



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Reingeniería e Industrialización
de Sistemas de Prensado para la
Producción de Plastimadera de
Grado Industrial**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Luis Norberto Oviedo Mendoza

ASESOR DE INFORME

Dr. Fernando Velázquez Villegas



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado REINGENIERIA E INDUSTRIALIZACION DE SISTEMAS DE PRENSADO PARA LA PRODUCCION DE PLASTIMADERA DE GRADO INDUSTRIAL que presenté para obtener el título de INGENIERO MECATRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.



LUIS NORBERTO OVIEDO MENDOZA
Número de cuenta: 318029030

Índice

Agradecimientos.....	1
1. Introducción.....	2
1.1. Cumplimiento de propiedad intelectual y licenciamiento.....	3
2.1. Organigrama.....	6
2.2. Perfil de puesto.....	6
3. Antecedentes.....	7
3.1. Alcance multidisciplinario.....	9
4. Desarrollo.....	9
4.1. Validación de insumos y reingeniería paramétrica en CAD.....	12
4.2. Manufactura e integración mecánica.....	12
4.2.1. Integración térmica y configuración eléctrica.....	17
4.2.2. Estrategia de aislamiento y contención termodinámica.....	19
4.2.3. Integración mecánica de alta carga y montaje estructural.....	21
4.2.4. Sistema de control y gestión de potencia en tablero.....	22
4.3. Diagnóstico técnico, evidencia de fallas operativas y propuesta de mejora.....	23
4.3.1. Diagnóstico de vulnerabilidad eléctrica y rediseño de distribución de potencia... 23	
4.3.1.1. Conductores eléctricos.....	24
4.3.1.2. Relevadores de estado sólido (SSR).....	27
4.3.1.3. Interruptor termomagnético.....	27
4.3.1.3. Validación virtual y correlación con el comportamiento experimental.....	30
4.3.1.4. Propuesta de mejora para la distribución eléctrica.....	33
4.3.2. Diagnóstico de vulnerabilidad estructural y rediseño de distribución de carga mecánica.....	35
4.3.2.1. Propuesta de mejora para la parte mecánica.....	45
4.3.3. Diagnóstico de vulnerabilidad térmica.....	52
4.3.3.1. Análisis de las tendencias térmicas.....	54
4.4. Gestión de contingencias, reingeniería y entrega de producto final.....	57
4.4.1. Diseño estructural de bancas.....	58
4.4.2. Ensamble colaborativo e integración final.....	60
4.4.3. Logística de entrega y cierre de proyecto en Xochimilco.....	60
5. Conclusiones.....	61
6. Bibliografía.....	64

Agradecimientos.

A mi padre y a mi madre, con todo mi amor, admiración y gratitud eterna. Sin su presencia, su guía y su ejemplo diario, simplemente no sería nada de lo que soy hoy; este logro es tanto mío como suyo, y se merecen todo el reconocimiento del mundo. Desde que era pequeño, me enseñaron con hechos, y no solo con palabras, que las metas grandes requieren esfuerzo y perseverancia. Verlos salir adelante ante cualquier adversidad fue la lección de ingeniería más valiosa que pude haber recibido, aprendiendo a ser resiliente y a entender que soy capaz de enfrentar cualquier reto porque así lo vi en casa. Siempre confiaron en mí, son el pilar que ha sostenido mis proyectos y el apoyo incondicional en los momentos de mayor presión, apoyándome en todas mis metas de manera incondicional, entregándolo todo sin reservas y sin esperar nada a cambio. No hay palabras, ni título universitario suficiente, para expresar el orgullo absoluto de ser su hijo. Solo quiero recordarles que los amo con todo mi corazón y que este paso es el reflejo de su extraordinario trabajo como padres.

A mi hermana, mi guía, mi mejor amiga y mi compañera incondicional de vida. Gran parte de mi esencia, de mis valores y de la persona en la que me he convertido se lo debo a ella. Ha estado a mi lado en cada paso de este trayecto, celebrando mis victorias y sosteniéndome en los momentos difíciles. Agradezco infinitamente su capacidad para escucharme, sus consejos oportunos que tantas veces me devolvieron la claridad, y el haberse convertido en la cómplice absoluta de cada uno de mis sueños y metas. Su respaldo constante ha sido mi refugio seguro y el impulso indispensable para mantener el enfoque y llegar con éxito al final de esta etapa académica.

A mi asesor, el doctor Fernando Velázquez, por su invaluable dirección técnica y por compartir conmigo su conocimiento. Más allá de su rigor académico, agradezco profundamente su empatía, calidez humana y el tiempo para escuchar mis metas profesionales. Sus palabras de apoyo al confiarle mi visión de convertirme en empresario fueron un pilar fundamental que me impulsó a iniciar este camino con absoluta determinación.

Al ingeniero Héctor Ortiz, por su confianza y por volverme un mentor para mi desarrollo como emprendedor, como ingeniero y como persona. Le agradezco profundamente su generosidad al compartir sus propias vivencias y retos, esto me permitió delinear y dar estructura a los cimientos de mi propia empresa. Gracias también por abrirme las puertas de este proyecto; una experiencia práctica invaluable que me ha aportado las herramientas para crecer dentro de la industria.

1. Introducción.

El presente reporte abarca las actividades profesionales realizadas durante el periodo del 1 de septiembre de 2025 al 1 de marzo de 2026, desempeñadas bajo el cargo de Diseñador Mecánico en el departamento de Innovación de la empresa Tecnologías Rennueva S.A. de C.V. Este documento detalla el desarrollo y optimización de la Prensa Térmica (Sheetpress) y su papel crítico en la creación de una nueva vertical de negocio enfocada en la producción de mobiliario urbano de plastimadera. Bajo una lógica de enfoque estratégico, la dirección priorizó la captura de una ventana de oportunidad comercial sobre la ingeniería de detalle inicial. Este enfoque estratégico de costo de oportunidad permitió a la organización posicionarse con velocidad en el sector del reciclaje y la transformación sustentable de plásticos, pero a su vez generó una de las deudas técnicas más complejas del proyecto, la cual se manifestó mediante fallas estructurales y operativas severas durante la puesta en marcha real del equipo.

La estrategia de comercialización se ejecutó a través de la creación del programa corporativo Mete gol por el ambiente, una iniciativa desarrollada por la empresa en conjunto con el Gobierno de la Ciudad de México, la cual se alineó estrechamente con la convocatoria federal emitida por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) a través de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA). En el marco de la Copa Mundial de la FIFA 2026, la administración pública y la iniciativa privada trabajaron en un modelo de cooperación. El modelo buscó promover la economía circular, mejorar la gestión de residuos y recuperar los espacios públicos. Con el vínculo institucional, la organización Tecnologías Rennueva cumplió su compromiso de mejora ambiental, valorando e integrando residuos plásticos para fabricar infraestructura urbana sostenible.

Este compromiso institucional se llevó a cabo mediante el diseño, fabricación y aporte de 100 bancas urbanas, proyectadas bajo una arquitectura híbrida de materiales. La estructura principal de las bancas se diseñó utilizando perfiles de Perfil Tubular Rectangular (PTR) de acero estructural para garantizar la rigidez mecánica, mientras que para las superficies de contacto se utilizaron tableros de plastimadera hechos de polietileno reciclado de alta densidad, material obtenido del procesamiento de descarte de plásticos en planta.

La proyección logística y operativa del proyecto determinó que estos activos sustentables fueran destinados a los planes de movilidad y mejoramiento del espacio público en la Alcaldía Xochimilco, definiendo como sitio de implementación las zonas turísticas de gran afluencia localizadas en los embarcaderos de Cuemanco.

El estricto cronograma de la convocatoria local impuso un ritmo de manufactura acelerado. Esto motivó el inicio directo de la producción en planta para capturar de

manera oportuna un 95% de participación de mercado en la vertical de mobiliario sustentable, priorizando la entrega inmediata del equipamiento urbano. Este ritmo de manufactura apresurada permitió identificar tempranamente importantes áreas de mejora en la rigidez del bastidor, así como en la distribución eléctrica y la homogeneidad térmica del sistema, tales observaciones de campo justificaron el desarrollo de simulaciones detalladas mediante Ingeniería Asistida por Computadora (CAE) para comprender con precisión el origen de las fallas operativas y, posteriormente, proponer las adecuaciones estructurales y de potencia definitivas.

Para ofrecer una perspectiva clara del trabajo de ingeniería y gestión realizado, este documento estructura de manera cronológica el proceso de evolución técnica y el desarrollo del producto final. El cuerpo del reporte se despliega metodológicamente iniciando con una descripción breve de la manufactura inicial de la máquina, donde se detalla el ensamble ejecutado con base en los modelos de código abierto de *Precious Plastic* bajo las variables de materiales, conexiones de potencia y tiempos que determinó la empresa.

Posteriormente, se aborda el diagnóstico técnico y evidencia de fallas operativas, apartado enfocado en el levantamiento en campo de las respuestas estructurales, los balances de voltaje y los perfiles térmicos observados en el taller durante la operación en tiempo real. En esta misma sección, cada anomalía detectada se justifica de manera teórica y se consolida mediante el uso de herramientas CAD/CAE, en el caso específico del comportamiento térmico, este se analiza a través de simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para comparar directamente los resultados numéricos con el escenario de la vida real. Estas simulaciones computacionales permiten comprender los fenómenos multifísicos de la máquina, logrando replicar digitalmente las condiciones observadas en la realidad y validando las variables de distribución de esfuerzos y caídas de potencial que originaron cada fallo.

Una vez que se identificaron las causas fue posible presentar una propuesta de mejora. En la sección correspondiente se plantean las soluciones técnicas necesarias y se aborda cómo se desarrollaron los rediseños a fin de optimizar de forma definitiva la rigidez mecánica y la eficiencia eléctrica, garantizando la integridad operativa y el correcto desempeño de la prensa.

1.1. Cumplimiento de propiedad intelectual y licenciamiento.

Este reporte muestra el proceso técnico seguido para la creación de la prensa térmica Sheetpress, cuyos diseños mecánicos y modelos de código abierto desarrollados por la comunidad global Precious Plastic. Dichos materiales originales se encuentran distribuidos bajo la licencia internacional Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 (CC BY-SA 4.0).

En estricto cumplimiento de los términos legales de dicha licencia, se hace constar lo siguiente:

- **Atribución:** Se otorga el crédito correspondiente a *Precious Plastic* como creador de los diseños base para la configuración del espacio de trabajo y ensamble de la prensa térmica (*Sheetpress*). El material original y sus librerías de soporte fueron consultados y descargados de manera oficial a través del siguiente enlace: <https://community.preciousplastic.com/library/set-up-a-sheetpress-workspace>. Esta mención se realiza a título de reconocimiento y no implica en ningún momento que los licenciados originales avalen, respalden o tengan relación con el uso, optimizaciones o conclusiones presentadas en este documento.
- **Indicación de Modificaciones:** De acuerdo con los términos de la licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0, se declara que el modelo original se rediseñó a los requerimientos operativos de la empresa, asimismo a la disponibilidad de suministros nacionales. Las modificaciones principales comprenden:
 - La reingeniería general de la estructura de la maquinaria, para adaptarla a las necesidades de producción en planta.
 - La tropicalización del sistema eléctrico, basado en suministros nacionales y la reconfiguración de las conexiones de potencia al estándar de tensión local en especificaciones nacionales.
 - La omisión del mecanismo de amortiguamiento contemplado en el modelo original, el cual no fue incorporado en esta versión.
 - El cambio en el diseño de los cortes láser para la fabricación de los componentes planos.
 - La selección y sustitución de materias primas comerciales, adaptando los perfiles estructurales a los estándares comerciales existentes en México y realizando un cambio de material en la plancha de aluminio.
- **Cláusula CompartirIgual:** Las intervenciones y modificaciones al material original, y en cumplimiento con la licencia CC BY-SA 4.0, se indexan y distribuyen bajo el mismo permiso planos, rediseños y/o cualquier contribución técnica derivada de la prensa térmica. Esta licencia garantiza que las modificaciones mecánicas y eléctricas permanezcan accesibles de forma libre para la comunidad global, prohibiendo la aplicación de cualquier medida tecnológica o término legal que limite los derechos que la licencia otorga.

2. Descripción de la empresa

Tecnologías Rennueva S.A. de C.V. es una empresa mexicana de base tecnológica cuyo núcleo fundacional reside en la innovación y la ingeniería aplicada al desarrollo sustentable. La organización fue concebida en junio de 2013 como una iniciativa multidisciplinaria gestada dentro de la Sociedad Estudiantil de Energía y Medio

Ambiente (SOEMA) en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), integrando desde su origen conocimientos técnicos de diseño mecánico, mecatrónica y ciencia de materiales para resolver problemáticas ambientales complejas a través de la tecnología. Bajo la misión rectora de “Hacer un México Circular”, la empresa se constituyó formalmente en 2014, vinculando estratégicamente a la sociedad, el gobierno y la industria con el objetivo de proteger la Tierra a través del mejoramiento ambiental y el desarrollo de soluciones técnicas nacionales

En un inicio, Rennueva se colocó como pionera en Latinoamérica al crear una tecnología especializada en el procesamiento de Poliestireno Expandido (EPS o unicel). Este avance técnico se consolidó con el desarrollo del prototipo REPS-01, una maquinaria diseñada para transformar el material posconsumo en pellets de poliestireno (PS) de alta calidad en un solo paso. Siendo una maquinaria capaz de reintegrar el residuo a la cadena de valor industrial y lograr una reducción de la huella de carbono del material de hasta un 90% al evitar que termine en rellenos sanitarios.

Con el éxito de esta primera implementación tecnológica, la empresa inició la primera planta de reciclaje de unicel en América Latina, ubicada en la Alcaldía Cuauhtémoc de la Ciudad de México. A la par la organización fortaleció su marco normativo obteniendo el primer plan de manejo federal autorizado por la SEMARNAT, lo que permitió establecer protocolos estandarizados para disminuir el impacto ambiental de los polímeros una vez terminada su vida útil. Así mismo, Rennueva incrementó su alcance mediante la obtención del plan de manejo de competencia local, consolidándose formalmente para la recolección, transporte, acopio, almacenamiento y tratamiento de materiales que incluye PET, polietilenos de alta y baja densidad (HDPE y LDPE), polipropileno (PP) y poliestireno rígido.

En el año 2021 la organización comenzó con una etapa de infraestructura con la apertura de una red de puntos de acopio abiertos al público en diversas alcaldías de la capital, como Álvaro Obregón, Gustavo A. Madero y Miguel Hidalgo. Este avance operacional fue acompañado con el lanzamiento de proyectos de alto impacto social, como el primer museo móvil interactivo de reciclaje, y soluciones digitales como la plataforma Desdelivery, un servicio orientado a la recolección de residuos a domicilio a través de aplicaciones móviles.

Actualmente, Rennueva trasciende el modelo tradicional de acopio para ofrecer una consultoría integral que abarca desde la auditoría y gestión ambiental hasta la medición de huella de carbono y el seguimiento al cumplimiento regulatorio. Toda esta trayectoria, que parte de la investigación académica, da como resultado el posicionamiento de Rennueva como una institución formal con la capacidad de la gestión ambiental y regulatoria en la Ciudad de México (CDMX), definiendo la naturaleza de la empresa como un organismo generador de tecnología eficiente y sustentable. El desarrollo constante de nuevas herramientas técnicas y la

optimización de procesos de manufactura bajo una filosofía de mejora continua constituyen el antecedente estratégico que permite a la organización enfrentar nuevos retos de ingeniería enfocados en el cierre de ciclos de materiales en territorio nacional.

2.1. Organigrama.



Fig. 1. Organigrama de la empresa

2.2. Perfil de puesto.

Puesto: Diseñador mecánico

Departamento: Innovación

El diseñador mecánico debe ser una persona analítica, proactiva, organizada y resolutiva, abierta a poder ver y atacar las problemáticas de diseño y manufactura desde diferentes ángulos.

Se busca que el encargado de este puesto tenga capacidad de distribuir su atención en diferentes actividades, dado que la mayoría de las veces hay varias etapas de desarrollo, fabricación y pruebas de prototipos llevándose a cabo al mismo tiempo. Debe contar con una amplia capacidad de administrar y organizar correctamente el

tiempo porque es parte fundamental para el cumplimiento de los cronogramas de los proyectos. De igual forma, se requiere de un profesional con una sólida formación en ingeniería mecatrónica, mecánica y de manufactura, ya que es parte del equipo encargado de desarrollar y optimizar los proyectos, así como la maquinaria destinada al reciclaje.

Durante este periodo se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Participar en el análisis y validación técnica a través de pruebas operativas con polímeros (HDPE y PP), asegurando el desempeño del equipo en condiciones críticas de temperatura y presión acorde con las necesidades de la empresa.
- Desarrollar simulaciones multifísicas en ensambles críticos, garantizando la integridad estructural, la eficiencia térmica y el funcionamiento óptimo de la parte eléctrica en el desarrollo de productos.
- Elaborar y dar continuidad a la planimetría técnica detallada a los modelos 3D de piezas y conjuntos, con el objetivo de definir tanto las tolerancias críticas como la documentación necesaria para asegurar la calidad de fabricación.
- Control de la compra de materiales y contacto con proveedores para tercerizar insumos, cumpliendo las especificaciones de diseño.
- Desarrollar modelos 3D y supervisar procesos de manufactura, tales como el corte láser CNC, soldadura industrial (MIG/MAG) y las operaciones de mecanizado.
- Encargado de trabajar e integrar el flujo de trabajo en Router CNC.
- Incorporación de componentes eléctricos y de control de potencia para sistemas trifásicos, garantizando un funcionamiento eficiente y seguro.
- Adecuación de la infraestructura eléctrica del taller de trabajo, cambiando los conductores y fusibles por interruptores termomagnéticos dimensionados para el amperaje de la prensa térmica.
- Proponer y probar materiales alternativos, para reducir los costes de fabricación y salvaguardar la viabilidad económica del proyecto sin perjudicar el factor de seguridad.
- Diseñar y proponer soluciones estructurales para estaciones de recolección de residuos integradas en los planes de manejo para empresas nacionales e internacionales, asegurando que los sistemas de acopio cumplan con requisitos de alta funcionalidad logística, durabilidad y estándares estéticos corporativos.

3. Antecedentes.

A fin de contextualizar el desarrollo de los proyectos en el Departamento de Innovación es indispensable resaltar su impacto estratégico y los retos técnicos que definen la labor de ingeniería. Mi desempeño como diseñador mecánico en actuar

como el eje conector entre el diseño asistido por computadora y la implementación física en planta, siguiendo la metodología operativa que se ilustra a continuación:



Fig. 2. Perfil profesional y competencias técnicas requeridas para el puesto de diseñador mecánico.

El Departamento de Innovación se ha posicionado como el núcleo de Tecnologías Rennueva. Su tarea va más allá del desarrollo técnico al facilitar el paso de la empresa de un modelo de servicio, fundamentado en el manejo de residuos, a un negocio de manufactura industrial y de consultoría técnica altamente especializada. Esta área tiene como objetivo proveer a la organización de propuestas tecnológicas que le permitan no solo gestionar el residuo, sino convirtiéndolo en activos comerciales, liderando este proceso.

Como motor de ingeniería corporativa, el departamento opera como un socio estratégico para la iniciativa privada. Su labor consiste en instrumentalizar los compromisos ambientales de empresas externas que operan bajo planes de manejo específicos; cuando una organización requiere recolectar y procesar volúmenes masivos de materiales (como PET o polipropileno), el Departamento de Innovación diseña y fabrica la infraestructura logística necesaria. Estas soluciones no se limitan a contenedores genéricos, sino que son sistemas de recolección de alta ingeniería que equilibran una robusta funcionalidad industrial con una estética alineada a la identidad corporativa del cliente.

La creación de este departamento responde a la oportunidad de capitalizar las potenciales oportunidades en mercados basados en la economía circular, donde la

respuesta inmediata es el factor determinante para el éxito. Es así como el Departamento de Innovación prioriza el despliegue de soluciones que permitan cumplir cuotas de mercado dominantes.

