtros de RF deben cumplir con estrictas especificaciones de tamaño, forma y rendimiento eléctrico. Para lograrlo, se utilizan instrumentos de medición de alta precisión, como sistemas ópticos y eléctricos, que permiten asegurar que los dispositivos cumplan con los estándares establecidos. Los parámetros medidos incluyen el espesor de las capas depositadas, la alineación de los patrones en la oblea y la conductividad eléctrica de los dispositivos terminados.

La metrología en la industria de semiconductores también desempeña un papel crucial en el control de calidad, la optimización de procesos y la precisión en las mediciones, garantizando la fiabilidad de los productos, reduciendo defectos e impulsando la innovación en materiales, diseños y técnicas de fabricación. Esta disciplina permite la medición y el análisis precisos de materiales y dispositivos, asegurando el cumplimiento de las especificaciones de fabricación, facilitando la resolución de problemas y caracterizando el rendimiento de los dispositivos. La metrología de semiconductores es, por lo tanto, esencial

para mantener la consistencia y precisión a lo largo de todo el proceso de producción (Rigaku, 2024).

3.2 Control Estadístico de Procesos (SPC)

El control estadístico de procesos (SPC) es una técnica que utiliza herramientas estadísticas para monitorear y controlar los procesos de producción. En la industria de semiconductores, el SPC es crucial para mantener la consistencia en la calidad del producto y detectar variaciones en las primeras etapas del proceso.

El SPC se aplica en cada paso del proceso de fabricación, desde la deposición de capas hasta el corte de las obleas. Al identificar patrones de variabilidad en tiempo real, las empresas pueden ajustar los parámetros de proceso para evitar defectos en los productos finales.

Según Navidi (2022), en ocasiones pueden surgir ciertos factores que generan una variabilidad adicional en los procesos. Entre los más comunes se encuentran fallas en el funcionamiento de las máquinas, errores humanos, cambios en el ambiente y diferencias en las características de los materiales utilizados. Estos factores se conocen como *causas especiales* o *asignables*, y suelen originar una variabilidad mayor a la de las causas comunes, lo cual se considera inaceptable. Cuando un proceso se ve afectado por una o más de estas causas, se considera que está fuera de control estadístico.

3.3 Registro de Datos

El registro de datos es una parte fundamental de cualquier proceso de fabricación moderno. En la industria de semiconductores, la recopilación de datos permite a los ingenieros analizar el rendimiento del proceso y realizar ajustes en tiempo real, para minimizar las desviaciones.

El registro de datos de manera sistemática es esencial para asegurar que los productos cumplan con los estándares esperados por el cliente, ya que cada parámetro medido aporta información valiosa sobre su calidad. Según Walpole et al. (2022), una planificación adecuada permite centrar el registro en aquellas características más relevantes, como la densidad en un proceso productivo, que puede reflejar directamente el desempeño del sistema.

4. Daños al Material

4.1 Definición de Daño

Los daños al material en la fabricación de semiconductores se refieren a defectos físicos o eléctricos que ocurren durante el procesamiento. Estos daños pueden reducir el rendimiento de los dispositivos y, en algunos casos, hacer que los productos sean inutilizables. En la producción de obleas y filtros RF, el daño puede resultar de la manipulación inadecuada, fallos en el equipo o variaciones en los procesos.

Dentro de la gestión de productos, el daño se refiere a cualquier condición que afecte la funcionalidad, calidad o presentación de un bien, impidiendo su venta o consumo. Según Baca Urbina (2022), estos productos, ya sea por desperfectos, pérdida de calidad o vencimiento, son comúnmente considerados como pérdidas por el productor y descartados del mercado. Tradicionalmente, su disposición ha quedado a cargo del distribuidor; sin embargo, desde el enfoque de la logística inversa, se establece que es el productor quien debe encargarse del retiro y tratamiento de dichos productos no aptos para la venta.

4.2 Daños Físicos

Los daños físicos, como grietas, fracturas o deformaciones, son una de las principales preocupaciones durante el manejo y procesamiento de obleas. Estos defectos suelen ser causados por la presión mecánica aplicada incorrectamente, tanto en procesos

manuales como automatizados. Las obleas fracturadas no solo representan un desperdicio de material, sino que también pueden comprometer la calidad de los dispositivos producidos.

En el estudio de los daños físicos de los materiales, los cristales, el hierro fundido y la piedra son ejemplos típicos de materiales frágiles que sufren fracturas sin mostrar una variación significativa en su tasa de elongación antes del fallo. Según Beer (2021), en estos materiales no se observa una diferencia entre la resistencia última y la resistencia a la fractura, lo que implica que la ruptura ocurre de manera abrupta y sin señales previas de deformación significativa. Además, la deformación unitaria en el momento de la fractura es mucho menor en los materiales frágiles, como los cristales que, en los materiales dúctiles, lo que hace que su comportamiento sea más difícil de predecir. En la siguiente imagen se muestra el comportamiento típico del esfuerzo hasta el quiebre, tal como sucede en materiales como los cristales utilizados para la manufactura de semiconductores.

Figura 11

Diagrama de esfuerzo-deformación para un material frágil

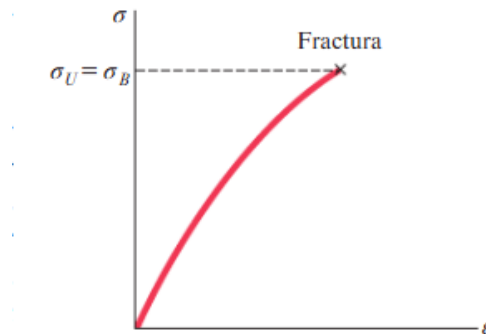


Figura 2.7 Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para un material frágil típico.

Nota: Obtenido de: Beer (2021). *Mecánica de materiales*.
<https://ebooks724.utn.eloqim.com:443/?il=16359>

4.3 Daños Eléctricos

En el ámbito de la fabricación y manipulación de componentes electrónicos, especialmente semiconductores, la descarga electrostática (ESD) representa un riesgo latente. Este fenómeno se origina por la acumulación de carga eléctrica en reposo sobre la superficie de materiales o personas, generando un campo eléctrico que puede liberarse al entrar en contacto con dispositivos sensibles. Actividades cotidianas como caminar sobre superficies alfombradas pueden inducir suficiente carga en el cuerpo humano como para dañar seriamente un semiconductor al momento del contacto. Según Olsson et al. (2020), esta situación constituye una amenaza importante en entornos industriales, ya que los dispositivos electrónicos son altamente susceptibles a descargas electrostáticas, especialmente durante su manipulación sin medidas adecuadas de protección.

Marco metodológico

Tabla Objetivos, variables e indicadores

Tabla 1

Objetivos, variables e Indicadores

Variables e indicadores			
Objetivo	Variable	Parámetro	Indicador
Evaluar las causas de los daños que provocan quebraduras en obleas por medio de las métricas de producción históricas del área y análisis causa raíz, para la generación de una propuesta electromecánica de un sistema único de medición y laminación, en el segundo cuatrimestre del 2025.	Eficiencia del proceso de laminado/medición manual	Cantidad de rechazos generales (fallos generados en el proceso)	Cantidad piezas rechazadas en operaciones manuales / Totalidad de rechazos.
Cuantificar el impacto del proceso de laminado con respecto a los daños de las obleas en la línea de producción de WLP, utilizando métricas de producción que indican los rechazos y áreas implicadas, para la identificación de las causas raíz del problema.	Daños en las obleas durante laminado	Cantidad de rechazos en el área de Wafer Saw (corte de obleas)	Reporte por Handling Damage (daño por mal manejo en laminado) y reporte por Remap Security (remapeo de seguridad). / Totalidad de rechazos.
Evaluar el sistema de medición actual del espesor de las obleas direccionado a un proceso que minimice los daños y facilite la recolección de datos, garantizando que los productos cumplan con los estándares de calidad establecidos.	Daños en las obleas durante medición	Cantidad de rechazos en el área de Grinder (desgaste de obleas)	Reporte por Broken on SPC (daño durante la medición). / Totalidad de rechazos.
Diseñar un sistema electromecánico único que integre el laminado y la medición del espesor, asegurando el cumplimiento de los requerimientos específicos del proceso de producción, para el cumplimiento del proceso del material de manera íntegra.	Método de proceso	Material sin daños	Piezas sin daños / piezas dañadas en proceso manual Piezas sin daños / piezas dañadas en proceso de carga automática Piezas sin daños / piezas dañadas en proceso con medición óptica sin contacto
Determinar los beneficios económicos de la solución electromecánica utilizando análisis costo-beneficio basado en datos históricos y proyecciones futuras, mejorando así el proceso de las obleas para la determinación de la factibilidad financiera del proyecto propuesto.	Costo-beneficio de la solución	Rentabilidad de la inversión, costo de implementación, ahorro generado.	VAN, TIR, PR.

Nota: Elaboración propia.

Esta metodología será desarrollada por las siguientes clasificaciones de investigación:

Enfoque de la Investigación

- Este estudio utilizará un enfoque cuantitativo, para contabilizar la incidencia de la afectación al material por la manipulación directa del personal operativo. Según Hernández Sampieri et al. (2018), el enfoque cuantitativo "sigue un patrón predecible y estructurado y se debe tener presente que las decisiones críticas sobre los métodos se toman antes de recolectar los datos, guiadas por el diseño" (p. 42). Esto es esencial para obtener resultados fiables y válidos en el análisis de datos de producción, permitiendo identificar patrones y tendencias con exactitud. La objetividad del enfoque cuantitativo facilita una interpretación clara de las relaciones causales, reduciendo la subjetividad y asegurando que las conclusiones sean replicables y generalizables.

Tipo de Investigación

- Correlacional: este tipo de investigación es adecuado cuando se desea determinar la relación entre dos o más variables. En este caso, se analizará la relación entre la manipulación manual y la incidencia de quebraduras en el material procesado. Hernández Sampieri et al. (2018), señalan que: "Tienen como propósito conocer la relación o grado de asociación que existe entre dos o más conceptos, variables, categorías o fenómenos en un contexto en particular, lo que es fundamental para comprender el fenómeno en profundidad" (p. 141). Este enfoque es crucial para descubrir patrones que puedan indicar cómo una variable influye en otra.
- Explicativo: este tipo de investigación se centra en entender las causas y efectos entre variables, buscando explicar por qué y cómo ocurre el fenómeno de las

quebraduras. Según Hernández Sampieri et al. (2018), los estudios explicativos: "Pretenden determinar las causas de los eventos y fenómenos de cualquier índole" (p. 141). Esto permite ir más allá de la simple correlación, explorando las razones subyacentes que conducen a los resultados observados, lo cual es esencial para formular estrategias que mitiguen o eliminen los problemas identificados.

Diseño de la Investigación

- **Diseño experimental:** se empleará un diseño experimental para analizar la relación de causa-efecto entre la manipulación manual y la incidencia de quebraduras en el material procesado. En este diseño, se realizarán modificaciones controladas en las variables independientes, como la intensidad o frecuencia de la manipulación manual, para observar cómo estas afectan las variables dependientes, específicamente la tasa de quebraduras.
- El proceso comenzará con la identificación y comprensión de las variables clave involucradas. Una vez determinadas, se llevarán a cabo pruebas controladas, en las que se manipulará intencionalmente la variable independiente (la manipulación manual) mientras se mantienen constantes otras variables que podrían influir en el resultado. Por ejemplo, la experimentación, desde el proceso manual, contra las propuestas seleccionadas para evaluar.
- Durante el experimento, se recopilarán datos detallados que serán comparados con un grupo control donde la manipulación manual no será alterada. Esta comparación permitirá establecer con mayor claridad la relación de causa-efecto entre las variables manipuladas y las observadas. Según Hernández Sampieri & Mendoza (2018), el diseño experimental "es una herramienta clave para manipular intencionalmente una o más variables independientes y medir su efecto en una o más variables dependientes" (p. 193). Esta metodología asegura que los resultados

obtenidos sean atribuibles a las modificaciones realizadas, fortaleciendo la validez interna del estudio y proporcionando evidencia sólida para las conclusiones.

Formulación de Hipótesis

- **¿Es la manipulación manual la causante directa de los daños en laminado y medición de espesor?**

Sí, se considera que la manipulación manual influye directamente en los daños, por lo que se plantea como una posible causa principal a confirmar durante la investigación.

- **¿Cuál método de laminado y medición no afecta al proceso con quebraduras?**

Un método automatizado e integrado se perfila como la mejor alternativa para evitar daños, lo cual será validado con el diseño y evaluación de una solución propuesta.

- **¿Puede un nuevo diseño electromecánico reducir la incidencia de quebraduras en los procesos?**

Sí, se prevé que un diseño electromecánico automatizado pueda disminuir significativamente las quebraduras al mejorar el control del proceso.

- **¿Será posible obtener un retorno de la inversión con el planteamiento de una solución electromecánica en menos de dos años?**

Sí, se proyecta que la solución planteada será financieramente viable y permitirá recuperar la inversión en un plazo menor a dos años, según los análisis propuestos.

Población y Muestra

- Población y muestra: la población del estudio comprende todos los reportes de producción registrados en el sistema Opcenter durante los años 2023 y 2024. Estos datos representan los informes más actuales y relevantes, reflejando la problemática de las quebraduras en obleas. La muestra, que no es estadística, incluirá 50 obleas utilizadas en experimentos controlados, que pueden ser llevadas hasta el fallo, pero se proponen pruebas repetibles con movimientos repetibles de hasta 500 veces durante el periodo de septiembre a diciembre, desde que los prototipos estén listos, ya que las obleas no forman parte de la producción regular. Según Hernández Sampieri & Mendoza (2018), "la selección de una muestra adecuada es crucial para la validez de los resultados obtenidos en el estudio" (p. 309).
- Esta muestra permitirá realizar pruebas experimentales sin afectar la producción en curso, garantizando que los resultados sean representativos y que las conclusiones obtenidas reflejen las condiciones reales del proceso. Al utilizar una muestra controlada, se asegura que los experimentos puedan repetirse y que los datos sean comparables, lo que es esencial para validar las hipótesis planteadas y entender mejor la relación entre la manipulación manual y las quebraduras en el material procesado.

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

- Datos históricos: se obtendrán de la herramienta de reportes de producción Opcenter, donde se registrarán variables clave como el usuario, el área, la fecha, la hora, la cantidad de rechazos y la razón de estos rechazos. Estos datos proporcionarán una visión integral de las operaciones y sus resultados.
- Datos experimentales: para las obleas de prueba, que no pueden ser ingresadas en el sistema Opcenter, los datos serán registrados manualmente en archivos de Excel.

Hernández Sampieri et al. (2018) destacan que: "Toda medición o instrumento de recolección de datos cuantitativo debe reunir tres requisitos esenciales: confiabilidad, validez y objetividad" (p. 264). Este enfoque permitirá un seguimiento detallado de las pruebas experimentales y facilitará el análisis posterior.

- La combinación de estos datos permitirá contrastar resultados históricos con los obtenidos en condiciones controladas, brindando una perspectiva más completa sobre el impacto de la manipulación manual en la incidencia de quebraduras.

Proceso de Tabulación y Análisis de Datos

- **Herramientas:** los datos recolectados se extraerán utilizando TIBCO Spotfire, una potente plataforma de análisis que permite realizar un análisis preliminar detallado, identificando patrones y tendencias en los datos históricos. Posteriormente, estos datos se procesarán en hojas de cálculo de Excel, lo que facilitará un análisis más exhaustivo y detallado, permitiendo la manipulación directa de los datos para realizar cálculos y comparaciones precisas. Hernández Sampieri et al. (2018) enfatizan que "las herramientas de análisis de datos permiten visualizar y procesar la información de manera efectiva, facilitando la interpretación de los resultados" (p. 120). Esto asegura que cada conjunto de datos sea examinado minuciosamente, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones.
- **Análisis estadístico:** se realizarán análisis de regresión para comprender la relación entre la manipulación manual y las quebraduras. Este análisis permitirá identificar la fuerza y dirección de la relación entre las variables, ayudando a determinar si los cambios en la manipulación manual afectan significativamente la incidencia de quebraduras. Además, se aplicarán métodos descriptivos, para resumir las características básicas de los datos y métodos inferenciales, para extraer

conclusiones sobre la población a partir de la muestra. Hernández Sampieri et al. (2018) señalan que el análisis de regresión lineal "es un modelo estadístico para estimar el efecto de una variable sobre otra" (p. 95). Este enfoque permitirá no solo identificar correlaciones, sino también establecer un modelo predictivo que explique cómo la manipulación manual influye en el proceso productivo, permitiendo así desarrollar estrategias para minimizar las afectaciones y mejorar la eficiencia operativa.

Se desarrollará la metodología utilizada por la compañía, que es A3 Problem Solving (A3 Solución de Problemas). En este caso, el desarrollo se llevará en paralelo con lo ya mencionado.

La metodología A3 a nivel de la compañía representa el pilar para la investigación, evaluación, implementación y evaluación de cambios, que buscan solucionar problemas en la compañía.

La metodología implica información inicial como:

- El análisis objetivo de la resolución de problemas ha revelado que los equipos, quienes siguen el modelo de resolución de los problemas, lo hacen de forma más rápida y permanente.
- El proceso de resolución de problemas sigue el método científico y Planificar-Hacer-Verificar-Actuar.
- Los comportamientos y herramientas utilizados para resolver problemas son: observación directa, desglose del problema, análisis de causa raíz, contramedidas y estándares.

El A3 es una herramienta de resolución de problemas y mejora continua, utilizada para resolver problemas, no debe verse ni aplicarse como un castigo; es propiedad y responsabilidad compartida. Identificar a todos los clientes, propietarios de procesos y proveedores; todos coinciden en que hay un problema y son responsables de realizar mejoras. Se deben considerar todos los puntos de vista, así como las necesidades del cliente final, centrarse en mejorar el proceso y no en mejorar las personas. Los juicios deben ser basados en hechos; para ello se debe conocer cada paso del trabajo, sin adivinar ni asumir; las opiniones importan, pero los hechos y los datos ganan para hacer transparentes el problema y el progreso.

- La página principal de esta metodología da un vistazo general al estado de la investigación. Incluye cuatro pilares, los cuales son: establecimiento del problema, estado actual, estado meta, plan de acción y verificación.

El establecimiento del problema incluye información elegible para visualizar cómo:

- El objetivo final es una declaración de aspiraciones.
- El estándar se establece como la condición ideal y es medible.
 - Actividades-Conexiones-Flujos. Todo el mundo lo está haciendo; medible con límite.
- La brecha con el estándar es la diferencia entre el desempeño estándar y el actual. Esto debería visualizarse.
- El impacto general del problema es claro.
- El indicador de producción debe estar claramente graficado con el desempeño histórico.

El estado actual incluye información elegible para visualizar cómo:

- Romper la brecha representada en el enunciado del problema.

- Usar los datos más recientes.
- Identificar problemas para resolver.
- Se visualiza el flujo del proceso actual.
- Si existe un estándar, documentar ese flujo.
- Si no existe un estándar, documentar cada flujo y utilizar el estado objetivo para alinearse con un flujo estándar
- Se indica claramente el paso en el que se produce el problema: punto de ocurrencia.
- Se analiza la causa raíz con una herramienta lógica de causa y efectiva, como el diagrama de espina de pescado.
- La causa raíz está dentro del alcance del control del equipo.
- El equipo de trabajo debe ir y conocer que se está realizando, y se utilizan hechos y datos.
- Se incluye también el costo monetario, que incluye el desechar las piezas afectadas, para también lograr calcular el análisis financiero de la solución, o soluciones propuestas.

En el estado objetivo se incluye información elegible para visualizar cómo:

- Se visualiza el flujo del proceso objetivo.
- La hipótesis para resolver el problema (cerrar la brecha) es clara.
- Se aplica la contramedida en el punto de ocurrencia.
- Se mide el objetivo (cuánto, para cuándo).
- Las contramedidas se evalúan visualmente y se reducen a las más efectivas.

Acá, se hace una mención al cómo se procederá para concretar los alcances propuestos. En el estado objetivo se incluye información elegible para visualizar cómo:

- El plan de acción debe respaldar el estado objetivo.

- El plan de acción está claramente definido con los responsables, las fechas de vencimiento y las fechas de finalización.
- Se implementa la contramedida óptima y se visualiza la mejora esperada en el indicador de producción.
- Calcular el estudio económico, evaluando las posibles soluciones.
- Documentación del estándar recién creado, o actualizar el estándar existente.
- Se adjuntan planos, diagramas, programación, simulaciones, experimentación, pruebas con prototipos.
- Informar a los clientes internos sobre estos cambios.

Presentación y análisis de los resultados

Definiendo el estado actual

Con base en los datos históricos del 2023 al 2024, generados por el programa extractor de datos llamado "Spotfire", el cual es utilizado en la compañía en las dos áreas estudiadas por rechazos relacionados con daños por manipulación manual, a continuación, se explicarán las de rechazo, que se utilizan para reportar los daños en el material, y se ilustrarán los códigos en los que se enfoca la investigación.

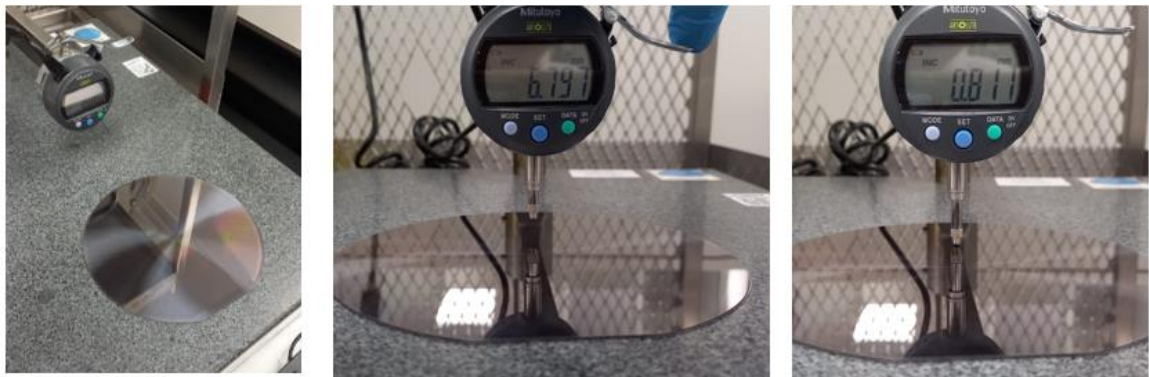
- Del área de Grinding (desgaste):

Códigos de rechazo

- 1- Quebrado en medición manual: representa la afectación directa durante la medición que se da sobre el granito con el micrómetro de aguja. El código se utiliza en los casos de sacar la oblea del casete; ponerlo sobre la superficie de medición, colocar la oblea por debajo de la aguja de medición, bajada provoca golpe, sacar la oblea de la superficie de medición y devolverla al casete, tal como se ilustra en la figura:

Figura 12

Quebrado en medición de material



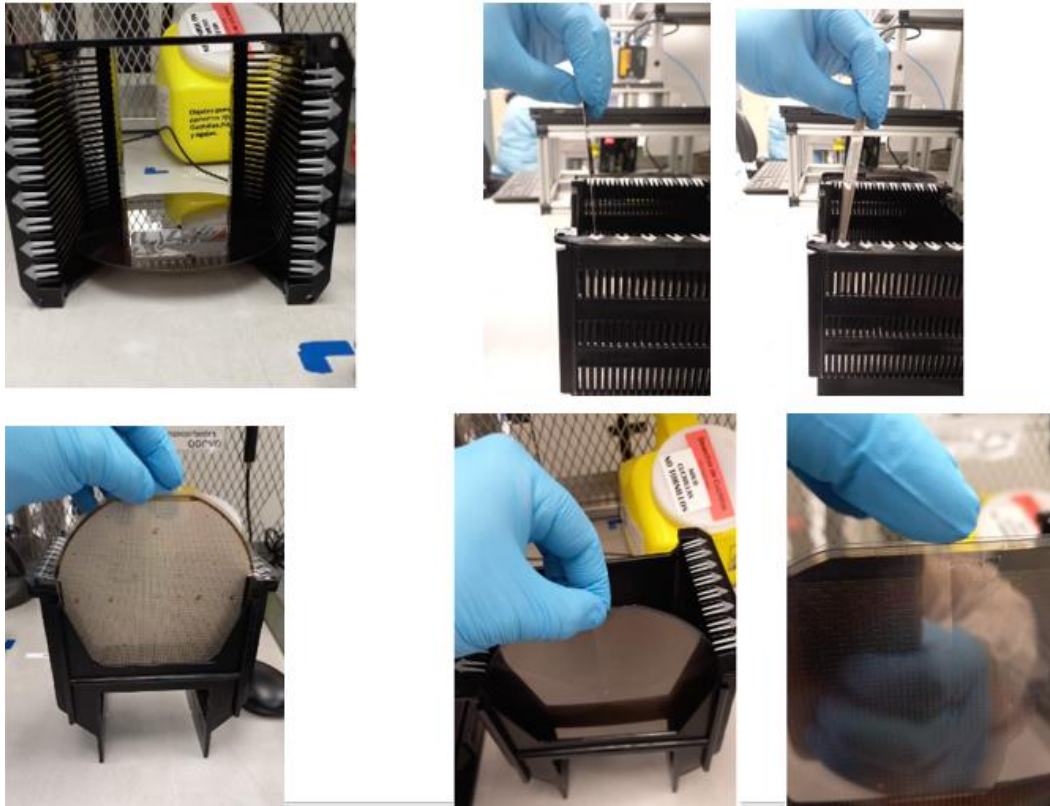
Nota: Elaboración propia.

- 2- Se encontró quebrado en la caja: este código se utiliza cuando, luego de un cambio de turno, el siguiente operario encuentra material quebrado en la caja que contiene las obleas, desconociendo cuál fue la causa del daño.
- 3- Remapeo de seguridad: en esta área se da cuando se observa ingreso de agua del lado de las conexiones del material. El desgaste se da por el lado de la espalda de la oblea, y el lado frontal debe quedar intacto, sin filtraciones de agua.
- 4- Defecto de fabricación: este código se utiliza cuando hay un defecto proveniente de la fabricación previa a los procesos de Costa Rica; dicho daño puede provocar una afectación en el proceso de desgaste.
- 5- Fallo en el agua: cuando las facilidades fallan, específicamente la caída en el nivel de agua que la máquina utiliza para el desgaste de la superficie de la oblea, el proceso se detiene súbitamente, para proteger el material y a la misma máquina. Mediante un sensor volumétrico de agua se ejecuta dicha acción, y en las ocasiones que, por la situación descrita, el material se quiebra o se mancha, se utiliza este código de rechazo.
- 6- Contaminación en la oblea: cuando el material sale manchado y no es relacionado con fallos de agua, se utilizar este código. Las manchas se pueden relacionar con problemas en la dirección de las boquillas de agua de la máquina con bajos niveles de agua, con contaminación del agua, o con deficiencia en la estación de lavado de obleas.
- 7- Daño por manipulación: en este caso, el operario indica que, debido a la mala manipulación se vio afectado el material, ya sea por una caída o golpe no deseado. Los movimientos normalmente deben ser delicados, pero no se pueden mantener límites controlables en la manipulación del material. Esta manipulación se realiza de manera manual, sin herramientas de ayuda; por ende, el agarre de la oblea no es estándar, ya que normalmente se utiliza con los dedos pulgar e índice, con la fuerza

necesaria para que no se caiga y no exceder la fuerza para que no se quiebre; en estos casos se pueden dar estos extremos no deseados. Este tipo de fallos se presentan en la siguiente imagen:

Figura 13

Daño por manipulación



Nota: Elaboración propia.

- 8- Daño en el proceso de rectificación: este código es propio de un daño relacionado con el proceso de desgaste y directamente relacionado con el estado de la máquina por un fallo de software, hardware, que requiera intervención del personal de mantenimiento del equipo, como pueden ser daños en las ruedas de desgaste, fallo de piezas o sensores de la máquina.

Tabla 2*Cantidad de rechazos, su código y cantidad del área de Desgaste*

Cantidad de rechazos, su código y cantidad del área de Desgaste				
#	Código inglés	Código Español	Cantidad	Porcentaje
1	BGC10_Broken_on_SPC	Quebrado en medición manual	73307	38%
2	BGC140_Found_broken_on_box	Se encontró quebrado en la caja	1212	1%
3	BGC160_Remap_Security	Remapeo de seguridad	842	0%
4	BGC20_Fab_defect	Defecto de fabricación	6701	3%
5	BGC30_Cut_water_failure	Fallo en el agua	975	1%
6	BGC50_Contamination_on_wafer	Contaminación en el wafer	9623	5%
7	BGC70_Handling_Damage	Daño por manipulación	8331	4%
8	BGC80_Machine_mal_function	Daño en el proceso de rectificación	93311	48%
Total			194302	

Nota: Elaboración propia.

De un total de 194 302 unidades dañadas en el proceso de desgaste, 73 307 fueron dañadas en la medición de grosor manual y 8 331 por mala manipulación.

Según la Tabla 2, se resaltaron los códigos de rechazo relacionados con operaciones manuales en el área; esto resulta en un total de 81 638 piezas rechazadas por categorías que indiquen mano de obra con manipulación manual implícita, lo que representa un 42% de los rechazos.