Siendo en esencia el Departamento de Innovación el responsable de garantizar que la empresa evolucione constantemente, transformando planes de manejo en soluciones tangibles que generan nuevas fuentes de ingresos y posicionamiento institucional.

3.1. Alcance multidisciplinario.

A diferencia de un área técnica tradicional, el Departamento de Innovación fusiona los conocimientos de ingeniería mecánica con los de diseño industrial, desarrollando una experiencia de usuario eficaz y una imagen profesional hacia el cliente. Desde esta perspectiva, el departamento gestiona diversos proyectos estratégicos:

- Desarrollo del museo móvil Interactivo de reciclaje, cuyo objetivo es promover la educación ambiental de manera dinámica en distintas comunidades.
- Diseño y la fabricación de vehículos de carga ligera, como el “QUAD”, una bicicleta cuadrúpeda, equipada con compartimentos de almacenamiento para optimizar la recolección de materiales reciclables en áreas urbanas.
- Diseño y manufactura de contenedores especializados para planes de manejo de residuos que se adapten a las necesidades estéticas y operativas de cada cliente.
- Desarrollo de maquinaria para procesamiento de materia prima reciclada con fines de aplicaciones reales asegurando que la materia prima se transforme en productos finales útiles para la industria o la sociedad, cerrando así el ciclo técnico del material.

4. Desarrollo.

Este apartado describe la ejecución técnica, tropicalización y reingeniería aplicada a los proyectos clave del departamento. Se documenta el proceso de validación mediante herramientas CAD/CAE y manufactura avanzada, transformando prototipos operativos en soluciones industriales.



Fig. 3. Estructura cronológica y etapas de desarrollo del proyecto industrial.

A fin de brindar un contexto técnico claro, resulta indispensable contrastar los insumos teóricos del proyecto original frente a las materias primas reales implementadas en la planta. Cabe destacar que la adquisición y selección de estos materiales fue un proceso previo a mi incorporación, definido enteramente por la dirección de Tecnologías Rennueva. A partir del desglose detallado en la *Tabla 1*, se presentan a continuación las diferencias específicas encontradas entre las especificaciones de diseño de *Precious Plastic* y los componentes adquiridos por la empresa, clasificadas por su categoría y asociadas a su número de fila correspondiente:

Vigas y láminas

- **Fila 1:** Reducción del espesor de la lámina de acero al carbón calibre 16 por una lámina lisa negra en calibre 26.
- **Fila 2:** Reducción del espesor de la lámina de acero calibre 14 por una lámina lisa negra en calibre 22.
- **Fila 3:** Se modifica en el diámetro y la cédula de la tubería, sustituyendo de un tubo galvanizado de 3/4" por tubo negro de 1 1/4" en cédula 30.
- **Fila 4:** Se modifica en la especificación de la tubería, sustituyendo de un tubo de cédula 80 de 1" por tubo negro de 1" en cédula 40.
- **Fila 6:** Se modifica en el espesor y material de la placa de prensado, sustituyendo de una placa de aluminio 6061 fresado calibre 3/8" por una placa de acero al carbón A36 fresado calibre 1/4".
- **Fila 7:** Reducción en el calibre del perfil tubular de 3" x 1 1/2", disminuyendo de calibre 11 a calibre 14.
- **Fila 8:** Reducción en el calibre del perfil tubular de 4" x 2", disminuyendo de calibre 11 a calibre 14.

Electrónica

- **Fila 12:** Modificación al voltaje del cartucho calefactor de 12 x 80 mm y 310 W, se cambió a 110 Volts el componente de 220 Volts.
- **Fila 14:** Incremento de la capacidad de corriente del disyuntor termomagnético de 32 Amperes a 63 Amperes.
- **Fila 15:** Omisión en la incorporación de la clavija macho de 32 Amperes.
- **Fila 16:** Incremento de la capacidad de corriente del relevador de estado sólido de 40 Amperes a 80 Amperes.
- **Fila 20:** Incremento de calibre del conductor principal de calibre 10 AWG a calibre 8 AWG.
- **Fila 21:** Reducción de calibre del conductor térmico de calibre 10 AWG a calibre 14 AWG.
- **Fila 28:** Sustitución en la implementación de un disipador para relevador de estado sólido por un ventilador de 110 Volts.

Accesorios

- **Fila 34:** Sustitución de muelle de compresión por un conjunto muelle-amortiguador comercial de una bicicleta.

	CLASIFICACIÓN	PRECIOUS PLASTIC	RENNUEVA
1	Vigas y Láminas	Lámina acero al carbón calibre 16	Lámina lisa negra 4X8 en calibre 26
2	Vigas y Láminas	Lámina acero al carbón calibre 14	Lámina lisa negra 8X10 en calibre 22
3	Vigas y Láminas	Tubo Negro o Tubo Galvanizado de 3/4"	Tubo negro de 1-1/4 en cédula 30
4	Vigas y Láminas	Tubo Industrial Cédula 80 de 1"	Tubo negro de 1" en cédula 40
5	Vigas y Láminas	Placa acero al carbón de 1/4" cortes laser	Placa acero al carbón de 1/4" cortes laser
6	Vigas y Láminas	Placa de aluminio 6061 fresado calibre 3/8" plancha	Placa de acero al carbón A36 fresado calibre 1/4" plancha
7	Vigas y Láminas	Perfil tubular 3" X 1 1/2" Cal.11	Perfil tubular 3" X 1 1/2" Cal.14
8	Vigas y Láminas	Perfil tubular 4" X 2" Cal.11	Perfil tubular 4" X 2" Cal.14
9	Vigas y Láminas	Barra plana de aluminio 6061-T6 2" X 1"	Barra plana de aluminio 6061-T6 2" X 1"
10	Electrónica	Tubo termoencogible de teflón 1/4"	Tubo termoencogible de teflón 1/4"
11	Electrónica	Tubo termoencogible de teflón 1/8"	Tubo termoencogible de teflón 1/8"
12	Electrónica	Cartucho calefactor 220V / 300W (12 X 80 mm)	Cartucho calefactor 110V / 300W (12 X 80 mm)
13	Electrónica	Terminal cerámica de 32 A	Terminal cerámica de 52 A
14	Electrónica	Disyuntor termomagnético 32 A	Disyuntor termomagnético 63 A
15	Electrónica	Clavija macho de 32 A	—
16	Electrónica	Relevador de Estado Sólido de 40 A	Relevador de Estado Sólido de 80 A
17	Electrónica	Palo de emergencia	Palo de emergencia
18	Electrónica	Terminal de horquilla azul	Terminal de horquilla azul
19	Electrónica	Terminal de horquilla rojo	Terminal de horquilla rojo
20	Electrónica	Cable multiconductor Cal. 10 AWG	Cable multiconductor Cal. 8 AWG
21	Electrónica	Cable para alta temperatura	Cable alta temperatura Cal. 14 AWG
22	Electrónica	Termopar tipo K	Termopar tipo K
23	Electrónica	Glándula para cable M10	Glándula para cable M10
24	Electrónica	Glándula para cable M25	Glándula para cable M25
25	Electrónica	Pirómetro PID	Pirómetro PID
26	Electrónica	Terminal de anillo	Terminal de anillo
27	Electrónica	Conmutador rotativo	Conmutador rotativo
28	Electrónica	Disipador para relevador de estado sólido	Ventilador 110 V
29	Accesorios	Gato hidráulico Long Ram de 8 toneladas con ojo	Gato hidráulico Long Ram de 8 toneladas con ojo
30	Accesorios	Pintura negra para alta temperatura	Pintura negra para alta temperatura
31	Accesorios	Cinta de fibra de vidrio	Cinta de fibra de vidrio
32	Accesorios	Primer para alta temperatura	Primer para alta temperatura
33	Accesorios	Pasta térmica	Pasta térmica
34	Accesorios	Muelle de compresión	Muelle-amortiguador comercial de bicicleta

Tabla 1. Análisis comparativo entre la lista de materiales de *Precious Plastic* y los componentes implementados por *Tecnologías Rennueva*.

Partiendo del inventario real y de las modificaciones de componentes previamente detalladas, la etapa inicial de la prensa térmica se rigió por la estrategia de ejecutar una producción acelerada. Con el objetivo de capturar un 95 % de participación de mercado, la manufactura se basó estrictamente en el diseño de código abierto de la comunidad *Precious Plastic*, utilizando las variables de materiales y los cronogramas dictados por la dirección de la empresa para cumplir en tiempo con el compromiso de las 100 bancas urbanas.

Mi labor profesional en esta etapa consistió en la supervisión de taller y la ejecución técnica al llevar los modelos virtuales a una estructura física funcional. Se priorizó el uso de materiales disponibles para reducir el tiempo de entrega, tomando en cuenta la omisión de análisis de ingeniería de detalle en favor del cumplimiento de las metas comerciales de la iniciativa *Mete gol por el ambiente*.

4.1. Validación de insumos y reingeniería paramétrica en CAD.

La fase inicial de manufactura comenzó con la gestión del material preseleccionado por la empresa. Mi intervención en esta etapa fue fundamental para garantizar que el diseño teórico de *Precious Plastic* fuera ejecutable con los insumos físicos disponibles en planta, para lograrlo se siguió este protocolo:

- Levantamiento dimensional y modelado: Realicé la supervisión técnica de la recepción de materiales, procediendo de inmediato a un levantamiento físico de medidas reales. Estos datos se integraron en un modelo paramétrico en SolidWorks, donde ejecuté un redimensionamiento integral de la maquinaria. Este proceso permitió generar planos a detalle de manufactura de forma acelerada a fin de evitar cuellos de botella en el cronograma de producción.

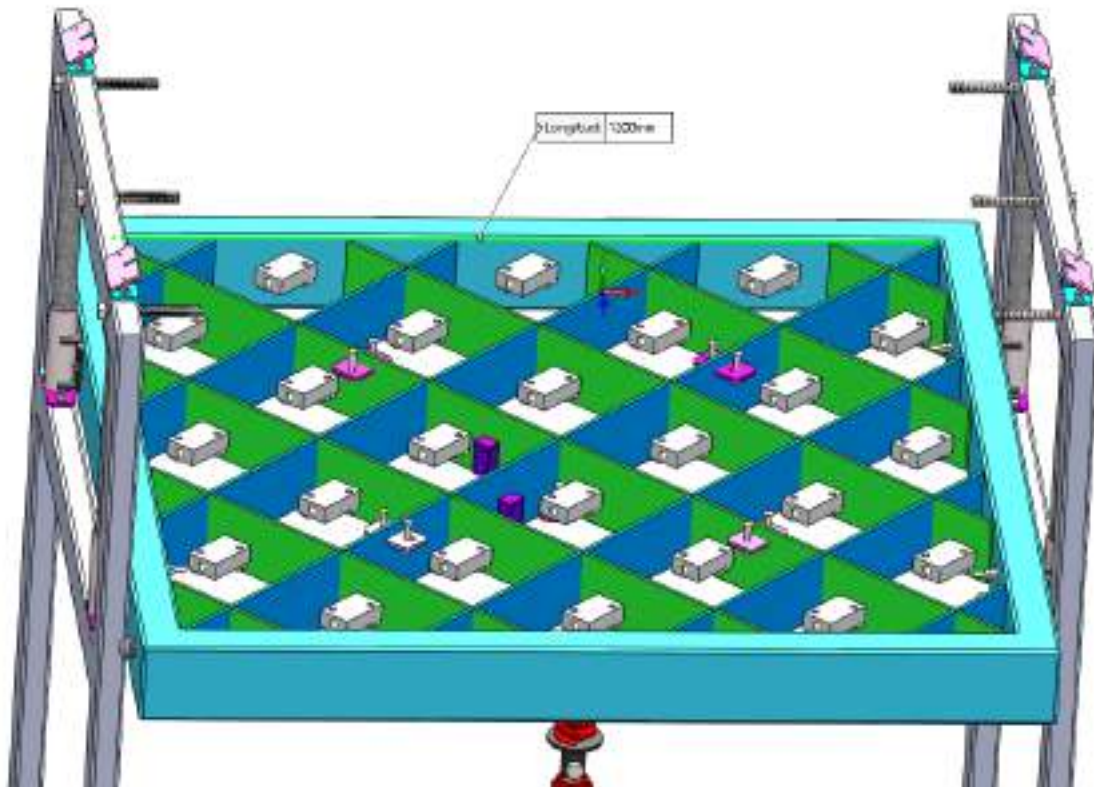


Fig. 4. Levantamiento dimensional y registro geométrico para la adaptación técnica de la prensa térmica.

- Optimización para corte láser: Me encargué de adaptar las dimensiones del modelo a los componentes de corte láser, realizando la selección del tipo de placa y material estructural. Durante este proceso, redimensioné los componentes dentro del entorno de SolidWorks y generé los archivos DXF necesarios para el control numérico.

4.2. Manufactura e integración mecánica.

La ejecución física del proyecto inició al concluir la validación en el entorno virtual. Este cambio del modelo digital al taller constituyó un proceso de reingeniería constante, por lo que se aplicaron criterios de manufactura y supervisión técnica directa para evitar discrepancia entre los insumos teóricos y los insumos físicos.

La habilitación del bastidor comenzó con el corte de los perfiles PTR de acero estructural. En esta etapa, supervisé meticulosamente cada medida y ángulo de inglete para garantizar la ortogonalidad de la estructura. Este control dimensional resultó crítico para prevenir desviaciones acumuladas que pudieran comprometer el paralelismo de las planchas de presión en las etapas posteriores. Para asegurar la integridad mecánica en los nodos de mayor carga de la prensa térmica, la empresa disponía de dos tecnologías de unión, por lo que procedí a realizar pruebas experimentales de penetración y resistencia en probetas para determinar el proceso más efectivo.

En la primera evaluación se utilizó el proceso Soldadura por Arco Eléctrico con Gas Metal (MIG). Para ello, se ajustó minuciosamente el flujo y la cantidad de gas protector recomendada por el fabricante con el fin de garantizar la estabilidad óptima del arco eléctrico. Sin embargo, tras configurar el equipo tanto en dichos parámetros nominales como en sus valores máximos de potencia, se observó que la soldadura por microalambre no generaba la profundidad de penetración requerida para los calibres gruesos del bastidor, quedando el depósito limitado a un nivel superficial.

Ante esta limitante, la integración de las uniones soldadas de la estructura secundaria y los perfiles PTR se realizaron mediante el proceso de Soldadura de Electrodo Revestido (SMAW), utilizando electrodos de la Sociedad Americana de Soldadura E6013 (AWS E6013). Esta selección de electrodos fue basada por su alta accesibilidad comercial y versatilidad operativa en el taller, bajo criterios de compatibilidad metalúrgica y la estabilidad térmica para perfiles de paredes delgadas, especificando para esta aplicación el uso de calibre 14. Con esto en mente, es importante mencionar que mecánicamente el material de aporte garantiza una resistencia a la tracción de 60,000 psi (413 MPa), valor que supera considerablemente el límite elástico del acero estructural base ASTM A36 que es de 250 MPa, asegurando la integridad estructural ante los esfuerzos operativos.

Desde el punto de vista de la manufactura, el arco concéntrico de mediana penetración y las propiedades del revestimiento de rutilo del E6013 disminuyeron el riesgo de perforación por exceso de calor en el material base al controlar la dimensión de la Zona Afectada por el Calor (ZAC), y al dar cordones homogéneos.

Las probetas soldadas por este arco eléctrico demostraron una penetración superior y una zona de fusión homogénea. Con el fin de evaluar su resistencia mecánica de manera práctica, las muestras se sometieron repetidamente a pruebas de impacto con golpes severos, lo que demostró una alta resistencia y la ausencia de fracturas o desprendimientos en la unión. Con base en las evidencias experimentales y

analíticas, se seleccionó el proceso de electrodo revestido E6013 para la consolidación final de la estructura, garantizando una unión mecánica capaz de soportar los requerimientos de compresión del sistema.



Fig. 5. *Proceso de habilitación, ensamble y consolidación estructural del bastidor de la prensa térmica.*

En paralelo a la construcción del bastidor, supervisé la manufactura de los bloques de aluminio destinados al soporte de las resistencias eléctricas, para lograr esto, proporcioné las dimensiones exactas y los diámetros de los barrenos para la tornillería, tome en consideración las tolerancias de ajuste necesarias para el ajuste térmico de las resistencias.

Para las planchas de presión usé como base los modelos de código abierto de *Precious Plastic*, aplicando un redimensionamiento de sus componentes. La ingeniería de estas piezas fueron ajustadas por usar la placa de acero al carbón de 1/4", así mismo, se prepararon los archivos DXF correspondientes para su envío a un proveedor externo de corte láser.

También, al recibir las piezas, supervisé el proceso de avellanado en las placas para asegurar que la tornillería de alta resistencia quedará perfectamente al ras de la superficie. Esta geometría era indispensable para garantizar un contacto térmico uniforme y una distribución de presión homogénea durante el ensamble.



Fig. 6. Bloques de aluminio mecanizados para el alojamiento geométrico y soporte de las resistencias eléctricas.

Posteriormente, una vez que las piezas base estuvieron terminadas, me enfoqué en supervisar el ajuste de las uniones transversales entre los postes de la estructura, el avance fue secuencial en la soldadura de la base destinada a recibir el conjunto de planchas de la prensa térmica. En esta fase, comprobé que cada uno de los barrenos de montaje coincidiera con las tolerancias de la tornillería de fijación.

A continuación procedí a alinear los ejes de guiado. Así dirigí su corte y colocación precisa bajo una concurrencia estricta que redujera cualquier riesgo de bloqueo mecánico durante el desplazamiento vertical de las placas. Por último, se soldó el soporte del corte al bastidor principal para el anclaje del gato hidráulico, integrando así la estructura y consolidando una base de alta rigidez para la transferencia de cargas del sistema de potencia.



Fig. 7. Vista de la plancha de acero al carbono avellanada para garantizar la uniformidad geométrica y el contacto térmico del sistema.

Durante la integración del actuador hidráulico tuvo lugar uno de los acontecimientos más relevantes de la fase del ensamblaje mecánico. El diseño original de *Precious Plastic* contemplaba un sistema de amortiguación con un resorte de regulación específico, estos componentes eran vitales para mitigar los picos de presión, de igual manera, impedían de forma física que se excediera el umbral operativo del equipo. Sin embargo, debido a las diferencias en el suministro de este elemento y por la imposibilidad de retrasar el cronograma por compromisos comerciales de la convocatoria, se determinó no contemplar dicho componente e instalar el mecanismo en forma directa, soldando el gato a la base estructural inferior.

Con este contratiempo el ajuste técnico intentó reducir cualquier grado de libertad o movimiento parásito. Esto pretendía asegurar que la transmisión de carga se produjera únicamente en sentido axial, reduciendo la posibilidad de momentos de torsión que pudieran inducir un pandeo lateral anticipado de la estructura durante su funcionamiento.



Fig. 8. *Instalación del mecanismo de potencia mediante la fijación directa por soldadura del gato hidráulico a la base estructural inferior.*

4.2.1. Integración térmica y configuración eléctrica.



Fig. 9. *Montaje de los elementos calefactores sobre la plancha de presión de la prensa*

Tras la consolidación estructural de las bases superior e inferior mediante el proceso de soldadura del corte láser, se procedió a la integración de los elementos calefactores en las planchas de contacto. Esta etapa consistió en el montaje de los

bloques de aluminio previamente mecanizados, con sus respectivas resistencias, dentro de las cavidades de las planchas. Para optimizar la transferencia por conducción y asegurar una fijación mecánica permanente frente a las vibraciones, las resistencias se acoplaron a los bloques de aluminio con un compuesto disipador de calor a base de yeso adhesivo conductor térmico y pasta de enfriamiento de secado rápido. Estos actuaron como selladores de alta adhesión antes de montar el conjunto calefactor sobre las planchas de acero al carbón previamente avellanadas.