Del área de Wafer Saw (Corte)

Códigos de rechazo, explicación en español

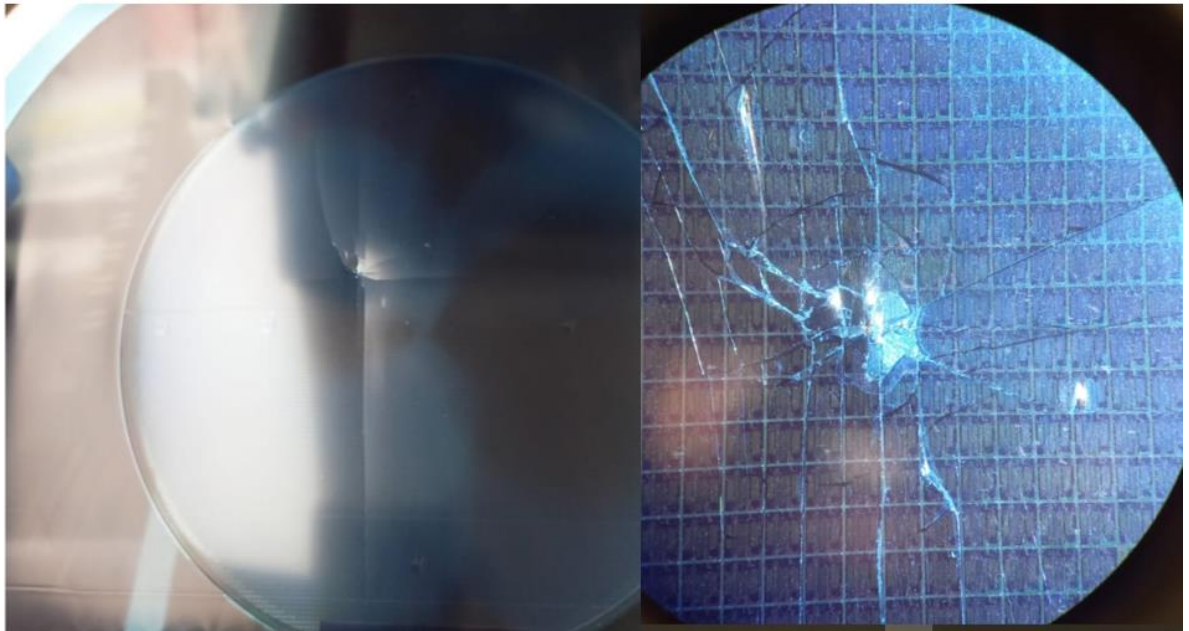
- 1- Desprendimiento de material en el frente del die: este código se utiliza para los rechazos relacionados con daños efectuados durante el corte, que están relacionados directamente con un tipo de astillamiento en el borde de las piezas. Este daño surge porque la cuchilla con la que se realiza el corte de la oblea sufrió un daño previo o durante el corte, haciendo así un corte no deseado que afecta el lado de las conexiones de la pieza.

- 2- Corte corrido: se da cuando existieron anomalías en el alineamiento del corte. Cuando la cuchilla pasa sobre la línea de corte, la idea es que siempre pase por la trayectoria deseada, para que la pieza cumpla con las dimensiones deseadas. Este proceso se puede asociar al tamaño de un cuadro cerámico, que debe cumplir con un tamaño de 40cm de cada lado; si uno de los lados tiene una medida diferente, no cumple con las características deseadas y ese cuadro no sería apto para la venta. En el corte de las piezas de las obleas pasa lo mismo: hay especificaciones de las medidas deseadas por el cliente, y al tener “corte corrido” ya no cumple con el estándar, ya que su dimensión fue reducida. Su causa es el mal alineamiento, que se puede dar por elección incorrecta de la receta de corte, la cual determina la dimensión de la pieza por cortar: los problemas en la visión también pueden desencadenar en problemas de esta índole, pues si se enseña a la máquina a cortar por el camino incorrecto, ella lo ejecutará y repetirá de dicha manera.
- 3- Caída de tape: se refiere a que, durante el proceso del corte, las piezas se desprendieron del tape que mantiene sujeta la oblea al aro; este tipo de fallo es relacionado con la mala dirección de la boquilla de agua encargada de enfriar el corte en el paso de la cuchilla. Cuando la dirección de la boquilla va direccionada al material y no a la cuchilla, el material se va a ir desprendiendo conforme se vaya cortando.
- 4- Cuchilla quebrada: este tipo de fallo se asocia al daño del elemento de corte; cuando la calibración de la cuchilla no se realiza, está mal ejecutada o un elemento ajeno al corte, como residuos de oblea, tape, u otros, están en la trayectoria de la cuchilla, la misma puede sufrir daños que, a su vez, van a provocar cortes irregulares. Esto se puede representar al igual que cortar con un cuchillo sin filo, cuando el elemento por cortar puede tener irregularidades no deseadas en el corte.

- 5- Desprendimiento en la espalda del die: este efecto tiene el mismo historial que el primer código, solo que en este caso el daño es visible desde el lado trasero de la pieza, donde no están las conexiones del elemento por cortar.
- 6- Daño por manipulación. este tipo de daño es provocado por el daño hecho por el operario durante el laminado de las obleas; la manipulación durante todo este proceso depende meramente de la capacidad operativa, ya que los movimientos se deben realizar de manera suave y delicada. En este caso, el material que se va a laminar tiene un grosor cercano a la cuarta parte de un milímetro; por ende, su manejo debe ser cauteloso. La parte delicada del laminado es la carga de la oblea, pues el material, aparte de estar muy delgado, no cuenta con ninguna protección, durante la carga de la oblea a la laminadora, mientras, al descargar el material, ya existe una unión con un aro laminado, el cual facilita su transporte y evita choques de la oblea con los demás elementos. En la Figura 12 se representa el mismo tipo de fallo, porque la manipulación al sacar la oblea es similar que cuando se introduce. Luego de laminado, el daño puede observarse como en la siguiente figura:

Figura 14

Daño luego de laminado



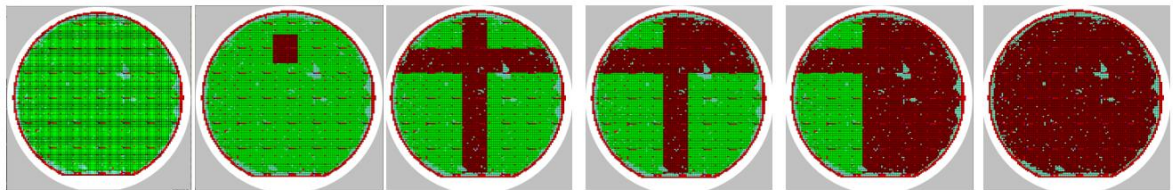
Nota: *Elaboración propia.*

- 7- Daño por la máquina: este código se utiliza cuando se encuentra que, debido a la naturaleza de la máquina, se detecta un fallo en su software o hardware, que estuvo directamente relacionado con un daño durante el proceso de corte, como lo puede ser el daño de un elemento, la pérdida de facilidades, o similares.
- 8- Partícula en la mesa de vacío: cuando se encuentra un elemento extraño sobre la mesa de vacío y no hubo daño en la cuchilla, se utiliza este código, que representa la afectación por un corte irregular provocado por el desnivel de la superficie.
- 9- Quebraduras internas: en este tipo de quebraduras internas, a causa de un estudio llevado a cabo en el 2017, la compañía concluyó que dicho daño viene del proceso de fabricación previo al trabajo realizado en la planta de Costa Rica.
- 10- Remapeo de seguridad: tiene una alta relación con el punto 2, que habla de corte corrido; la diferencia es que para este código de rechazo entrarán todas las obleas

que poseían una quebradura previa al ingreso a corte, ya sea que venían del área de desgaste con algún daño, o que haya sido provocado durante el laminado; el efecto es el mismo: la dimensión de la pieza, que no es aceptable por el cliente. En este código se puede ver la afectación futura que pueden tener las quebraduras hechas en las áreas anteriores. Cuando se ingresa material con fisuras previas a la máquina, la misma toma la referencia en los bordes de la oblea y el material central no se evalúa para el alineamiento previo al corte, donde se puede dar la afectación que se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Remapeo de seguridad



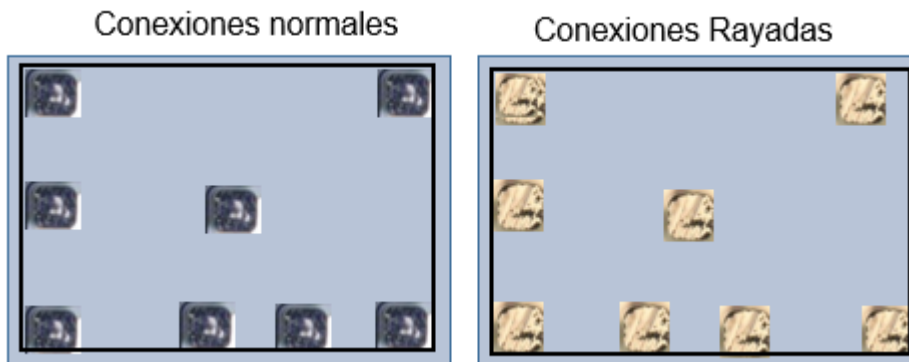
Nota: Elaboración propia.

El proceso inicia con una oblea en buen estado; luego se puede dar un fallo inicial que no afecta muchas piezas, pero a nivel de corte, dicho defecto se puede extender debido a lo quebradizo del material, que en ciertos casos llega a afectar la totalidad de la oblea.

- 11-Rayones en las conexiones: este código representa los problemas de carga y descarga que tienen las obleas durante su manipulación, pero que no provocan quebraduras. En este caso, el daño fue un rayón en la parte de la conexión, como se observa en la siguiente figura.

Figura 16

Comparación conexión con daños



Nota: Elaboración propia.

12- Esquinas quebradas: similar al paso 5, el daño se presenta del lado trasero del die donde no hay conexiones; la diferencia es que el daño es justo en la esquina de la pieza. También este problema se crea durante el corte del material, y la dirección de la boquilla de agua también está relacionada con este tipo de daño.

De un total de 262 015 unidades dañadas en el proceso de corte, 39 636 piezas fueron dañadas por manipulación directa, 89 294 fueron rechazadas por remapeo de seguridad, y 10% por rayones en las conexiones de las obleas.

Tabla 3

Cantidad de rechazos, su código y cantidad del área de Corte

Cantidad de rechazos, su código y cantidad del área de Corte				
#	Código inglés	Código Español	Cantidad	Porcentaje
1	DSW010_Chip_Outs_On_Die	Desprendimiento de material en el die	806	0%
2	DSW020_Cut_Wrong_Index	Corte corrido	27965	11%
3	DSW030_Fell_of_Tape	Caída de tape	1435	1%
4	DSW040_Broken_Blade	Cuchilla quebrada	38820	15%
5	DSW090_Back_Side_Die	Desprendimiento en la espalda del die	13605	5%
6	DSW110_Handling_Damage	Daño por manipulación	39636	15%
7	DSW120_Machine_Malfunction	Daño por la máquina	14553	6%
8	DSW140_Particle_on_Chuck	Partícula en el chuck	1739	1%
9	DSW150_Cracked_houses	Quebraduras internas	5412	2%
10	DSW160_Remap_security_	Remapeo de seguridad	89294	34%
11	DSW170_Scratches_on_pads	Rayones en los Pads	25127	10%
12	DSW190_Broken_corner	Esquinas quebradas	3623	1%
Total			262015	

Nota: Elaboración propia.

Según la Tabla 3, se resaltaron los códigos de rechazo relacionados con operaciones manuales en el área; esto resulta en un total de 154 057 piezas rechazadas por categorías que indiquen mano de obra con manipulación manual implícita, lo que representa un 59% de los rechazos en el área de corte.

Tabla 4

Rechazos generales relacionados con manipulación manual

Rechazos generales relacionados con manipulación manual		
Área	Cantidad	Porcentaje
Desgaste Obleas	81638	18%
Corte Obleas	154057	34%
Total	235695	52%
Rechazos totales en ambas áreas		456317
Rechazos por manipulación manual		235695
Cantidad total inicial sin defectos		3856547

Nota: Elaboración propia.

Con base en la información presentada en la Tabla 4, se propone implementar un sistema que integre las operaciones de laminado y medición en un único proceso

automatizado, con el objetivo de mitigar los rechazos generados por la manipulación manual de las obleas, que actualmente representan un costo significativo. Al considerar un valor unitario de \$0.15 por oblea dañada, el costo total asociado a estas fallas asciende a \$35 354.25. La automatización de estas tareas, mediante el uso de manipuladores robóticos, sensores ópticos de grosor y mesas de laminado con monitoreo de vacío, asegurará un manejo controlado y seguro del material, eliminando errores causados por fuerza y velocidad descontroladas, o por un orden incorrecto en las operaciones. Este sistema no solo reducirá el desperdicio de material y optimizará los recursos, sino que también incrementará la eficiencia operativa, garantizará la calidad del producto y fortalecerá la rentabilidad y competitividad de la empresa.

Definición del equipo de trabajo

El equipo de trabajo se divide en las partes mencionadas en la Tabla 5.

Tabla 5

Definición del equipo de trabajo

Definición del equipo	
Encargado	Rol
Carlos Fallas Castro	Líder del Proyecto.
Ing. Producto	Facilitador del Producto para pruebas.
Ing. Equipo	Encargado de facilitar la máquina para pruebas y modificaciones, permisos para retirar repuestos necesarios.
Ing. Industrial	Encargado de aprobar los tiempos de operación del equipo.
Gerente de Proceso	Aprobador de la propuesta Electromecánica.
Ing. Proceso	Aprobador de la documentación generada.

Nota: Elaboración propia.

El grupo de trabajo presentado desempeña un rol fundamental como facilitador en el desarrollo del trabajo, aunque no esté directamente involucrado en su ejecución. Su función principal consiste en crear un entorno favorable para el avance del proyecto,

resolviendo posibles bloqueos, gestionando recursos y estableciendo comunicación efectiva entre los diferentes actores.

Evaluación de medida de contención actual

Tabla 6

Efectividad del Remapeo

Fallos encontrados en el área final Agosto 2024		
Total de fallos de inspección	421	100%
Fallos por piezas quebradas en muestra	55	13%

Nota: Elaboración propia.

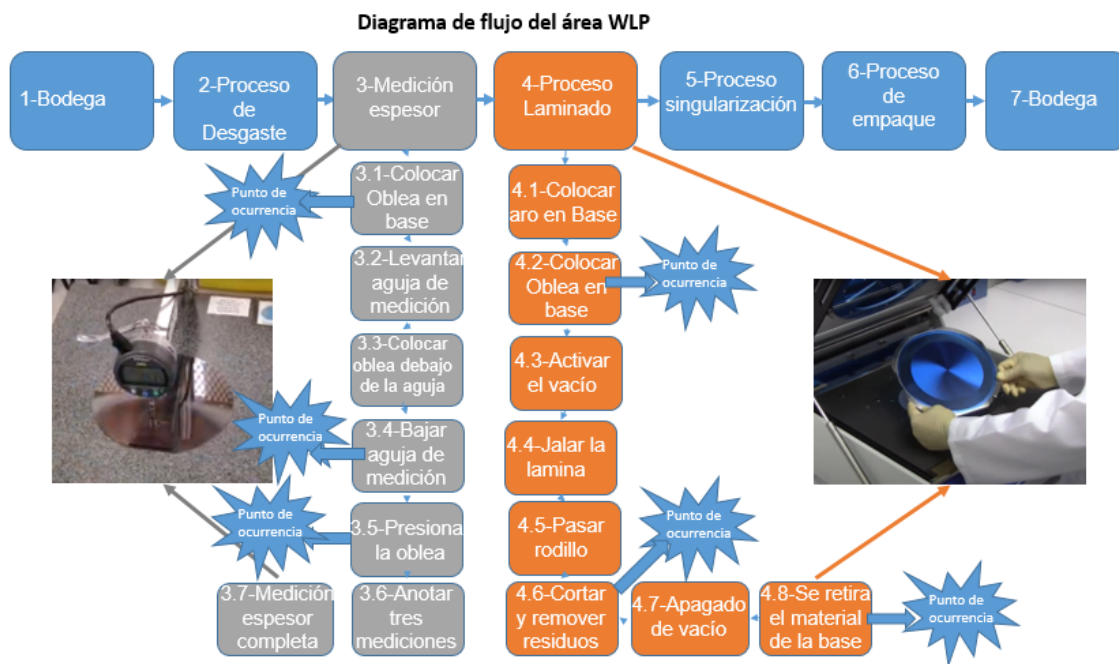
Según los datos presentados en la Tabla 6, correspondientes al área de DTR, las muestras de piezas son rechazadas por diversas razones, entre las cuales se encuentran daños físicos, contaminación, rayones y, en este caso, las piezas que se fisuran. Las fisuras representan un 13% del total de los rechazos registrados para el mes de agosto de 2024. Este tipo de defectos se concentran principalmente en las áreas de medición de oblea y corte, donde las piezas son sometidas a presiones y fuerzas mecánicas que, si no son adecuadamente controladas, pueden generar fisuras en los materiales. Las causas de estas fisuras pueden incluir un ajuste incorrecto en las máquinas de medición o corte, herramientas desgastadas, o un control de calidad insuficiente en el proceso de corte. Es fundamental revisar estos procesos, para identificar posibles puntos críticos y adoptar medidas correctivas, como la calibración de los equipos, la revisión de las condiciones de las herramientas de corte, o la implementación de técnicas de manejo más cuidadosas, con el fin de reducir la tasa de rechazos y mejorar la eficiencia en la producción.

Determinación de causa raíz

Diagrama de flujo específico para encontrar el punto de ocurrencia de los fallos

Figura 17

Puntos de ocurrencia de los fallos



Nota: Elaboración propia.

Según el estudio más cercano a las operaciones de medición de espesor y del proceso de laminado, se han identificado varios puntos críticos en los que ocurren las quebraduras de las piezas. Estos puntos están vinculados a las distintas etapas del proceso, que incluyen desde la colocación de la oblea en la base hasta el retiro final del material. Durante la colocación de la oblea, es fundamental que el material esté alineado correctamente, ya que un posicionamiento inadecuado puede generar tensiones internas que, más adelante, resulten en fisuras. Al bajar la aguja de medición, si la presión aplicada es excesiva, o no se distribuye de manera uniforme, las obleas pueden sufrir daños, especialmente porque el material es sensible a presiones localizadas. La fase de presión

adicional sobre la oblea, cuando se aplica para asegurar su estabilidad, también representa un riesgo, ya que un exceso de presión o una distribución desigual pueden generar microfisuras que, aunque inicialmente invisibles, se agravan en etapas posteriores.

El proceso de corte y remoción de residuos del laminado presenta un riesgo importante, debido a las pérdidas de vacío no deseadas. El vacío, que se utiliza para asegurar la estabilidad de la pieza durante estas etapas, es fundamental para evitar que el material se desplace o se deforme bajo la acción de las herramientas de corte. Cualquier pérdida de vacío puede causar que la pieza se mueva de manera incontrolada, lo que no solo afecta la precisión del corte, sino que también aumenta la posibilidad de que se generen fisuras o daños en el material. Además, si las herramientas de corte no están correctamente ajustadas o desgastadas, pueden producir bordes irregulares o fracturas en las piezas. La remoción de residuos, si no se maneja cuidadosamente, también puede comprometer la integridad de la pieza, especialmente si la oblea se ve sometida a movimientos bruscos, o si el vacío se pierde en este momento crítico.

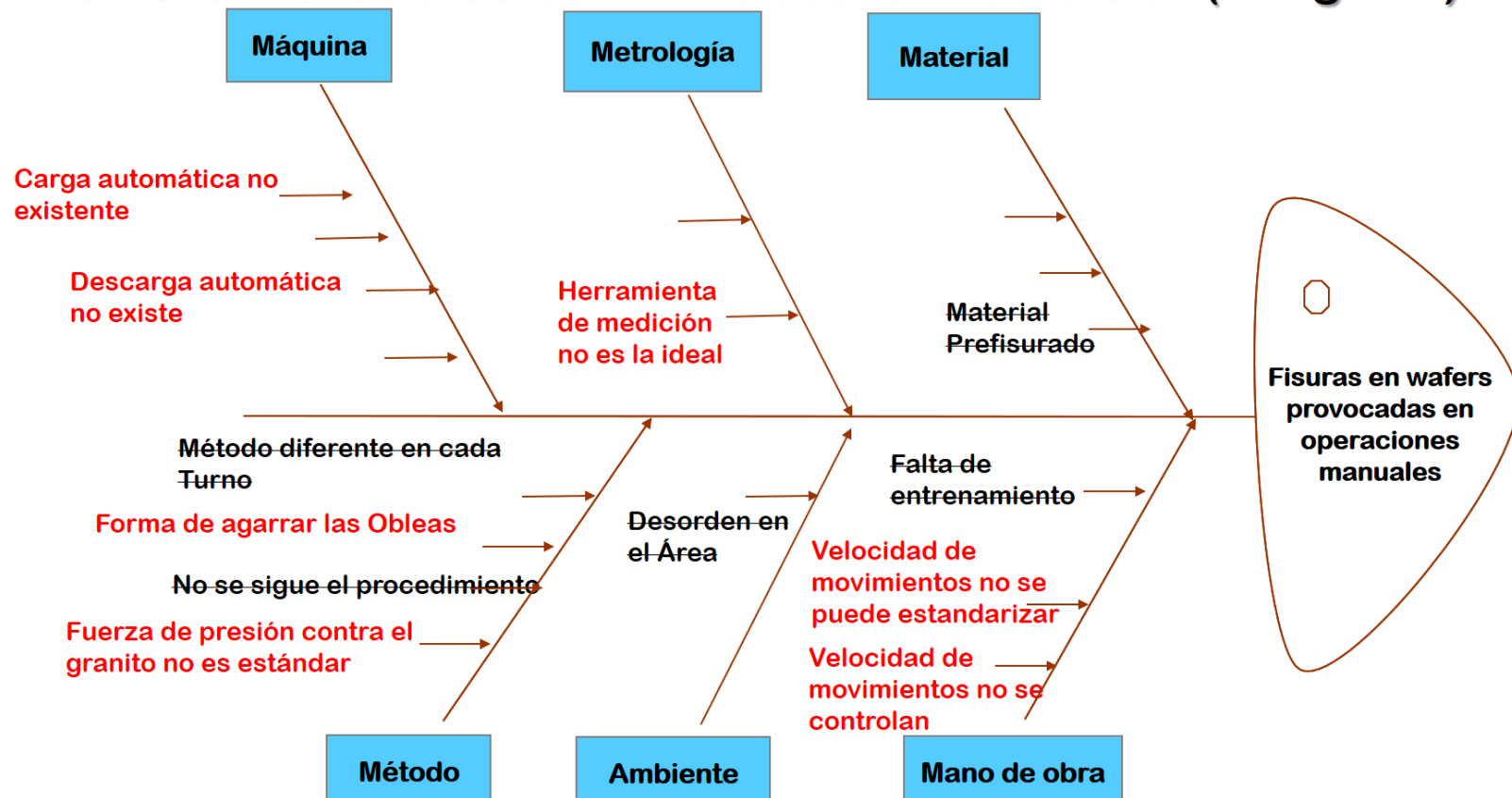
Finalmente, al retirar el material de la base, el manejo inadecuado o la falta de soporte adecuado puede generar torsiones o deformaciones que resulten en fisuras, particularmente si las piezas ya están debilitadas por las tensiones previas. Cada una de estas fases está interconectada, y las tensiones o daños que ocurren en un paso pueden incrementarse o agravarse en etapas sucesivas. Es esencial contar con un control preciso en cada etapa del proceso, asegurando que las herramientas estén correctamente calibradas, que el vacío se mantenga estable, y que el personal esté capacitado para manejar las piezas con el cuidado necesario para reducir las incidencias de quebraduras y garantizar la calidad en la producción.

Análisis de Causa Raíz espina de pescado medición manual

Figura 18

Análisis Espina de pescado medición manual

Análisis de causa raíz medición manual (Desgaste)



Nota: Elaboración propia.

Tabla 7*Evaluación posibles causas medición manual*

Evaluación de las posibles causas Medición Manual (Desgaste)		
Causa	Explicación	Solución posible
Carga/descarga automática no existe	El material para hacer la medición de grosor se toma manualmente y se pone sobre un granito. Al finalizar la tarea la oblea se retorna al cassette.	Cargador, descargador automático de obleas
Herramienta de medición no es ideal	El método de medición requiere contacto físico entre el elemento medidor y la oblea, además dicho contacto no tiene velocidad ni fuerza controlada.	Sensor óptico medidor de grosor, sin contacto
Forma de agarrar obleas no se controla	La forma en que se toman las obleas es 100% manual sin herramientas de ayuda, para un material con un grosor tan bajo se ve afectada su integridad.	Herramienta manipuladora de obleas
Fuerza de presión contra el granito no es estándar	Cada quien aplica la fuerza hacia la oblea y contra el granito de manera no estándar, cada operador aplica la presión que cree necesaria, esto también puede inducir fallos de medición. Varias mediciones han fallado por daños en el granito por golpes de la punta del micrómetro.	Sensor óptico medidor de grosor
Velocidad de movimientos no se controla	El personal de los cuatro turnos realiza las tareas con una velocidad no controlada aunque se diga que los movimientos sean lentos y cuidados, se presentan fallos durante la manipulación.	Cargador, descargador automático de obleas

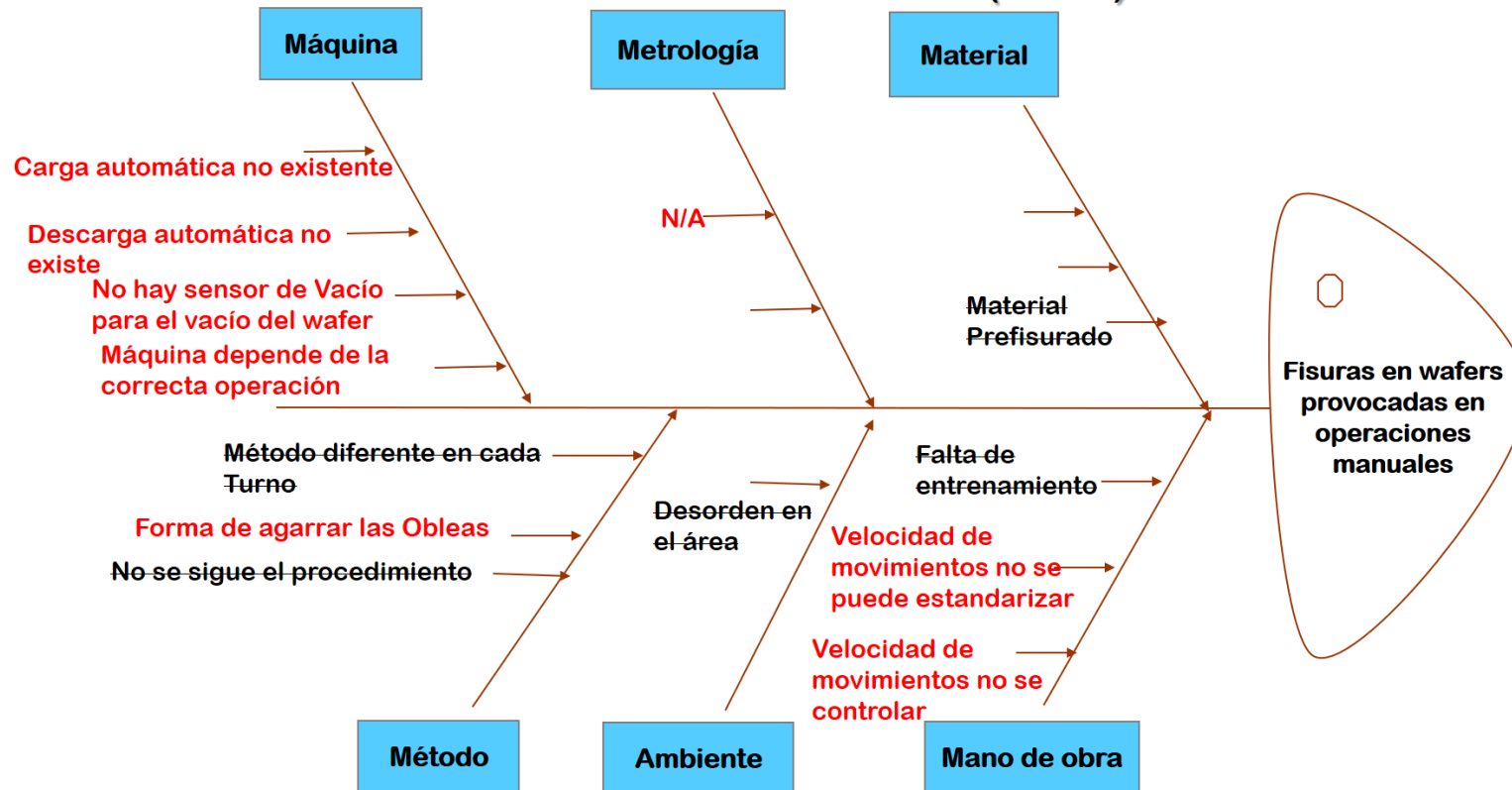
Nota: Elaboración propia.

Análisis de Causa Raíz espina de pescado laminado

Figura 19

Análisis Espina de pescado laminado

Análisis de causa raíz laminado (Corte)



Nota: Elaboración propia.

Evaluación de las posibles causas Raíz

Tabla 8

Evaluación posibles causas laminado

Evaluación de las posibles causas Laminado (Corte)		
Causa	Explicación	Solución posible
Carga/descarga automática no existe	El material se toma manualmente, se coloca sobre la mesa de vacío para realizar la tarea de laminado, al finalizar se descarga en un cassette también de manera manual.	Cargador, descargador automático de obleas
Forma de agarrar obleas no se controla	La forma en que se toman las obleas es 100% manual sin herramientas de ayuda, para un material con un grosor tan bajo se ve afectada su integridad.	Herramienta manipuladora de obleas
Fuerza de presión contra la mesa de vacío no es estándar	Cada quien aplica la fuerza hacia la oblea y contra la mesa de vacío de manera no estándar, cada operador aplica la presión que cree necesaria	Cargador, descargador automático de obleas
Velocidad de movimientos no se controlan	El personal de los cuatro turnos tiene su velocidad con que hacen las tareas aunque se diga que los movimientos sean lentos y cuidados, se presentan fallos durante la manipulación.	Máquina procesa el material de manera automática
No hay sensor de vacío para el vacío de la oblea	Si el vacío de la mesa de laminado se despega durante la operación se puede continuar con el trabajado, se han dado casos que por esta razón se dañó material.	Máquina automática se detiene al detectar fallos de vacío
Máquina depende de la correcta operación	Si las tareas se realizan en desorden por ejemplo se coloca la oblea luego el aro, el tape, no se pasa el rodillo, y se corta directamente el remanente se pueden producir daños al material, esto quiere decir que el orden no es obligatorio respetarlo y se pueden producir fallos.	Máquina automática procesa material según las secuencias programadas

Nota: Elaboración propia.

Con base en las tablas 7 y 8, un diseño electromecánico con control automatizado podría mejorar significativamente la eficiencia y precisión en el proceso de manipulación y medición de las obleas, al abordar los problemas derivados de la intervención manual. Actualmente, la carga y descarga del material se realiza manualmente, lo que introduce inconsistencias y aumenta el riesgo de daño. Implementar un cargador y descargador automático estandarizaría esta tarea, optimizando tiempos y eliminando errores humanos. Además, la medición manual del grosor es propensa a errores y daños en las obleas; un sensor óptico sin contacto proporcionaría mediciones precisas sin afectar el material, eliminando las variaciones provocadas por las diferencias en la presión y velocidad de los operadores.

Otro problema es la manipulación de las obleas, que actualmente depende de la destreza manual y puede causar daños. Una herramienta manipuladora automatizada garantizaría un manejo consistente y seguro, reduciendo riesgos y mejorando la ergonomía para los operarios, disminuyendo la fatiga y el riesgo de accidentes. Además, la presión aplicada al granito varía según el operador, lo que puede inducir errores. Un sensor óptico permitiría controlar esta presión de manera precisa, protegiendo tanto el material como la medición. La velocidad de los movimientos también varía y podría causar fallos en el proceso; la automatización sincronizaría los movimientos, reduciendo errores.

Por último, la falta de un sensor de vacío en el proceso de laminado representa otro riesgo. Un sistema automatizado con sensores de vacío podría detectar irregularidades y detener la máquina, evitando daños en las obleas. En conjunto, la automatización mediante un control electromecánico resolvería estos problemas, mejorando la consistencia, precisión y seguridad del proceso, eliminando las ineficiencias y riesgos asociados con la intervención manual, lo que se traduciría en mayor productividad y control sobre la calidad del producto final.

Diseño Experimental

El diseño de un sistema integrado de laminado y medición automática tiene como objetivo combinar de manera eficiente las funciones de laminado y medición en un proceso continuo y automatizado. Este sistema reduciría al mínimo la intervención manual del operador, mejorando la precisión, la velocidad y la confiabilidad del proceso. Al integrar las operaciones de laminado y medición en un único flujo, se optimiza el tiempo y se minimizan los errores asociados con la manipulación manual de las obleas.

Entre los componentes principales del sistema se encuentra la estación de carga y descarga automática. Esta estación utiliza mecanismos de vacío para mover las obleas desde un casete de carga hasta la estación de trabajo, y posteriormente, las coloca en la estación de salida al final del proceso. Al eliminar la intervención manual en esta fase, se reduce el riesgo de daño a las obleas por errores humanos durante la manipulación.

El sensor óptico de medición de grosor es otro componente clave. Este sensor utiliza tecnología láser o basada en características ópticas para medir el grosor de las obleas sin contacto físico, lo que permite obtener mediciones precisas sin riesgo de dañar las obleas.

Esta tecnología mejora la exactitud de las mediciones y elimina el riesgo de quebraduras, que podría generar el contacto físico en el proceso manual.

La mesa de vacío con detección automática de fallos asegura que las obleas permanezcan fijas durante el laminado y la medición. Al utilizar sensores para monitorear el vacío, la mesa puede detener el proceso de manera automática si se detecta una pérdida de vacío. Esto protege las obleas de posibles daños, al interrumpir la operación antes de que se produzcan fallos en el material.

El laminador y procesador automático es el encargado de realizar el laminado en el orden correcto y con las fuerzas y velocidades adecuadas, evitando errores que podrían

surgir si los pasos se ejecutaran de manera desordenada o inadecuada. Este sistema asegura que el proceso siga un flujo controlado y eficiente, lo que aumenta la fiabilidad y la calidad del producto final.

Finalmente, el monitoreo y trazabilidad del sistema permitiría generar registros detallados de las mediciones y el estado de cada oblea procesada. Esto no solo facilita el análisis posterior, sino que también permite la detección de patrones de falla y la implementación de mejoras continuas en el proceso.


Creación de conceptos e ideas y selección de elemento que pueden ser parte de un sistema

Selección de manipulador de Obleas

Figura 20

Opción 1 de manipulador de obleas

Porta-Vac® II Portable Vacuum Wand Kits, Virtual Industries
 Supplier: Virtual Industries



Cleanroom and ESD-safe, the portable wafer wand features a high-performance pump and standard rear exhaust.

- 9 volt alkaline battery operation
- Class I cleanroom approved
- ESD safe
- No hoses to get in the way
- Portable
- Handles wafers, flat panels

Ideal for handling wafers, flat panels or any item that has a flat, hard surface. Easily lifts over 500 grams. Rear exhaust of the pump air is standard on these units. The battery low indicator flashes red when the battery needs to be changed. A large on/off switch provides easy on/off control. An internal air filter is replaceable... [More Product Information](#)


Description	Supplier No.	VWR Catalog Number	Unit	Price	Quan
Kit with Tip for Handling Hot Wafers ≤15.2 cm (6") Diameter	PV4000A-MW6	21925-152	Each	\$2,054.41	- 0

Nota: Obtenido de: <https://www.virtual-ii.com/product/pv4000a-mw6-porta-vac-ii-kit-with-molded-peek-wafer-tip/>

Figura 21

Opción 2 de manipulador de obleas

Home / Manual Wafer Handling / Vacuum Wand Sets / 200mm Thin Wafer Vacuum Wand Set - VWS
SKU: VWSET-C



Specification	
Wafer Size	200
Dimensions	30" x 30"
Weight	0.5 lb

Shipping Info

Product Description

\$360.00

1 :

A H-Square standard, the VWSET-C vacuum wand set used for handling 200mm and smaller thin wafers. Set includes everything needed to start handling wafers safely using house vacuum. H-Square recommends house vacuum greater than 22" Hg for best performance. Designed for ISO Class 3 (FS209E Class 1) Antistatic construction, chemical resistant; This is a fixed set; no part substitutions.

Set includes:

1. T793PKAS3 ESD PEEK Tip
2. NOASPF2 Normally Open Vacuum Wand
3. HSU Vacuum Wand Shut-off Holder
4. CTA12 Adapter Assembly for grounding coil cord
5. CC11SDS ESD Coiled Tubing

Nota: Obtenido de <https://www.h-square.com/product/200mm-thin-wafer-vacuum-wand-set/>

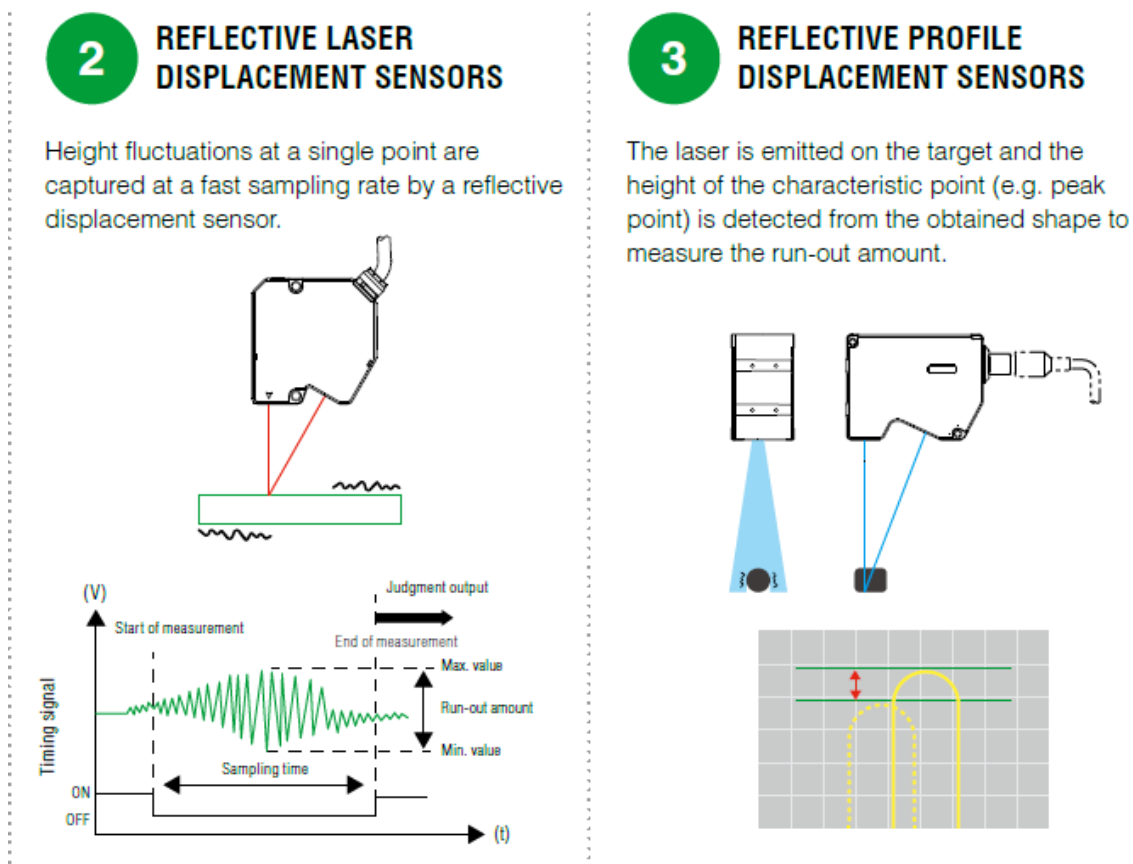
En la Figura 20 se presenta un manipulador portátil a batería, con un costo de 2054.41 dólares, que es seguro para semiconductores (ESD), pero solo puede ser operado por personal operativo. Esto limita la automatización del proceso y depende de la intervención manual. En cambio, la opción de la Figura 21, que requiere una línea de vacío, tiene un costo de 360 dólares y ofrece mayor flexibilidad, ya que puede ser usado tanto manualmente por operarios como integrado en un sistema automatizado. Al igual que el primer manipulador, cumple con las normativas ESD para el manejo seguro de semiconductores, pero su bajo costo y capacidad de automatización lo convierten en una opción más rentable y adecuada para procesos industriales que buscan aumentar la eficiencia y reducir la dependencia de la intervención humana.

Selección del sensor óptico de medición sin contacto

La selección se basa en la experiencia de la compañía con microscopios Keyence, conocida por su tecnología avanzada en sensores de medición. En la Figura 22, se destacan los sensores de perfil de desplazamiento, que utilizan el principio de triangulación láser para realizar la medición sin contacto físico, lo que elimina el riesgo de daño al material. Este tipo de sensor es ideal para medir superficies con alta precisión y velocidad.

Figura 22

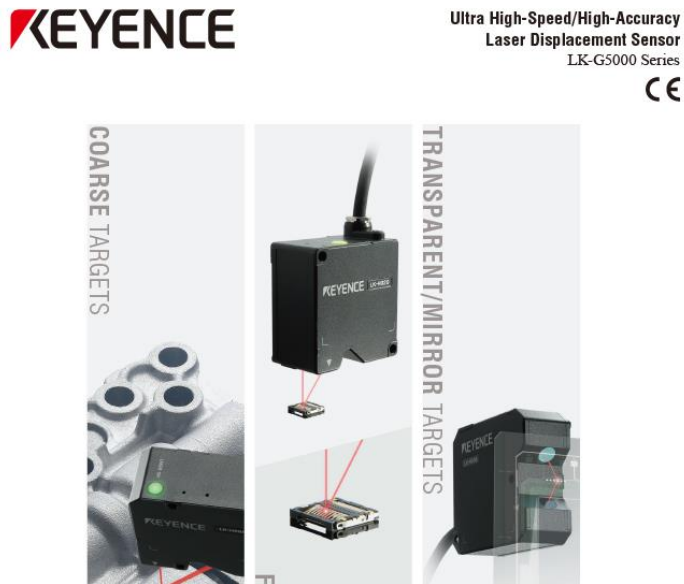
Selección Sensor óptico 1



Nota: Obtenido de: <http://www.keyence.com/measure>

Figura 23

Selección Sensor óptico 2



Nota: Obtenido de <http://www.keyence.com/measure>

En la Figura 23 se presenta el controlador de sensor LK-G5000 de Keyence, que ofrece gran versatilidad al trabajar con sensores capaces de medir superficies rugosas, materiales transparentes y superficies reflectantes tipo espejo. Este controlador, compatible con sensores de triangulación láser y otras tecnologías ópticas avanzadas, permite obtener mediciones precisas, incluso en materiales con características ópticas complejas. Su capacidad para adaptarse a diferentes tipos de superficies hace que sea ideal para aplicaciones industriales, mejorando la precisión y eficiencia del proceso de medición sin contacto.

A continuación, se pueden analizar tipos de sensores posibles para elegir, basados en la guía de elección de Keyence:

Figura 24

Selección Sensor óptico 3



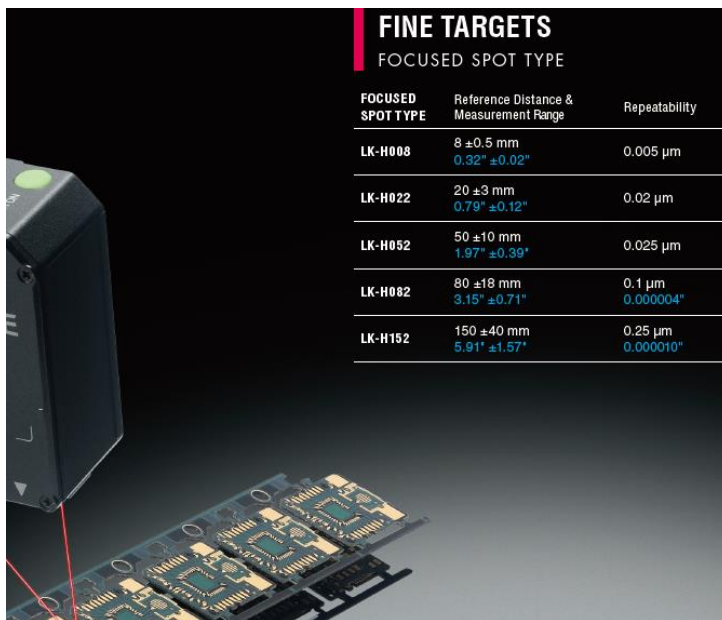
COARSE TARGETS		
WIDE SPOT TYPE		
WIDE SPOT TYPE	Reference Distance & Measurement Range	Repeatability
LK-H008W	8 ±0.5 mm 0.32° ±0.02°	0.005 μm
LK-H027	20 ±3 mm 0.79° ±0.12°	0.02 μm
LK-H057	50 ±10 mm 1.97° ±0.39°	0.025 μm
LK-H087	80 ±18 mm 3.15° ±0.71°	0.1 μm 0.000004°
LK-H157	150 ±40 mm 5.91° ±1.57°	0.25 μm 0.000010°

Nota: Obtenido de <http://www.keyence.com/measure>

En la Figura 24 se presentan sensores diseñados para medir superficies rugosas, destacando el LK-H008W como el más preciso, con una repetitividad de 0.005 μm. Este sensor es ideal para superficies con texturas irregulares, ya que ofrece alta precisión, incluso en materiales con acabados no uniformes, lo que lo hace una excelente opción para mediciones donde se requiere gran exactitud.

Figura 25

Selección Sensor óptico 4



FINE TARGETS		
FOCUSED SPOT TYPE		
FOCUSED SPOT TYPE	Reference Distance & Measurement Range	Repeatability
LK-H008	8 ±0.5 mm 0.32" ±0.02"	0.005 μm
LK-H022	20 ±3 mm 0.79" ±0.12"	0.02 μm
LK-H052	50 ±10 mm 1.97" ±0.39"	0.025 μm
LK-H082	80 ±18 mm 3.15" ±0.71"	0.1 μm 0.000004"
LK-H152	150 ±40 mm 5.91" ±1.57"	0.25 μm 0.000010"


Nota: Obtenido de: <http://www.keyence.com/measure>

En la Figura 25 se muestran sensores para materiales con acabados finos, destacándose el LK-H008 como el sensor más preciso. Sin embargo, debido al tipo de material que se va a medir, este sensor es descartado, ya que no es adecuado para superficies con ciertas características ópticas que requieren sensores especializados.

Figura 26

Selección Sensor óptico 5

TRANSPARENT/MIRROR TARGETS		
SPECULAR REFLECTION TYPE		
SPECULAR REFLECTION TYPE	Reference Distance & Measurement Range	Repeatability
LK-H008(W)	8 ±0.5 mm 0.32° ±0.02°	0.005 μm
LK-H027K	16.1 ±2.8 mm 0.63° ±0.11°	0.02 μm
LK-H057K	46.3 ±5.2 mm 1.82° ±0.20°	0.025 μm
LK-H087 & LK-F3	76.7 -17.6 mm/+14.5 mm 3.02° -0.69°/+0.57°	0.1 μm 0.000004°
LK-H157 & LK-F2	147.5 -39.5 mm/+24.4 mm 5.81° -1.56°/+0.96°	0.25 μm 0.000010°



Nota: Obtenido de: <http://www.keyence.com/measure>

Por último, en la Figura 26, se presentan sensores diseñados para medir objetos con superficies tipo espejo y ciertos niveles de transparencia. En este caso, el LK-H008W es el sensor más preciso y adecuado, ya que está optimizado para trabajar con materiales que tienen estas características. Dado que el material por medir presenta algo de transparencia, se opta por este sensor para garantizar la precisión en las mediciones. Además, el LK-H008W puede ser utilizado para medir también materiales rugosos, lo que le da versatilidad para diferentes tipos de aplicaciones.

Acá, se adjuntan las características técnicas del sensor elegido para la medición óptica sin contacto:

Figura 27

Selección Sensor óptico 5



LK-H008W

Sensor Head, Wide Type



*Please note that accessories depicted in the image are for illustrative purposes only and may not be included with the product.

Specifications

Model	LK-H008W	
Mounting mode	Specular reflective	
Reference distance	8 mm 0.315"	
Measuring range	±0.5 mm ±0.02" ¹	
Light source	Type	Red semiconductor laser
	Wavelength	655nm
	Laser class	IEC 60825-1: Class 1 FDA(CDRH)21CFR Part 1040.10: Class II
	Output	0.3mW
Spot diameter (at standard distance)	20 μm x 550 μm	
Linearity	±0.05% of F.S. (F.S.= 1 mm 0.04") ²	
Repeatability	0.005 μm (0.001 μm) ³	
Sampling cycle	2.55/5/10/20/50/100/200/500/1000 μs (9 steps selectable)	
Temperature characteristics	0.02% of F.S./°C (F.S.=1 mm 0.04")	
Environmental resistance	Enclosure rating	IP67
	Ambient light	Incandescent lamp or fluorescent lamp: 10,000 lux max.
	Ambient temperature	0 to +50 °C 32 to 122 °F ⁴
	Relative humidity	35 to 85 % RH (No condensation)
	Vibration resistance	10 to 55 Hz, Double amplitude 1.5 mm 0.06", 2 hours in each of the directions
Material	Aluminum die-cast	
Weight	Approx. 240 g	

Nota: Obtenido de: <http://www.keyence.com/measure>

Parte del laminado se realizará sobre la laminadora existente, y se buscará trabajar modificándola:

Figura 28

Laminadora



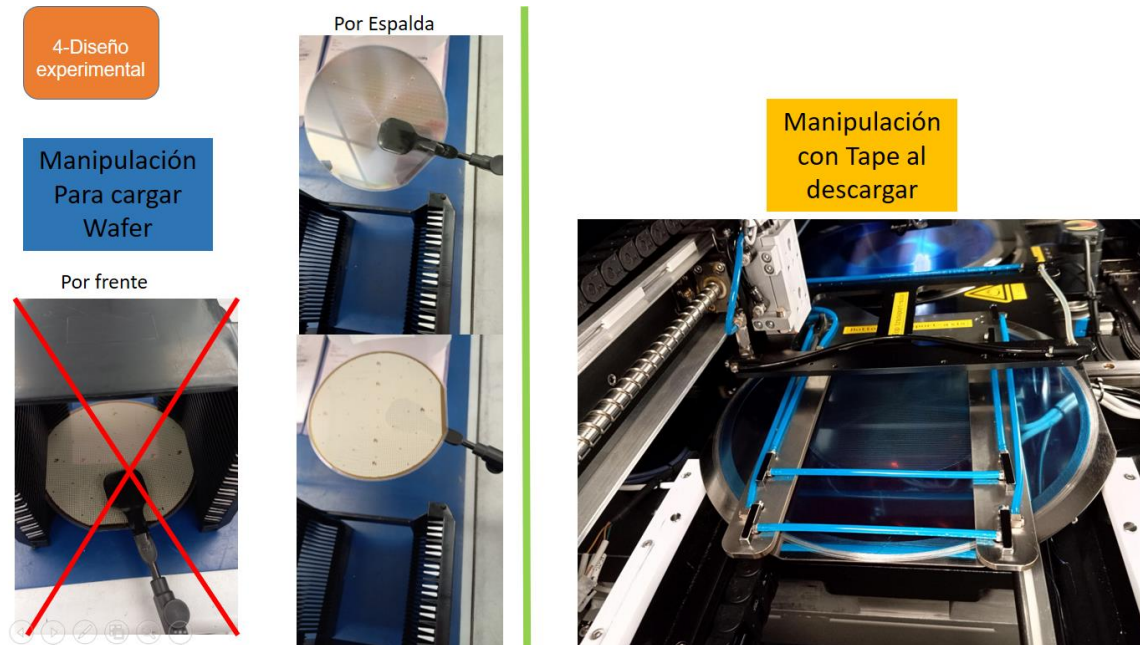
Nota: Elaboración propia.

En la Figura 28 se muestra la laminadora existente, un modelo USI UH114, la cual, aunque sigue siendo funcional, realiza sus procesos de manera manual, lo que introduce limitaciones significativas en términos de eficiencia y consistencia. Al depender en gran medida de la intervención del operario, este equipo genera variabilidad en los tiempos de proceso, y puede resultar en errores humanos, como ajustes incorrectos de los parámetros o la omisión de pasos, lo que a su vez puede generar defectos en los materiales procesados.

Comprobación de elementos de carga y descarga

Figura 29

Manipuladores para Obleas y Aro



Nota: Elaboración propia.

En la Figura 29, se muestra la comprobación de funcionalidad de los elementos manipuladores de obleas y aros. Para el manipulador de obleas, se verificó que la manipulación desde la parte posterior de la oblea (la parte más lisa) era satisfactoria. Esto es clave, ya que en el lado frontal se encuentran las conexiones de la oblea, lo que hace que esta zona no sea adecuada para manipulación.

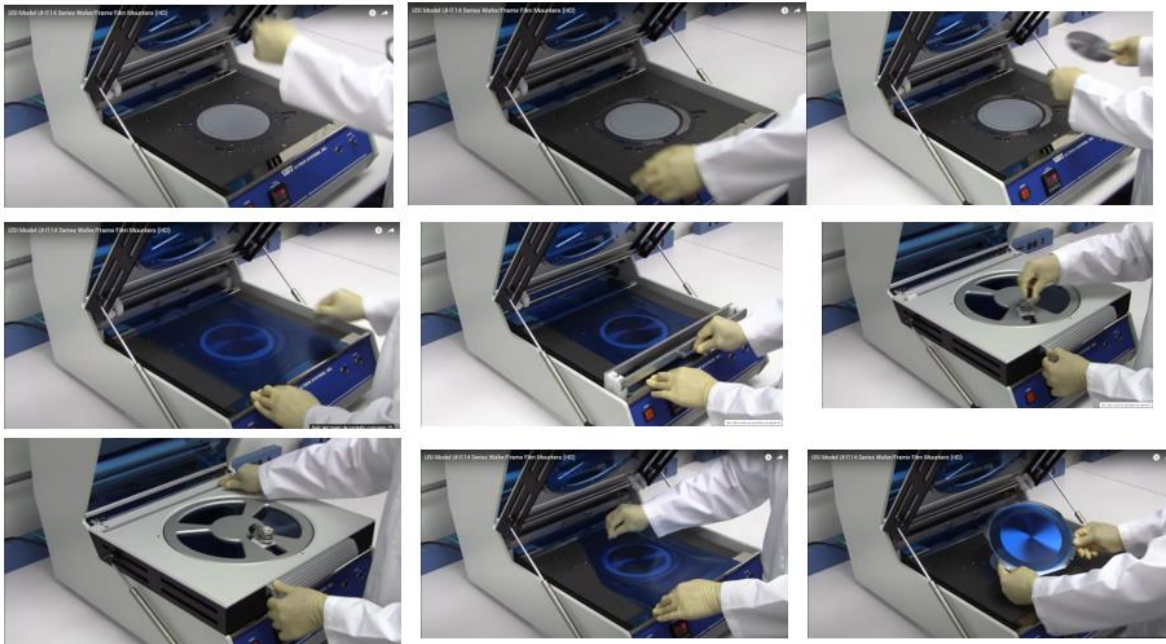
La prueba se realizó dando diez movimientos fuertes, al tener la oblea sujeta con el manipulador mediante vacío, del lado frontal: de diez movimientos, la oblea se cayó ocho veces; del lado de la espalda de diez movimientos fuertes no hubo ningún fallo de vacío, ni caídas.

Por otro lado, en cuanto al manipulador de aros, se identificó un brazo manipulador proveniente de una máquina Breaker del fabricante TEC-dia, que se encontraba sin uso en otra parte de la planta. Este brazo se cotizará al fabricante, del equipo para evaluar la posibilidad de reutilizarlo en el proceso. Aunque el brazo ha sido probado previamente y su funcionamiento ha sido satisfactorio, la cotización al fabricante permitirá confirmar los detalles técnicos y la viabilidad de su uso para el manejo de aros, lo que ofrecería una solución eficiente sin la necesidad de desarrollar una nueva herramienta.

Comprendiendo el paso a paso del laminado

Figura 30

Proceso de Laminado



Nota: Elaboración propia.

En la Figura 30 se presenta el paso a paso del proceso de laminado, destacando cómo el equipo depende completamente del operario. El proceso requiere que el operario realice cada paso en el orden correcto, lo que introduce una alta dependencia humana para

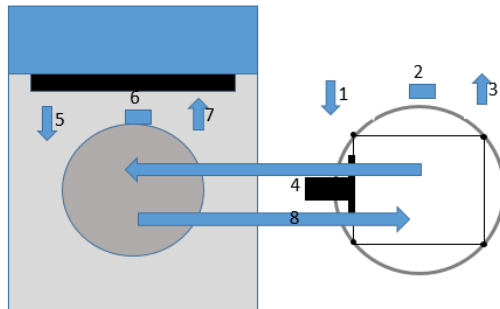
garantizar la correcta ejecución del proceso. Esta dependencia puede generar variabilidad en la producción y aumentar el riesgo de errores, ya que cualquier desviación en el orden o en la ejecución de los pasos puede afectar la calidad del resultado final. Según Ultron Systems Inc. el modelo UH114 mediante el video en el siguiente link indica el orden correcto de realizar la tarea: <https://www.youtube.com/watch?v=Fux4VIAWu8>

Generación del concepto

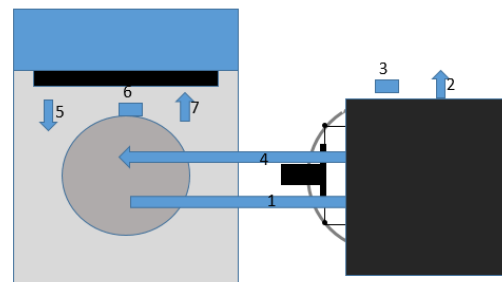
Figura 31

Concepto paso 1

1. Alimentar aro A



1. Alimentar aro B



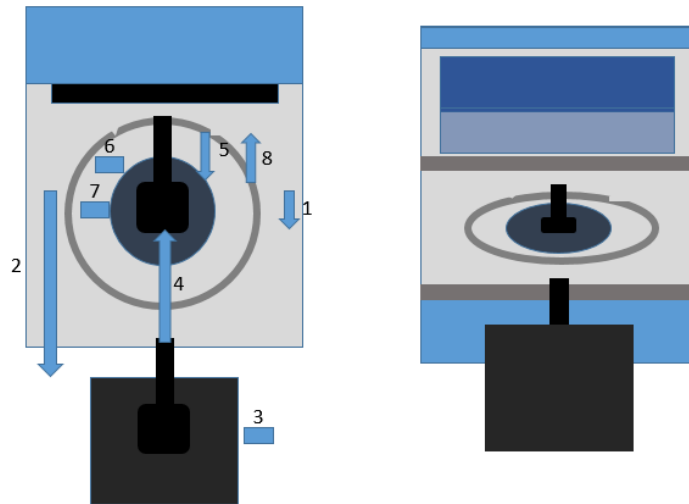
Nota: Elaboración propia.

En el paso de alimentar el aro, la Figura 31 representa los movimientos evaluados. La opción A presenta más movimientos, lo que puede generar mayor complejidad y riesgo de error. En cambio, la opción B, que incluye la implementación de un elevador para el casete de los aros, permite asegurar una mejor sujeción de vacío. Esto facilita el transporte del aro hacia la mesa de laminado, reduciendo la cantidad de movimientos y mejorando la precisión y seguridad del proceso.