La interconexión eléctrica se llevó a cabo bajo una arquitectura de distribución en paralelo mediante una configuración tipo BUS. Esta configuración se implementó con el objetivo de simplificar el tendido de cableado inicial y buscar una respuesta térmica rápida, lo que permitió establecer el sistema de alimentación para el ciclo de trabajo de la prensa. El sistema integraba un total de 49 resistencias calefactoras, distribuidas estratégicamente de manera heterogénea para mitigar las pérdidas de calor así, 24 elementos se posicionaron en la plancha superior y 25 en la plancha inferior. Los componentes se agruparon en subnodos conectados en paralelo para mejorar el acomplamiento y la distribución de potencia en ambas superficies, de este modo se distribuyeron nodos de cuatro resistencias en las esquinas y zonas periféricas de las planchas, y nodos de tres resistencias en el área central.

Esta denominación tipo BUS responde directamente a la topología eléctrica implementada en el bastidor, la cual replicaba el principio de operación de una barra colectora (*busbar*) de potencia. El diseño disponía de un único conductor de alta temperatura principal y continuo de calibre 14 AWG que funcionaba como la columna vertebral de suministro energético. En lugar de estructurar líneas independientes desde el tablero de control para cada resistencia, esta línea troncal común recorría la estructura para transportar la totalidad del potencial eléctrico. Esto permitía que los bloques de elementos calefactores se acoplaran directamente a ella a través de los nodos de derivación periféricos y centrales previamente descritos, compartiendo de este modo un mismo canal general de alimentación.



Fig. 10. Conexión de potencia tipo BUS integrada en el conjunto de las planchas de presión.

Durante la fase de ejecución e instalación del sistema térmico, y siguiendo las instrucciones operativas de la dirección de la empresa, la carga de trabajo se dividió entre dos equipos de trabajo en el taller. La dirección de la organización asumió la responsabilidad directa de realizar el cableado y la conexión de la plancha inferior de la prensa. Por otra parte, yo quedé a cargo de la integración completa de la plancha superior, atendiendo a los lineamientos de diseño estipulados por la dirección, los cuales prescribían que todas las resistencias debían interconectarse en paralelo mediante una configuración tipo BUS para la distribución del voltaje entre cada uno de los elementos.

En el desarrollo de la sección superior centré mi trabajo en asegurar la correcta instalación y el aislamiento de cada conductor. Verificar la firmeza de los empalmes y de las conexiones permitió garantizar un circuito limpio, esto contribuyó a prevenir cualquier tipo de falla en el sistema durante la operación. Con ambas planchas conectadas bajo este esquema en paralelo y la distribución tipo BUS, se dio por terminada la etapa de cableado, dejando el equipo listo para comenzar con la fase de pruebas y puesta en marcha de la maquinaria.

4.2.2. Estrategia de aislamiento y contención termodinámica.

Una vez finalizada la configuración del sistema de distribución de potencia en las planchas, se procedió a la integración de un subsistema de aislamiento térmico mediante el uso de paquetes de lana mineral acústica SAFB (Sound Attenuation Fire Blankets) de alta densidad. La aplicación de este material, compuesto por fibras

de roca basáltica, tuvo como objetivo principal reducir de manera significativa las pérdidas de calor por conducción y radiación desde las zonas calefactoras hacia la estructura externa de la prensa, optimizando con ello la eficiencia energética general del equipo.

Al actuar como una barrera física de baja conductividad térmica, y poseer excelentes propiedades de resistencia al fuego y estabilidad a altas temperaturas, este bloque aislante estabilizó el gradiente térmico concentrándolo exclusivamente en las planchas de contacto. Esto permitió que el sistema retuviera de forma eficiente la energía necesaria para el proceso de fusión del polímero y, al mismo tiempo, protegió los componentes periféricos, los conductores eléctricos y los sensores de un sobrecalentamiento destructivo por radiación térmica.

Una vez selladas y aseguradas las capas de aislamiento en las bases de la maquinaria, se hizo el tratamiento superficial del bastidor. En el taller, la superficie de acero fue preparada rigurosamente, asegurando que estuviera completamente limpia y libre de agentes contaminantes como grasas, aceites o polvo, los cuales podrían impedir la correcta adherencia del producto.

El proceso comenzó con la aplicación de una capa base de primer para altas temperaturas, indispensable para lograr el anclaje químico sobre la superficie metálica. Posteriormente, se realizó la aplicación del esmalte industrial, para esto se usó la pintura negra de alta temperatura especificada. La integración de este sistema de recubrimientos garantizó que el bastidor y las bases de ambas prensas resistieran el entorno operativo sin sufrir degradación ni desprendimientos, lo anterior ofreció una protección eficiente contra la corrosión y un acabado estético de grado industrial adecuado para el equipo.



Fig. 11. Proceso de acabado superficial mediante pintura en la estructura de la prensa térmica.

4.2.3. Integración mecánica de alta carga y montaje estructural.

Debido a la masa considerable de las bases reforzadas y la rigidez mecánica del bastidor, la maniobra de ensamblaje requirió el uso de un polipasto industrial en el taller. Este procedimiento mecánico permitió maniobrar con seguridad los componentes para alinear las planchas de la manera más recta posible sobre el bastidor, la cual ya contaba con los barrenos de sujeción previamente seleccionados y mecanizados conforme a la tropicalización del diseño.

El ensamblaje final de estos elementos fue fijado con tornillería de alta resistencia Grado 8 (conforme a norma SAE). Esta selección se debió a sus propiedades mecánicas para soportar las elevadas cargas de tracción y los esfuerzos de compresión que produce el actuador hidráulico durante el proceso de prensado de la plastimadera. En esta etapa de montaje, la intervención sincronizada del personal resultó de vital importancia para asegurar un ajuste parejo en todos los puntos de fijación, evitando desalineaciones mecánicas antes de completar el armado del equipo.



Fig. 12. Ensamble general y acoplamiento de las bases mediante grúa industrial en la prensa térmica.

4.2.4. Sistema de control y gestión de potencia en tablero.

Tras concluir la interconexión eléctrica, el aislamiento del cableado en ambas planchas y el ensamble general de la prensa, se procedió a la extracción de las correspondientes líneas de fase y neutro desde las planchas para dirigir las hacia el tablero de control central. Toda la instalación y configuración de este sistema fue ejecutada directamente por la dirección de la empresa, estructurando una arquitectura operativa orientada a regular las condiciones térmicas de la maquinaria. La estrategia de control está pensada para operar de forma independiente en la plancha superior e inferior, empleando dos pirómetros que se dedican a monitorear la temperatura que alcanzan las placas a partir de la señal analógica que envían los termopares alojados en las cavidades.

Para regular la temperatura se utilizó el método de lazo de control tipo ON-OFF. Con este método los pirómetros leen la temperatura actual y cuando llega o supera los límites programados envían o cortan una señal digital que activa y desactiva los Relevadores de Estado Sólido (SSR) que son los que conmutan el paso de potencia hacia las resistencias.

Para el suministro energético de toda la arquitectura, la dirección implementó una alimentación basada en una conexión trifásica de 220 Volts disponible en el taller. Con el objetivo de garantizar una transferencia de voltaje segura hacia el tablero de control, se separó un interruptor electromagnético que actúa como la protección general del circuito antes de la entrada a los módulos de conmutación por estado

sólido. Con esta configuración se dio por finalizada la infraestructura eléctrica inicial del equipo, quedando establecida la distribución de potencia para dar paso a las evaluaciones operativas y de puesta en marcha.



Fig. 13. Arquitectura interna del tablero de control y distribución de potencia de la SheetPress.

4.3. Diagnóstico técnico, evidencia de fallas operativas y propuesta de mejora.

Con la maquinaria completamente ensamblada en el taller, llegó el momento crucial de confrontar el diseño con la realidad operativa. A continuación, se detalla la transición hacia la fase de validación experimental y el diagnóstico del equipo. Tras la implementación inicial de la prensa térmica, sometí el sistema a sus primeros protocolos de prueba; fue precisamente durante este proceso de puesta en marcha donde se comenzaron a identificar diversas fallas críticas, las cuales comprometían seriamente tanto la seguridad operativa como la integridad estructural de la propia maquinaria.

4.3.1. Diagnóstico de vulnerabilidad eléctrica y rediseño de distribución de potencia.

Durante la fase de ejecución, el sistema eléctrico presentó limitaciones operativas que hicieron visible la diferencia entre las especificaciones de los suministros disponibles y las demandas exigidas por el proceso. Al operar bajo el diseño

estandarizado, se identificó que la infraestructura eléctrica de la empresa entregaba una tensión real de 130 Volts por fase en la conexión trifásica (Línea-Neutro), debido a las condiciones de la zona o de la propia instalación de la planta. Esta condición real difería del estándar comercial típico de 110 Volts.

Al trabajar bajo esta configuración en paralelo, la cual integraba un arreglo total de 49 resistencias calefactoras de 310 Watts con una tensión nominal de 110 Volts, distribuidas en tres arreglos independientes de 16, 16 y 17 resistencias por fase para balancear la carga del sistema, y al estar estructurada mediante líneas comunes que empleaban conductores calibre 14 AWG de alta temperatura con recubrimiento de fibra de vidrio para las planchas y calibre 12 AWG estándar para las fases y retornos, dicha elevación en el voltaje provocó que la demanda de corriente total alcanzará un rango de valores de entre 55 Amperes y 57 Amperes en las fases. Este flujo exagerado de corriente desencadenó un fenómeno severo de disipación calórica por efecto Joule, el cual superó la capacidad de conducción continua y los límites de ruptura dieléctrica de los componentes instalados en la etapa de potencia. Lo anterior se detalla en los siguientes apartados.

4.3.1.1. Conductores eléctricos.

El circuito eléctrico presentó dos problemáticas críticas diferenciadas por el tipo de conductor y su ubicación en la instalación:

- **Líneas principales y fases (Calibre 12 AWG estándar):** Las líneas principales de alimentación, encargadas de soportar la corriente total del sistema de entre 52 Amperes y 57 Amperes, como se puede observar en la *Figura.16*. Se cablearon con conductores convencionales calibre 12 AWG. Al carecer de un recubrimiento de alta temperatura y debido a que su capacidad nominal normativa de 20 Amperes fue ampliamente superada, estos conductores operaron bajo un estado de sobrecarga masiva de hasta el 285%. Como consecuencia, sufrieron un proceso de calentamiento activo visible en el taller, trabajando en condiciones de riesgo extremo.

A continuación se justifica dicho comportamiento de manera teórica:

Basándonos en la Ley de Watt para deducir la resistencia fija del elemento calefactor usando solo sus datos nominales.

$$P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow R = \frac{V_{nominal}^2}{P_{nominal}}$$

Cálculo matemático que determina que cada elemento de carga posee una oposición constante al flujo eléctrico de 39.03 Ohms.

$$P = \frac{(110 \text{ Volts})^2}{310 \text{ Watts}} = 39.03 \text{ Ohms}$$

Aplicación de la Ley de Ohm para obtener la corriente forzada por cada resistencia debido a la sobretensión de 130 V de la planta.

$$I_{ind} = \frac{130 \text{ Volts}}{39.03 \text{ Ohms}} = 3.33 \text{ Amperes}$$

Sumatoria de corrientes en paralelo que justifica físicamente los 57 Amperes y 54 Amperes reales medidos en el taller con el amperímetro.

$$I_{Fase\ 1,2} = 16 \times 3.33 \text{ Amperes} = 53.28 \text{ Amperes}$$

$$I_{Fase\ 3} = 17 \times 3.33 \text{ Amperes} = 56.61 \text{ Amperes}$$

Diagnóstico final que demuestra que el cable calibre 12 AWG operó a casi el triple de su límite normativo de 20 Amperes.

$$\text{Porcentaje de Operación} = \left(\frac{57 \text{ Amperes}}{20 \text{ Amperes}} \right) \times 100 = 258\%$$



Fig. 14. Medición de corriente en tiempo real, evidencia de sobrecarga de 12.1 Amperes en conductores calibre 14 AWG.

- **Derivaciones en las planchas (Calibre 14 AWG de alta temperatura):** El cableado interno de las planchas térmicas se llevó a cabo con conductores calibre 14 AWG con aislamiento de fibra de vidrio, su límite normativo es de 15 Amperes. Las mediciones en tiempo real demostraron que cada subnodo (compuesto por cuatro resistencias), demandaba 12.1 Amperes,

consolidando un flujo constante de 23.6 Amperes entre los nodos de conexión de las resistencias.

A continuación se justifica dicho comportamiento de manera teórica:

Basándonos en la Ley de Watt para deducir la resistencia fija del elemento calefactor usando solo sus datos nominales.

$$P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow R = \frac{V_{nominal}^2}{P_{nominal}}$$

Cálculo matemático que determina que cada elemento de carga posee una oposición constante al flujo eléctrico de 39.03 Ohms.

$$P = \frac{(110 \text{ Volts})^2}{310 \text{ Watts}} = 39.03 \text{ Ohms}$$

Aplicación de la Ley de Ohm para obtener la corriente forzada por cada resistencia debido a la sobretensión de 130 V de la planta.

$$I_{ind} = \frac{130 \text{ Volts}}{39.03 \text{ Ohms}} = 3.33 \text{ Amperes}$$

Sumatoria de corrientes en paralelo que justifica físicamente los 12.1 Amperes y 23.6 Amperes reales medidos en el taller con el amperímetro.

$$I_{Subnodo} = 4 \times 3.33 \text{ Amperes} = 13.32 \text{ Amperes}$$

$$I_{Paso \text{ entre Subnodos}} = 8 \times 3.33 \text{ Amperes} = 26.64 \text{ Amperes}$$

Diagnóstico final que demuestra que el cable calibre 14 AWG operó a un 157.3% de su límite normativo de 15 Amperes.

$$\text{Porcentaje de Operación} = \left(\frac{23.6 \text{ Amperes}}{15 \text{ Amperes}} \right) \times 100 = 157.3\%$$

Este escenario evidenció un problema crítico de diseño, ya que cada conductor de derivación en las planchas operaba a un 157.3% de su capacidad nominal, mientras que las líneas principales trabajaban bajo el mencionado 285% de sobrecarga. Si bien las propiedades térmicas de la fibra de vidrio evitaron la fundición física o la degradación inmediata del recubrimiento en las planchas, estos conductores trabajaron en un régimen de sobrecarga constante; por lo tanto, actuaron como disipadores de calor directo hacia el resto de los componentes del tablero de control debido al sobrecalentamiento por efecto Joule.



Fig. 15. Medición de corriente en tiempo real: evidencia de sobrecarga (23.6 A) en conductores calibre 14 AWG.

4.3.1.2. Relevadores de estado sólido (SSR).

Los relevadores instalados poseían una capacidad nominal de 40 Amperes. Al ser excedidos por la corriente real del circuito, la cual oscilaba entre los 52 Amperes y 57 Amperes provistos por el cableado común, los dispositivos superaron sus límites de conmutación segura. Esto aceleró el catastrófico fallo por fatiga térmica en sus uniones semiconductoras y en sus componentes internos de conducción.

4.3.1.3. Interruptor termomagnético.

El interruptor termomagnético de protección general estaba diseñado para soportar hasta 60 Amperes. Si bien la corriente total nominal de 57 Amperes no superaba formalmente el umbral de disparo por sobrecarga instantánea, el dispositivo experimentaba aperturas prematuras y disparos no deseados de manera constante durante la operación.

Lo anterior sucedió porque el calor extremo alteró la curva de operación de su bimetálico interno al ser transferido por conducción térmica y radiación desde los conductores calibre 12 AWG hacia los bornes de la pastilla. Dicho fenómeno precipitó un colapso mecánico que inutilizó el dispositivo a corto plazo, impidiendo finalmente una apertura de contactos oportuna.

La falla de la instalación derivó en un evento crítico de cortocircuito ubicado en la plancha inferior de la prensa. La auditoría técnica a dicho incidente reveló una combinación de fallas de manufactura física y errores de dimensionamiento

eléctrico: deficiencias severas en la densidad del aislamiento térmico, una defectuosa disposición y conexión física de los conductores en los nodos, y la implementación de calibres inadecuados para las magnitudes de corriente reales del sistema. La operación continua de los cables calibre 14 AWG y calibre 12 AWG estándar bajo regímenes de sobrecarga del 157% y 285%, respectivamente, aceleró la degradación térmica y dieléctrica de sus aislamientos.

La suma de factores mencionados permitió la formación de puntos calientes y el contacto directo entre las líneas vivas expuestas y la estructura metálica; esto comprometió por completo la seguridad del operador y obligó a una detención total para proceder con la reingeniería integral de la maquinaria.

Al mismo tiempo, se detectó un grave desequilibrio energético en la disposición de las resistencias térmicas, ocasionado de la configuración tipo BUS que la dirección había propuesto inicialmente para la distribución de energía. Debajo de este esquema se observó una caída de potencial considerable a medida que el circuito se alejaba de la fuente de alimentación; por lo cual las resistencias en la periferia se hallaban bajo una tensión efectiva bastante menor que las que están situadas al principio de la cadena de suministro.

Esto produjo en la plancha un gradiente térmico heterogéneo, con el centro a temperatura de fusión del polímero, mientras que los bordes se encontraban en un estado semicristalino. Esa asimetría térmica impedía la obtención de una plastimadera con calidad constante y generaba esfuerzos internos residuales en las placas.

Estas complicaciones operativas fueron agravadas por la insuficiente infraestructura eléctrica preexistente en la planta. El sistema de protección general estaba basado en fusibles de 60 Amperes, lo cual obligaba al dispositivo de la fase más demandada a operar a 57 Amperes, alcanzando un crítico 95% de su capacidad nominal. Esta carga asimétrica se debió a que dicha fase alimentaba un total de 17 resistencias, en comparación con las otras dos fases que contaban con 16 resistencias cada una y registraban consumos medidos de entre 52 Amperes y 54 Amperes; este comportamiento permitió que esos dos fusibles operaran cerca de su límite sin llegar a fallar. No obstante, la continua sobre-excitación por efecto Joule, provocó que el fusible conectado a la línea de 57 Amperios, se fundiese completamente.



Fig. 16. Medición del amperaje de línea en la entrada principal a la Prensa Térmica.

Con este diagnóstico se determinó que la arquitectura de la conexión interna de la prensa y su interfaz con la red de suministro eléctrico de la planta eran cuellos de botella técnicos, por lo que se consideró necesario pasar a una conexión más robusta y ejecutar una actualización integral de las protecciones térmicas de la instalación.

Con el objetivo de garantizar la continuidad operativa y eliminar por completo las interrupciones en el ciclo de trabajo, asumí la responsabilidad de renovar la infraestructura eléctrica, ejecutando las siguientes acciones de mejora y sobredimensionamiento estratégico:

- **Transición estratégica a topología en estrella:** Como acción inmediata posterior al cortocircuito, se aprovechó la ventana de mantenimiento correctivo para reestructurar por completo la red de distribución eléctrica, migrando de la arquitectura tipo BUS a una conexión en estrella trifásica balanceada. Se escogió esta configuración porque elimina el cuello de botella que sufrían los nodos periféricos anulando el acoplamiento térmico y óhmico en serie de las resistencias. Separando las líneas desde el centro de carga hacia cada bloque de calefacción se corrigió la caída progresiva de tensión y

se hizo que cada elemento tuviera el mismo potencial eléctrico. Esto estabiliza el gradiente térmico superficial, lo que permite una fusión homogénea del polímero y previene posibles fallos por sobrecarga localizada.

- **Conductores de la planta:** La línea de suministro se cambió por conductores de cobre calibre 8 AWG. Siguiendo la norma NOM-001-SEDE, el conductor de calibre 8 AWG con aislamiento estándar para canalización soporta una corriente continua de hasta 70 Amperes, esto depende de la temperatura de operación de sus terminales.
- **Conductores de la prensa térmica:** Se usó cableado calibre 8 AWG con recubrimiento de fibra de vidrio para la instalación interna en las planchas. La capacidad de conducción de este cable con aislamiento de la fibra de vidrio se eleva hasta los 90 Amperes, esta propiedad térmica la hace capaz de operar en ambientes con temperaturas de hasta 200 °C o más. Integrar este conductor representó una ventaja técnica definitiva, cubriendo con holgura los requerimientos de corriente reales del sistema, sino que disipa el calor de manera eficiente sin degradar sus propiedades dieléctricas, blindando a la prensa contra futuros cortocircuitos por desgaste térmico.
- **Relevadores de potencia:** Los dispositivos de conmutación del tablero se actualizaron por relevadores industriales con capacidad nominal de 80 Amperes. Trabajando muy por encima de la corriente de diseño por grupo, se elimina totalmente la fatiga térmica en las uniones semiconductoras y contactos, se asegura ciclos de apertura y cierre limpios y se prolonga la vida útil del componente.
- **Protecciones termomagnéticas:** Se organizó un sistema de protección escalonado para que dé garantías de seguridad ante fallos. En el tablero central de la prensa térmica se instaló un interruptor termomagnético de 63 Amperes, el cual protege los componentes internos de potencia sin riesgo de disparos en falso por proximidad calórica de la carga. A modo de respaldo general en la acometida de la planta, se colocó un interruptor termomagnético de 80 Amperes. Esta configuración asegura que cualquier eventualidad local sea contenida primero por el interruptor del tablero de 63 Amperes, así se cuida la integridad de la máquina y se mantiene la operación del resto de la instalación de la planta.

4.3.1.3. Validación virtual y correlación con el comportamiento experimental.

La totalidad de los fenómenos observados en campo fueron replicados mediante un entorno de simulación virtual con el objetivo de validar las causas raíz del fallo y consolidar una propuesta de rediseño adecuada a las necesidades del sistema. En la sección previa, correspondiente a la *Figura 17*, se ilustra el modelado eléctrico general de la prensa térmica, para posteriormente complementar a detalle las conexiones de la plancha inferior en la *Figura 18* destacando mediante recuadros

rojos las magnitudes de corrientes en las fases, así como los valores medidos en los nodos y entre los conductores de retorno común.

El modelo virtual exhibió de forma explícita una corriente de 13.2 Amperes por nodo y un flujo de retorno de 26.5 Amperes en el conductor de retorno común. Al realizar la validación experimental en el taller, la instrumentación de campo registró valores de 12.1 Amperes por nodo (lo que representa una sutil diferencia del 8.3%) y de 23.2 A en el retorno común, exhibiendo una discrepancia del 10.9 % respecto al entorno virtual. Esta variación no invalida el modelo, al contrario, demuestra una correlación física exacta que se fundamenta en la dinámica térmica del material calefactor y el efecto Joule.

Mientras que la simulación calcula el escenario ideal en frío —es decir, el instante exacto del arranque donde la resistividad eléctrica es baja y el paso de corriente es máximo—, en la vida real las resistencias experimentan un coeficiente térmico positivo. A medida que el flujo masivo de electrones disipa energía calórica para alcanzar la temperatura de fusión del polímero, los elementos se calientan y su resistencia óhmica se eleva, provocando una reducción de amperaje natural y de régimen estable en caliente. A este fenómeno se suman las pérdidas por inserción reales del taller, donde las pequeñas caídas de tensión y las resistencias de contacto introducidas por las clemas cerámicas y la longitud del cableado operan como una atenuación física normal frente al entorno idealizado de la simulación.

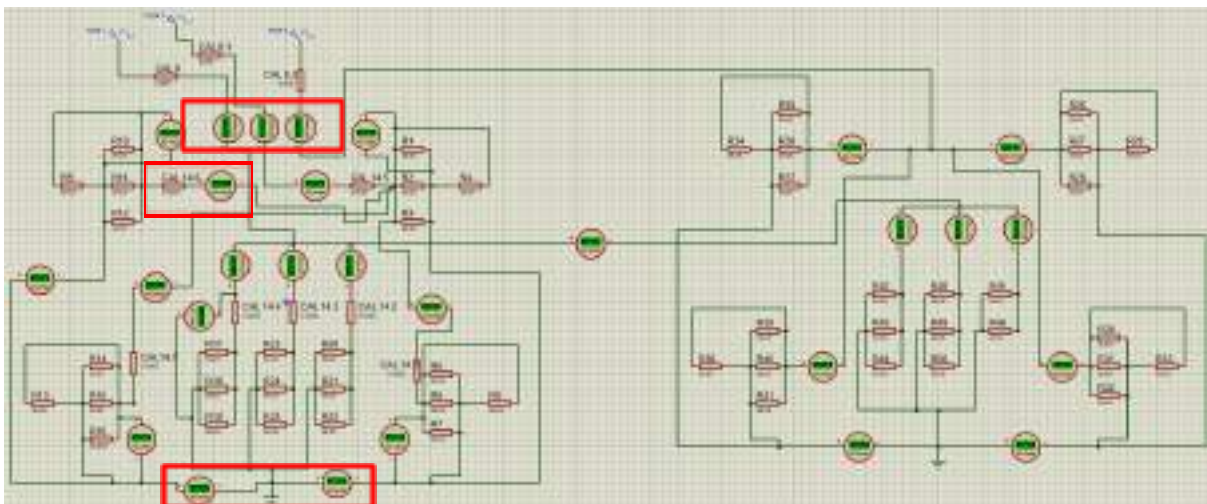


Fig. 17. Modelación virtual del comportamiento eléctrico y distribución de corriente de la prensa térmica.

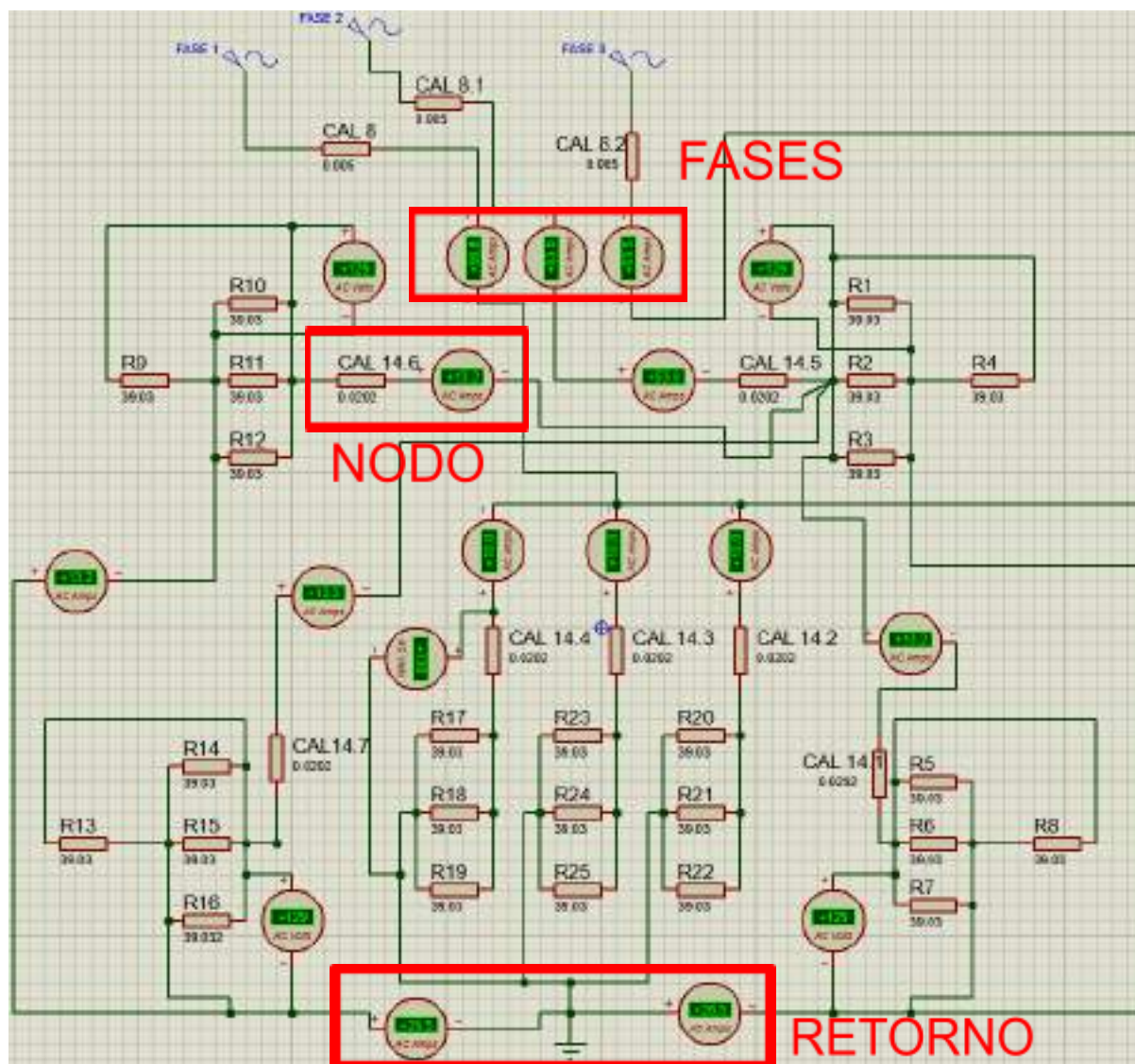


Fig. 18. Modelación virtual del comportamiento eléctrico y distribución de corriente en los nodos de la plancha inferior de la prensa térmica.

Para asegurar el máximo apego a la realidad operativa de la planta, el entorno virtual se configuró fijando una tensión de fase de 130 V a una frecuencia de 60 Hz. La inclusión de los 60 Hz resulta indispensable en el análisis debido a que define los ciclos de onda de la corriente alterna comercial estandarizada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el país y determina el comportamiento de conmutación de los relevadores de estado sólido, garantizando que el filtrado y la respuesta de las protecciones respondan a la frecuencia real de suministro.

Bajo este mismo criterio, cada una de las resistencias calefactoras fue parametrizada con un valor nominal estricto de 39.032 Ohms y para consolidar la precisión matemática del modelo, la simulación contempló explícitamente la impedancia lineal de los conductores calibre 14 AWG y calibre 8 AWG dispuestos en la nueva topología en estrella; de este modo, se mapearon con rigor técnico las

caídas de potencial y el estrés por sobrecorriente. Esta consideración del comportamiento óhmico real de las líneas permitió corroborar de forma analítica que la independización de los ramales restringe la atenuación de voltaje a valores despreciables. Esto asegura que el suministro de potencia y la eficiencia disipada se mantengan constantes en toda la matriz de calefacción, independientemente de la distancia física de los nodos respecto al centro de carga.



Fig. 19. Actualización del tablero de control y distribución de potencia.

Finalmente, tras el análisis integral del sistema, se determinó que el error principal que detonó este comportamiento radicó en la selección de las resistencias térmicas. El diseño original de la maquinaria, proyectado por *Precious Plastic*, contemplaba la utilización de resistencias de 220 Volts, como se indica en la *Tabla 1*, Fila 12, con lo cual el consumo de corriente se habría mantenido en un régimen seguro por debajo de los 39 Amperes. Al haberse integrado finalmente resistencias de 110 Volts, la corriente del sistema se duplicó por Ley de Watt; esto dejó inutilizados los márgenes de seguridad de los cables, relevadores e interruptores que, en su momento, sí se apegaban a las especificaciones de la planificación inicial, lo que obligó a ejecutar la reingeniería eléctrica tanto de la prensa como de la instalación general de la planta.

4.3.1.4. Propuesta de mejora para la distribución eléctrica.

Para subsanar el error de diseño que duplica la corriente del sistema por ley de Watt, se determinó la sustitución total de las resistencias 110V por resistencias con especificación nominal de 220 V, apegándose estrictamente a la ingeniería original de *Precious Plastic*.

Cuando se duplica la tensión operativa, la demanda de corriente por elemento se reduce a la mitad para mantener la misma transferencia de potencia. Esto mitiga la corriente máxima global del sistema de un valor crítico de 57 Amperes a un régimen seguro inferior a los 39 Amperes, lo que devuelve instantáneamente la factibilidad operativa y los márgenes de seguridad calculados para toda la instalación.

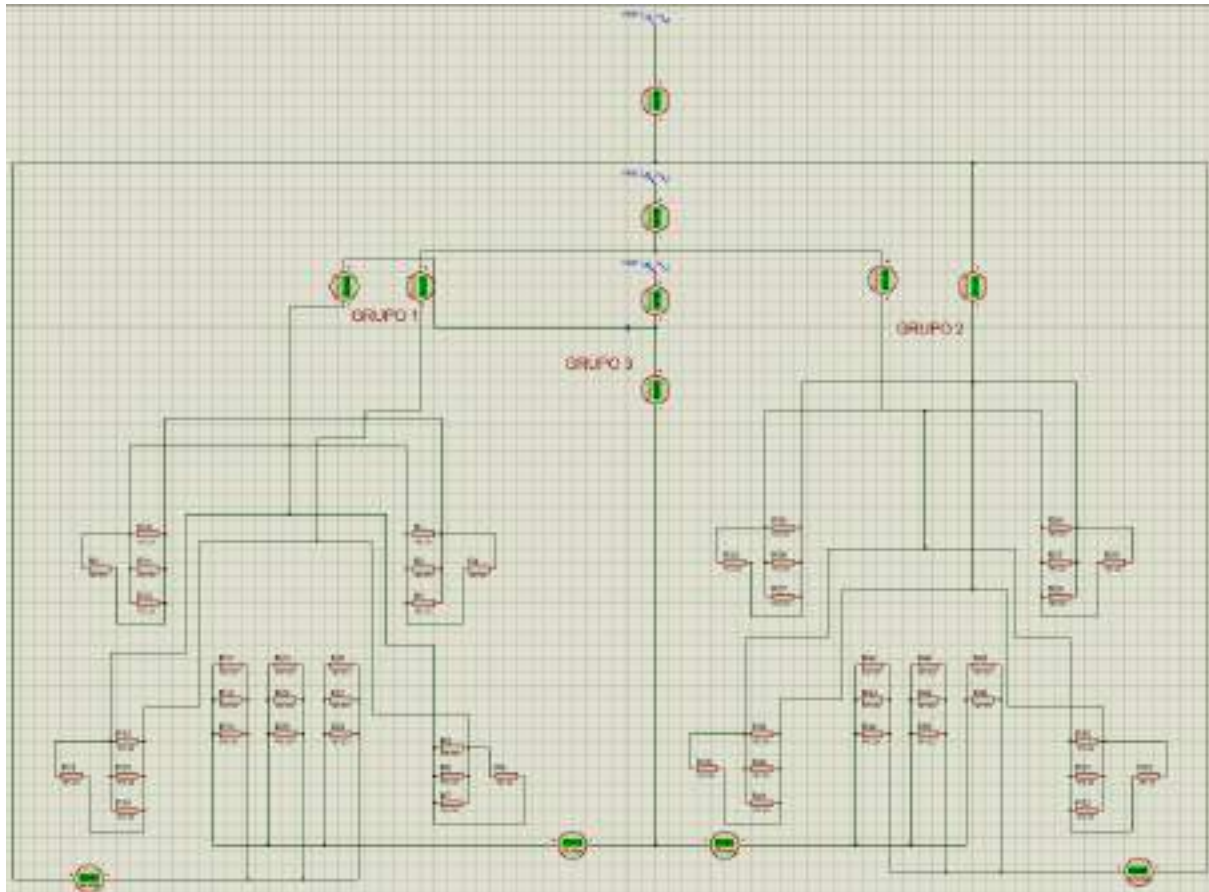


Fig. 20. Actualización del tablero de control y distribución de potencia.

El circuito se configuró en delta bifásica para cubrir la tensión nominal de los nuevos cartuchos. Para ello, las tres fases ingresan divididas hacia el interior de las planchas, creando tres nodos de potencial independientes. De estos puntos derivan, de manera individual, los subgrupos de resistencias en paralelo conectados entre las líneas 1-2, 2-3 y 3-1. El resultado es un suministro eléctrico balanceado que se distribuye de forma uniforme desde el centro hacia la periferia de la matriz de calefacción.

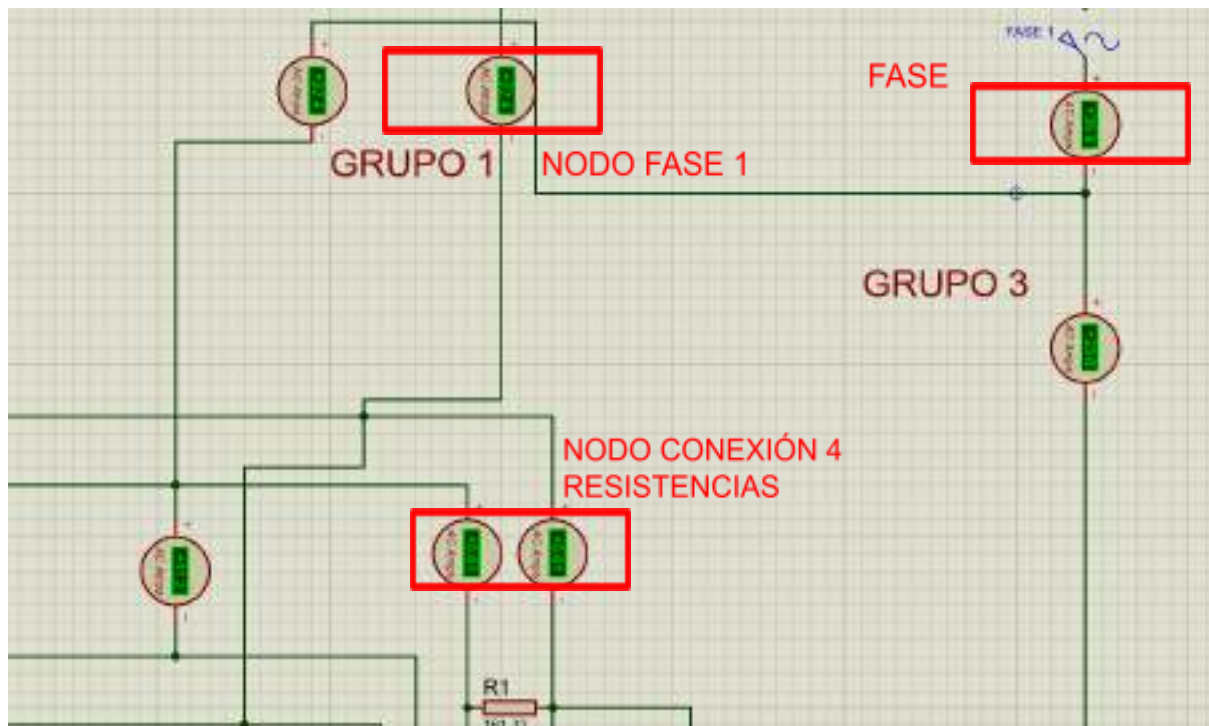


Fig. 21. Actualización del tablero de control y distribución de potencia.

La independización de las líneas de suministro por el arreglo en delta bifásica eliminó los puntos críticos de densidad de corriente. Esta topología suprime la resistencia óhmica acumulada y frena la caída de voltaje a través de la plancha. Garantizando una tensión constante e idéntica en cada elemento, el sistema genera un gradiente térmico parejo. Esto es indispensable para lograr una fusión correcta de la plastimadera y blindar las placas contra esfuerzos mecánicos internos de origen térmico.

4.3.2. Diagnóstico de vulnerabilidad estructural y rediseño de distribución de carga mecánica.

Las fallas eléctricas se acompañaron de serias limitaciones en la rigidez y resistencia estructural del bastidor principal de la prensa térmica para soportar las cargas operativas de compactación. En la fase de pruebas dinámicas, al accionar el gato hidráulico, la base de la maquinaria se sometió a una combinación compleja de momentos flectores y torsores que sobrepasaron el límite de fluencia del acero, generando una deformación plástica permanente en forma de “U”. Como medida correctiva de campo para mitigar este esfuerzo, se procedió a insertar un perfil de acero estructural en el espacio libre de 10 cm existente entre el soporte del actuador y el piso de la planta.