Figura 32

Concepto paso 2

2. Alimentar oblea

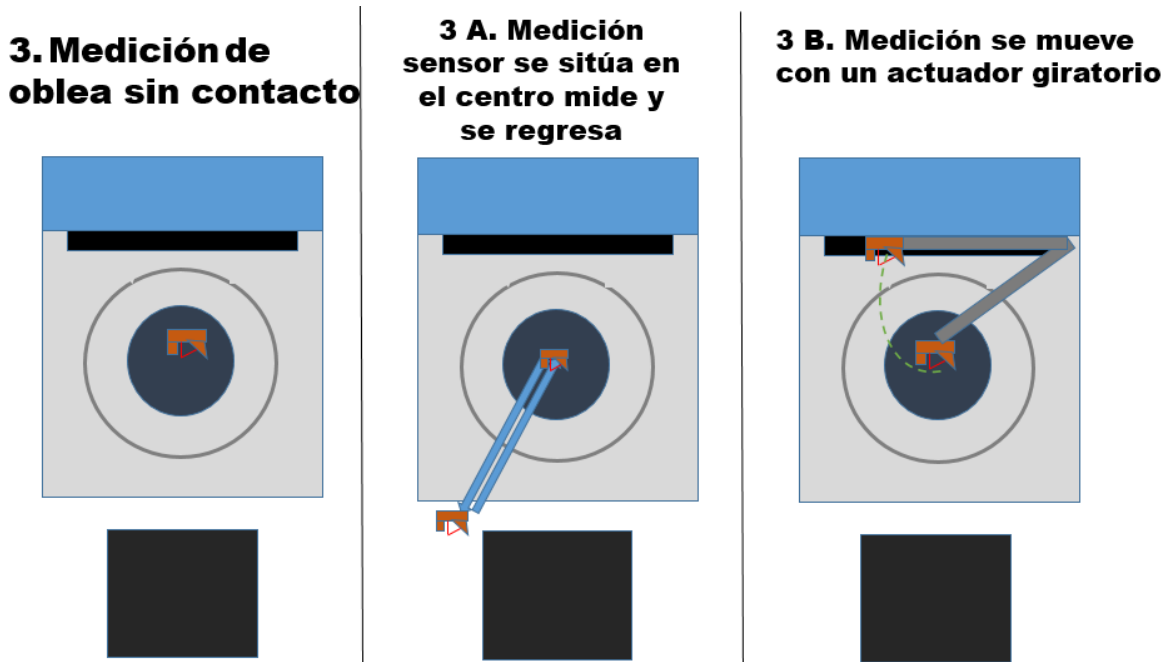


Nota: Elaboración propia.

En la Figura 32, se presenta una secuencia de movimientos muy similar a la de la Figura 30, para colocar la oblea en la mesa de laminado. Al igual que en la opción anterior, se incluye un elevador, que garantiza una sujeción adecuada de vacío de la oblea al manipulador, lo que asegura su correcta colocación en la mesa sin riesgo de deslizamientos o errores durante el proceso.

Figura 33

Concepto paso 3



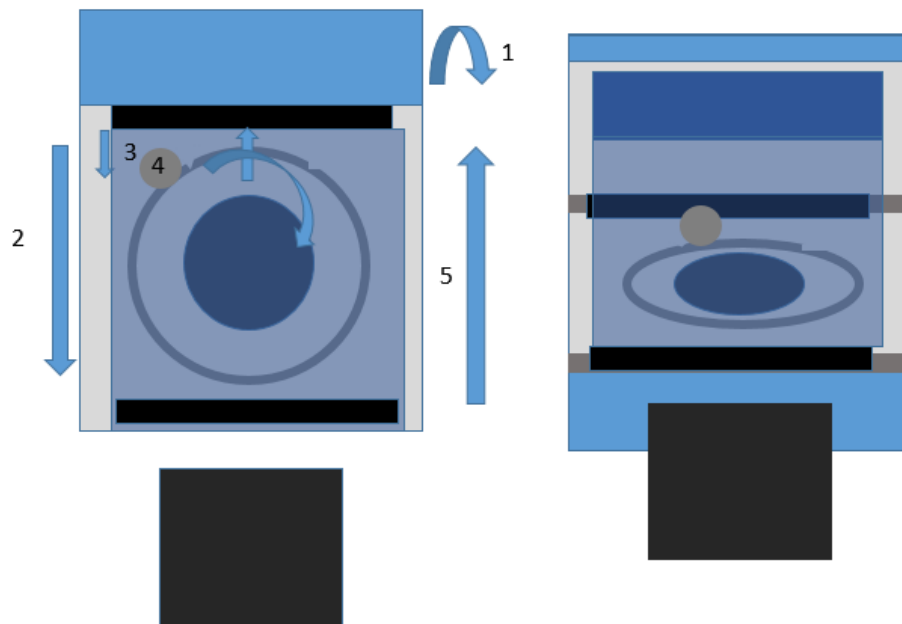
Nota: Elaboración propia.

En la Figura 32, se ilustra el posible movimiento de introducción para el sensor de medición óptica sin contacto, considerando dos alternativas: un pistón con movimiento de salida y retorno, o un pistón con pivote de movimiento giratorio. Ambos sistemas son funcionales, pero debido a la complejidad del área de trabajo, donde interactúan varios elementos, se opta por el pistón con movimiento lineal de salida y retorno. Esta elección se debe a que el movimiento lineal permite una mayor precisión y control en un espacio más restringido, además de facilitar la operación repetitiva sin interferencias de otros componentes, lo que optimiza la eficiencia del proceso y garantiza que el sensor se posicione correctamente para realizar mediciones sin contacto.

Figura 34

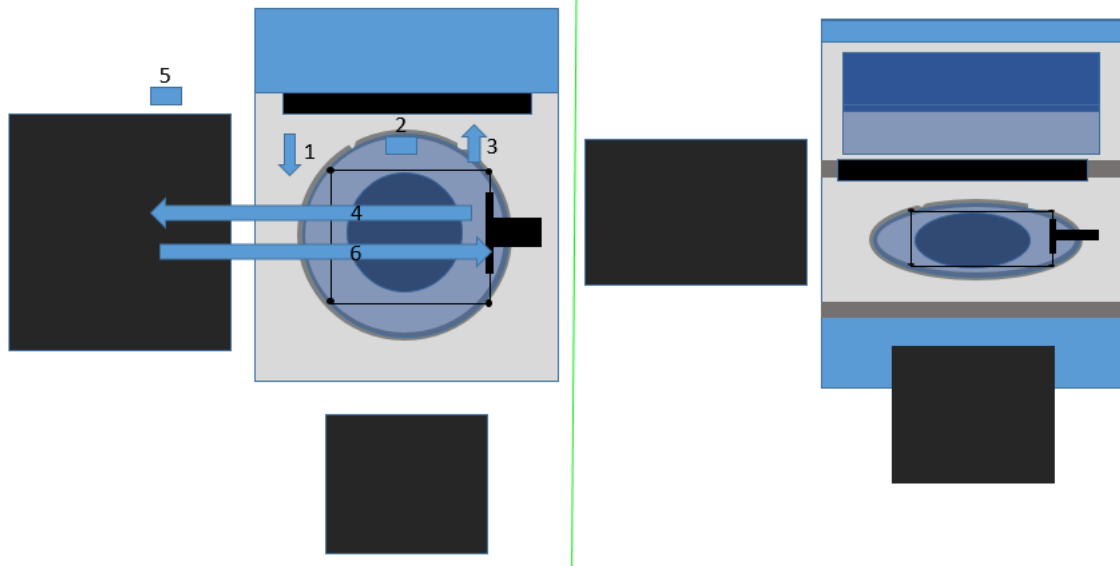
Concepto paso 4

4. Mover tape y rodillo laminadora



Nota: Elaboración propia.

Para el paso 4, en la Figura 34 se presentan los movimientos que la máquina realiza actualmente de manera asistida, donde el operario interviene para llevar a cabo varias tareas clave, como halar la lámina, cortar el residuo y volver a colocar el rodillo. Sin embargo, con el objetivo de mejorar la eficiencia y reducir la dependencia del operador, se busca que estas operaciones sean realizadas de manera automática. Al automatizar estos movimientos, se eliminaría el riesgo de errores humanos, se optimizaría el tiempo de ciclo y se garantizaría una mayor consistencia en el proceso.

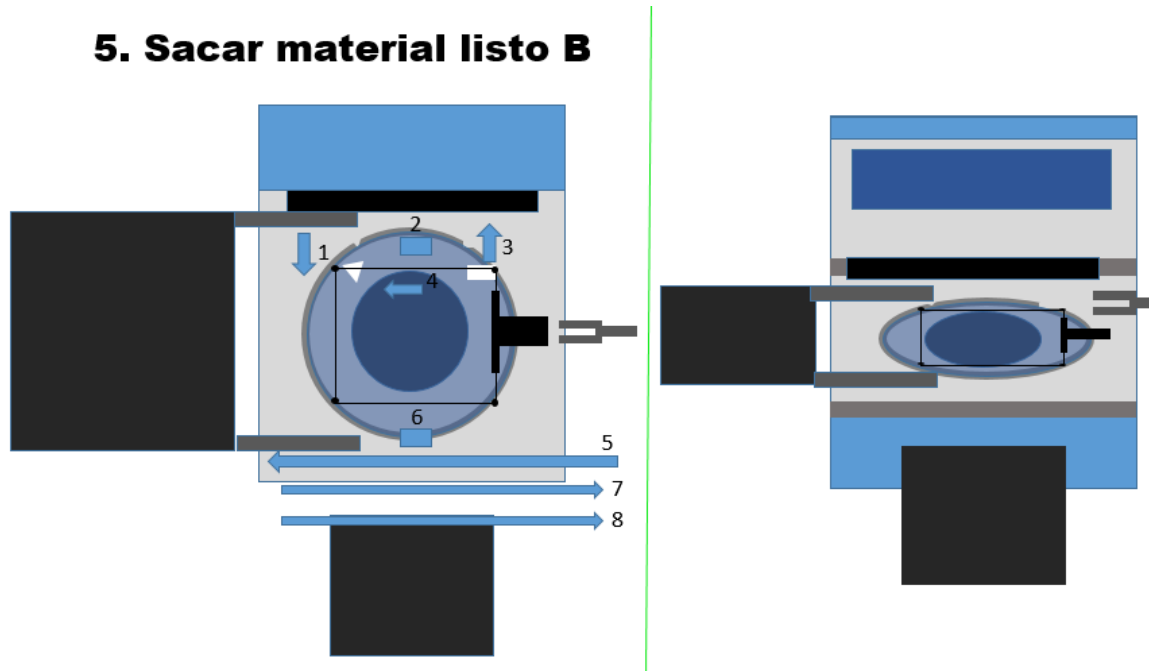
Figura 35*Concepto paso 5.A***5. Sacar material listo A**

Nota: Elaboración propia.

En la Figura 35, se presenta la propuesta de que el mismo manipulador de los aros sea responsable de retirar el aro con el material listo, y transportarlo al lado opuesto de su punto de inicio. Esta solución busca simplificar el proceso, aprovechando el manipulador existente para realizar ambas funciones.

Figura 36

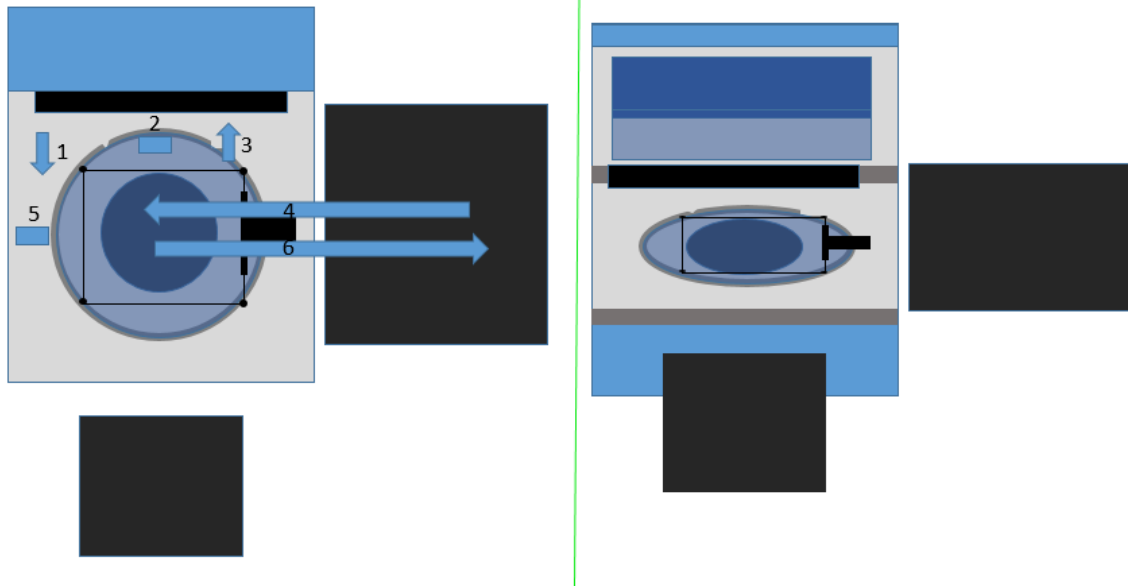
Concepto paso 5.B



Nota: Elaboración propia.

En la Figura 36 se presenta la consideración de que, debido a que en la Figura 34 el manipulador necesitaría una carrera cercana a los 600 mm, se evaluaría la opción de incluir un riel para que otro elemento o pinza retire el material listo. Sin embargo, esta solución aumentaría la cantidad de movimientos y elementos en el sistema, lo que podría complicar el proceso y afectar la eficiencia, ya que se introducirían más etapas y posibles puntos de fallo en la operación.

Figura 37

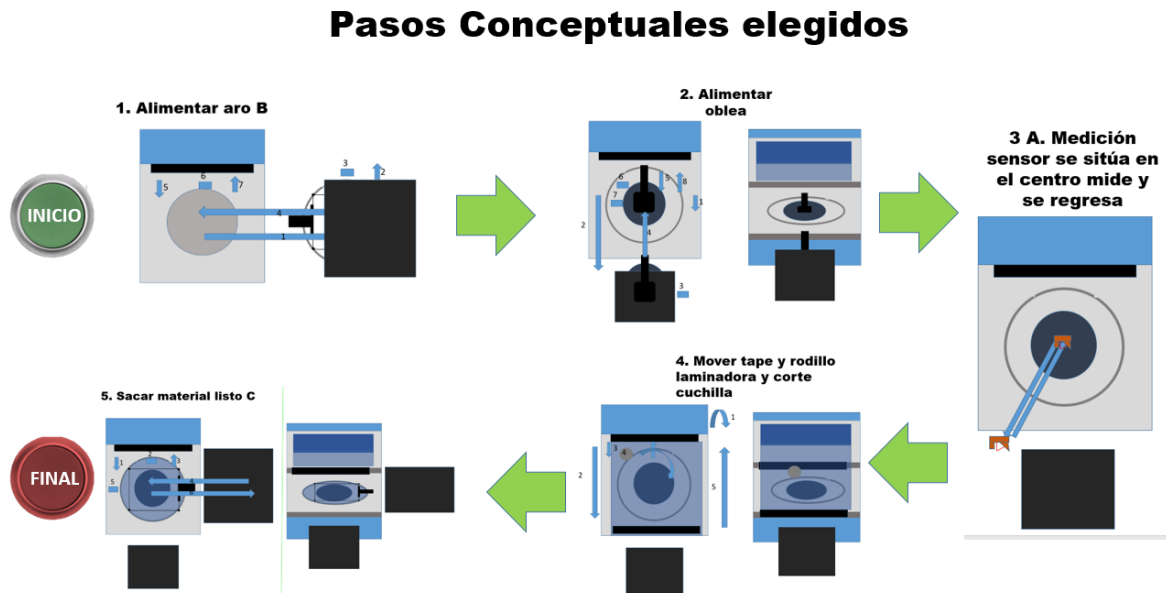
*Concepto paso 5.C***5. Sacar material listo C**

Nota: Elaboración propia.

En la Figura 37 se presenta la solución que minimiza los movimientos al máximo, ya que en el mismo casete se pueden colocar tanto los aros vacíos como el material finalizado. Al concluir el proceso, el material se dejaría en el mismo casete, invirtiendo el proceso de carga de aros. Esta solución simplifica la operación, reduciendo el número de desplazamientos y aumentando la eficiencia, al utilizar el mismo sistema para ambos procesos, tanto de carga como de descarga.

Figura 38

Pasos conceptuales elegidos



Nota: Elaboración propia.

Explicación de movimientos de la figura 38

1- Alimentar aro

El alimentador de aros contará con movimientos en dos ejes, eje x (izquierda y derecha), eje Z (arriba y abajo), además de activación y desactivación de vacío.

Acciones y su explicación

- 1.1 El pistón mueve el manipulador de aros hacia la derecha, para ingresar al casete que contiene los aros.
- 1.2 El casete se eleva a una posición donde se puede generar un vacío, para lograr tomar el aro mediante ventosas.
- 1.3 Se activa el vacío.

- 1.4 El manipulador de aros se mueve hacia la izquierda junto con el aro; el mismo se desplaza hasta llegar al centro de la mesa de laminado.
- 1.5 El manipulador se mueve hacia abajo para dejar el aro en la mesa; al llegar a abajo, hay un tiempo de espera de tres segundos.
- 1.6 Se activa el vacío de la mesa y luego se desactiva el vacío del manipulador, dejando el aro en la mesa.
- 1.7 El manipulador de aros sube a posición de inicio.

2- Alimentar Oblea

El alimentador de obleas contará con movimientos en dos ejes, eje Y (atrás y frente), eje Z (arriba y abajo), además de activación y desactivación de vacío.

Acciones y su explicación

- 2.1 El pistón mueve el manipulador de obleas hacia el frente, para ingresar al casete que contiene el material.
- 2.2 El casete de obleas se eleva a una posición donde se puede generar un vacío, para lograr tomar la oblea mediante el manipulador.
- 2.3 Se activa el vacío.
- 2.4 El manipulador de obleas se mueve hacia atrás junto con la oblea; el mismo se desplaza hasta llegar al centro de la mesa de laminado.
- 2.5 El manipulador se mueve hacia abajo para dejar la oblea en la mesa; al llegar a abajo, hay un tiempo de espera de tres segundos.
- 2.6 Se activa el vacío de la mesa y luego se desactiva el vacío del manipulador, dejando la oblea en la mesa.

2.7 El manipulador de obleas sube a la posición de inicio.

3- Medición sensor óptico sin contacto

El alimentador de obleas contará con movimientos en dos ejes (atrás y frente a 45°).

Acciones y su explicación

3.1 El pistón mueve el sensor óptico hacia el centro de la oblea, espera tres segundos mientras se realiza la medición.

3.2 Luego de la medición, el pistón vuelve a la posición de inicio.

4- Mover tape, rodillo, la laminadora y cuchilla

4.1 Se mueve la lámina para poder alimentar de tape sobre el aro.

4.2 Una vez cubiertos tanto la oblea como el aro, pasa el rodillo para adherir el tape al aro y a la oblea.

4.3 La cuchilla sale desde debajo de la mesa y hace contacto con el borde del aro, cortando el tape azul.

4.4 La cuchilla hace un recorrido circular, siguiendo la forma del aro, cortando el tape; la misma gira hasta volver a la posición de inicio.

4.5 El rodillo retorna a la posición de espera.

5- Sacar material listo

El alimentador es el mismo del paso 1; por esto sus movimientos y acciones tienen las mismas funcionalidades, solo que esta vez el desplazamiento es inverso y se utiliza para sacar el material en el mismo casete donde el aro inició su proceso.

5.1 El manipulador se mueve hacia abajo para recoger el aro de la mesa; al llegar a abajo, hay un tiempo de espera de tres segundos.

5.2 Se acciona el vacío del manipulador y se apaga el vacío de la mesa.

5.3 El manipulador de aros se mueve hacia arriba, con el material listo.

5.4 El manipulador de aros se mueve hacia la derecha, para dejar el material listo dentro del casete.

5.5 Se suelta el vacío del manipulador de aros.

5.6 El manipulador vuelve a la posición de inicio, dejando el material listo en el casete.

Según la lógica de los conceptos y componentes previamente seleccionados, así como las partes que se han elegido para el diseño, se ha generado un listado detallado de las entradas y salidas necesarias para desarrollar el diseño experimental de la automatización completa. Este listado se presenta en la Tabla 9 para las entradas, que incluyen todos los parámetros y señales de control que el sistema requiere para operar, como los sensores y actuadores. Por otro lado, la Tabla 10 muestra las salidas del sistema, que representan los resultados del proceso automatizado.

Tabla 9*Entradas propuestas*

Entradas			
Número	ID	Nombre	Comentario
#1	M	Marcha	Se presiona para iniciar el proceso
#2	P	Paro/Sensor vacío bajo/Sensor aire Bajo	Se presiona para detener el proceso
#3	AX0	Sensor Pistón Aro X	Sensa la posición Entrada de PAX
#4	AX1	Sensor Pistón Aro X	Sensa la posición Salida de PAX
#5	AZ0	Sensor Pistón Aro Z	Sensa la posición Entrada de PAZ
#6	AZ1	Sensor Pistón Aro Z	Sensa la posición Salida de PAZ
#7	AE0	Sensor Elevador Casette Aros	Sensa la posición Entrada de ECA
#8	AE1	Sensor Elevador Casette Aros	Sensa la posición Salida de ECA
#9	OY0	Sensor Pistón Oblea Y	Sensa la posición Entrada de POY
#10	OY1	Sensor Pistón Oblea Y	Sensa la posición Salida de POY
#11	OZ0	Sensor Pistón Oblea Z	Sensa la posición Entrada de POZ
#12	OZ1	Sensor Pistón Oblea Z	Sensa la posición Salida de POZ
#13	OE0	Sensor Elevador Casette Obleas	Sensa la posición Entrada de ECO
#14	OE1	Sensor Elevador Casette Obleas	Sensa la posición Salida de ECO
#15	S0	Sensor Pistón Sensor Óptico	Sensa la posición Entrada de PSO
#16	S1	Sensor Pistón Sensor Óptico	Sensa la posición Salida de PSO
#17	CU0	Sensor Cuchilla	Sensa la posición Entrada de C
#18	CU1	Sensor Cuchilla	Sensa la posición Salida de C
#19	R	Reseteo	Envía los actuadores a posición de inicio

Nota: *Elaboración propia.*

Tabla 10

Salidas propuestas

Salidas			
Número	ID	Nombre	Comentario
#1	LM	Luz Marcha	Advierte que la máquina está trabajando
#2	LP	Luz Paro	Advierte que la máquina No está trabajando
#3	PAX+	Pistón Aro X Salida	Se mueve en este Eje para desplazar el aro al cassette o Viceversa
#4	PAZ+	Pistón Aro Z Salida	Se mueve en este Eje para desplazar el aro al cassette o Viceversa
#5	ECA+	Elevador Casette Aros	Eleva el cassette para lograr el vacío entre el actuador y el aro
#6	VA+	Ventosas Aro	Permite al actuador tomar mediante vacío lel Aro
#7	POY+	Pistón Oblea Y Salida	Se mueve en este Eje para desplazar La oblea del cassette a la mesa de vacío
#8	POZ+	Pistón Oblea Z Salida	Se mueve en este Eje para desplazar el aro al cassette o Viceversa
#9	ECO+	Elevador Casette Obleas	Eleva el cassette para lograr el vacío entre el actuador y la oblea
#10	VO+	Vacío Oblea	Permite al actuador tomar mediante vacío la Oblea
#11	VM+	Vacío Mesa enteipado	Activa el Vacío para sotener la oblea durante el enteipado
#12	PSO+	Pistón Sensor Óptico Salida	Mueve el sensor Óptico a la posición de medición
#13	ML+	Motor Alimentador de lámina	Mueve la lámina para iniciar el enteipado
#14	MT+	Motor Tape Giro horario	Aplasta el tape, para unir el aro con la oblea
#15	MTV-	Motor Tape Antihorario	Aplasta el tape, para unir el aro con la oblea
#16	C+	Pistón Cuchilla Salida	Extrae la cuchilla para iniciar el corte
#17	MC+	Motor Cuchilla Gira	Gira la cuchilla alrededor del aro para realizar el corte

Nota: Elaboración propia.

Diseño de automatización

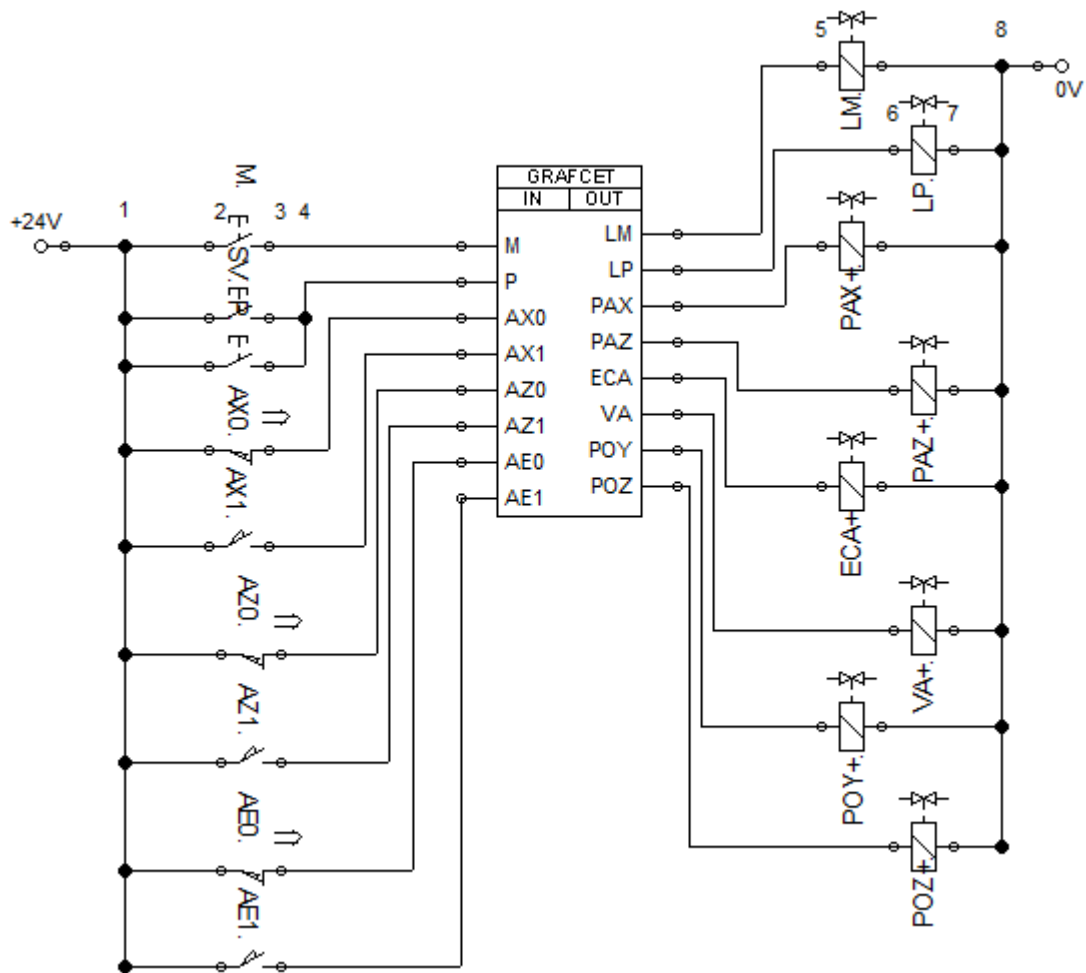
Para la conexión PLC y la integración con el sistema electro neumático se seleccionó el software Festo FluidSIM, que es una herramienta de simulación altamente eficiente para sistemas de control neumático. Este software ofrece la posibilidad de simular de manera detallada el funcionamiento del programa desarrollado, permitiendo evaluar y validar las secuencias de los pistones y actuadores de forma anticipada. Al simular el proceso en un entorno virtual, se pueden detectar posibles errores en las conexiones, los tiempos de ciclo y la sincronización de los componentes antes de implementar el sistema físicamente. Esto no solo reduce riesgos durante la implementación, sino que también mejora la optimización y el rendimiento del sistema automatizado. Además, Festo FluidSIM facilita la creación de un modelo de control más eficiente, ajustando los parámetros en tiempo real, para perfeccionar el comportamiento del sistema antes de su puesta en marcha definitiva.

Grafcet

En las figuras 39 y 40 se presenta el esquema de conexión eléctrica para el PLC, que detalla cómo se deben interconectar los diferentes componentes del sistema automatizado con el PLC. En este caso, se requiere un PLC que tenga un mínimo de 17 entradas y salidas, o bien, un PLC de 12 entradas y salidas con un módulo de extensión, para cubrir la cantidad total de entradas y salidas necesarias para el proyecto. Este número de entradas y salidas es esencial para gestionar adecuadamente todos los dispositivos, sensores, actuadores y controladores involucrados en el proceso automatizado, garantizando que cada función se ejecute de manera eficiente y sincronizada. La elección entre un PLC de 17 entradas y salidas o uno de 12 con extensión dependerá de las especificaciones del sistema y la flexibilidad requerida en el diseño, permitiendo adaptarse a futuros cambios o ampliaciones en el proceso.

Figura 39

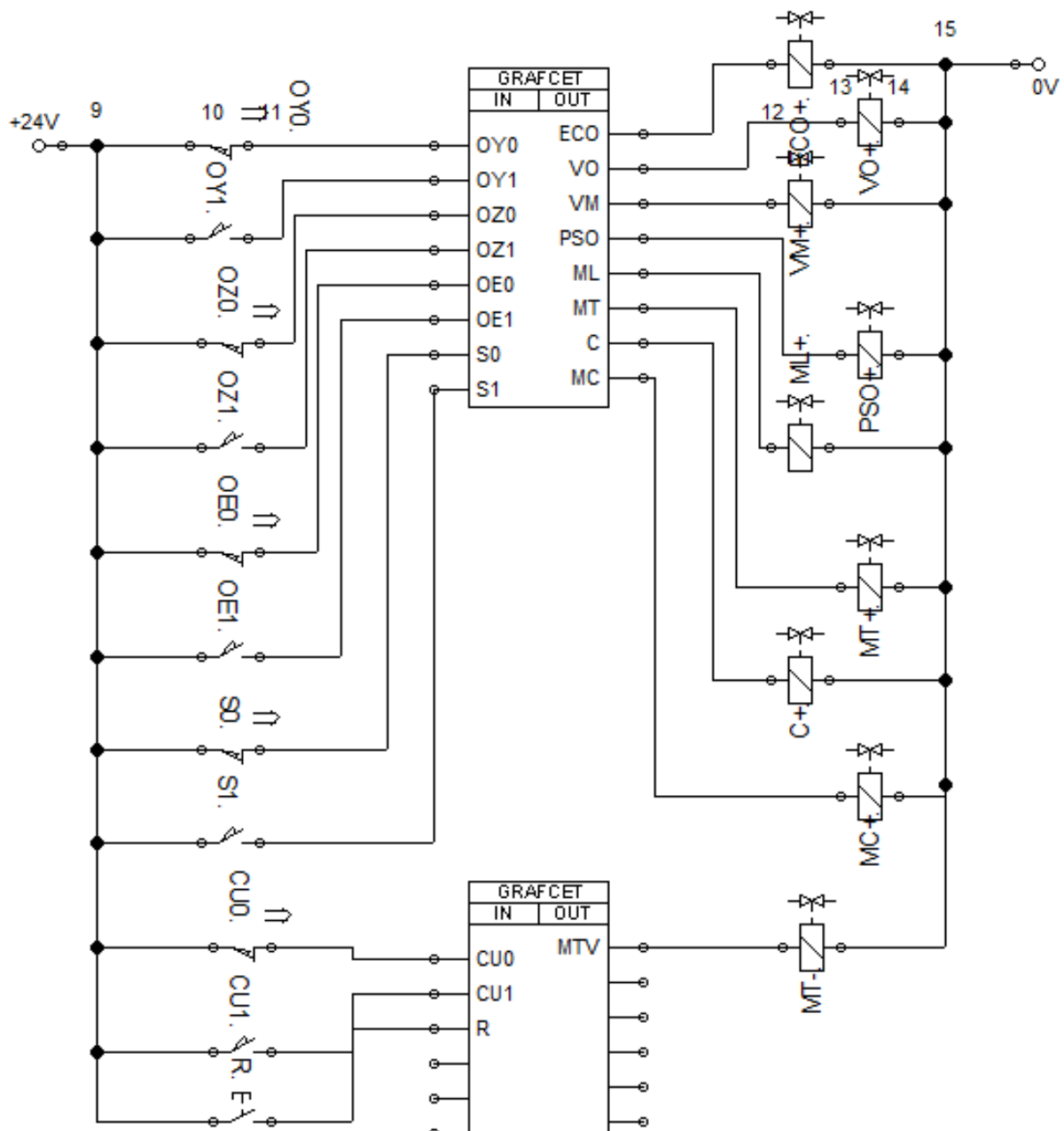
Conexión PLC 1



Nota: Elaboración propia.