El objetivo primordial de esta intervención de emergencia fue redirigir el vector de carga directamente hacia la cimentación, evitando que el bastidor continuará absorbiendo la totalidad del momento flector generado por la presión operativa de

aproximadamente 8 toneladas, ejercida por el gato hidráulico al ser accionado a su máximo recorrido. La inclusión de esta magnitud límite es indispensable en el análisis debido a que, si bien el esfuerzo real en un ciclo normal depende de la resistencia que oponga el polímero a compactar, el operador en planta continuará accionando manualmente la palanca del actuador ante cualquier obstrucción o presencia de material rígido. Al hacerlo, el sistema hidráulico elevará la presión interna de manera sostenida hasta alcanzar físicamente su capacidad nominal de 8 toneladas antes de activar las válvulas de alivio.

En consecuencia al integrar este perfil de acero estructural de soporte no solo se restringió la flexión en el bastidor, sino que se reforzó la estructura ante el peor escenario de operación. Este comportamiento justifica técnicamente que el análisis de la maquinaria deba realizarse bajo su carga límite de 8 toneladas, lo que asegura que el bastidor no actúe como el componente de falla que colapse mecánicamente durante el proceso.



Fig. 22. Evidencia de deformación plástica permanente en geometría tipo "U" en el bastidor principal de la SheetPress.

Sin embargo, esta solución empírica alteró la dinámica del equilibrio estático de la maquinaria. Con la concentración de reacción en el perfil central y debido a la inexistencia de ligaduras inicial en los extremos de la base, el momento de flexión comenzó a manifestarse de forma inversa. Esto trajo consigo que los apoyos periféricos de la unidad sufrieran una deflexión ascendente, elevándose respecto al nivel del suelo y despegándose de su plano horizontal de diseño.

Para intentar estabilizar el conjunto y mitigar un vuelco inminente, se soldaron placas de refuerzo en la base de las patas con la finalidad de fijarlas a la

cimentación mediante anclajes mecánicos expansivos. No obstante, la efectividad de esta sujeción fue marginal debido a la severidad del daño estructural previo: la deformación plástica era tan pronunciada que las extremidades presentaban una desalineación angular y una diferencia de altura que impedían un asentamiento ortogonal y sólido. Al aplicar carga con el actuador, el brazo de palanca generado por la geometría deformada del bastidor ejercía un esfuerzo de tensión ascendente que superaba la capacidad de carga de los pernos, provocando la extracción y desprendimiento de las fijaciones del concreto ante el mínimo régimen operativo.



Fig. 23. *Elevación lateral del bastidor provocado por el desprendimiento de anclajes debido a esfuerzos mecánicos inversos y momentos flectores parásitos.*

Se determinó en análisis posteriores que la estructura original operaba por debajo de los límites mínimos de seguridad y que la falla estructural del bastidor no fue un evento aislado, sino la manifestación de deficiencias críticas que tuvieron su origen en el subdimensionamiento de los elementos estructurales. El calibre y la geometría de los perfiles comerciales elegidos para el bastidor no eran capaces de resistir las cargas de compresión y los momentos de pandeo producidos durante el prensado industrial. Esta falta de rigidez a la flexión y de un módulo de sección adecuado fue el factor primario que permitió la transición del material desde su régimen elástico hacia una deformación plástica irreversible bajo condiciones normales de uso.

Las irregularidades observadas en campo fueron contrastadas cuantitativamente mediante un análisis estático lineal por el Método de Elementos Finitos (FEA). Este estudio numérico arrojó una correlación con el comportamiento físico real del bastidor, lo que provocó con un alto índice de precisión el diagnóstico de

vulnerabilidad, mostrando que los fallos mecánicos eran completamente previsibles bajo las condiciones de frontera operativas.

En la evaluación de las deformaciones, el modelo de simulación matemática reprodujo fielmente la deflexión geométrica en forma de “U” del travesaño inferior del bastidor principal. Para validar esta conducta en el taller, se obtuvieron de forma empírica las medidas experimentales mediante el uso de una solera sólida como plano de referencia. Este perfil rectilíneo se apoyó firmemente sobre la superficie deformada, sobre las zonas no afectadas por el gradiente de esfuerzo (las regiones azules en el mapa de contorno de la *Figura 24* y la *Figura 26*), lo que permitió trazar la curva de deformación aproximada de la estructura real. . Bajo este procedimiento de campo, la medición experimental directa registró un valor de desplazamiento máximo vertical de 10.9 mm, mientras que en el entorno virtual se obtuvo un valor de 10.59 mm. Esto representa una desviación absoluta de apenas 0.31 mm, equivalente a un error relativo de solo 2.84% y a un índice de coincidencia del 97.16% entre el modelo numérico y el componente manufacturado. La validación matemática de estos márgenes de discrepancia y el comportamiento de las variables de control se desarrollan a través de las siguientes ecuaciones de correlación:

Basándonos en la diferencia geométrica directa para deducir la desviación absoluta entre el comportamiento empírico y el analítico.

$$E_{abs} = |10.90 \text{ mm} - 10.59 \text{ mm}| = 0.31 \text{ mm}$$

Cálculo matemático que determina la discrepancia física dimensional en el punto de máxima flexión del bastidor.

$$E_{abs} = 0.31 \text{ mm}$$

Aplicación del error relativo porcentual para evaluar la magnitud de dicha desviación respecto al desplazamiento real registrado en campo.

$$E_{rel} = \left(\frac{0.31 \text{ mm}}{10.90 \text{ mm}} \right) \times 100 = 2.84\%$$

Deducción del índice de coincidencia mediante el complemento del error para establecer la confiabilidad del modelo virtual.

$$I_{conf} = 100\% - 2.84\% = 97.16\%$$

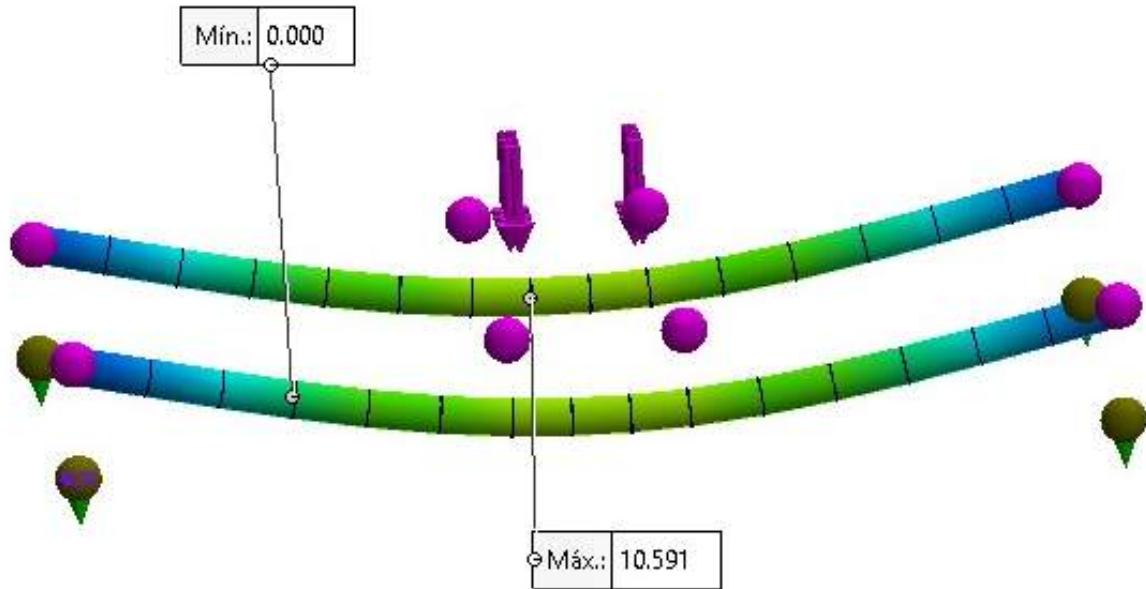


Fig. 24. Correlación del campo de desplazamientos en el travesaño del bastidor bajo carga estática.



Fig. 25. Medición física del desplazamiento vertical en el travesaño del bastidor bajo carga estática.

De igual manera, el fenómeno de pandeo local y deformación superficial en las caras laterales del perfil estructural del bastidor, fue previsto y modelado analíticamente. Al evaluar el campo de desplazamientos, el modelo numérico detectó y calculó un modo de inestabilidad por abolladura con un desplazamiento hacia el interior en la zona central de las caras flectadas, registrando una magnitud teórica de 4.2 mm.

En contraste, la medición experimental directa sobre la estructura física real registró un desplazamiento plástico de 3.8 mm en la misma zona flectada de los apoyos. Esto representa una desviación absoluta de apenas 0.4 mm, equivalente a un error relativo del 10.53% y a un índice de coincidencia del 89.47% entre el modelo predictivo virtual y el comportamiento medido en el componente real en el taller. La validación matemática de estos márgenes de discrepancia y el comportamiento de las variables de control se desarrollan a través de las siguientes ecuaciones de correlación:

Basándonos en la diferencia geométrica directa para deducir la desviación absoluta entre el pandeo local teórico y el simulado.

$$E_{abs} = |3.80 \text{ mm} - 4.20 \text{ mm}| = 0.40 \text{ mm}$$

Cálculo matemático que determina la discrepancia física dimensional en la zona central de las caras abolladas por el puntal.

$$E_{abs} = 0.40 \text{ mm}$$

Aplicación del error relativo porcentual para evaluar la severidad de dicha desviación respecto al desplazamiento plástico real de la pared del perfil.

$$E_{rel} = \left(\frac{0.40\text{mm}}{3.80\text{mm}}\right) \times 100 = 10.53\%$$

Índice de coincidencia mediante el complemento del error para establecer la confiabilidad del modelo predictivo virtual ante modos de inestabilidad locales.

$$I_{conf} = 100\% - 10.53\% = 89.47\%$$

Esta aproximación física, que arroja un error predictivo en una escala submilimétrica marginal, consolida el uso de las herramientas de ingeniería asistida por computadora (CAE) no solo como un recurso de diagnóstico forense, sino como una plataforma de predicción e iteración matemática indispensable para fundamentar de manera científica la selección de los nuevos calibres, espesores y materiales estructurales para el rediseño integral de la maquinaria.

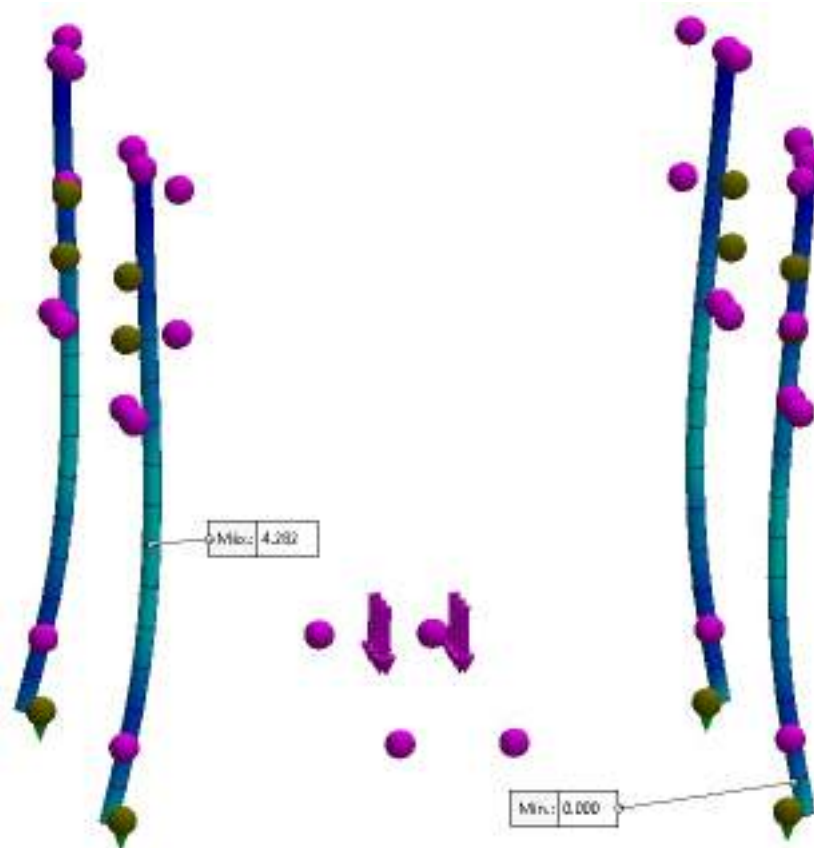


Fig. 26. Simulación analítica del campo de desplazamientos hacia el interior en la cara lateral del bastidor.



Fig. 27. Medición empírica de la deformación por abolladura y el desplazamiento resultante en la estructura física del bastidor.

A nivel operativo, la manifestación de estos desplazamientos afectó directamente el funcionamiento dinámico y la calidad de la manufactura. La deflexión acumulada en el bastidor provocó una pérdida crítica en el paralelismo de las planchas de presión, lo que a su vez generó una distribución asimétrica de la carga de compactación sobre el material. Esta desalineación angular indujo esfuerzos parásitos de flexión en los ejes de guiado, en consecuencia, la fricción interna aumentó y el conjunto móvil presentó un bloqueo mecánico en los ciclos de ascenso y descenso. Sin embargo, la fricción constante de las piezas en contacto en las zonas de interferencia produjo un desgaste que permitió que las superficies se asentaran mecánicamente y el sistema recuperara su movilidad por acoplamiento directo.

Asimismo, la falta de uniformidad geométrica en las placas impidió un contacto térmico homogéneo, lo que trajo consigo: en defectos de densidad, variaciones dimensionales en el espesor de la plastimadera y zonas con una transferencia de calor deficiente que comprometieron las propiedades mecánicas del producto final.

A esta debilidad estructural del ensamble se sumó la alteración crítica en el mecanismo de amortiguación original, derivada de una sustitución no validada del resorte de regulación contemplado en el diseño estándar de *Precious Plastic*. Originalmente, este componente de acoplamiento debe cumplir con una doble función operativa de vital importancia: actuar como un elemento limitador mecánico de carga y como un sistema de homogeneización de esfuerzos de compactación sobre la placha.

De acuerdo con las especificaciones técnicas del plano de *Precious Plastic*, el sistema requiere un muelle de compresión industrial de alta rigidez diseñado para alojarse en un espacio geométrico determinado por una altura de montaje de 103 mm y un diámetro de guía de 55 mm, permitiendo un rango de compresión de trabajo regulado entre $30\text{ mm} < C < 80\text{ mm}$ para absorber de manera lineal vectores de carga de gran magnitud. Sin embargo, la empresa adquirió como sustituto un muelle-amortiguador comercial para la suspensión trasera de bicicleta.

Este componente posee una longitud extendida de 150 mm y una capacidad nominal máxima de apenas 1,500 libras (aproximadamente 0.68 toneladas), un umbral que representa menos del 9% de la fuerza operativa total de 8 toneladas que es capaz de ejercer el actuador hidráulico de la prensa. Ante esta severa discrepancia en las dimensiones geométricas y en el orden de magnitud de la constante de rigidez de diseño, se determinó que la pieza era completamente incompatible e incapaz de soportar el régimen de trabajo, por lo que ni siquiera se procedió a realizar su montaje físico en el conjunto final.

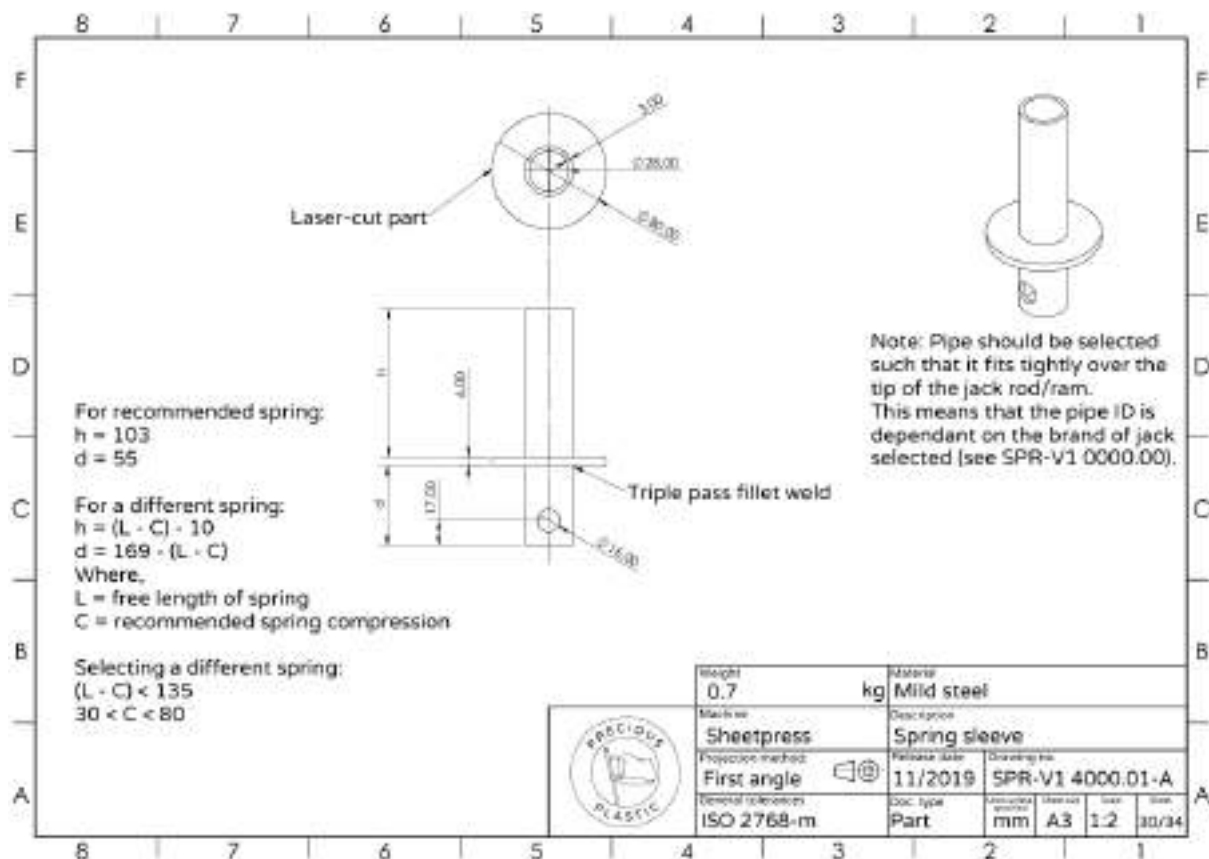


Fig. 28. Plano de ensamble y especificaciones técnicas del subconjunto de amortiguación según el estándar de diseño de Precious Plastic.



Fig. 29. Componente helicoidal comercial para suspensión de bicicleta adquirido como sustituto.

Asimismo, la omisión de este muelle anuló la capacidad del sistema para homogeneizar la carga sobre la superficie de prensado. En el diseño original, el muelle funciona como un acumulador de energía que absorbe la fuerza puntual del actuador y la distribuye de manera uniforme sobre toda la placa térmica. Al no contar con este componente de transferencia, la carga del pistón se aplicó de forma directa y concentrada en el centro geométrico de la plancha. Esta concentración de esfuerzos provocó una distribución asimétrica de la presión que deformó la sección

media del conjunto y dejó las zonas perimetrales fuera de la zona de influencia de la carga de compactación, comprometiendo la homogeneidad dimensional y la densidad de la plastimadera resultante.

La carga se elevó a causa de una falta grave de ortogonalidad y de alineación del gato hidráulico con el eje vertical de la prensa. La no perpendicularidad del montaje del actuador, hizo que la fuerza aplicada se desviara de su línea de acción puramente axial, creando un sistema de esfuerzos combinados que dieron lugar a momentos flectores parásitos. Estos momentos generaron una carga asimétrica sobre la estructura, acelerando el pandeo lateral y estableciendo la geometría de falla final del bastidor.



Fig. 30. Evidencia de deformación local.

Finalmente, el fallo estructural se vio agravado por un incremento significativo en la carga gravitatoria del sistema, derivado de la sustitución de materiales en las placas térmicas. Mientras que el diseño original prescribía el uso de aluminio por su baja densidad y alta conductividad térmica, la maquinaria fue construida utilizando placas de acero al carbono de gran espesor. Esto incrementó drásticamente la carga estática sobre un bastidor que ya se encontraba severamente comprometido, induciendo esfuerzos de flexión adicionales que aceleraron la inestabilidad geométrica del conjunto.

Este diagnóstico integral de fallas mecánicas proporciona la evidencia empírica necesaria para la fase de simulación numérica mediante ingeniería asistida por computadora (CAE), donde se procederá a validar científicamente el impacto de cada una de estas variables y a fundamentar las dimensiones del nuevo bastidor rediseñado.

4.3.2.1. Propuesta de mejora para la parte mecánica.

A partir del diagnóstico y la identificación de los modos de falla por flexión y pandeo local, se procedió a evaluar alternativas de rediseño mediante simulación estática por el Método de Elementos Finitos (FEA). El objetivo principal fue dar rigidez a la estructura y lograr una distribución óptima de las cargas. Como antecedente del criterio técnico establecido en el análisis de vulnerabilidad, se ejecutaron los modelos de simulación numérica contemplando la aplicación de una fuerza puntual neta de 78,480 Newtons, magnitud que equivale a las 8 toneladas correspondientes a la capacidad máxima nominal del gato hidráulico instalado en el equipo. Este límite superior de carga en las pruebas virtuales se debe considerar para poder blindar estructuralmente al conjunto frente a cualquier condición extrema o error de operación en planta.

Con lo anterior se garantiza que los factores de seguridad obtenidos sean válidos bajo cualquier régimen de trabajo real y que las modificaciones geométricas propuestas soporten los esfuerzos máximos sin riesgo de colapso, asegurando que el bastidor nunca constituya el eslabón de falla mecánica.

Para corregir de manera definitiva la deficiencia crítica en la ortogonalidad y alineación del actuador, se desarrolló una reingeniería en el subsistema de sujeción inferior. Anteriormente, el acoplamiento se hacía únicamente con tres placas de acero A36 de 1/4 de pulgada (6,35 mm) de espesor dispuestas verticalmente y soldadas directamente al tubo en el centro del bastidor, dejando un espacio de 2 pulgadas (50,8 mm) entre placas. Este conjunto estaba unido por un tornillo pasante y una tuerca; pero, por tolerancias geométricas excesivamente holgadas, el montaje dejaba un juego angular que inclinaba al actuador, desencadenando el sistema de esfuerzos combinados y la deformación estructural ya analizada.

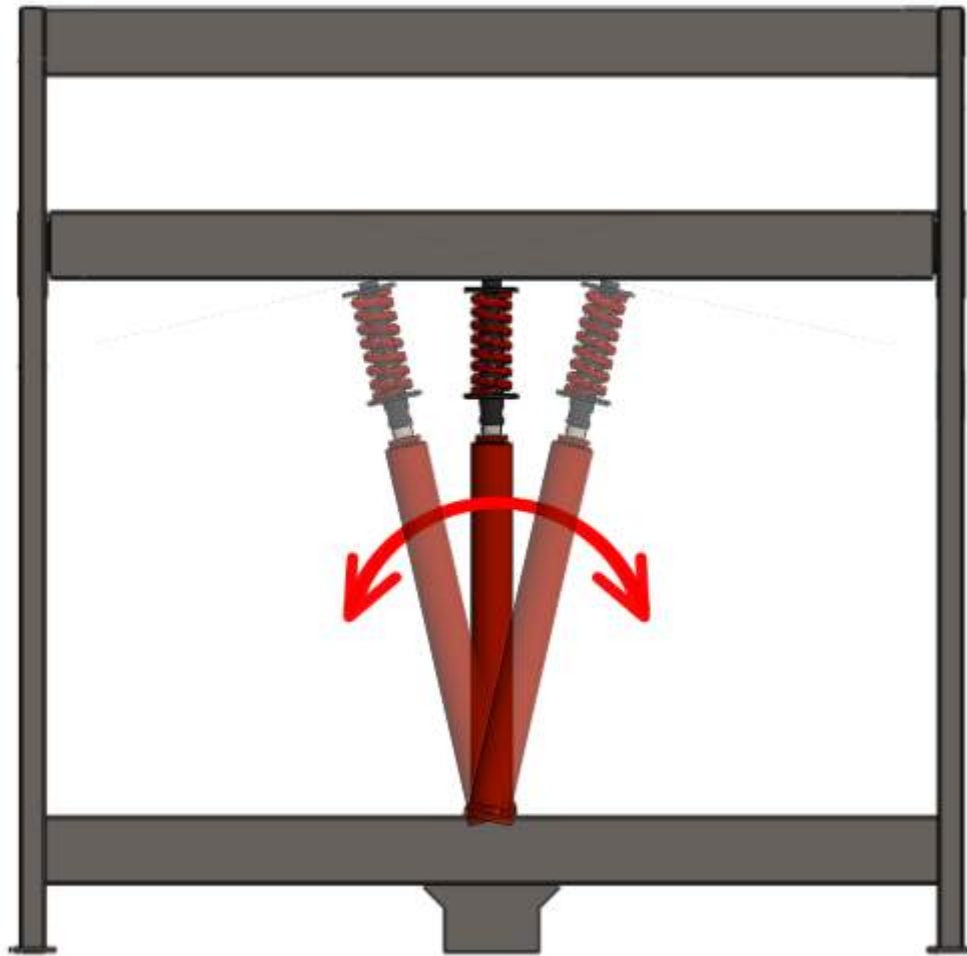


Fig. 31. *Holgura mecánica y pérdida de linealidad en el eje del gato hidráulico de la prensa.*

La solución que se propone, mantiene dichas placas verticales soldadas en su posición original como soporte de base, pero incorpora una placa estabilizadora horizontal dispuesta mecánicamente sobre el borde superior de las mismas. Esta nueva chapa horizontal presenta unos orificios mecanizados a la medida exacta de las orejas inferiores del gato hidráulico, actuando de guía geométrica rígida. Así, al insertar el actuador, las orejas atraviesan la placa horizontal encajando sin holguras, lo que obliga al gato a asentarse en posición estrictamente vertical y perpendicular al eje de la prensa. Al eliminar toda desviación angular, la fuerza se transmite de forma puramente axial y concéntrica, neutralizando el componente lateral que originaba la excentricidad y eliminando por completo el momento torsor de la estructura principal. Una vez restringido el movimiento lateral por la placa horizontal, el tornillo estructural atraviesa las orejas y el conjunto de placas verticales inferiores para consolidar un ensamble sólido, perfectamente alineado y seguro.

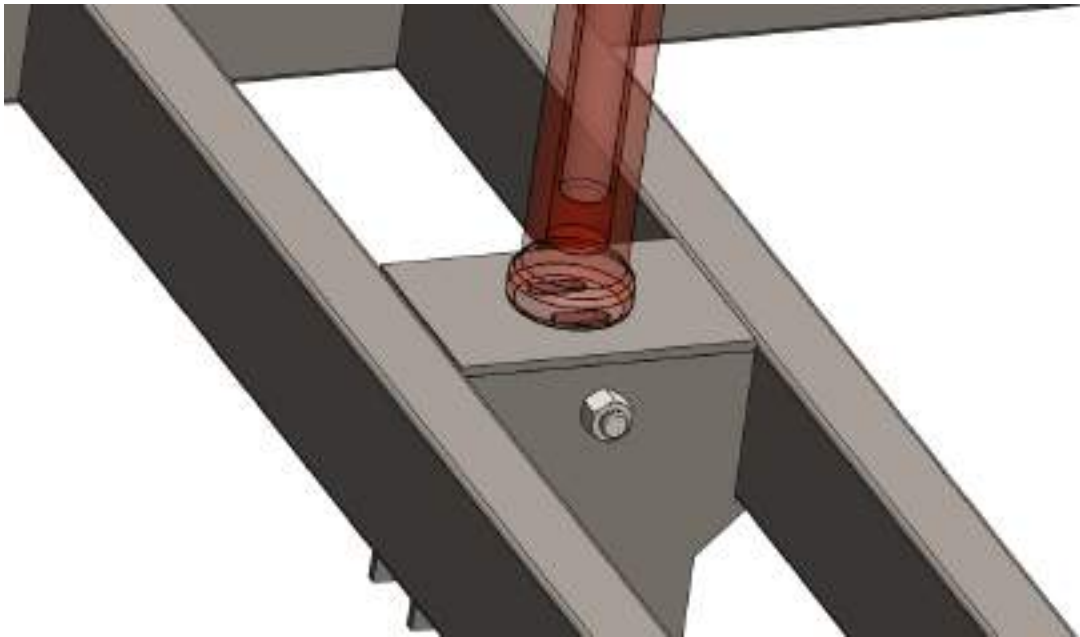


Fig. 32. Placa de acoplamiento y guía mecánica para asegurar la alineación axial recta del gato hidráulico.

De manera complementaria a la estabilidad posicional del actuador, se incorporó como requisito indispensable el sistema de amortiguación bajo los lineamientos de diseño de la comunidad global *Precious Plastic*, el cual se describe en la *Figura 28*. El módulo elástico se integra principalmente para reducir los picos de presión que produce la resistencia compactiva del material polimérico en la cámara. Este sistema, que actúa como un elemento de almacenamiento de energía elástica, disipa la carga dinámica y evita que sobre la estructura principal de la maquinaria se ejerza de forma directa y brusca la totalidad de las 8 toneladas de fuerza nominal.

Sumado a lo anterior, este arreglo evita que la carga del pistón se concentre como una fuerza puntual en el centro geométrico de la plancha, en su lugar, distribuye la presión operativa de manera homogénea sobre toda la superficie de contacto, asegurando una consolidación uniforme del polímero y reduciendo los esfuerzos cíclicos y la fatiga estructural. Esto se traduce en un funcionamiento continuo que prolonga la vida útil de todo el ensamble.

Con el propósito de evaluar el impacto conjunto de estas modificaciones geométricas y verificar si los cambios en la fijación del actuador eran suficientes para salvaguardar la integridad de la estructura principal, se dio paso a la validación del comportamiento del bastidor mediante una evaluación iterativa de calibres comerciales. Inicialmente, bajo un enfoque empírico, en la organización se planteó como solución al problema de deformación el incremento al espesor del perfil tubular rectangular, por lo que se propuso la transición hacia un Calibre 7 (4.76 mm), considerado de alta robustez industrial. Sin embargo, el análisis por elementos finitos (FEA) demostró la inviabilidad mecánica de esta propuesta. Durante la

evaluación numérica, el perfil alcanzó un esfuerzo de Von Mises máximo de 337.6 MPa, valor que supera el límite elástico comercial del acero estructural convencional 250 MPa.

Tipo de resultado: Tensión axial y de flexión en el límite superior Tensiones2
Escala de deformación: 26.2716

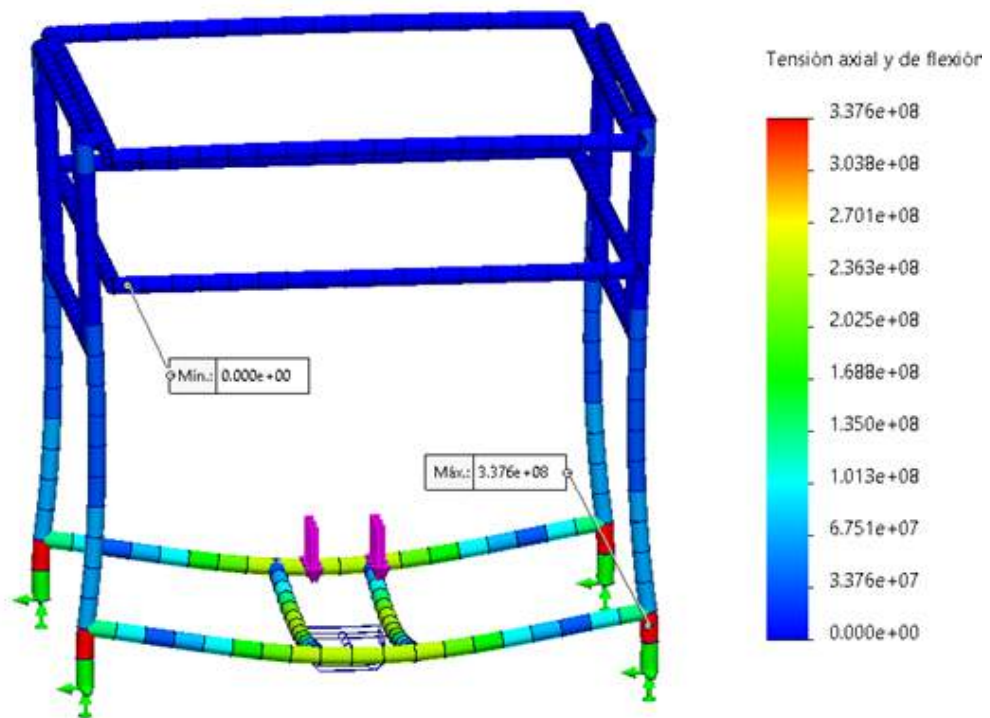


Fig. 33. Simulación de esfuerzos axiales y de flexión en la estructura de la prensa bajo carga operativa (escala de deformación exagerada).

Estos valores dieron lugar a que el criterio de diseño presentará un factor mínimo de seguridad de 0.74 en las regiones adyacentes a la concentración. Dado que estos valores son menores que la unidad $FS < 1$, el programa verificó, desde un punto de vista matemático, la ruptura por fluencia y la deformación plástica permanente de la estructura bajo la carga de trabajo nominal. De esta manera, se comprobó que el incremento aislado en el espesor del perfil, es mecánicamente insuficiente y técnicamente inviable frente a la magnitud de la fuerza aplicada.

Nombre del modelo: PROPUESTA 1
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad2
 Criterio: Automático
 Distribución de factor de seguridad: FDS min = 0.74

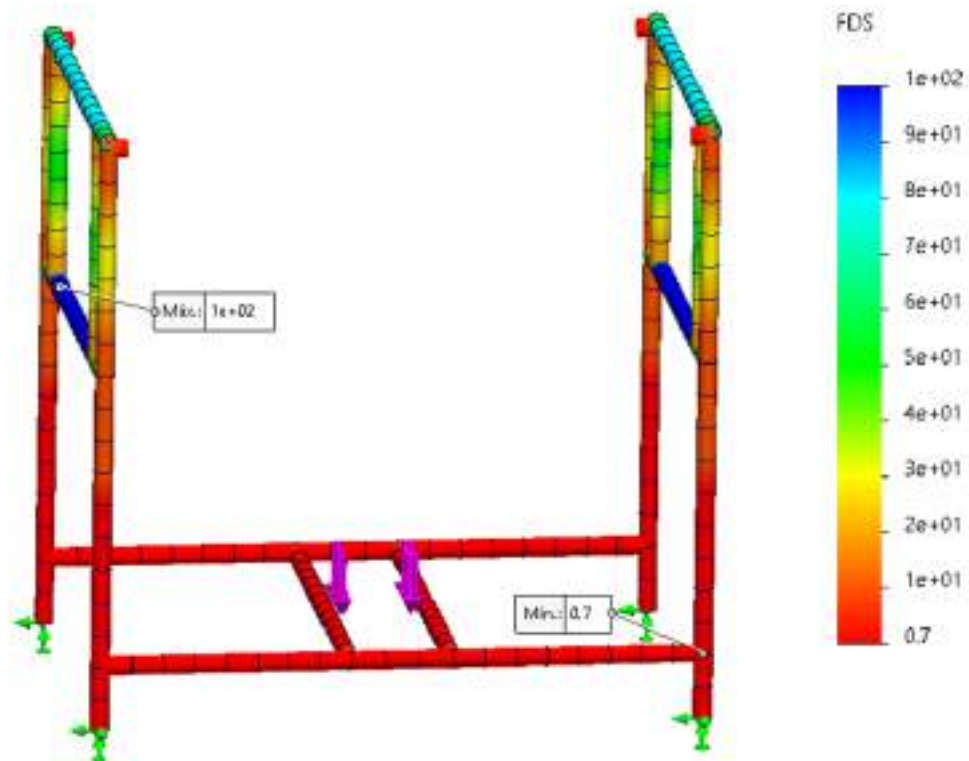


Fig. 34. Distribución del factor de seguridad (FDS) en el bastidor y localización de zonas críticas por debajo del límite unitario.

Ante los resultados del análisis previo, se desarrolló una propuesta integral de reingeniería orientada a modificar la trayectoria del flujo de cargas. Se propuso el uso de un perfil Calibre 11 (3.05 mm), estructuralmente más esbelto y eficiente, complementado con la integración de un soporte de reacción vertical directo acoplado mecánicamente en la sección inferior de sujeción del gato hidráulico y extendido longitudinalmente hasta el suelo de la planta. Los cálculos por elementos finitos (FEA) de esta nueva geometría mostraron una optimización radical del comportamiento mecánico del bastidor. El esfuerzo máximo de Von Mises cayó de forma drástica hasta tan sólo 128.9 MPa, lo que situaría al esfuerzo en un rango completamente seguro y muy por debajo del límite de fluencia del material.

Tipo de resultado: Tensión axial y de flexión en el límite superior Tensiones2
Escala de deformación: 5,464.42

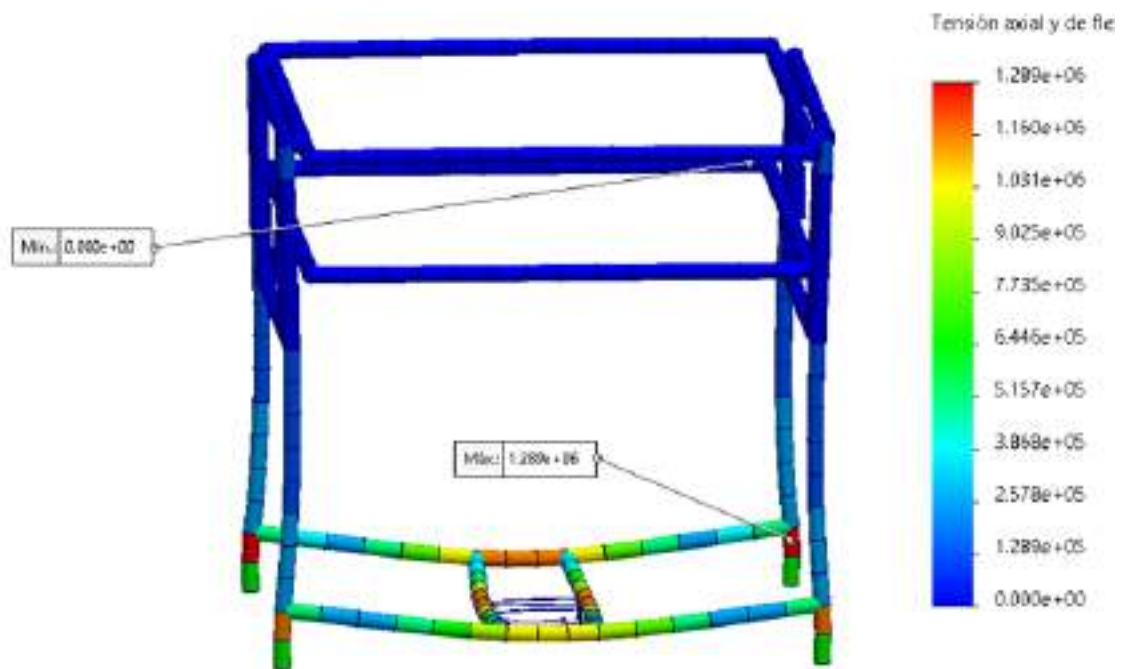


Fig. 35. Comportamiento estructural y tensiones residuales del bastidor bajo la nueva configuración geométrica.

Por último, el factor de seguridad mínimo alcanzó un valor de 190, lo que confirma que la estructura opera dentro de un régimen elástico seguro y libre de deformaciones plásticas permanentes. Sin embargo, este resultado también demuestra un sobredimensionamiento crítico, que más que una solución segura realmente no corrige la causa del problema, sino que solamente encubre las deficiencias del diseño original.