Figura 40

Conexión PLC 2

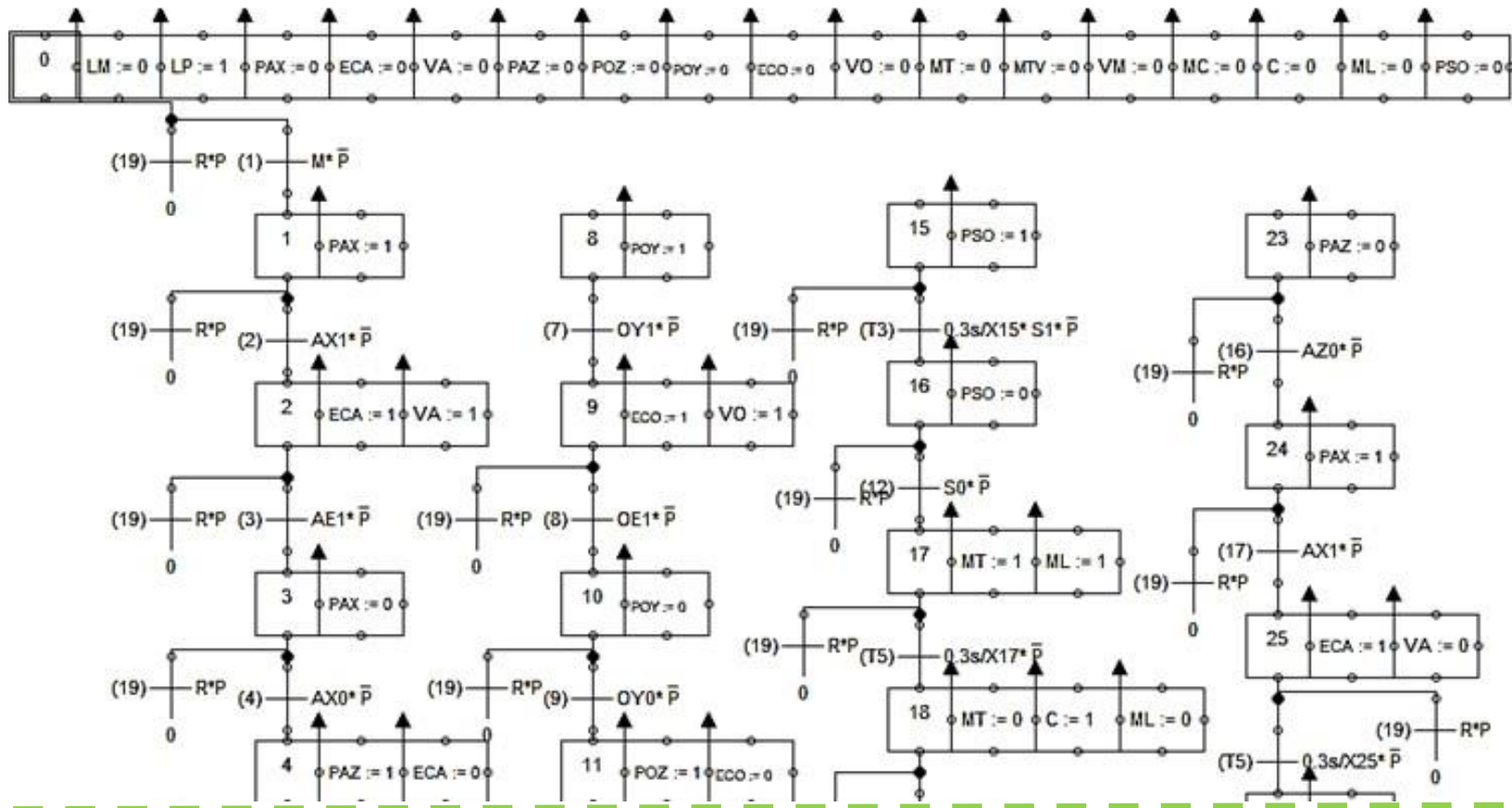


Nota: Elaboración propia.

Primera Parte Diagrama Grafcet

Figura 41

Diagrama Grafcet primera Parte

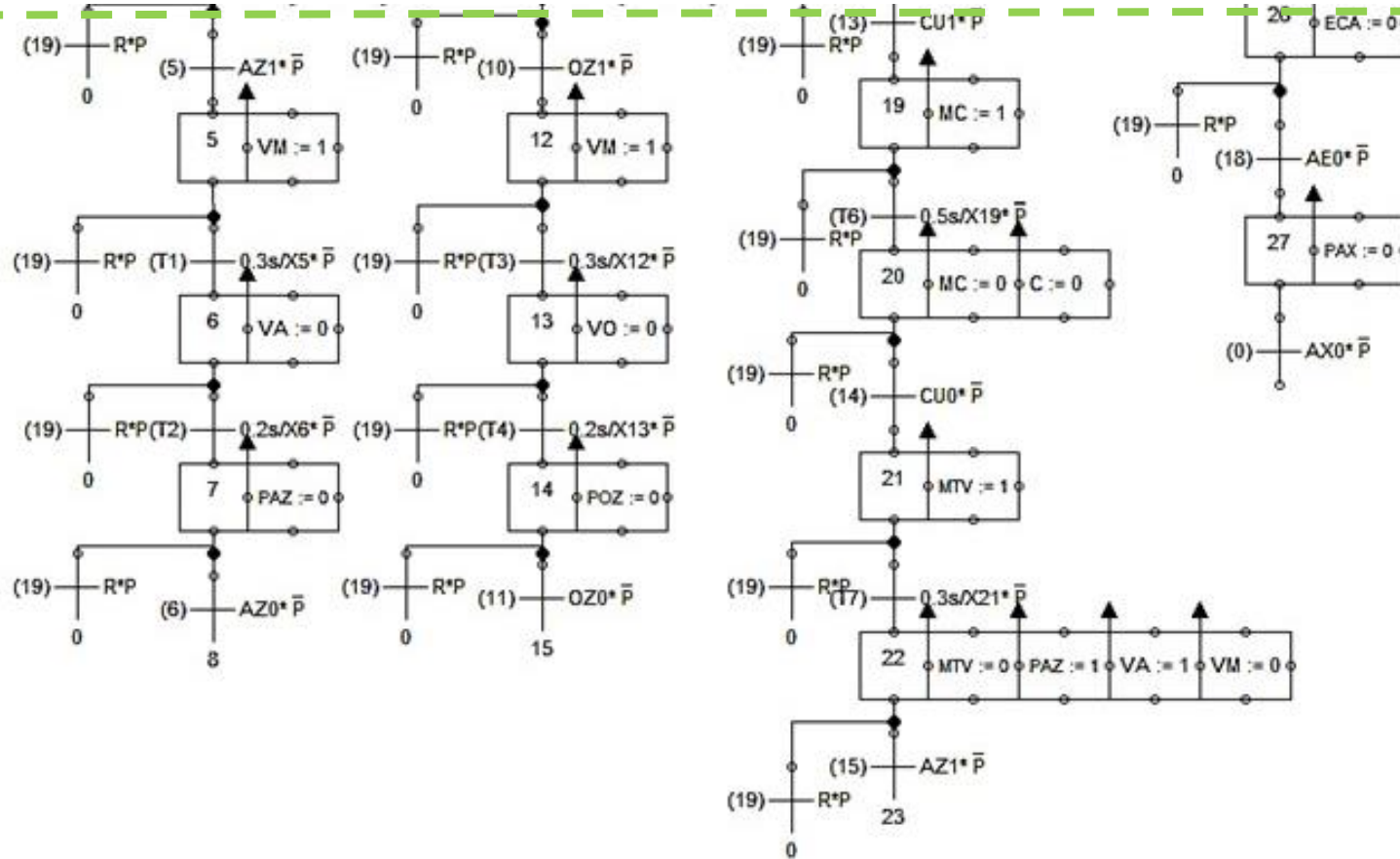


Nota: Elaboración propia.

Segunda Parte Diagrama Grafcet

Figura 42

Diagrama Grafcet segunda Parte



Nota: Elaboración propia.

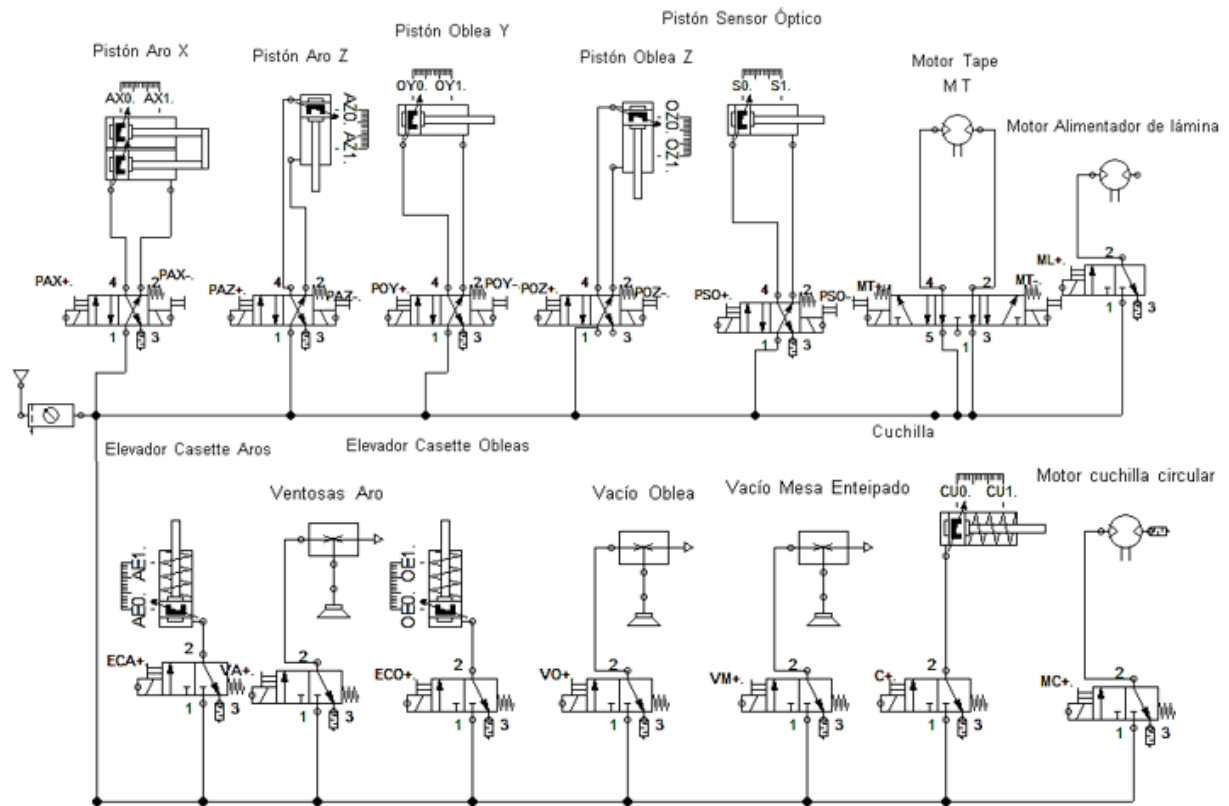
El diagrama Grafset de la figura 41 y 42 es la representación del paso a paso que se deriva del concepto de la figura 38. El diagrama se realizó en dos partes, para que su dimensión fuera visible. Todos los pasos anteriormente son respetados; además, con respecto a la secuencia, es respetada, tomando en cuenta la salida y las entradas de cada uno de los sensores para pasar a cada movimiento, sin peligro de choques, evitando así movimientos no deseados para concretar movimientos seguros a lo largo de todo el proceso.

Parte fundamental del control automático es la de los elementos de acción o paro del proceso; los mismos también juegan un papel importante en la realización de las secuencias, ya que en cada uno de los pasos se incorporó un método de paro que incluye dos variables: primero, el paro de emergencia; segundo, el sensor de vacío en la misma entrada. Cuando cualquiera de estos se activa, el sistema se detiene en cualquiera de los pasos; una vez en este estado, solo un técnico con la llave designada puede volver a habilitar el equipo, y tiene dos opciones:

- Corregir el problema, cerrar las puertas y resetear el sistema mediante la llave; enseguida el sistema continúa con la operación en la que se detuvo.
- Retirar el material de manera manual, retirar los casetes; luego, al presionar el botón R de reseteo del sistema, hará que todos los actuadores vuelvan a la posición de inicio.

Figura 42

Diagrama Electromecánico



Nota: Elaboración propia.

En la Figura 43 se presenta el diagrama electromecánico, que muestra detalladamente los componentes esenciales del sistema, como los solenoides, las válvulas, los pistones y los actuadores. Cada uno de estos elementos está claramente identificado, lo que facilita la comprensión y correcta conexión de todos los dispositivos en el sistema automatizado. Los solenoides controlan las válvulas que regulan el flujo de aire hacia los pistones y actuadores, permitiendo así los movimientos precisos que el proceso requiere. Este diagrama electro neumático proporciona una visión integral de cómo se interrelacionan los componentes eléctricos y neumáticos, garantizando que el sistema funcione de manera

eficiente y sin fallos. Su correcta interpretación es fundamental para la instalación, la puesta en marcha y el mantenimiento del sistema automatizado.

Tabla 11

Lista de Materiales y gastos

Lista de materiales						
ID	Nombre	Marca	Modelo	Precio	Cantidad	Total
M	Marcha	Schneider Electric	696334171747	\$17	1	\$17
P	Paro	Schneider Electric	XALK188E	\$73	1	\$73
P	Sensor aire bajo	Festo	540198	\$25	1	\$25
P	Sensor vacío bajo	Festo	540198	\$25	1	\$25
R	Reseteo	Schneider Electric	696333949118	\$25	1	\$25
	Cabezal óptico	Keyence	LK-H008W	\$10 400	1	\$10 400
	Controlador Sensor alta precisión	Keyence	LK-G5001	\$3 600	1	\$3 600
	Cables/ Keyence-Usb-ethernet	Keyence	CB-A07/OP-66843/OP-66844	\$450	1	\$450
	Software medición Keyence	Keyence	LK-H2	\$690	1	\$690
	Fuente poder Keyence	Keyence	CA-U4#	\$350	1	\$350
	Válvula 4/2	Festo	L30-M32C-MD-G38	\$70	5	\$350
	Válvula 5/3	Festo	30483 MFH-5/3-E	\$90	1	\$90
	Válvula 3/2	Festo	750423	\$35	8	\$280
	Cables para control	Condumex		\$60	1	\$60
	Mangueras Neumáticas			\$100	1	\$100
	PLC	SIEMENS	S7-200	\$400	1	\$400
	Técnico electromecánico		¢ 432 819	\$849	4	\$3 395
	Ingeniero Electromecánico		¢ 784 139	\$1 538	4	\$6 150
LM	Luz Marcha	Schneider Electric	XB4BVB3	\$20	1	\$20
LP	Luz Paro	Schneider Electric	XB6AV4BB	\$35	1	\$35
PAX+	Pistón Aro X Salida	Mc Master-Carr	6491K258	\$237	1	\$237
PAZ+	Pistón Aro Z Salida	Mc Master-Carr	4952K208	\$109	1	\$109
ECA+	Elevador Casette Aros	Festo	536292 DN08	\$50	1	\$50
VA+	Ventosas Aro	Festo	539074	\$150	1	\$150
POY+	Pistón Oblea Y Salida	Mc Master-Carr	6491K258	\$237	1	\$237
POZ+	Pistón Oblea Z Salida	Mc Master-Carr	4952K208	\$109	1	\$109
ECO+	Elevador Casette Obleas	Festo	536292 DN08	\$50	1	\$50
VO+	Brazo Vacío Oblea	H-SQUARE	VWSET-C	\$360	1	\$360
VM+	Vacío Mesa enteipado	Festo	539074	\$150	1	\$150
PSO+	Pistón Sensor Óptico Salida	Mc Master-Carr	4952K208	\$109	1	\$109
ML+	Motor Alimentador de lámina	SMC	CRB1BW100	\$461	1	\$461
MT+	Motor Tape Giro horario	SMC	CRB1BW100	\$461	1	\$461
C+	Pistón Cuchilla Salida				1	\$0
MC+	Motor Cuchilla Gira	Festo	DRVS-16-270-P-EX4	\$180	1	\$180
Total					51	\$29 196
					Cantidad	Total

Nota: Elaboración propia.

Realización del prototipo funcional en FUSION de Autodesk

En las figuras 44, 45, y 46 se presenta el diseño mecánico propuesto, que cubre los aspectos físicos necesarios para la implementación del proyecto automatizado. Para el desarrollo de este diseño, se utilizó el software Autodesk Fusion, conocido por su versatilidad y capacidades de modelado en 3D. Esta herramienta permitió crear un modelo detallado y preciso del sistema, facilitando la visualización de la interacción entre los distintos componentes y mejorando la calidad del diseño. Gracias a su flexibilidad, Fusion permitió ajustar el diseño, optimizando tanto la funcionalidad como la manufactura del producto.

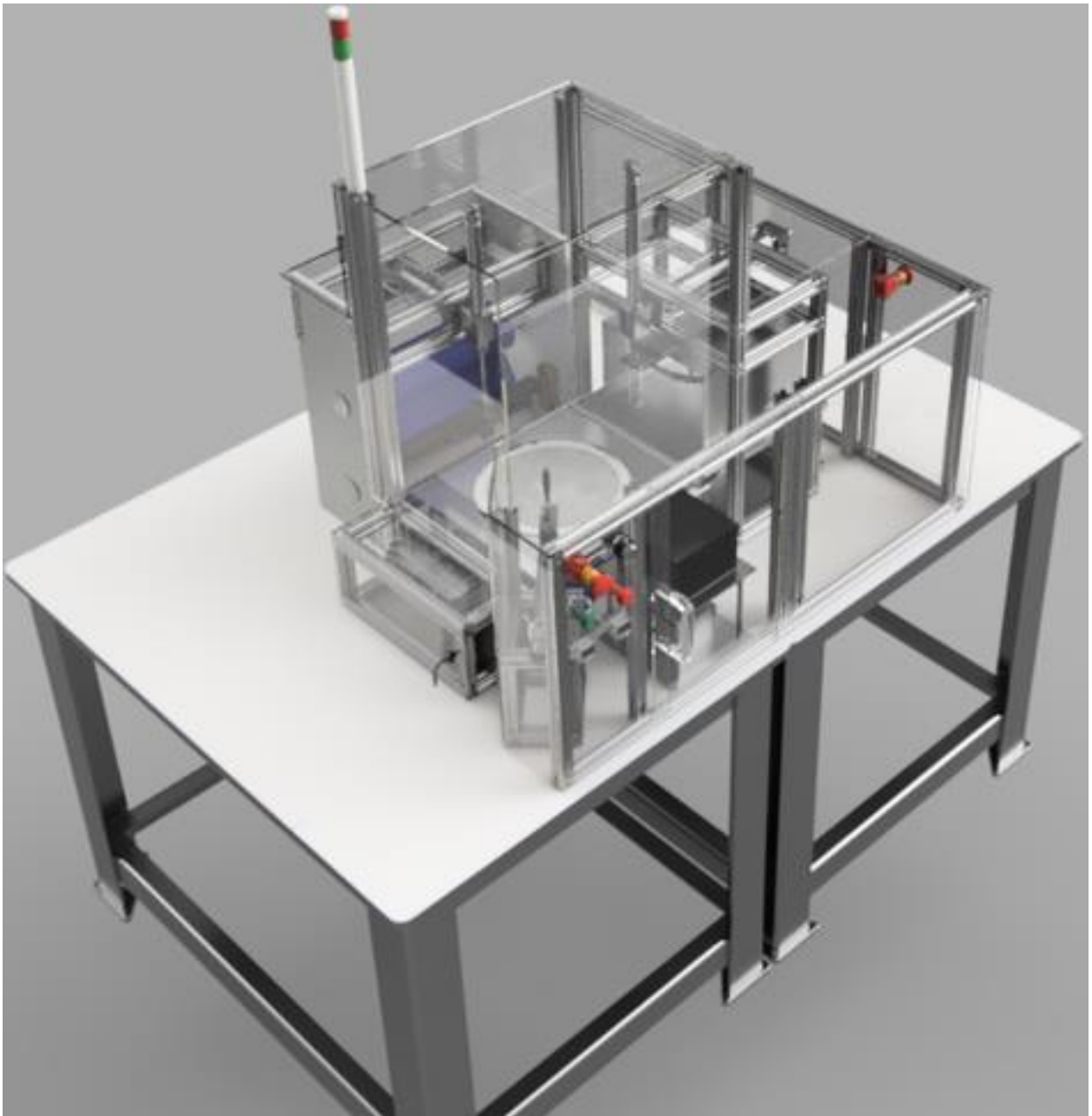
El diseño incluye la disposición de componentes clave como los sensores, la laminadora, las bases de los casetes, los elevadores, los pistones y los perfiles de aluminio que forman la estructura del sistema. Cada uno de estos elementos ha sido cuidadosamente diseñado para asegurar un funcionamiento eficiente y seguro, garantizando tanto la estabilidad estructural como la correcta integración de los componentes.

Este enfoque visualiza cómo se verá el sistema automatizado que integra las funciones de medición y laminado en un proceso continuo, optimizando la distribución de los elementos para facilitar el acceso, la operatividad y el mantenimiento. Se asegura una correcta interacción entre los componentes eléctricos, neumáticos y mecánicos, cumpliendo con los requisitos técnicos y adaptándose de manera eficaz al espacio y a las condiciones operativas del entorno de trabajo.

Además, se desarrolló una animación, simulando cada uno de los pasos propuestos en los pasos conceptuales, y desarrollados por medio del diagrama Grafcet, mediante el Software Fusion. El enlace se ubica en la siguiente dirección: <https://youtu.be/grCziErwby0>

Figura 43

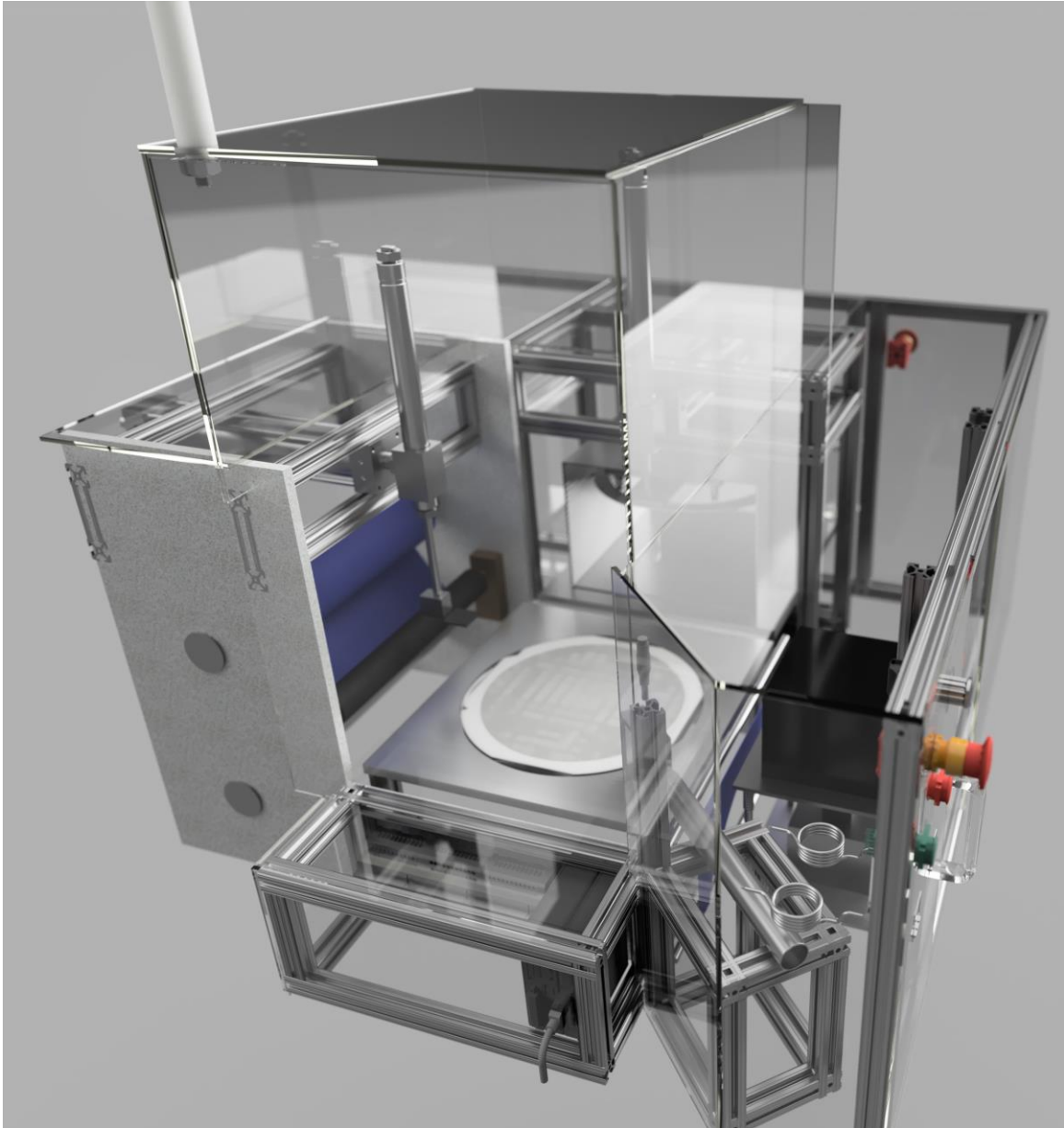
Diseño Mecánico en Autodesk Fusión 1



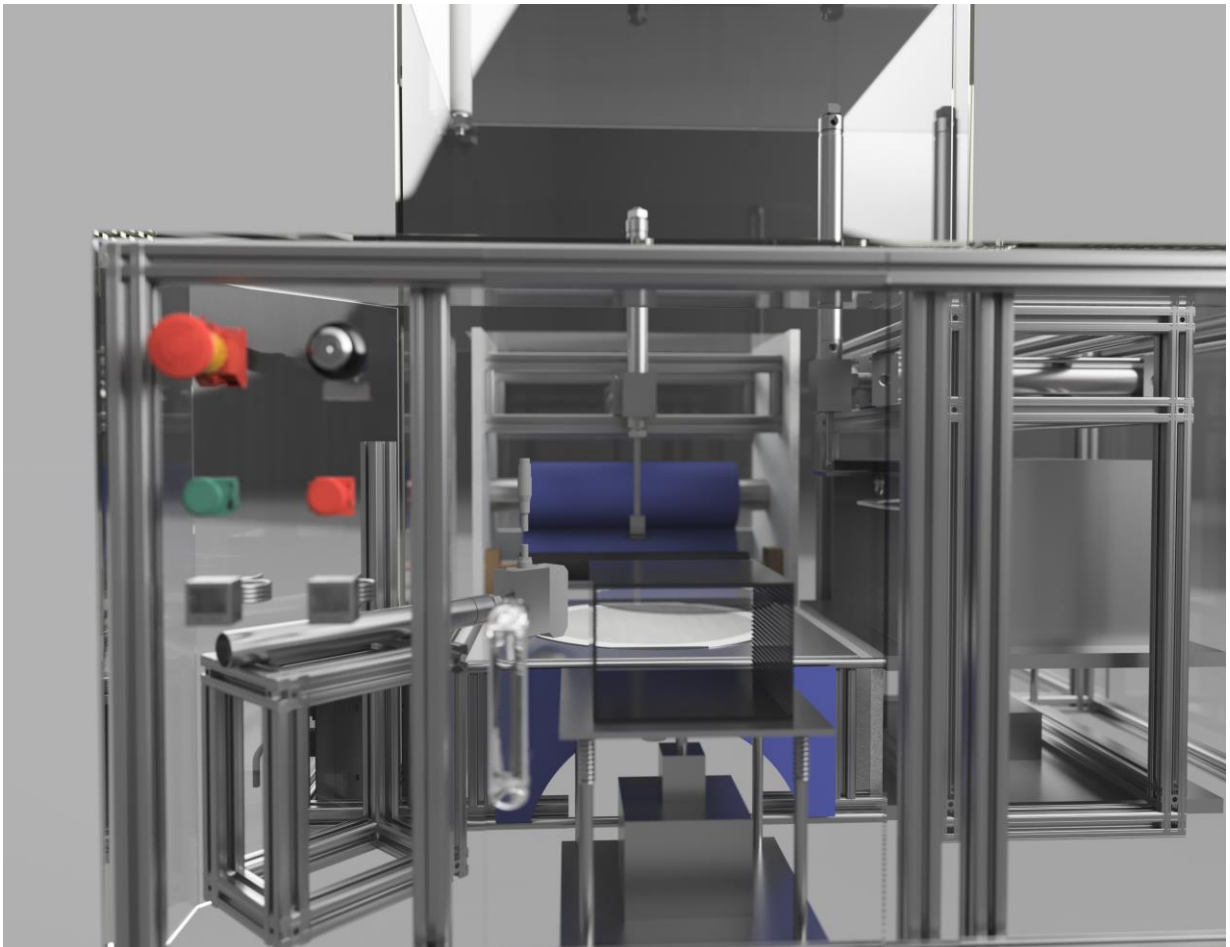
Nota: Elaboración propia.