Esta geometría tiene como característica que la fuerza puntual de compresión no es absorbida bajo esfuerzos de flexión por el travesaño del bastidor, sino que es conducida directamente a la losa de cimentación a través de los soportes verticales. Esta modificación anula el momento flector crítico en el perfil tubular rectangular (PTR), suprimiendo tanto el riesgo de pandeo local como la concentración de esfuerzos que podrían derivar en una falla por fatiga o fractura mecánica prematura.

Distribución de factor de seguridad: FDS min = 1.9e+02

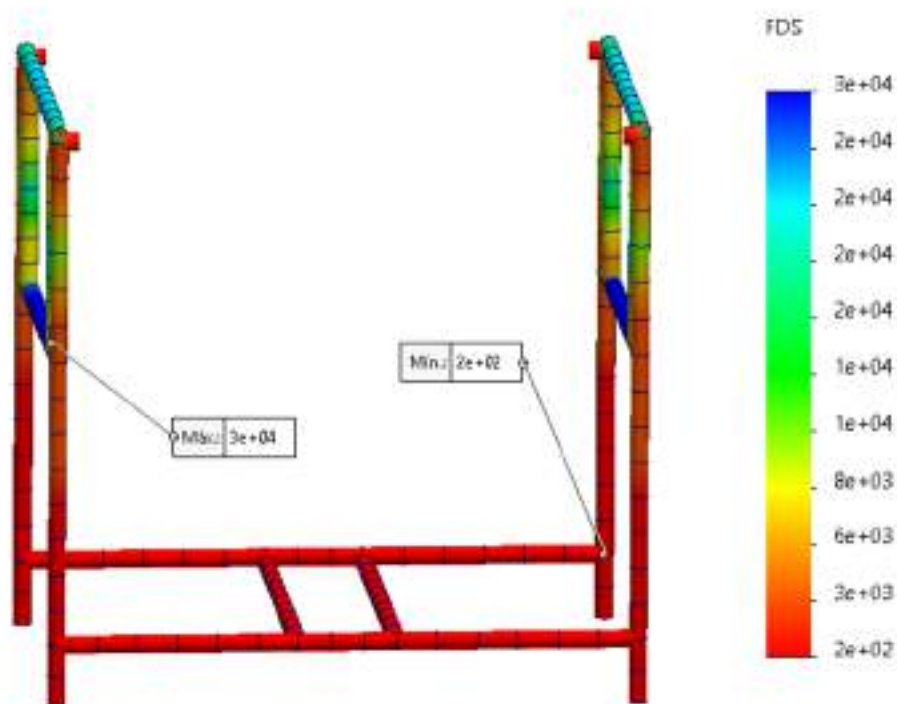


Fig. 36. Distribución del factor de seguridad (FDS) en el bastidor optimizado tras la implementación de los refuerzos estructurales.

Para asegurar el correcto funcionamiento del sistema y mitigar los efectos de inestabilidad por reacciones dinámicas, este rediseño exige una modificación estricta en las condiciones de frontera del ensamble. Como la fuerza vertical aplicada en la zona central produce un momento de volcamiento que tiende a levantar los extremos de la estructura, se determinó la necesidad de confinar mecánicamente los cuatro apoyos periféricos al suelo de la planta. Esta restricción se logrará mediante el diseño de una placa de asiento metálica que se soldará a la base de cada perfil y se fijará a la losa de cimentación mediante anclajes mecánicos expansivos de alta resistencia. Este arreglo de sujeción introduce una condición de soporte fijo en los nodos inferiores, anulando los grados de libertad de traslación e impidiendo cualquier desprendimiento o esfuerzo de arrancamiento en los extremos durante el ciclo operativo de la maquinaria.

Si bien estas simulaciones numéricas ofrecen una predicción confiable sobre el comportamiento del bastidor tras evaluar iterativamente distintos calibres comerciales y analizar la transferencia del vector de carga, queda claro que la deformación y el pandeo local observados en la estructura física se derivan de una acumulación de esfuerzos provocada por múltiples variables operativas. Entre ellas, cabe señalar la pérdida de la ortogonalidad del actuador y la ausencia de muelle de compresión. Más que invalidar o descartar estas propuestas de rediseño, el diagnóstico de metodología conduce al proyecto a una solución óptima, técnica y corporativamente viable. De este modo se evita la fabricación de prototipos físicos

por ensayo y error, lo que mitiga directamente el riesgo de pérdidas de tiempo y de recursos económicos para la organización.

4.3.3. Diagnóstico de vulnerabilidad térmica.

Se realizó un diagnóstico térmico y de transferencia de calor en el módulo de prensado para evaluar la eficiencia térmica de las planchas y el comportamiento de los componentes periféricos, todo esto realizado de manera paralela a las evaluaciones estructurales. Para ello, se desarrolló un modelo numérico de simulación multifísica, integrando los mecanismos de transferencia de calor por conducción en sólidos con herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD). La incorporación del análisis CFD permitió modelar rigurosamente el comportamiento de la capa límite térmica, así como los fenómenos de convección natural y radiación del aire circundante. Se configuró un régimen operativo continuo bajo una escala temporal de 180 min para estudiar la distribución tridimensional del gradiente de temperatura.

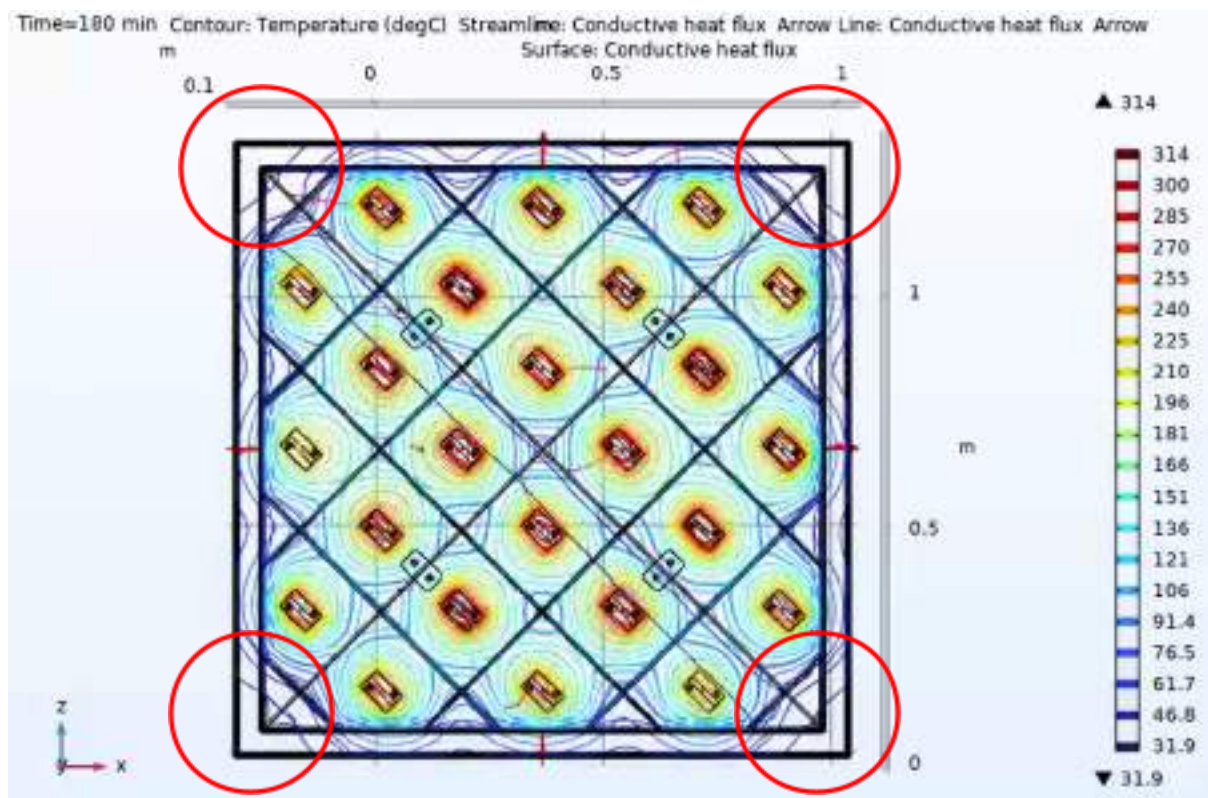


Fig. 37. Perfil de distribución de temperatura y vectores de flujo de calor por conducción en la plancha a los 180 minutos de operación.

Los resultados numéricos mostraron deficiencias críticas en la homogeneidad del perfil térmico. Al alcanzar el régimen permanente el núcleo de las planchas de compactación alcanzó una temperatura máxima de 308.21°C; sin embargo, el análisis de contornos térmicos mostró un pronunciado gradiente caracterizado por

una deficiente transferencia de calor hacia las esquinas exteriores, donde la temperatura decae hasta los 31.90°C. Este comportamiento genera zonas frías localizadas que alteran la viscosidad del polímero durante el prensado, comprometiendo de forma directa la consolidación y la calidad superficial de las láminas recicladas. De igual forma, la conducción del flujo de calor demostró que la falta de barreras aislantes provoca que la estructura y el entramado de las planchas funcione como disipador pasivo llegando a temperaturas críticas de hasta 214°C en los puntos de acoplamiento mecánico cercanos al bastidor.

La existencia real de estas zonas periféricas frías fue comprobada de modo empírico a partir del análisis de la calidad del producto terminado. La falta de un flujo térmico homogéneo en los límites de la plancha, anticipada numéricamente por el modelo, imposibilitó que el polímero alcanzara la temperatura adecuada de fusión en los bordes. Esto derivó en un defecto crítico de consolidación donde las esquinas de las láminas no lograron plastificarse ni integrarse correctamente. Tal comportamiento que confirma experimentalmente la severidad del gradiente térmico del módulo, tal como se evidencia en el registro fotográfico.



Fig. 38. Evidencia de defecto de consolidación y plastificación incompleta en los bordes de la placa de plastimadera debido al gradiente térmico periférico.

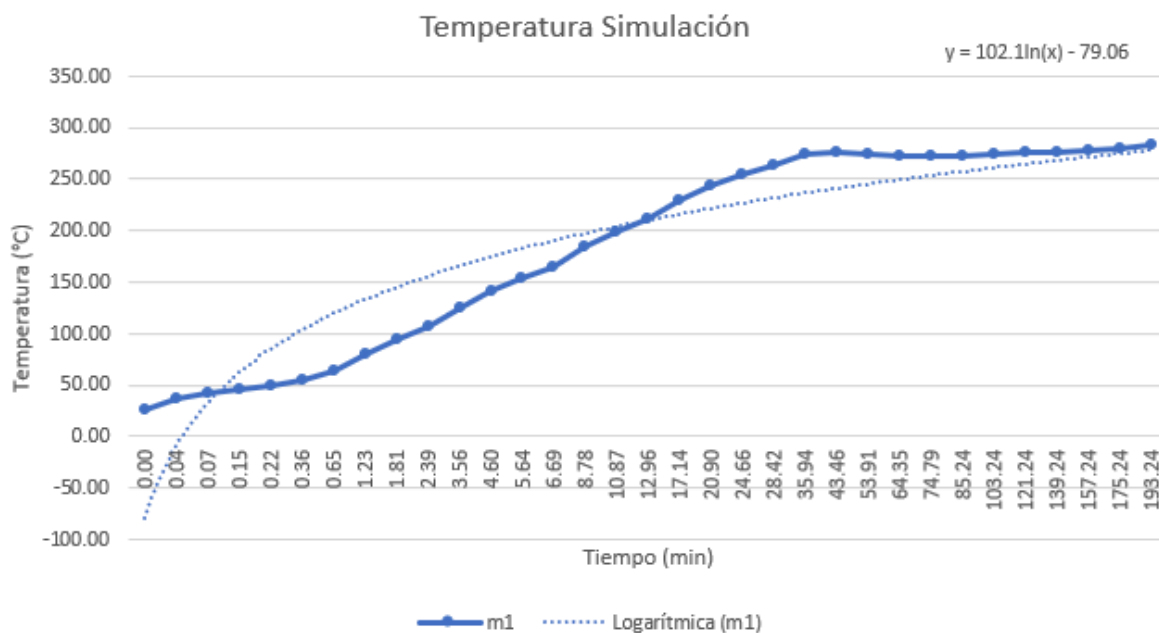
Con el propósito de validar los fenómenos observados en el entorno virtual, se procedió a tomar lecturas térmicas directas a la maquinaria y se llevaron a cabo pruebas experimentales en condiciones reales de operación en el taller, registrando de manera transitoria la evolución del comportamiento térmico. Para el escenario virtual, la simulación multifísica recopiló un total de 33 datos discretos distribuidos a lo largo de un horizonte temporal de 180 min, registrando una estabilización

asintótica de 283.28°C en la curva transitoria y un pico máximo absoluto de 314°C en las zonas de acoplamiento.

Por otro lado, la adquisición de datos en campo constó de un muestreo masivo de 106 datos experimentales en total, capturados manualmente durante un periodo continuo de 59 min, donde el sistema real alcanzó un umbral crítico máximo de 373.6°C medido mediante un termómetro infrarrojo industrial de no contacto marca Westward.

Para el procesamiento matemático de ambos escenarios, los conjuntos de datos discretos obtenidos tanto en la simulación como en la fase experimental se tabularon y procesaron. Mediante las herramientas analíticas, se generaron los respectivos gráficos de dispersión y se calcularon sus líneas de tendencia, obteniendo formalmente las ecuaciones de ajuste logarítmico que permiten comprender a fondo la cinética de transferencia de calor de ambos entornos.

4.3.3.1. Análisis de las tendencias térmicas.

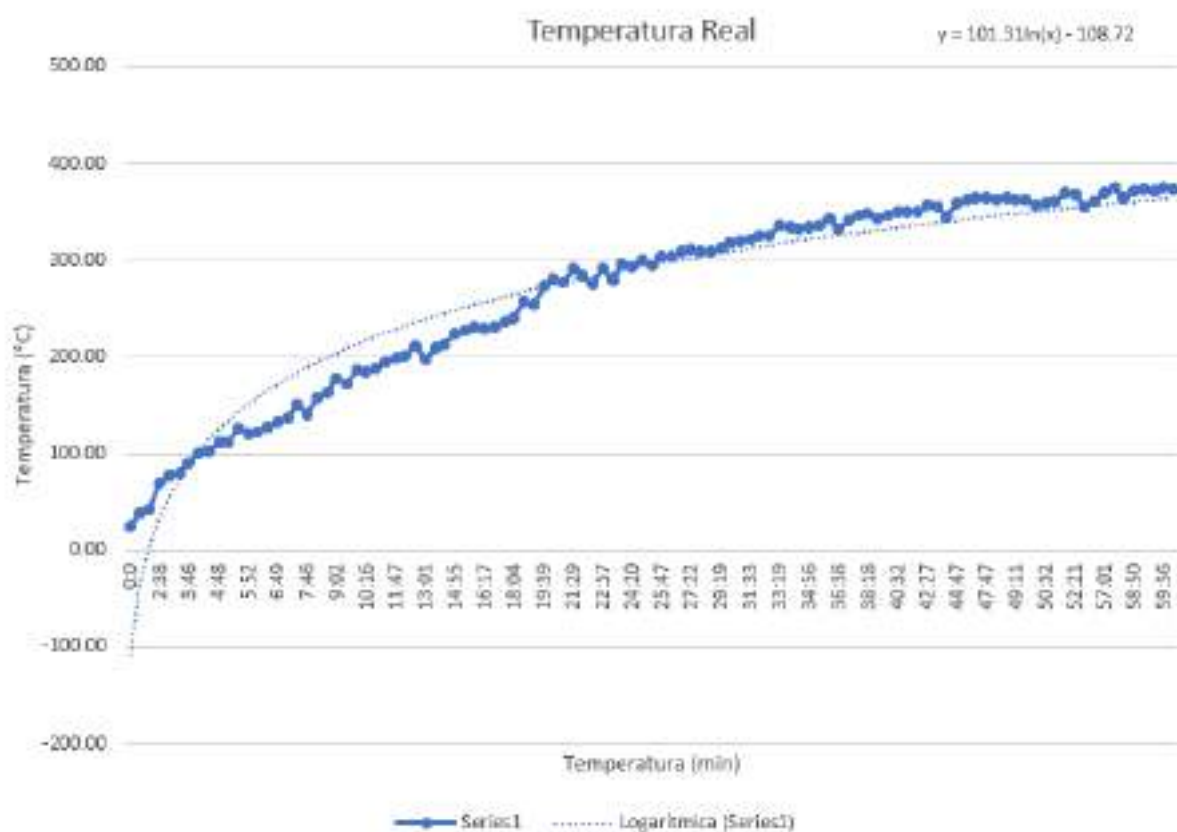


Gráfica 1. Predicción virtual de la evolución temporal de la temperatura en la plancha durante un ciclo de 180 minutos.

- **Comportamiento del Modelo Virtual:** La curva de simulación numérica se encuentra gobernada por la función predictiva obtenida directamente de su gráfico de dispersión, calculada a partir de un total de 33 datos discretos recopilados a lo largo de un horizonte temporal de 180 min de procesamiento virtual. La ecuación de ajuste y tendencia logarítmica para este entorno es:

$$y = 102.1\ln(x) - 79.06$$

La interpretación termodinámica de los coeficientes de la ecuación de ajuste de la simulación responde directamente a las condiciones ideales del entorno digital y a la naturaleza de las funciones logarítmicas. Por un lado, el término independiente (-79.06) opera como un factor de desfaseamiento y anclaje inicial necesario para desplazar la asíntota vertical de la función $\ln(x)$, la cual tiende al infinito negativo cuando el tiempo se aproxima a cero, obligando a la curva matemática a acoplarse con la realidad al forzarla a interceptar el origen temporal dentro de un rango coherente de temperatura ambiente entre los 20 °C y 25 °C, compensando así el cálculo de transferencia calórica masiva e instantánea que el *software* ejecuta en el primer segundo. Por otro lado, el coeficiente logarítmico (102.1) cuantifica la pendiente transitoria o tasa de calentamiento del sistema, cuya elevada magnitud es el resultado directo de omitir en el modelo virtual las imperfecciones del mundo real, tales como las holguras mecánicas y micro-espacios de aire que actúan como resistencias térmicas superficiales entre la resistencia y el barreno. Por lo anterior, se puede asumir en su lugar una conductividad perfecta en un aluminio puramente homogéneo y un régimen de pérdidas calóricas limitado exclusivamente a las ecuaciones teóricas de radiación y convección del módulo CFD, lo que provoca que el sistema digital acumule energía de forma sumamente acelerada en su fase inicial.



Gráfica 2. Curva de respuesta térmica transitoria obtenida de manera experimental en el taller durante un ciclo de 59:56 minutos.

- **Comportamiento del Sistema Experimental:** Por su parte, los 106 datos obtenidos en el taller durante un periodo continuo de una hora con veinte segundos de prueba real se ajustan de manera rigurosa a la ecuación empírica deducida estadísticamente a partir de la línea de tendencia de su gráfica:

$$y = 101.31\ln(x) - 108.72$$

La interpretación termodinámica de los coeficientes de la ecuación de ajuste real, representa de forma directa, el impacto de las condiciones físicas del taller y la inercia térmica de la maquinaria. El término independiente (-108.72), por otra parte, actúa como factor de desfase y de anclaje inicial necesario para contrarrestar la tendencia de la función $\ln(x)$ de irse al infinito negativo cuando el tiempo se aproxima a cero, representando físicamente la severa inercia térmica y pérdidas por transferencia calórica que padece la máquina al momento mismo del encendido.

Es justo en el arranque donde las resistencias térmicas de contacto por las holguras de aire entre los cartuchos y los barrenos del bloque de aluminio, sumadas a la fuga de calor por conducción hacia el bastidor frío, ralentizan notablemente la puesta en marcha del calentamiento y exigen este robusto contrapeso numérico para forzar a la curva matemática a arrancar coherentemente desde la temperatura ambiente medida en el taller. Por otro lado, el coeficiente logarítmico (101.31) cuantifica la pendiente transitoria o velocidad sostenida con la que el conjunto acumula energía térmica conforme avanza el tiempo, indicando que una vez vencido el freno inicial, el sistema experimenta una ganancia de temperatura sumamente agresiva y eficiente que es el reflejo directo del excelente desempeño de la lana mineral acústica de fibra de vidrio instalada en la prensa, la cual confina con éxito el flujo calórico en el núcleo, impide su disipación masiva hacia la atmósfera por convección o radiación libre y permite que la máquina rompa con velocidad la barrera de los 250°C en los primeros 20 min para continuar escalando con firmeza.

Al emparejar y contrastar analíticamente los coeficientes de la simulación teórica frente a los obtenidos en la campaña de medición en el taller, se revelan correlaciones cualitativas y divergencias físicas de gran valor para el diagnóstico de la maquinaria:

Primero, al confrontar los términos independientes, se evidencia matemáticamente el efecto de los *frenos* térmicos reales del taller, del taller, en donde el coeficiente de desfase experimental (-108.72) es notoriamente más bajo y negativo que el calculado de forma idealizada por el *software* (-79.06). Esta diferencia demuestra de forma contundente que, al momento exacto del encendido, el sistema real experimenta un transitorio inicial mucho más lento debido a las resistencias térmicas de contacto (las holguras de aire entre los cartuchos calefactores y los barrenos) y a las fugas masivas por conducción directa hacia la estructura metálica de soporte, fenómenos de inercia y disipación inicial que el modelo virtual asume como inexistentes o instantáneos.

En segundo lugar, al comparar los coeficientes logarítmicos, se puede apreciar un comportamiento muy revelador. El valor real de la pendiente (101.31) prácticamente coincide con el valor de la simulación teórica (102.1). Esta igualdad matemática nos muestra que, una vez superada la inercia del inicio y saturadas las uniones mecánicas, la velocidad transitoria con la que la máquina real acumula calor y gana temperatura es casi tan eficiente y agresiva como en el entorno digital perfecto. En el plano físico, este paralelismo ratifica el excelente desempeño de la lana mineral acústica de fibra de vidrio instalada en la prensa real. Al estar presente en la máquina física, este aislamiento logra confinar de manera exitosa el flujo calórico dentro del núcleo, equilibrando la tasa de calentamiento real con la idealizada y permitiendo que el sistema rompa con rapidez la barrera de los 250°C en los primeros 20 minutos. Eso confirma que la discrepancia en los valores pico finales de temperatura no se debe a una falta de potencia o velocidad de las resistencias, sino a la acumulación energética prolongada que propicia la presencia de dicha barrera física que no pudo ser incorporada en la simulación por las limitaciones de tiempo descritas.

4.4. Gestión de contingencias, reingeniería y entrega de producto final.

Este apartado detalla la culminación técnica del proyecto mediante el desarrollo y entrega de las bancas urbanas destinadas al programa local *Mete gol por el ambiente*. Ante los retos identificados en la maquinaria interna durante la fase de estabilización, mi labor se centró en asegurar que el producto final cumpliera estrictamente con los estándares de alta resistencia y seguridad pública. Para ello, el desarrollo se fundamentó en un diseño robusto basado en el análisis de cargas y factores de seguridad, garantizando que cada unidad fuera capaz de soportar las exigencias de un entorno de uso rudo en espacios públicos.

La organización ejecutó un plan de contingencia consciente en la adquisición estratégica de tablas de plastimadera a través de un proveedor externo, de esta manera no se compromete el cumplimiento de los plazos gubernamentales mientras se gestiona la reingeniería de la maquinaria propia. En esta etapa mi obligación

técnica fue la de validar la compatibilidad mecánica y dimensional de estos insumos con el diseño original de las bancas. El proceso de supervisión sirvió para que el material externo mantuviera la integridad estética y funcional que se proyectó en la fase de ingeniería.

Con los insumos recibidos se llevaron a cabo las operaciones de transformación en planta, entre las que se encuentran cortes de precisión y procesos de barrenado, bajo mi supervisión.

Estas acciones permitieron integrar de manera exacta las piezas de plastimadera a las estructuras metálicas, cuya manufactura y planimetría técnica yo había diseñado y coordinado previamente con un tercero. Esta etapa de integración final no solo permitió cumplir con la meta de producción, sino que validó la documentación técnica generada, que el ensamble fuera sistemático y los activos finales estuvieran listos para su implementación en la Alcaldía Xochimilco.

4.4.1. Diseño estructural de bancas.

El diseño técnico de la banca urbana no partió de cifras arbitrarias, sino de una justificación demográfica y antropométrica basada en el contexto de salud pública y las características físicas de la población nacional. Se estableció una carga de diseño neta de 2,650 N (aproximadamente 270 kg) calculada específicamente para un módulo de tres personas. Este valor se fundamentó al cruzar las estadísticas de masa corporal e indicadores de bienestar del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Instituto Nacional de las Mujeres (INMUJERES) del año 2024 con los datos de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición, los cuales sitúan la prevalencia de sobrepeso y obesidad en adultos mexicanos en un 75.2%.

Si se diseñara la banca utilizando el peso promedio de la población global (aproximadamente 70 kg o 75 kg por persona), el mobiliario fallaría prematuramente o quedaría subdimensionado ante el perfil de salud pública y prevalencia del país. Por ello, bajo un criterio de diseño inclusivo, se asignaron 90 kg nominales por persona, absorbiendo con ello el percentil 95 de la población adulta mexicana. Esto significa que el elemento está geométricamente dimensionado para que tres usuarios con un peso significativamente superior al promedio puedan ocupar el asiento de manera simultánea y segura.

Además, el excedente numérico que resulta de fijar este límite sirve como una reserva estructural crítica para atenuar los esfuerzos dinámicos, tales como los impactos mecánicos al sentarse o las solicitaciones imprevistas por movimientos bruscos, disipando la energía cinética sin inducir deformaciones permanentes de tipo plástica. De esta forma se asegura que el activo conserve su integridad

estructural y alargamiento de su vida útil ante las condiciones severas del uso rudo masivo en los espacios públicos de la alcaldía.

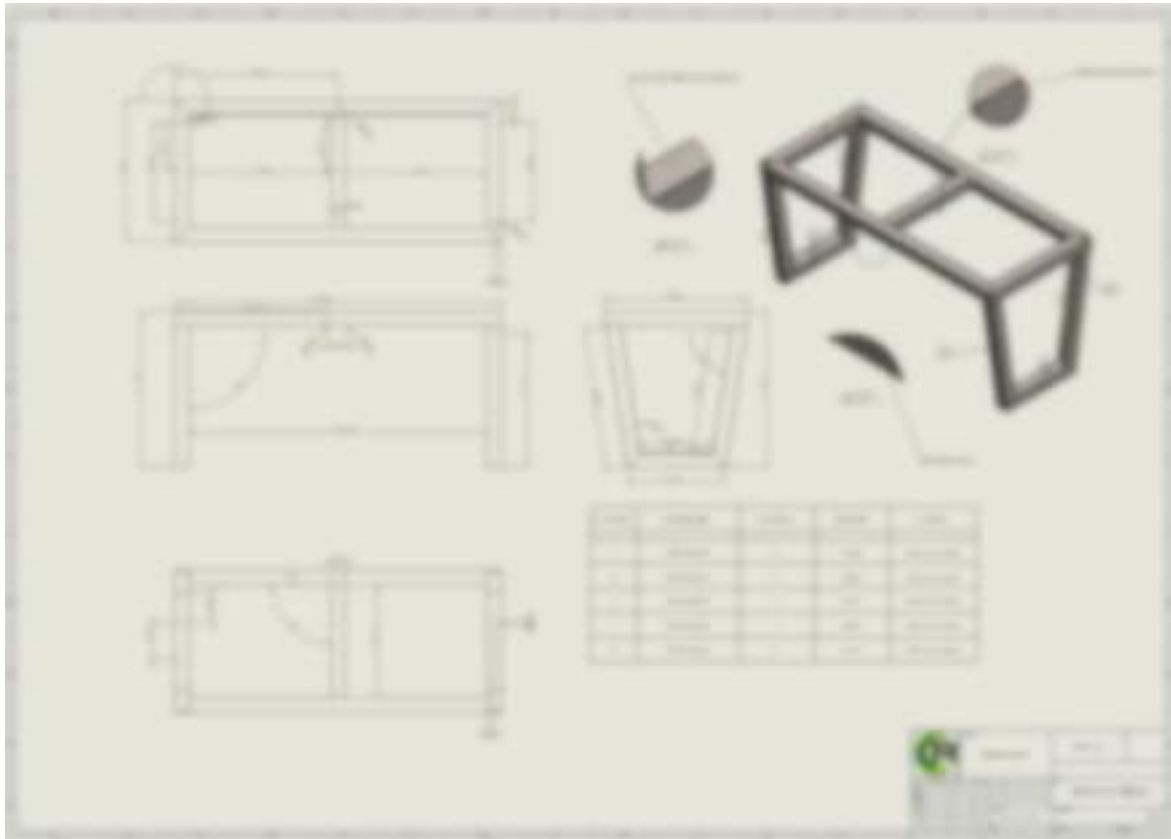


Fig. 39. *Plano banca*

Para garantizar la solvencia del diseño antes de su fabricación, se sometió el modelo a simulaciones de Método de Elemento Finito (FEA). Las evaluaciones de esfuerzo bajo el criterio de Von Mises confirmaron que las zonas de mayor sollicitación mecánica se mantienen significativamente por debajo del límite elástico del acero estructural, garantizando que el componente opere de manera permanente dentro de un régimen puramente elástico y seguro. En cuanto a comportamiento cinemático y rigidez, el análisis numérico validó que las deflexiones estructurales son marginales bajo condiciones de carga total, asegurando así una óptima estabilidad y firmeza para el usuario final. El análisis global arrojó un factor de seguridad muy sólido, que da cuenta de la viabilidad mecánica de la banca frente a las exigencias del entorno, cumpliendo así los más estrictos estándares de seguridad pública y confirmando la idoneidad geométrica de la propuesta.

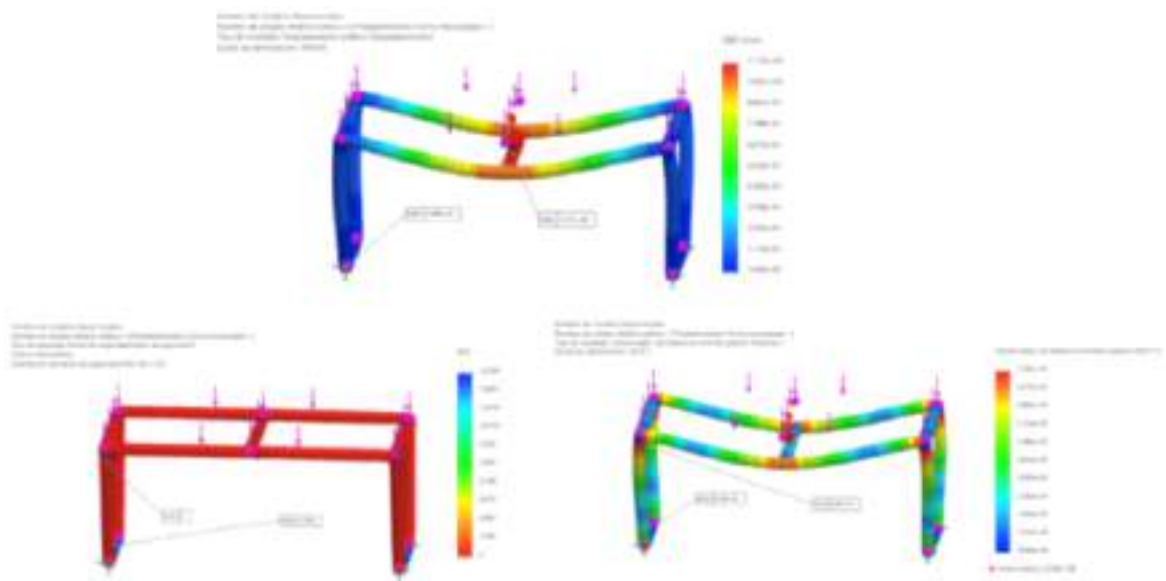


Fig. 40. Validación virtual y criterios de falla de la banca bajo carga nominal total mediante el Método de Elemento Finito.

4.4.2. Ensamble colaborativo e integración final.

El proceso de ensamble final de las 100 unidades se ejecutó en las instalaciones de la planta bajo un esquema de colaboración multidisciplinaria. Si bien el liderazgo operativo del armado recayó en el encargado del taller, mi participación se centró en brindar el soporte de ingeniería necesario para asegurar que la integración de los componentes metálicos y de plastimadera se ajustara estrictamente a las tolerancias geométricas y dimensionales establecidas en los planos. Esta fase de producción permitió validar que, a pesar de las modificaciones en el suministro y provisión de los materiales, la documentación técnica y la planimetría generadas resultaron lo suficientemente robustas para garantizar la intercambiabilidad de las piezas y un ensamble sistemático y repetible en la línea de trabajo.

4.4.3. Logística de entrega y cierre de proyecto en Xochimilco.

La culminación del proyecto consistió en la distribución y entrega formal del mobiliario urbano en la Alcaldía Xochimilco. En la etapa de cierre, colaboré muy de cerca con la Coordinación de Logística para el despliegue de las unidades, planificándolo y haciéndolo cumplir. Me hice cargo de la gestión del aseguramiento de la calidad del producto terminado en las maniobras de carga y traslados y la asistencia técnica especializada en los sitios de emplazamiento final.

El trabajo en equipo facilitó el cumplimiento de los compromisos institucionales, entre ellos los asumidos ante el gobierno para el programa. La colaboración reforzó la posición de la organización en el sector. El éxito de la fase mostró que la

ingeniería de diseño y la gestión de operaciones fueron factores clave para minimizar los problemas en la cadena de suministro y poder cumplir con los objetivos institucionales. inistro y alcanzar de manera sistemática los objetivos institucionales establecidos.



Fig. 41. Liberación de proyecto y entrega del mobiliario urbano sustentable en el Embarcadero de Cuemanco, Xochimilco.

5. Conclusiones.

La culminación exitosa de este proyecto demostró que la viabilidad de una ingeniería de gran alcance no depende únicamente de la rigidez de un diseño preliminar, sino de la capacidad adaptativa y la resiliencia operativa del equipo de trabajo frente a la adversidad.

A pesar de los complejos retos técnicos identificados en la maquinaria interna durante las fases de estabilización y las contingencias imprevistas surgidas, el

proyecto se consolidó gracias a un esquema de colaboración multidisciplinaria y a una filosofía orientada a la resolución de problemas en tiempo real en el taller. Este esfuerzo conjunto y coordinado permitió que la organización transformara con éxito un proceso de manufactura artesanal en una operación de grado industrial con impacto gubernamental directo, cumpliendo con la entrega sistemática de las 100 unidades de mobiliario sustentable en los plazos establecidos y estrechando de forma permanente los lazos entre el diseño de ingeniería y la ejecución real en la línea de producción.

Desde el punto de vista del diseño mecánico, la termodinámica y la ingeniería eléctrica, la implementación de simulaciones computacionales representó el puente directo y definitivo entre el saber académico adquirido en la facultad y la práctica profesional en la planta. En esta fase, los fundamentos teóricos demostraron su máxima utilidad, otorgando el criterio analítico necesario para transpolar el conocimiento del aula a un entorno productivo real. La importancia de estas herramientas virtuales estuvo en que pudieron reproducir el comportamiento de los sistemas con la carga operativa real, con un margen de precisión del 98,7 % en la convergencia del modelo numérico y un margen de error mínimo de tan solo el 1,3 % con respecto a los datos experimentales obtenidos en campo.

Estos indicadores de correlación consolidaron al entorno virtual no sólo como recurso de diagnóstico, sino como plataforma de predicción e iteración matemática imprescindible para fundamentar la selección de materiales estructurales para el rediseño integral de la maquinaria. Esta aproximación rigurosa entre las ecuaciones analíticas escolares y la respuesta empírica de los componentes validó el potencial del modelado multifísico, elevándose de un mero generador de gráficos a un pilar de toma de decisiones ingenieriles con un impacto directo en la seguridad pública y el aseguramiento de la calidad.

Profundizando en este vínculo, la formación universitaria demostró ser el pilar indispensable que otorgó la capacidad conceptual para enfrentar la crisis del proyecto. El valor de la facultad no consistió solo en abrir el horizonte hacia el uso de herramientas especializadas aplicadas en la industria, sino en proveer los conocimientos científicos necesarios para interpretar y validar dichos análisis numéricos con rigor. Con este soporte teórico fue posible conocer la física real que subyace a los mapas de calor, circuitos y vectores de deformación mecánica, sin caer en la tentación de tomar los resultados virtuales como simples representaciones visuales automáticas.

Esta experiencia ratifica que la rigurosidad analítica infundida en las aulas es la herramienta más potente que un egresado tiene para respaldar sus decisiones ante contingencias críticas en el sector productivo; asimismo, evidencia que la institución actúa como un catalizador que ayuda al alumno a encontrar su verdadera pasión técnica, otorgando un propósito claro al aprendizaje que evita caer en la

memorización inercial de planes de estudio sin comprender su trascendencia en el mundo exterior.

Sin embargo, el impacto con el entorno industrial evidenció la necesidad imperiosa de fortalecer los mecanismos de vinculación práctica en el modelo educativo, dejando al descubierto áreas de oportunidad formativa que sería conveniente reestructurar.

En campo se ha podido comprobar que la inserción en proyectos reales, ya sea en el sector corporativo a través de estancias profesionales o en plataformas de alta competencia tecnológica como las escuderías tipo Baja SAE, no deberían permanecer como una opción secundaria o un requisito puramente académico y burocrático en los planes de estudio. Estos escenarios son el verdadero ámbito de transformación, donde el alumno deja de ser un estudiante pasivo y pasa a gestionar proyectos reales de ingeniería, a asimilar restricciones presupuestarias y a dominar el trabajo multidisciplinario bajo los esquemas de manufactura y calidad industrial.

Fomentar institucionalmente la aplicación obligatoria y generalizada de estos conocimientos en contextos corporativos y de competencia técnica real antes del egreso democratizaría la oportunidad de consolidar un propósito de aprendizaje claro, proveyendo una madurez operativa que en este proyecto fue clave para resolver la toma de decisiones metrológicas con proveedores y mitigar las contingencias de producción en tiempo real.

Por último, la ejecución íntegra de este proyecto, que involucró desde el análisis termomecánico y la redefinición de la infraestructura eléctrica, hasta la administración de la cadena de suministro y la logística de distribución, evidenció la ventaja que caracteriza a la ingeniería mecatrónica como una disciplina de integración nativa y sinérgica de diferentes campos del conocimiento.

La experiencia en campo demostró que es de importancia crítica mantener un perfil versátil y rechazar la reclusión o el encasillamiento de una sola vertical o sector tecnológico. En el contexto de una industria moderna, el ingeniero debe ser un articulador multifacético, porque el no cerrarse a una sola disciplina permitió diagnosticar fallas complejas de raíz, en las que interactuaban variables eléctricas, mecánicas y térmicas de forma simultánea, coordinando proveedores externos y liderar operaciones en planta.

Esta visión integral reafirma que el valor de la ingeniería no se agota en la manufactura secuencial de activos, sino en la capacidad de gestionar la convergencia tecnológica y resolver contingencias para alcanzar de forma sistemática los objetivos institucionales.

6. Bibliografía.

- Precious Plastic. (2026). *Sheetpress: Open source plastic recycling machine*. Recuperado de <https://preciousplastic.com/>. Licencia CC BY-SA 4.0.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Instituto Nacional de las Mujeres. (2024). *Mujeres y Hombres en México 2024*. INEGI; INMUJERES. <https://www.inegi.org.mx>