Figura 44

Diseño Mecánico en Autodesk Fusión 1



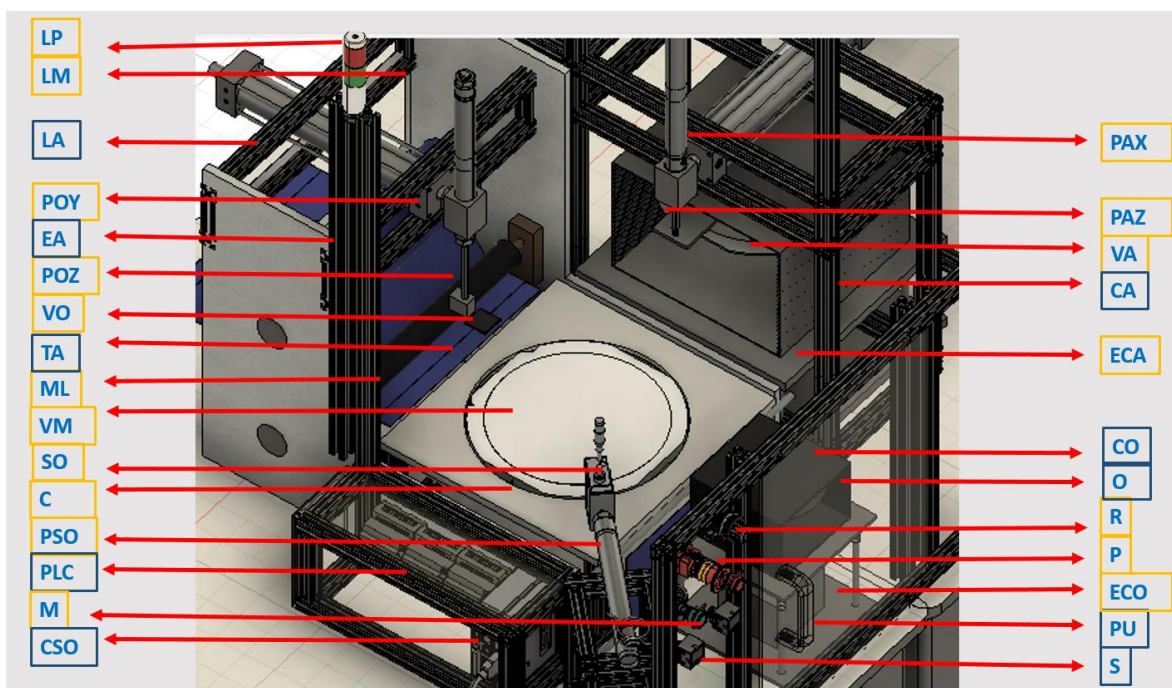
Nota: Elaboración propia.

Figura 45*Vista Frontal Diseño*

Nota: Elaboración propia.

Figura 46

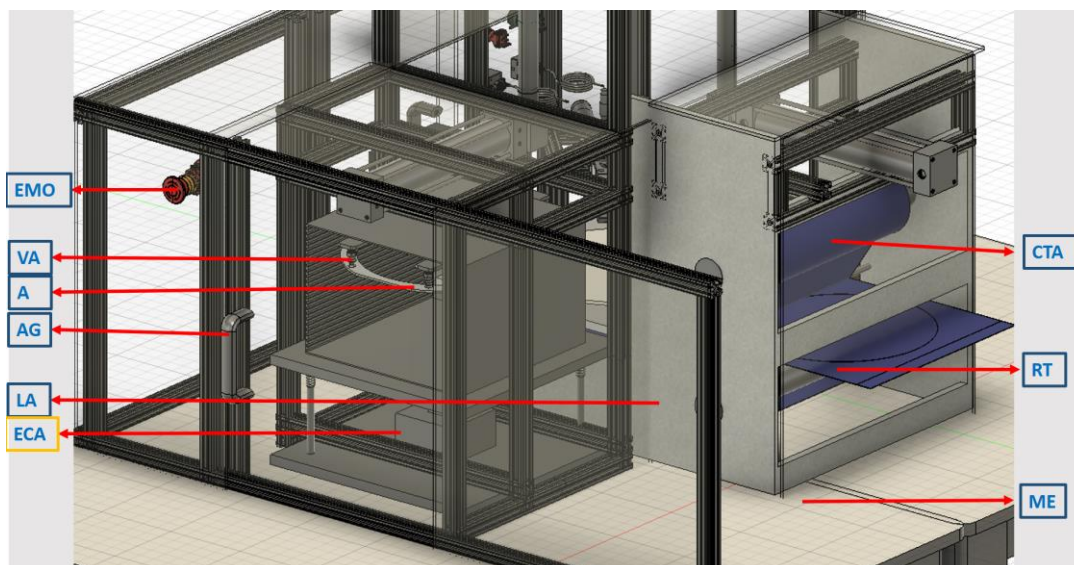
Ubicación de los elementos vista frontal isométrica



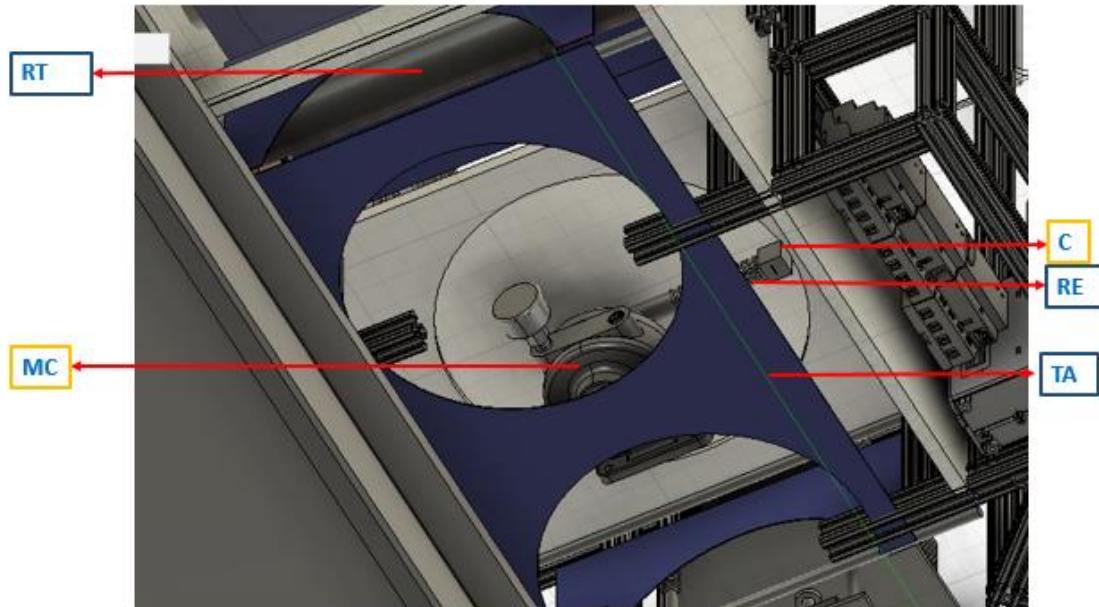
Nota: Elaboración propia.

Figura 47

Ubicación de los elementos vista trasera isométrica



Nota: Elaboración propia.

Figura 48*Ubicación de los elementos vista Inferior*

Nota: Elaboración propia.

En las figuras 47, 48 y 49 se identifica cada uno de los elementos del proyecto, elementos, actuadores, entradas y salidas.

En cada uno de los elementos identificados con letras y un cuadro amarillo se utilizaron las siglas, y tanto su nombre como su función se encuentran identificados en las tablas 9 y 10.

Para el resto de elementos identificados con el cuadro azul, a continuación, se hallan su identificación, nombre y comentario, con su función.

Tabla 12

Elementos figuras 47, 48 y 49

Elementos del Diseño		
ID	Nombre	Comentario
LA	Láminas Acrílico	Funcionan como ente separador entre el exterior y el interior de la máquina protegiendo la integridad de los individuos alrededor.
EA	Estructura aluminio	El perfil de aluminio se encarga de soportar los diversos elementos seleccionados para ser parte del proyecto.
TA	Tape Azul	Es el elemento mediante el cual la oblea y el aro se unen.
PLC	Controlador Lógico Programable	Es el medio por el cual se realizan las programaciones para lograr controlar las salidas mediante las entradas existentes.
CSO	Controlador Sensor Óptico	Es el encargado de realizar la función de medición libre de contacto de las obleas.
CA	Cassette aros	Se encarga de sostener los aros tanto al inicio como al final del proceso.
CO	Cassette Obleas	Se encarga de sostener las obleas que se desean ser medidas y laminadas.
PU	Puerta Corrediza	Esta puerta al estar abierta permite la insercion del cassette.
S	Sensores de Presión	Los sensores se utilizan para medir la presión de aire entrante y el vacío.
EMO	Sirve como paro de emergencia	Al ser presionado detiene la operación de la máquina.
VA	Ventosas Aro	Sostienen al aro mediante vacío.
A	Aro	Es el medio en el que la oblea estará segura luego de ser laminada.
AG	Agarradera puerta corrediza	Ayuda a mover la puerta de izquierda a derecha.
CTA	Cambio tape azul	Compuerta ayuda a cambiar el tape azul.
RT	Remoción Tape	Compuerta ayuda a remover el residuo de tape.
ME	Mesas para máquina	Mesas sonstienen la máquina.
RE	Resorte tensor	El resorte se encarga de sostener la cuchilla lo más cercano para que cuando la cuchilla pasa logre apegarse al aro

Nota: Elaboración propia.

Análisis mecánico de los elementos del manejo de la oblea

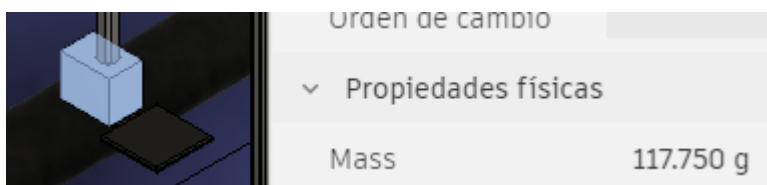
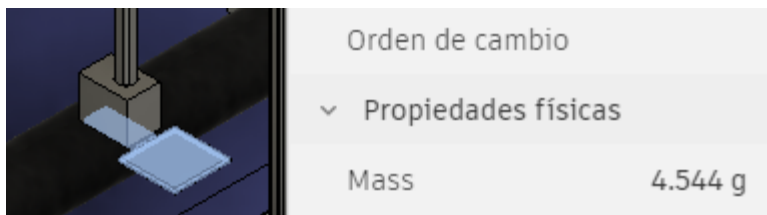
Para llevar a cabo el análisis mecánico, se consideraron todos los elementos que componen el sistema, evaluando sus respectivas masas, las cuales varían según la forma, el volumen y la densidad del material seleccionado. Aunque algunos componentes no son modificables, se procuró seleccionar aquellos que optimizaran la capacidad del diseño para soportar las fuerzas a las que estará sometido.

En este estudio, se analizaron los dos elementos más críticos por su función y carga: el pistón horizontal y los perfiles de aluminio, junto con los tornillos que unen estos perfiles a la carcasa de la laminadora. Se calcularon parámetros fundamentales, como el factor de seguridad de los elementos, la fuerza total aplicada, el esfuerzo cortante y el factor de seguridad específico para los tornillos. Estos cálculos son esenciales para garantizar que el diseño cumpla con los estándares de seguridad y funcionalidad requeridos.

Análisis pistón horizontal

Figura 49

Masa del manipulador



Nota: Elaboración propia.

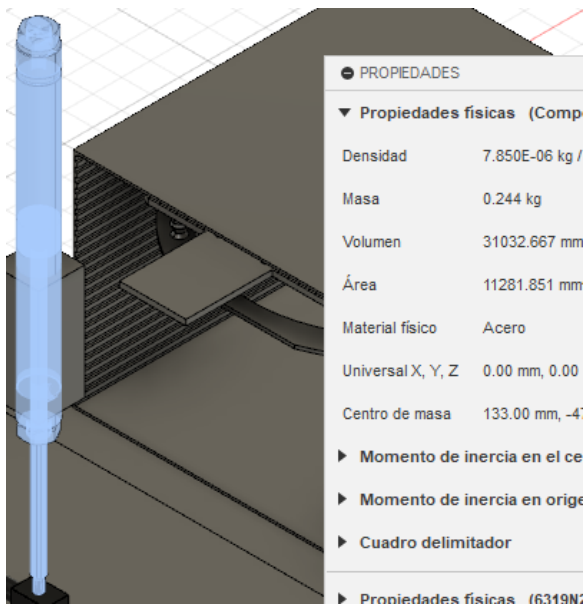
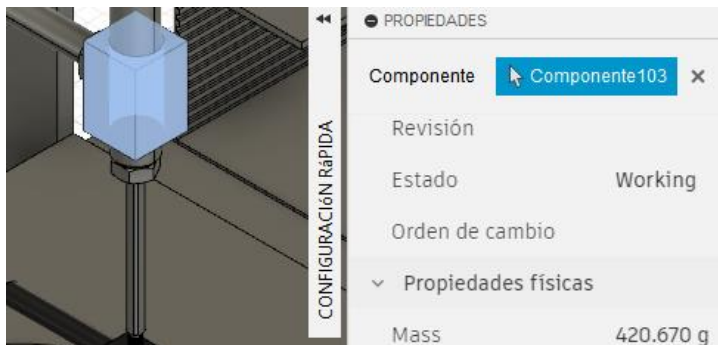
Figura 50*Masa del pistón vertical**Nota: Elaboración propia.***Figura 51***Masa ensamble entre pistones**Nota: Elaboración propia.*

Figura 52*Masa de la Oblea*

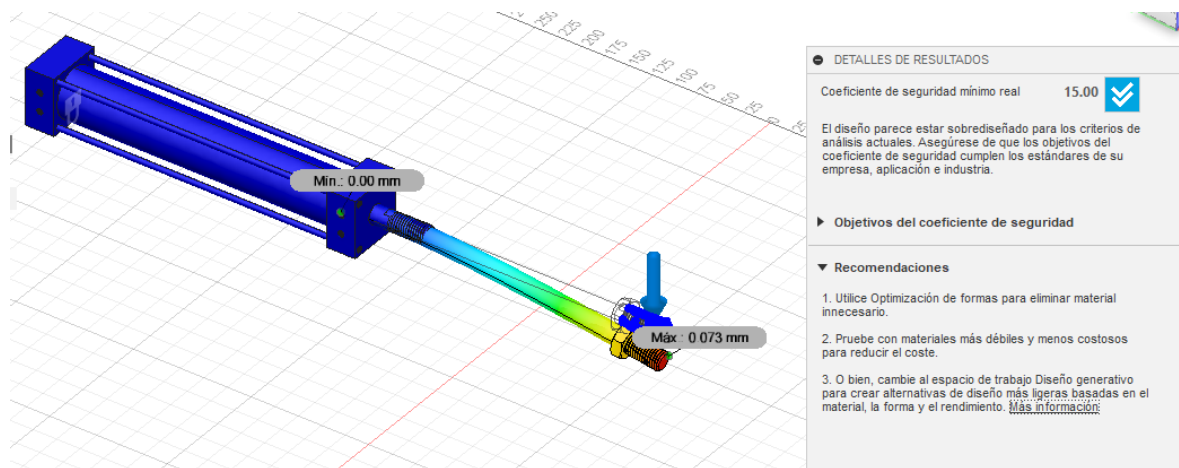
Nota: Elaboración propia.

Con base en la información de las figuras de la 50 a la 53, se extrajo la masa de los elementos que son parte de la masa que sostiene el pistón horizontal.

Tabla 13*Análisis fuerza pistón horizontal*

Análisis punto crítico pistón horizontal	Masa	
Pistón vertical	0,643281	Kg
Ensamble pistón y paleta de vacío	0,11775	Kg
Ensamble pistón de oblea y pistón horizontal	0,244	Kg
Manipulador de vacío	0,004544	Kg
Oblea	0,038524	Kg
Sumatoria masa total	1,048099	Kg
Fuerza total ($g=9,81\text{m/s}^2$)	10,2818512	N

Nota: Elaboración propia.

Figura 53*Pandeo del punto crítico del pistón horizontal*

Nota: Elaboración propia.

Con base en la Tabla 13, se aplica dicha fuerza al punto más crítico del pistón de la Figura 54; el factor de seguridad obtenido del pistón es de 15, sobredimensionado. En cuanto al pandeo del pistón, se determinó que la deformación máxima es de 0.073 mm. Al considerar que las obleas de silicio pueden tolerar deformaciones de hasta 1 mm sin sufrir fracturas, este valor no representa un riesgo significativo para el diseño, especialmente al tener en cuenta las cargas a las que estará sometido el sistema.

Análisis Perfiles de aluminio que sostienen a los pistones que se encargan de transportar la oblea

Además de los elementos contemplados en la Tabla 11, se suma a la masa total que sostienen los perfiles:

Figura 54

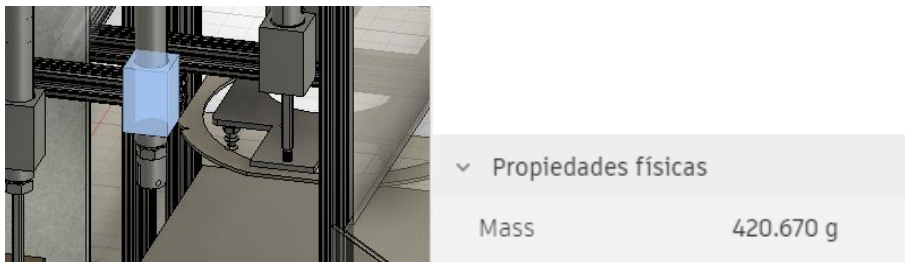
Masa del pistón horizontal



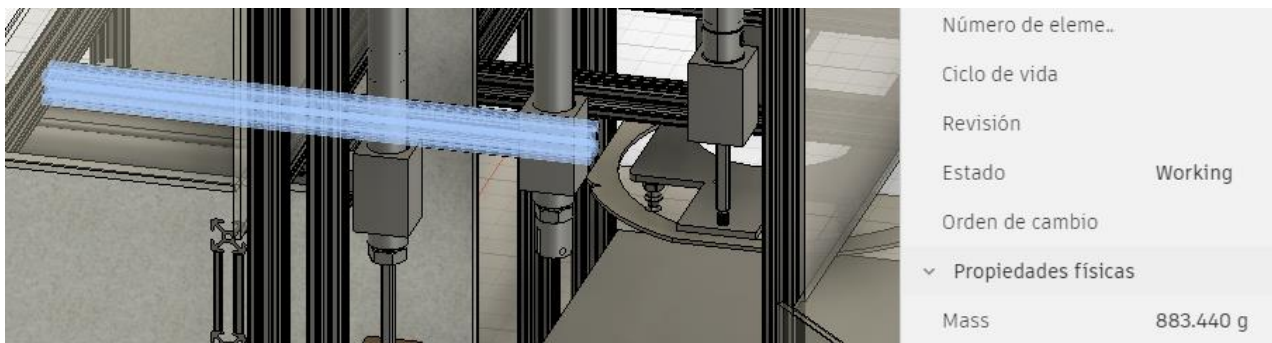
Nota: Elaboración propia.

Figura 55

Masa del ensamble pistón-cuchilla



Nota: Elaboración propia.

Figura 56*Masa pistón corte cuchilla**Nota:* Elaboración propia.**Figura 57***Masa del perfil de aluminio que sostiene el pistón de la cuchilla**Nota:* Elaboración propia.

Resultado de la sumatoria de los elementos

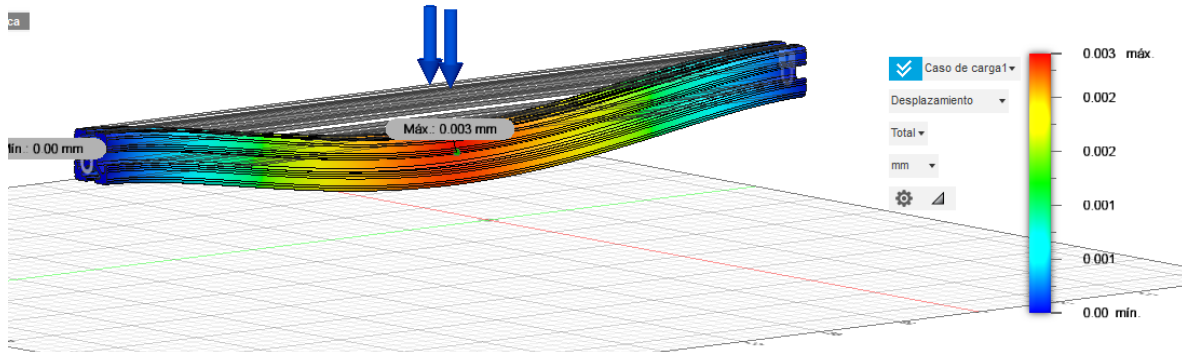
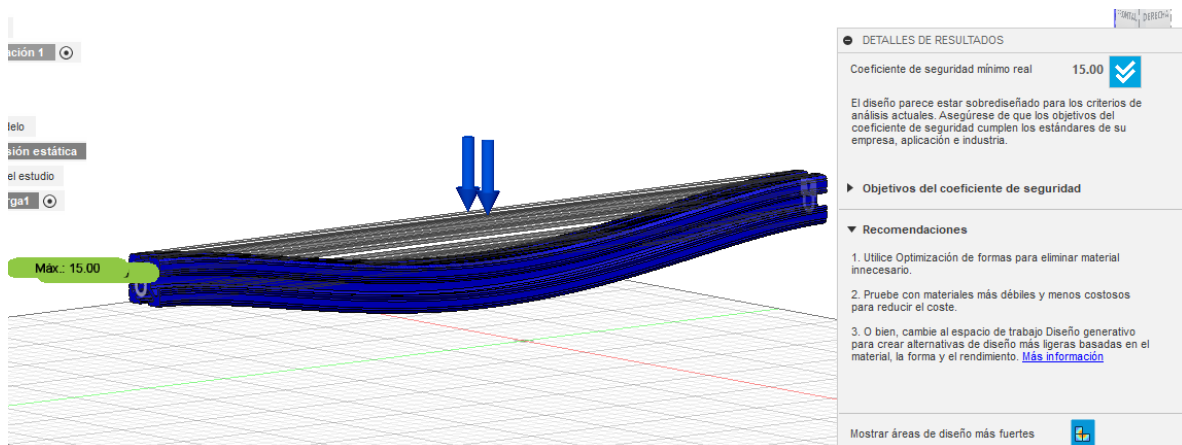
Tabla 14

Sumatoria masa de elementos sostenidos en los perfiles de aluminio

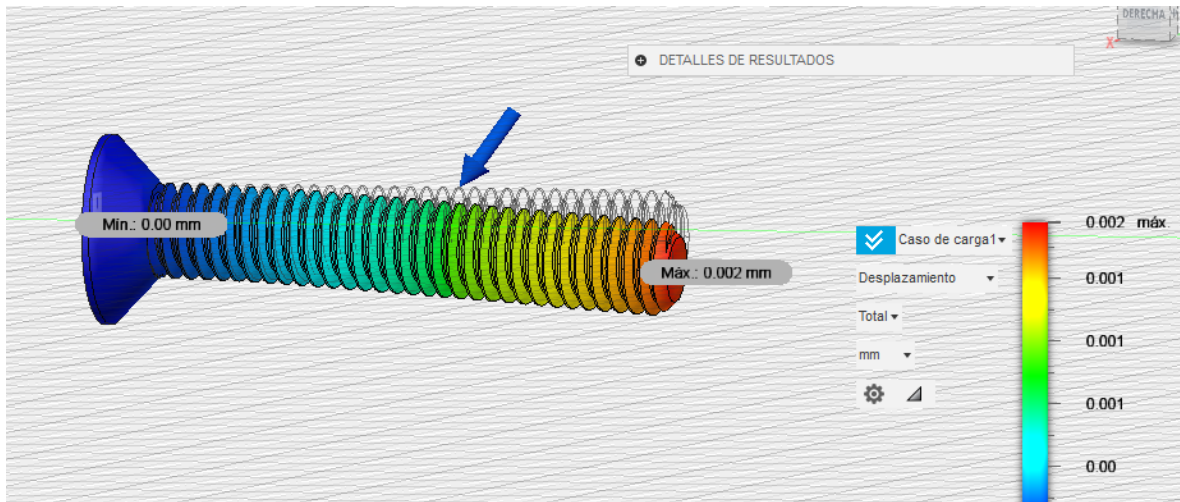
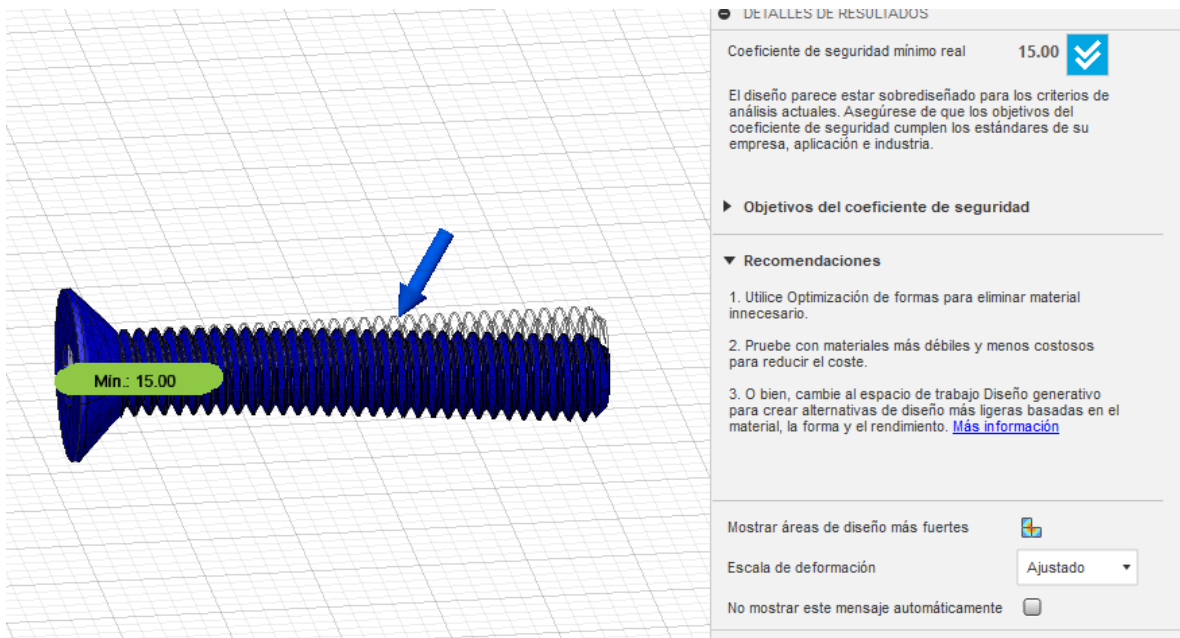
Análisis punto perfiles de aluminio	Masa	Masa
Pistón vertical	643,281 g	0,643281 Kg
Ensamble pistón y paleta de vacío	117,75 g	0,11775 Kg
Ensamble pistón de oblea y pistón horizontal	244 g	0,244 Kg
Manipulador de vacío	4,544 g	0,004544 Kg
Oblea	38,524 g	0,038524 Kg
Pistón Horizontal	5620,451 g	5,620451 Kg
Ensamble cuchilla	420 g	0,42 Kg
Pistón cuchilla	643,281 g	0,643281 Kg
Perfil aluminio para pistón cuchilla	883,44 g	0,88344 Kg
Sumatoria masa total	8615,271 g	8,615271 Kg
Fuerza total ($g=9,81\text{m/s}^2$)		84,5158085 N

Nota: Elaboración propia.

Mediante la simulación mecánica de Fusion de Autodesk se aplica dicha fuerza sobre los perfiles de aluminio. Como se muestra en la imagen, en un análisis de la carga y el pandeo se obtienen hasta 0.003mm de pandeo, es decir, un factor de seguridad de 15. Este elemento es un perfil estándar y se seleccionó debido a que su tamaño está predefinido.

Figura 58*Pandeo de los perfiles de aluminio**Nota:* Elaboración propia.**Figura 59***Coefficiente de seguridad**Nota:* Elaboración propia.**Análisis de tornillos que ensamblan perfiles a la máquina laminadora**

Al dividir la fuerza obtenida en la Tabla 13 y dividiéndola entre los cuatro tornillos que son M5, resulta un pandeo de 0.002mm, es decir, un factor de seguridad de 15. Este elemento es un perfil estándar, y se seleccionó debido a que su tamaño está predefinido por el agujero del perfil de aluminio.

Figura 60*Pandeo del tornillo M5**Nota: Elaboración propia.***Figura 61***Factor de seguridad para tornillo M5**Nota: Elaboración propia.*

Revisión de la selección del tornillo

Inicialmente, se cuenta con una fuerza total aplicada a los perfiles de 84,5N, dividiéndola entre los cuatro tornillos de apoyo a la carcasa de la laminadora, siendo un total de 21N por tornillo, llevando a un factor de seguridad donde un tornillo logre sostener la carga total, de los 84.5N, tomando como referencia las características del tornillo M5.

Lo anterior se obtiene al calcular el esfuerzo cortante, calculando con 84N como el peor escenario e incluyendo un incremento en la posible fuerza aplicada.

Datos del tornillo M5

Diámetro nominal: $d=5\text{mm}=0.005\text{m}$

Fuerza aplicada: $F=84.51\text{N}$

Límite elástico del acero S275 (Obtenido de Mc master-carr): $\sigma_y=275\text{ MPa}$

Al tomar en cuenta que para el M5 el di interno sin la rosca es de 4.02mm, se calcula:

$$A = \left(\frac{\pi}{4}\right) d^2 = A = \left(\frac{\pi}{4}\right) 4.02^2 = 12.68 \times 10^{-6} \text{m}^2$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{84.51}{12.68 \times 10^{-6}}$$

$$\tau = 6.67 \text{ MPa}$$

Se calcula el FS manualmente

$$FS = \frac{275}{6.67} = 41.24$$

Al ingresar a la configuración del factor de seguridad en Fusion, el valor máximo predeterminado es 15, ya que cualquier valor superior se considera sobredimensionado. Esto significa que, si el resultado excede 15, el software lo limitará a ese número. Por esta razón, se realizan cálculos adicionales con otros diámetros de tornillo, para obtener un análisis más preciso.

Tabla 15

Comprobación diámetro del tornillo

Tornillo	Diámetro de Núcleo del tornillo	Área (mm ²)	Esfuerzo Cortante (τ) (Mpa)	Factor de Seguridad
M1	0,81	0,52	162,5	1,69
M2	1,41	1,56	54,17	5,08
M3	2,16	3,66	23,08	11,92
M4	3,06	7,16	11,81	23,29
M5	4,02	16,68	6,67	41,23

Nota: Elaboración propia.

El análisis de los factores de seguridad muestra que los tornillos M4 y M5 son buenas opciones para soportar la carga aplicada de 84.5 N, ya que presentan valores de FS altos, en comparación con tornillos más pequeños como M1, M2 o M3. En particular, el tornillo M5 fue seleccionado por varias razones clave: primero, su alto factor de seguridad de 41.24, lo que garantiza una unión confiable y sin riesgo de falla estructural. Además, es compatible con el perfil de aluminio, pues este cuenta con un orificio diseñado específicamente para tornillos M5, facilitando su instalación sin necesidad de modificaciones adicionales. Por último, durante el proceso de fabricación, se logró mecanizar la rosca M5 con éxito, permitiendo una sujeción firme y efectiva de los elementos sin comprometer la integridad del material. Gracias a estas ventajas, el M5 se convierte en la opción ideal para garantizar una conexión segura y duradera en la estructura.

Resultados

Implementación y pruebas en físico

Se lleva a cabo con base en los indicadores del tercer objetivo específico, que son:

- Piezas sin daños / piezas dañadas en proceso manual
- Piezas sin daños / piezas dañadas en proceso de carga automática
- Piezas sin daños / piezas dañadas en proceso con medición óptica sin contacto

Es necesaria la implementación en físico de los elementos, para determinar la funcionalidad del diseño experimental.

Para la comprobación del primer indicador, los datos se basan en los históricos consultados con anterioridad y que fueron analizados para concluir en la Tabla 4.

Para la comprobación del segundo indicador, los datos se basan en la implementación de una carga automática a la máquina laminadora.

Se cuenta con variedad de elementos de desuso en la compañía, que se amoldan a la aplicación por desarrollar, como lo son: laminadora, pistones de varios tamaños, manipulador.

Con estos elementos y su ensamble con base en el diseño experimental propuesto, se puede llegar a obtener el dato de cuál es la tasa de fallos, al realizar la tarea de carga del material de una manera automática sin intervención directa del operario.

Parte del ensamble inicial es la implementación del elevador, para lo que se implementaron elementos como una base de casete, la cual se observa en la figura:

Figura 62

Base para casete

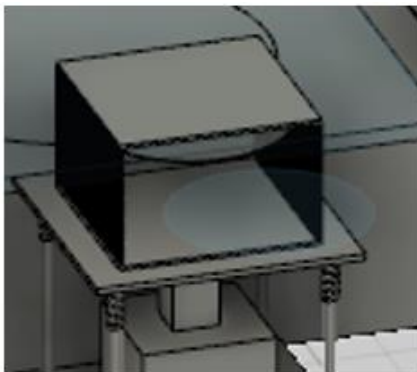


Nota: Elaboración propia.

A la base ilustrada en la figura anterior, se le modificaron las guías, para que lograra sostener el casete; la misma se ensambló al elevador siguiente, el cual también tiene el control de la altura mediante un pistón que posee un recorrido de 1cm:

Figura 63

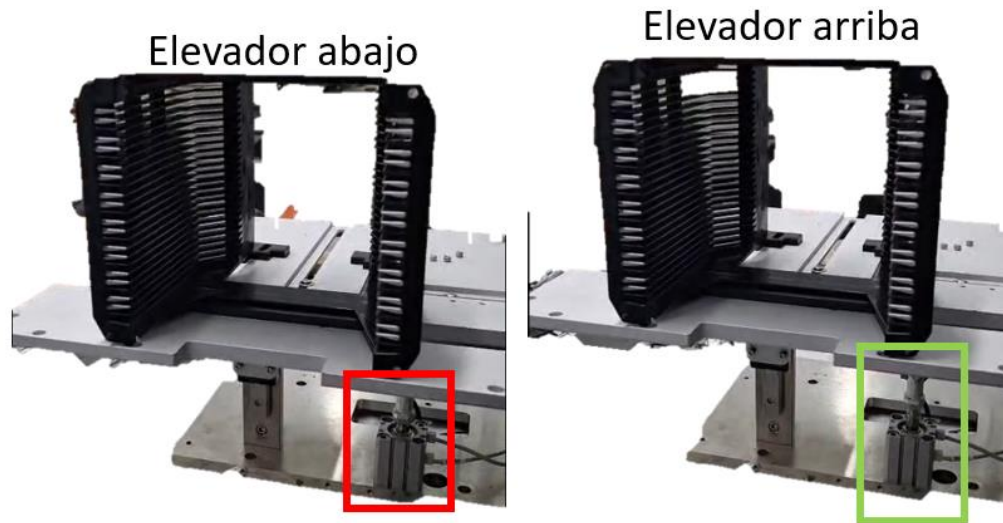
Elevador con pistón



Nota: Elaboración propia.

Figura 64

Posiciones del elevador

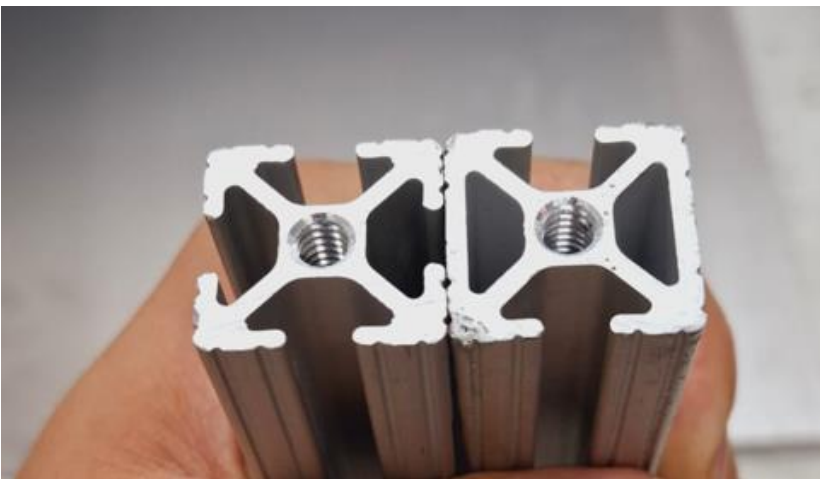


Nota: Elaboración propia.

Roscado de perfiles de aluminio para la colocacion del pistón horizontal

Figura 65

Roscado interno Perfiles de aluminio



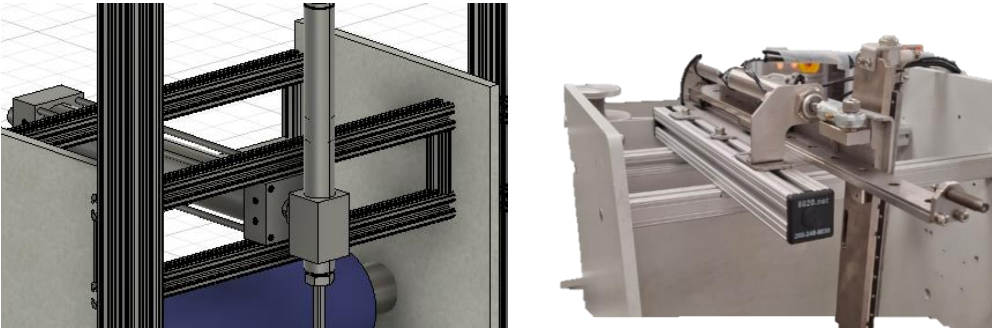
Nota: Elaboración propia.

Dichos perfiles serán utilizados para sostener el pistón de movimiento horizontal.

El pistón estará ensamblado de una manera similar a esta, en la laminadora:

Figura 66

Posición del pistón horizontal



Nota: Elaboración propia.

El pistón indicado en la Figura 64 posee una guía que ayuda a mantener la dirección correcta de la trayectoria del pistón, es decir, el émbolo no se va a girar, sino más bien su verticalidad se mantendrá en su salida y retorno a posición de reposo.

Figura 67

Ensamble transportador de oblea

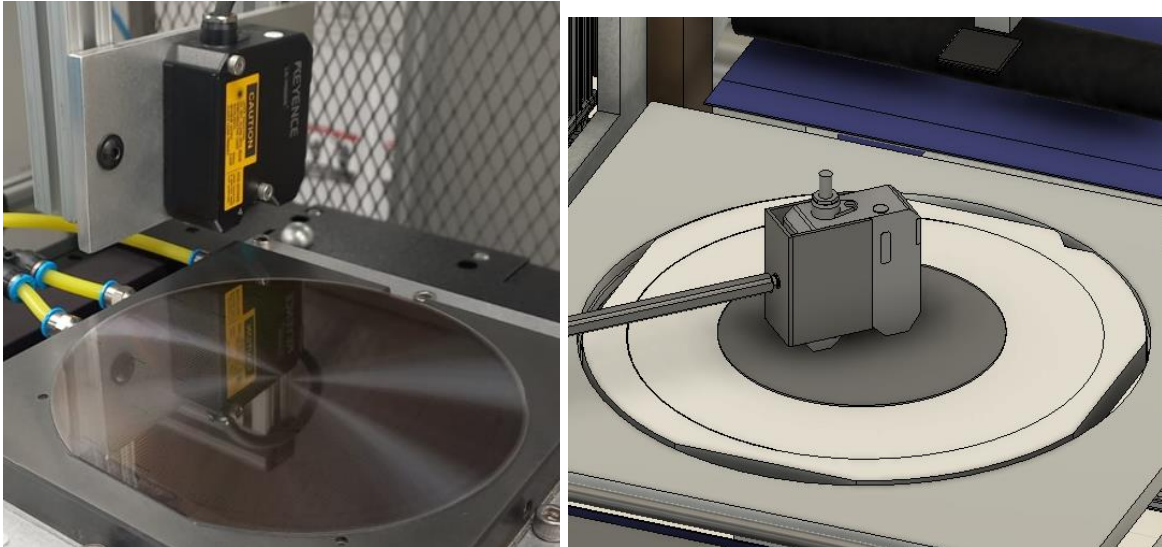


Nota: Elaboración propia.

Para la comprobación del tercer indicador, los datos se basan en la implementación de una medición sin contacto sobre una base. Como se muestra en la imagen:

Figura 68

Medición óptica



Nota: Elaboración propia.

Para lograr esta medición, se implementó un sistema de medición óptica de alta precisión, el cual incorpora el sensor Keyence LK-H008W junto con el controlador LKG5001. Este ensamble permitió obtener mediciones confiables y precisas del material en cuestión.

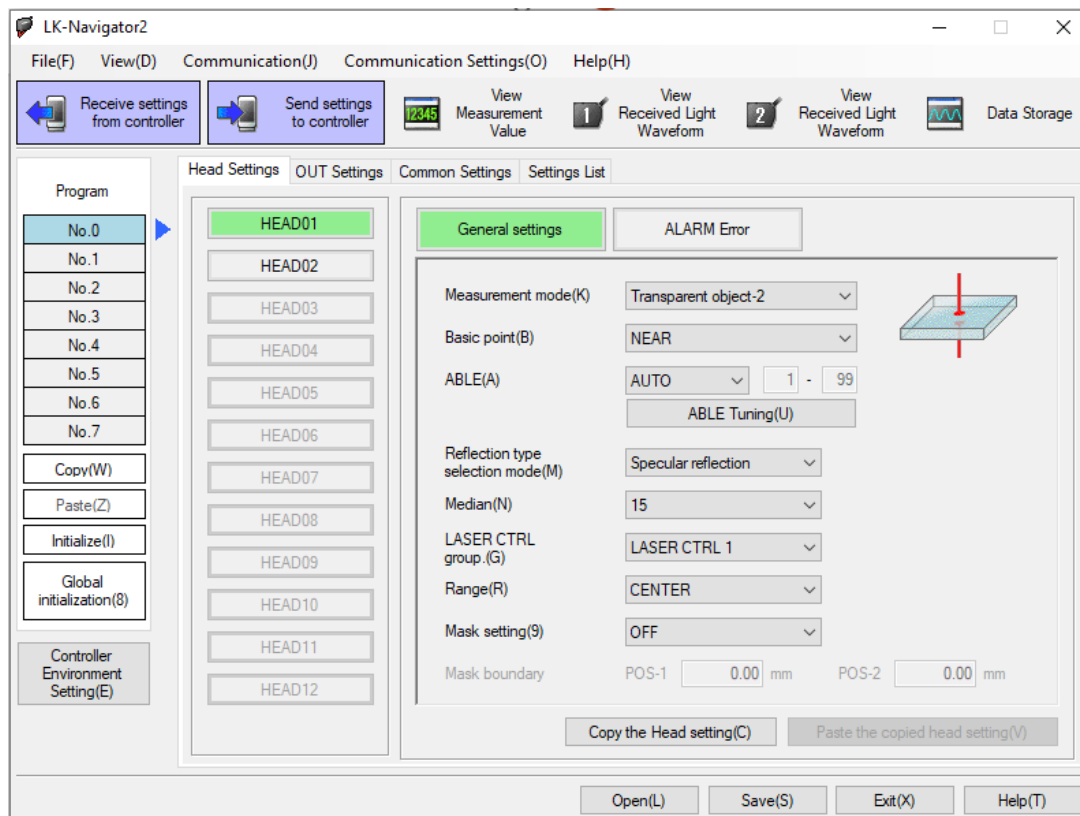
Los parámetros específicos para la correcta ejecución de la medición fueron proporcionados por la compañía, específicamente por una fábrica ubicada en Estados Unidos de América, asegurando que la configuración del sistema estuviera optimizada para las características del material evaluado. Dichos parámetros consideran factores clave como el tipo de cristal, su nivel de transparencia y el grosor del material, elementos fundamentales para garantizar la exactitud en los resultados obtenidos.

La interfaz del sistema se conecta a la computadora mediante un puerto USB, lo que facilita su integración y operación. Además, la extracción de datos se puede realizar de manera manual o a través de Excel, permitiendo un análisis más detallado y un registro eficiente de las mediciones.

A continuación, se adjuntan los parámetros detallados utilizados en la configuración del sistema de medición:

Figura 69

Intefaz LK Navigator, parámetros 1

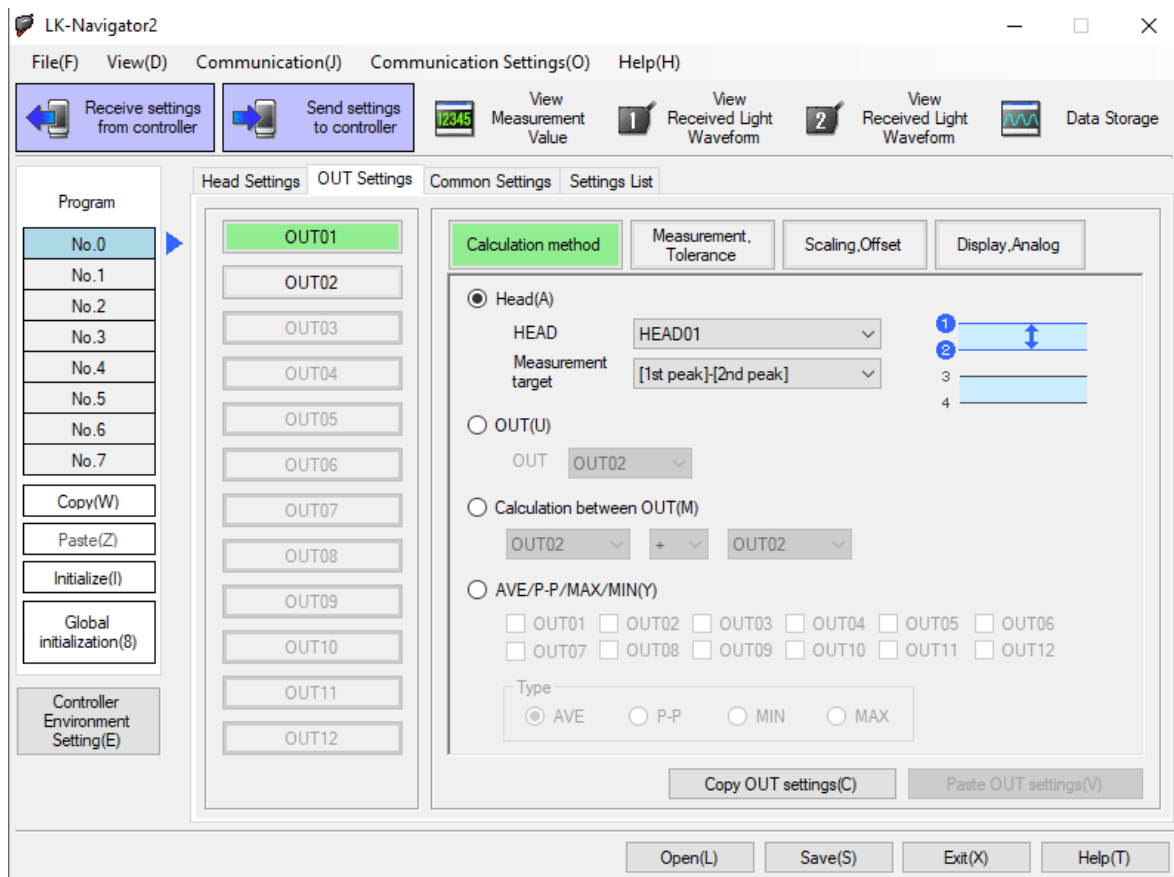


Nota: Software: LK Navigator 2.

Acá, se indican los parámetros generales de la medición. Se resalta que la oblea entra en el perfil de objeto transparente 2.

Figura 70

Intefaz LK Navigator, parámetros 2

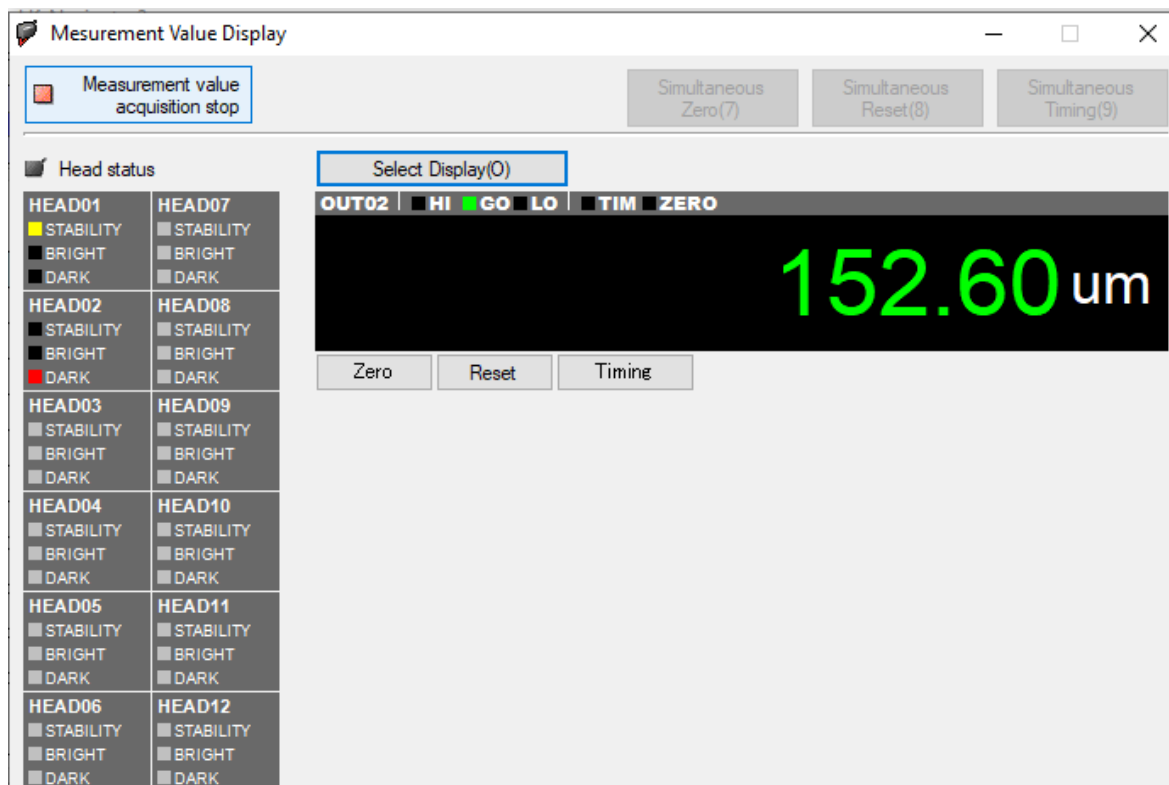


Nota: Software: LK Navigator 2.

Con base en los objetivos de medición, se indica que el valor importante para el sensor es el primer pico y el segundo pico; esto se refiere a la entrada del láser, donde contacta al material y el segundo cuando finaliza su contacto con el cristal. Luego del cálculo de la diferencia entre estas dos líneas de medición, la medida obtenida es el grosor del cristal de la oblea.

Figura 71

Intefaz LK Navigator, medición



Nota: Software: LK Navigator 2.

En la figura se muestra la pantalla llamada “view measurement value”, donde se puede obtener directamente en la pantalla el valor de la medición.

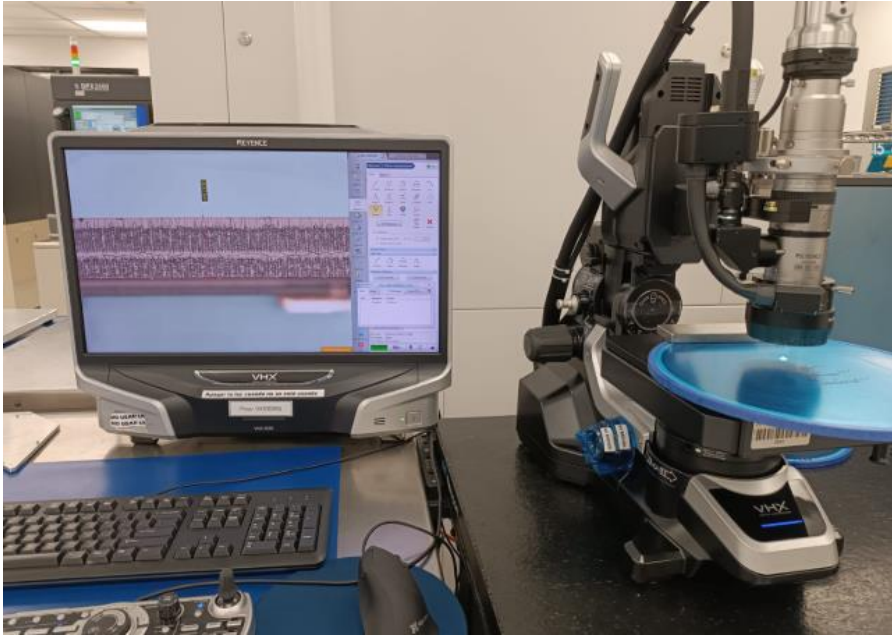
Para evaluar si la medición óptica puede reemplazar de manera efectiva la medición física, se diseñó un procedimiento experimental con base en la comparación de resultados obtenidos por ambos métodos. Se propuso realizar 15 mediciones, comenzando con el método óptico y, posteriormente, verificando la precisión de los datos mediante una medición física detallada.

El proceso comenzó con la medición de las muestras utilizando el sensor óptico Keyence LK-H008W, registrando los valores obtenidos en cada caso. Una vez finalizado el proceso de fabricación, se procedió a realizar la validación física de las mismas piezas

mediante el microscopio Keyence VHK-5000, tomando mediciones directas en los laterales del material, para identificar posibles discrepancias.

Figura 72

Comparación microscopio Keyence



Nota: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de ambas metodologías fueron analizados y comparados, con el objetivo de determinar la precisión y repetibilidad de la medición óptica, en relación con el patrón de referencia. A continuación, se presentan los valores obtenidos en cada medición, así como la diferencia observada entre los resultados del método óptico y el patrón de medición física.

La comprobación en físico está evidenciada en los videos presentados en el siguiente link: [Videos](#)

Figura 73

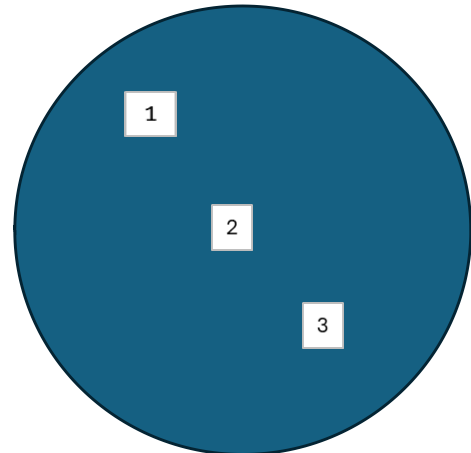
Valores obtenidos, comparativa

Medición sensor óptico (µm)				
Unidad	Máquina	Valor 1	Valor 2	Valor 3
3	BackGrinder 02	148,97	148,26	149,53
1	BackGrinder 01	153,41	153,1	153,56
7	BackGrinder 02	152,54	152,43	153,01
7	BackGrinder 02	151,02	149,36	153,85
13	BackGrinder 01	151,59	151,09	152,18

Medición Microscopio Keyence (µm)				
Unidad	Máquina	Valor 1	Valor 2	Valor 3
3	BackGrinder 02	148,90	148,4	148,5
1	BackGrinder 01	153,60	153,1	152,7
7	BackGrinder 02	153,10	152,4	152,34
7	BackGrinder 02	150,90	150,2	154,6
13	BackGrinder 01	151,70	152,1	151,3

Diferencias Medición (µm)				
Unidad	Máquina	Valor 1	Valor 2	Valor 3
3	BackGrinder 02	0,07	-0,14	1,03
1	BackGrinder 01	-0,19	0,00	0,86
7	BackGrinder 02	-0,56	0,03	0,67
7	BackGrinder 02	0,12	-0,84	-0,75
13	BackGrinder 01	-0,11	-1,01	0,88

Puntos de medición Vista frontal



Nota: Elaboración propia.

Para comprender si el proceso de medición es confiable o no, es necesario tomar en cuenta que la variación aceptada para el material es de +15µm/-10µm y el objetivo es de 150µm.

La desviación estándar (σ) mide la dispersión de los datos respecto a la media. La

$$\text{fórmula es: } \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

x_i Valores individuales

\bar{x} : Promedio entre valores

N =Número de mediciones

Cálculo de la media o promedio

$$\bar{x} = \frac{\sum . xi}{N}$$

Cálculo de la varianza (σ^2)

$$\sigma^2 = \frac{\sum (xi - \bar{x})^2}{N}$$

Cálculo de la desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

Se decidió evaluar las mediciones ópticas y la comparación con el microscopio Keyence, dando como resultado:

Tabla 16

Cálculo desviación estándar

Número de medición	Medición óptica(μm)	Medición Microscopio Keyence(μm)
1	148,97	148,90
2	153,41	153,60
3	152,54	153,10
4	151,02	150,90
5	151,59	151,70
6	148,26	148,4
7	153,1	153,1
8	152,43	152,4
9	149,36	150,2
10	151,09	152,1
11	149,53	148,5
12	153,56	152,7
13	153,01	152,34
14	153,85	154,6
15	152,18	151,3
Máximo	153,85	154,60
Mínimo	148,26	148,40
Promedio	151,59	151,59
Dev est	1,757146846	1,822743232
Variancia	3,08756504	3,322392889

Nota: Elaboración propia. (Dev est) significa desviación estándar

Al evaluar la confiabilidad de las mediciones ópticas en comparación con las mediciones manuales, se encontró que tanto la desviación estándar como la varianza presentan valores similares en ambos métodos. Esto indica que el proceso de medición óptica es efectivo y suficientemente estable para reemplazar la medición manual, sin comprometer la precisión de los resultados.

En términos de los valores obtenidos, la mayor desviación respecto al objetivo de $150\ \mu\text{m}$ se observó en la medición de referencia con un valor de $154.60\ \mu\text{m}$, mientras que la medición óptica presentó una máxima desviación de $153.85\ \mu\text{m}$. Ambos valores se encuentran dentro del rango esperado, según la distribución normal de los datos.

Dado que, en una distribución normal, aproximadamente el 99.7% de los datos deben estar dentro de tres desviaciones estándar de la media, se calculó que el límite superior aceptable alcanzaría un máximo de $155.271\ \mu\text{m}$. Como los valores obtenidos tanto en la medición manual como en la óptica se encuentran dentro de este umbral, se confirma que el método óptico cumple con los requisitos de estabilidad y precisión necesarios para su implementación como alternativa confiable a la medición manual.

Este análisis respalda la viabilidad de la medición óptica como un método robusto y confiable, reduciendo la dependencia de procedimientos manuales y mejorando la eficiencia en el proceso de medición.

La comprobación en físico es la del sistema óptico de medición y de la puesta automática de oblea sobre la base de la laminadora.

Para la comprobación final del diseño propuesto y, con el objetivo de establecer una ruta cuantitativa, se llevó a cabo una prueba utilizando 35 unidades de obleas desgastadas. Estas obleas presentan las mismas características que el material empleado en la

producción regular, es decir, se encuentran desgastadas y requieren una manipulación extremadamente cuidadosa, debido a su fragilidad.

El experimento se diseñó para evaluar la viabilidad del método de medición óptica en combinación con el proceso de carga automática a la laminadora. La prueba consistió en procesar las 35 obleas a través del sistema de medición óptica, y luego someterlas al proceso de carga automática, para evaluar el impacto de la manipulación en la integridad de las piezas.

Para determinar la eficacia y seguridad del proceso, se contabilizó la cantidad de obleas que sufrieron daños o quebraduras durante la medición y carga automática. El análisis de estos resultados permitió identificar posibles mejoras en el procedimiento, y validar si la medición óptica y la automatización de la carga pueden ser implementadas sin comprometer la integridad del material.

A continuación, se presentan los datos obtenidos en las pruebas, incluyendo la cantidad de piezas dañadas en cada etapa.

Tabla 17

Evaluación de tasa de quebraduras

Evaluación de tasa de quebraduras prototipos en físico			
N.º unidad	Cantidad de piezas procesadas	Cantidad de piezas afectadas por quebraduras	
		En medición óptica	Carga automática en laminado
1	8512	0	0
2	8499	0	0
3	8816	0	0
4	8030	0	0
5	8314	0	0
6	8749	0	0
7	8116	0	0
8	8278	0	0
9	8708	0	0
10	8036	0	0
11	8695	0	0
12	8154	0	0
13	8536	0	0
14	8299	0	0
15	8067	0	0
16	8239	0	0
17	8421	0	0
18	8253	0	0
19	8323	0	0
20	8746	0	0
21	8765	0	0
22	8244	0	0
23	8276	0	0
24	8963	0	0
25	8745	0	0
26	8234	0	0
27	8274	0	0
28	8544	0	0
29	8667	0	0
30	8754	0	0
31	8234	0	0
32	8232	0	0
33	8066	0	0
34	8921	0	0
35	8932	0	0
	295642	0%	0%
Resultado	Total piezas procesadas	Tasa quebraduras Medición óptica	Tasa quebraduras Carga Automática

Nota: Elaboración propia.

En la Tabla 17 se presenta la información relacionada con los códigos de rechazos estudiados. En la Tabla 4 se encuentra que la tasa de quebraduras total es de un 6,11%, con base en los datos históricos contra la totalidad de defectos provocados por manipulación manual.

Tabla 18

Tasa de quebraduras con base en los datos históricos

Datos históricos basados en la tabla 4	
Total procesado	Total afectado
3 856 547	235 695
Tasa de quebraduras	6,11%

Nota: Elaboración propia.

Tabla 19

Evaluación de la propuesta

Evaluación de la propuesta	
Obleas probadas	35
Obleas por quebrarse con base en la tasa de quebraduras	2,139044332
Obleas que se dañaron	0

Nota: Elaboración propia.

Con base en las pruebas con las 35 obleas, se esperaba que, al finalizar el proceso con el método manual, un total de 2.13 se hubiesen quebrado según el 6,11% calculado en la tabla anterior, pero el resultado con las 35 obleas utilizando la medición óptica y la carga automática a la laminadora fue satisfactorio, obteniendo cero fallos.

Análisis Financiero

Los datos financieros indican los valores iniciales con que cuenta la empresa, basados en el histórico del año anterior contra la inversión requerida para implementar el proyecto de la laminadora con medición automática. Para no perder de vista el enfoque del proyecto y el efecto de la implementación de la mejora, el número que dictamina financieramente el proyecto es el ingreso por defectos no generados. Además, para el cálculo se estimó un crecimiento de 3% en las ventas.

Tabla 20

Datos iniciales y ventas anuales

Datos iniciales		Datos anuales ventas	
Valor de la pieza Producida	\$ 0,15	Venta esperada	\$ 578 482
Piezas Producidas totales (Unidades)	3856547	Total en Fallos debido a manipulación manual	\$ 35 354
Piezas que se dañaron (Unidades)	235695	Venta Ganancias obtenidas restando afectación	\$ 543 128
Inversión inicial para máquina	\$ 29 196,00	Aumento de ventas anual Proyectado	3%

Nota: Elaboración propia.

Tabla 21

Cálculo de flujo

Ventas anuales		\$ 543 128	\$ 559 422	\$ 576 204	\$ 593 490	\$ 611 295
Año	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingreso por defectos no generados		\$ 35 354	\$ 36 415	\$ 37 507	\$ 38 633	\$ 39 792
Depreciación		\$ 3 981	\$ 3 583	\$ 3 185	\$ 2 787	\$ 2 389
Flujo neto efectivo operativo		\$ 31 373	\$ 32 832	\$ 34 322	\$ 35 846	\$ 37 403
Inversión inicial	\$ 29 196,00					
Flujo neto efectivo	\$-29 196,00	\$ 2 177	\$ 32 832	\$ 34 322	\$ 35 846	\$ 37 403
FLUJO NETO ACUMULADO		\$ 2 177	\$ 35 009	\$ 69 331	\$ 105 177	\$ 142 579
FLUJO NETO VALOR PRESENTE		\$ 1 979	\$ 27 134	\$ 25 787	\$ 24 483	\$ 23 224
FLUJO NETO ACUMULADO PRESENTE		\$ 1 979	\$ 29 113	\$ 54 900	\$ 79 383	\$ 102 607

Nota: Elaboración propia.

Tabla 22*Resultados financieros*

K	10,00%
Valor neto acumulado VNA	\$ 102 607
Valor actual Neto VAN	\$ 73 411
TIR	64%
Periodo de Recuperación (Años)	0,93
Periodo de Recuperación (Meses)	11,16731756
% de ganancia	251%
ID (Indice de deseabilidad) ID > 1: El proyecto es rentable	3,51

Nota: Elaboración propia.

La decisión de invertir en una máquina que reduzca los defectos por manipulación manual representa una oportunidad valiosa y necesaria para la empresa. Más allá de los números, esta inversión tiene un impacto real y directo en la calidad del producto, en la eficiencia del proceso y en la sostenibilidad del negocio.

Los resultados del análisis financiero hablan por sí solos. Con una recuperación de la inversión en menos de un año y una rentabilidad que supera con creces la inversión inicial, se confirma que el proyecto no solo es viable, sino altamente rentable. Un VAN positivo de más de \$73 000 dólares y un TIR del 64% no solo justifican la inversión, sino que la convierten en una decisión estratégica inteligente. Además, el hecho de que se obtenga una ganancia estimada del 251% deja claro que no se trata de un gasto, sino de una apuesta por el crecimiento y aumento de la calidad.

Pero la importancia de esta inversión no se limita a lo económico. Al reducir la cantidad de piezas dañadas, se mejora la calidad del producto y se minimizan las pérdidas. Esto no solo se traduce en mayores ingresos, sino también en clientes más satisfechos y en una reputación fortalecida para la empresa. Es una mejora que toca todas las áreas: desde lo técnico hasta lo humano.

También, es importante destacar que esta inversión abre la puerta a una forma de trabajo más eficiente y moderna. Permite que el personal se enfoque en tareas de mayor valor, reduce la presión sobre los procesos manuales y promueve una cultura de mejora continua. En un entorno cada vez más competitivo, dar este paso significa avanzar hacia un futuro más sólido, con procesos más confiables y con una visión a largo plazo.

Evaluación de final de los indicadores propuestos en la Tabla 1

Tabla 23

Indicadores del proceso actual y con la propuesta evaluada

Indicador	Actual		Con la propuesta electromecánica	
Cantidad piezas rechazadas en operaciones manuales / Totalidad de rechazos.	52%		0%	
Reporte por Handling Damage (daño por mal manejo en laminado) y reporte por Remap Security (remapeo de seguridad). / Totalidad de rechazos.	18%		0%	
Reporte por Broken on SPC (daño durante la medición). / Totalidad de rechazos.	34%		0%	
Piezas sin daños / piezas dañadas en proceso manual Piezas sin daños / piezas dañadas en proceso de carga automática Piezas sin daños / piezas dañadas en proceso con medición óptica sin contacto	Piezas Dañadas Proceso manual: 235 695 Laminado actual: 154057 Medición Actual: 81638	Tasa de Rechazos total: 6,11%	Piezas Dañadas Automático 0 Carga automática 0 Medición Sin contacto: 0	Tasa de Rechazos total: 0%
VAN, TIR, PR.	Pérdidas anuales por: \$-35,354		VAN: \$73,410,82 TIR: 64% PR:11 Meses	

Nota: Elaboración propia

Conclusiones

Se evaluaron las causas de los daños que provocan quebraduras en las obleas, encontrando que tanto la manipulación manual como el sistema actual de medición provocan 235,695 daños en total. Por lo tanto, se desarrolló una propuesta electromecánica que integra ambos procesos, que propone eliminar dichas fuentes de error.

Mediante el análisis de las métricas de producción históricas y el estudio de defectos, se determinó que la manipulación manual durante el proceso de laminado es una de las principales causas de daño en las obleas. Con más de 154,057 unidades rechazadas, se evidenció un impacto significativo en la eficiencia productiva y en los ingresos de la empresa.

Se identificó que el sistema actual de medición de espesor no permite una integración eficiente con el proceso de laminado, ni facilita la recopilación estructurada de datos. Este proceso, además, genera, debido a los defectos, 81,638 piezas defectuosas. Esto genera no solo retrasos, sino también inconsistencias que afectan la calidad final del producto.

Se desarrolló una propuesta de solución electromecánica automatizada, que integra los procesos de laminación y medición, asegurando un preciso control de las variables físicas, que demostró la reducción de errores en los pasos críticos, mejor trazabilidad de datos y alineación con los requerimientos específicos del proceso de producción que, su vez, elimina la producción de los defectos.

El análisis económico reflejó que el proyecto es altamente rentable. El Valor Actual Neto (VAN) asciende a \$73,410.82, la Tasa Interna de Retorno (TIR) es del 64%, y el periodo de recuperación de la inversión es de solo 11 meses. Además, el Índice de Deseabilidad

(ID) de 3,51 y una rentabilidad proyectada del 251% confirman que el proyecto no solo es viable, sino que representa una mejora estratégica y sostenible para la empresa.

Recomendaciones

Implementar el sistema electromecánico propuesto en el corto plazo, ya que se ha comprobado su viabilidad técnica y económica. Esta acción permitirá disminuir significativamente los daños por manipulación y mejorar la calidad del producto final.

Establecer un sistema de monitoreo continuo de los defectos y fallas post-implementación, con el fin de evaluar el desempeño del nuevo sistema y realizar ajustes necesarios en tiempo real.

Capacitar al personal operativo y técnico sobre el funcionamiento del nuevo sistema, promoviendo buenas prácticas en el manejo de obleas y asegurando una correcta interpretación de los datos recolectados.

Reforzar el control de calidad mediante la integración del sistema de medición con una base de datos, que permita un seguimiento detallado del espesor y estado de cada oblea, fortaleciendo la trazabilidad del proceso.

Utilizar los resultados financieros del proyecto como referencia para futuras inversiones en automatización y mejora de procesos, ya que se demuestra el valor estratégico de implementar soluciones tecnológicas en áreas críticas de producción.

Referencias bibliográficas

ACI Worldwide. (2024, 19 de julio). *Prime time for real-time global payments report* | ACI

Worldwide. https://www.aciworldwide.com/prime-time-for-real-time-report?utm_campaign=gpe-2024-bnks-rtp-global-prime-time-for-real-time-2024-web&utm_medium=press-release&utm_source=press-release

Alvarez-Bejar, G. C. (2021). *Diseño y automatización de una máquina para el conformado de estribos*. Recuperado de:

<https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/56ed2429-28c7-4375-8b58-7fc308132faa/content>

Araya-Rojas, I. (2020). *Diseño de un sistema automático para la creación y extracción de marquetas de hielo*. Recuperado de:

<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/11516>

Baca Urbina, G. (2022). *Evaluación de proyectos*. McGraw-Hill.

<https://ebooks724.utn.eloqim.com:443/?il=22469>

Barrantes-Murillo, S. (2022). *Rediseño de una máquina llenadora y dosificadora de jalea en la empresa Jaleas AltoBarrantes*. Recuperado de:

<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/13907>

Beer, F. P. (2021). *Mecánica de materiales*. McGraw-Hill Interamericana.

<https://ebooks724.utn.eloqim.com:443/?il=16359>

Darley, B., Singh, M., Santos, P., Ambrocio, E., & Tiku, S. (2014). *Reducción de fisuras en obleas de GaAs: un enfoque de automatización*. Recuperado de:

https://csmantech.org/wp-content/acfrcwdownloads/field_5e8cddf5ddd10/post_2058/016.pdf

E-Waste Monitor. (2020). *GEM 2020 - E-Waste Monitor*. Recuperado de:

<https://ewastemonitor.info/gem-2020/>

Gutiérrez Pulido, H. (2020). *Calidad y productividad*. McGraw-Hill. Recuperado de:

<https://ebooks724.utn.elogim.com:443/?il=10411>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación* (6a ed.), McGraw-Hill Interamericana Ediciones.

Hernández Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Educación.

Hernández-Marías, C. (2020) *Diseño e implementación de un sistema de control robótico delta con aplicación pick and place (recoge y posiciona) de material a granel en banda*. Recuperado de: <http://51.143.95.221/handle/TecNM/6974>

International Telecommunication Union. (2023). *Medición del desarrollo digital: datos y cifras 2023* [Archivo PDF]. Recuperado de:

<https://www.itu.int/en/ITU/Statistics/Documents/facts/FactsFigures2023.pdf>

Jin, H., & Lee, Y. (2017). *Samsung Elec to permanently halt note 7 production*. Reuters.

Recuperado de: <https://www.reuters.com/article/us-samsung-elec-smartphones-idUSKCN12B0FX>

Kaushik, B. K. (Ed.). (2018). *Nanoelectronics: devices, circuits and systems*. Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/C2016-0-04936-7>

Lauri, K. H. (2023). *Tipos de procesos de fabricación*. MRPeasy. Recuperado de:

<https://www.mrpeasy.com/blog/es/tipos-de-procesos-de-fabricacion/>

- Li, A. (2020). Apple to pay \$25 million settlement for iPhone 'touch disease'. *The Verge*. Recuperado de: <https://www.theverge.com/2020/10/1/21497018/apple-iphone-6-touch-disease-settlement>
- López, M. R., & Pérez, S. A. (2020). Industria 4.0 y su impacto en los procesos industriales. *Journal of Industrial Engineering*. <https://doi.org/10.1234/jie.2020.0045>
- Madriz, M., et al. (2022). Influencia de la intervención humana en procesos modernos de manufactura. *Tecnología en Marcha*, 35(1), 1-15. Recuperado de: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/5358
- Navidi, W. (2022). *Estadística para ingenieros y científicos*. McGraw-Hill Interamericana. <https://ebooks724.utn.elogim.com:443/?il=20755>
- Oficina de las Naciones Unidas en Ginebra. (2023, diciembre). *Más del 75% de la población mundial tiene un teléfono celular y más del 65% usa internet*. UN Geneva. <https://www.ungeneva.org/es/news-media/news/2023/12/88874/mas-del-75-de-la-poblacion-mundial-tiene-un-telefono-celular-y-mas#:~:text=Inicio-,M%C3%A1s%20del%2075%25%20de%20la%20poblaci%C3%B3n%20mundial%20tiene%20un%20tel%C3%A9fono,del%2065%25%20usa%20el%20internet>
- Olsson, J. A., Santiago, L. V., Corrado, L. J., Anocibar, H. R., & Kurtz, V. H. (2020). Susceptibilidad de componentes electrónicos a descargas electrostáticas en el modelo del cuerpo humano. *Ingenio*, 2(1), 42-53. <https://revistas.fio.unam.edu.ar/index.php/masingenio/article/view/176/960>
- Peralta-Abarca, J. (2020). Vista de industria 4.0. *Inventio*, 16(39). <https://doi.org/10.30973/inventio/2020.16.39/4> .

Rigaku. (2024). *Control de calidad y medición en la fabricación de semiconductores*.

Recuperado de: https://rigaku-com.translate.google.com/products/semiconductor-metrology?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge

SemiEngineering. (2025). *What's what in advanced packaging?* Recuperado de:

<https://semiengineering.com/whats-what-in-advanced-packaging/>

Vélez-Danel, O. (2021). *Optimización del proceso de manufactura de un sensor para la medición de CO₂ en un paciente médico para la empresa Philips Costa Rica*.

<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/12343>

WaferPro. (2024). *What is a semiconductor wafer?* Recuperado de:

<https://waferpro.com/what-is-a-semiconductor-wafer/>

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., Ye, K. (2022). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Pearson Educación.

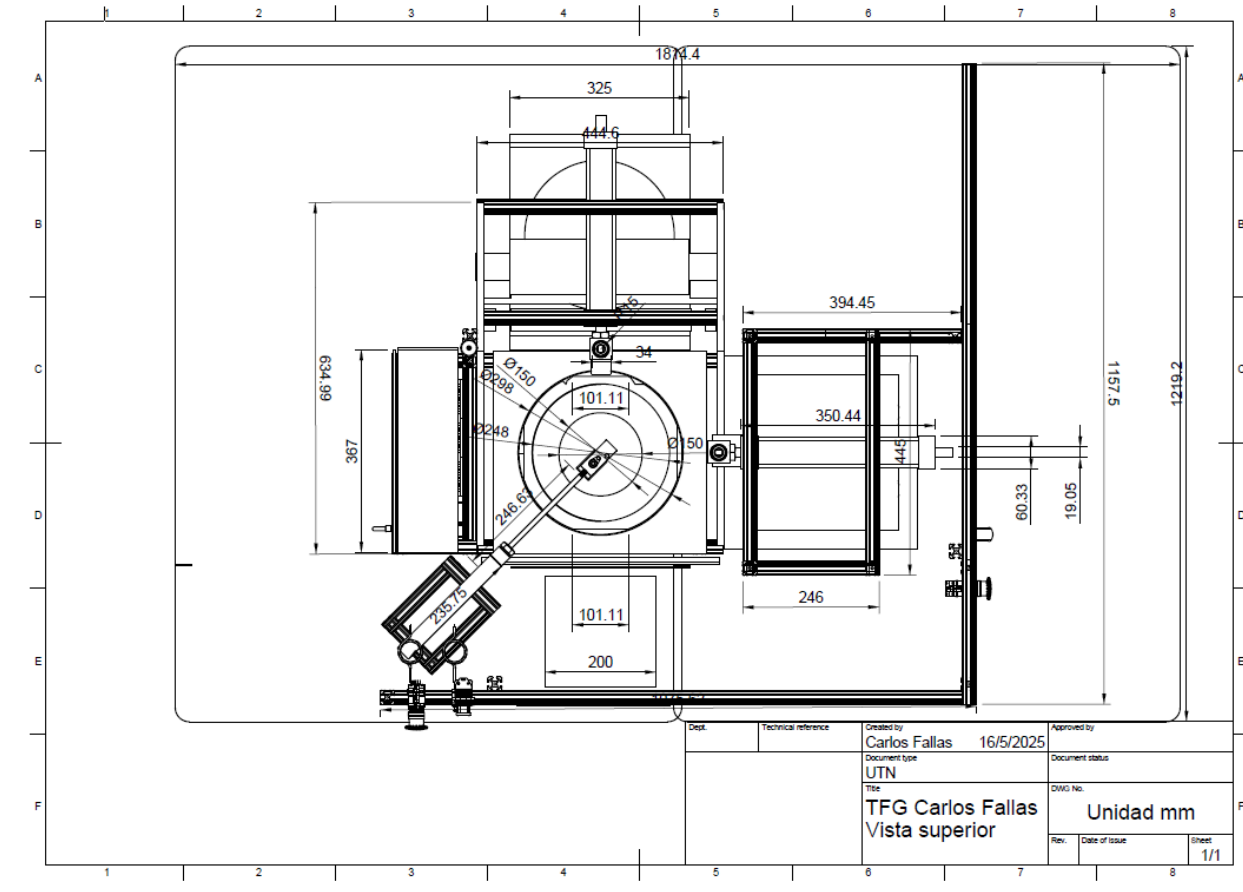
<https://ebooks724.utn.elogim.com:443/?il=25575>

Anexos

Anexo 1

Figura 74

Plano Vista Superior

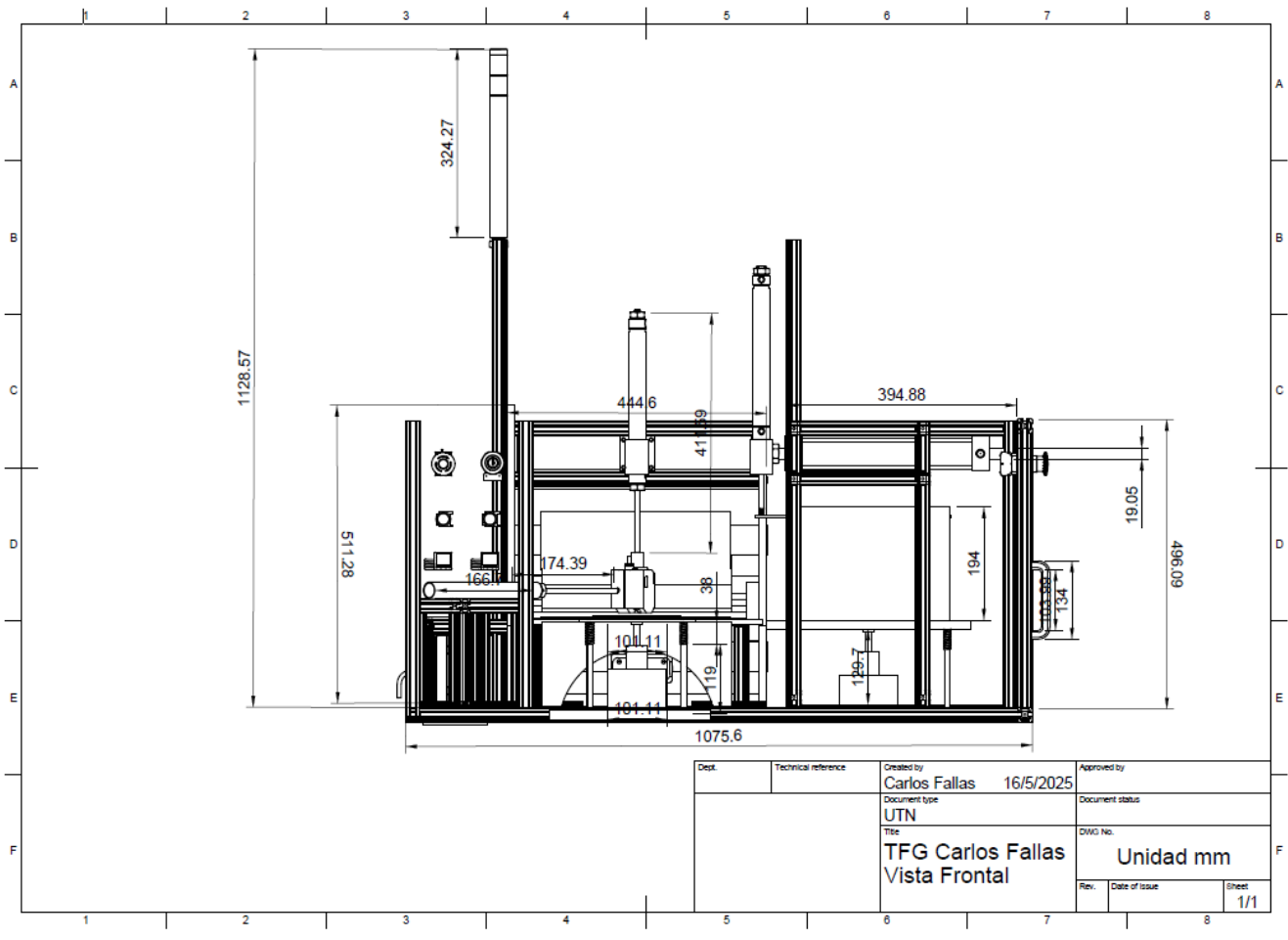


Nota: Elaboración propia.

Anexo 2

Figura 75

Plano Vista Frontal

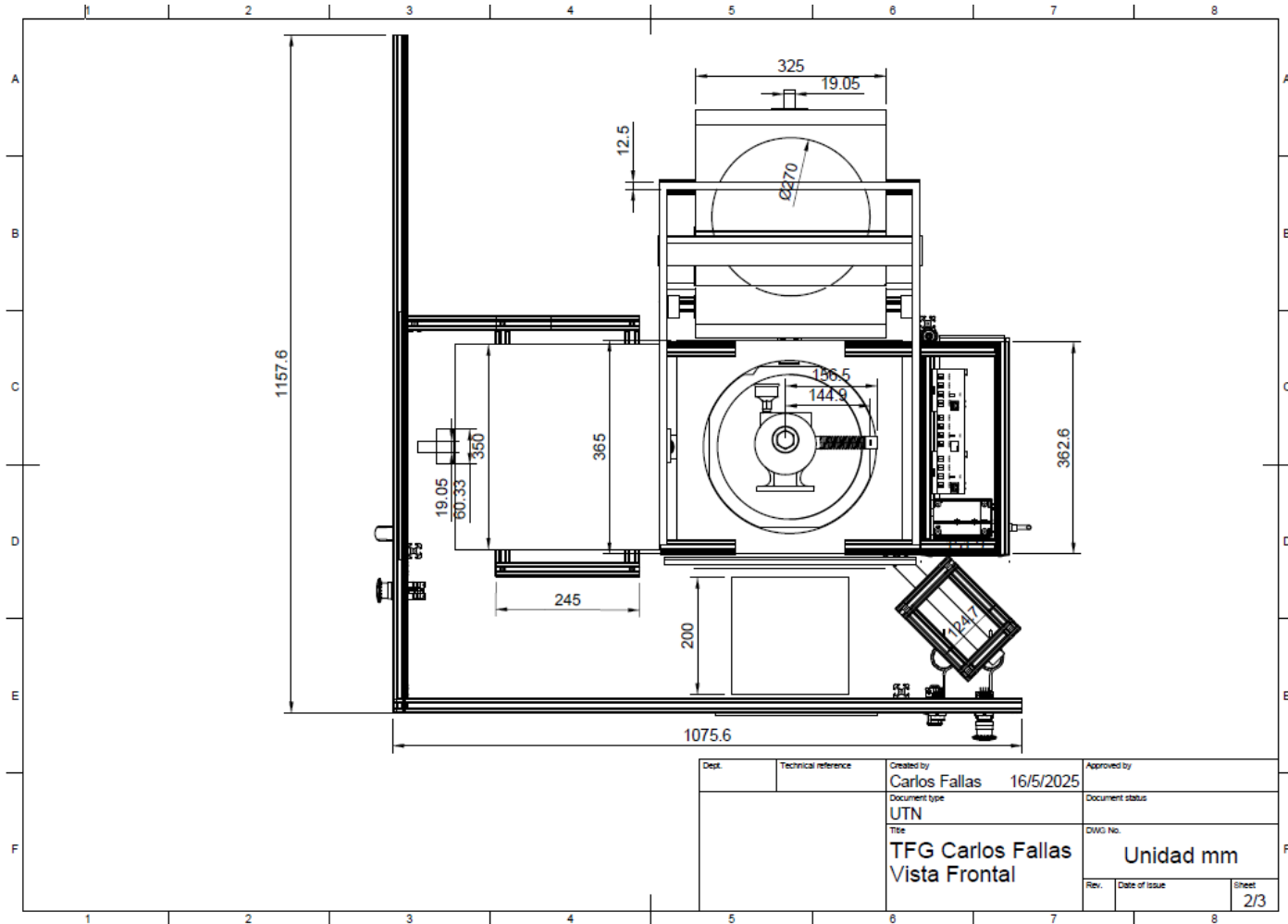


Nota: Elaboración propia.

Anexo 3

Figura 76

Plano Vista Inferior



Nota: Elaboración propia.

Anexo III

**CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA USO Y MANEJO DE LOS TRABAJOS
FINALES****DE GRADUACIÓN UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL**

Página | 37

(Trabajo Individual)

Alajuela

18/07/2025

Señores/as

Vicerrectoría de Investigación. Sistema Integrado de Bibliotecas y Recursos
Digitales

Estimados señores/as:

Yo Carlos Fallas Castro portador (a) de la cédula de identidad número 11580119 En mi calidad de autor (a) del trabajo de graduación titulada: Estudio del proceso laminado y medición de obleas en una empresa de manufactura electrónica en Heredia Costa Rica

El cual se presenta bajo la modalidad de, marque una opción:

 Proyecto de Graduación Tesis de Graduación

Presentado en la fecha 18/Julio/2025, autorizo a la Universidad Técnica Nacional, sede Central, para que mi trabajo pueda ser manejado de la siguiente manera:

Autorizo**Ver capítulo V, disposiciones finales, artículo 41 (O aquel que refiera a derechos patrimoniales)**

Marque con una X o un ✓	
Conservación de ejemplares para préstamo y consulta física en biblioteca.	X
Inclusión en el catálogo digital del SIBIREDI (Cita catalográfica)	X
Comunicación y divulgación a través del Repositorio Institucional	X
Resumen (Describe en forma breve el contenido del documento)	X
Consulta electrónica con texto protegido	X
Descarga electrónica del documento en texto completo protegido	X
Inclusión en bases de datos y sitios web que se encuentren en convenio con la Universidad Técnica Nacional contando con las mismas condiciones y limitaciones aquí establecidas.	X
Divulgación del resumen en el Repositorio UTN, con una cantidad de 200 a 500 palabras	X

Por otra parte, declaro que el trabajo que aquí presento es de plena autoría, es un esfuerzo realizado de forma personal, académica e intelectual con plenos elementos de originalidad y creatividad. Garantizo que no contiene citas, ni transcripciones de forma indebida que puedan devenir en plagio, pues se ha utilizado la normativa vigente de la American Psychological Association (APA). Las citas y transcripciones utilizadas se realizan en el marco de respeto a las obras de terceros. La responsabilidad directa en el diseño y presentación son de competencia exclusiva, por tanto, eximo de toda responsabilidad a la Universidad Técnica Nacional.

Consciente de que las autorizaciones no reprimen mis derechos patrimoniales como autor del trabajo. Confío en la que Universidad Técnica Nacional respete y haga respetar mis derechos de propiedad intelectual.

Firma del estudiante



Cédula: 115830119

Día: 18/07/2025