

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERIA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Innovación en la fabricación de estructuras metálicas
parabólicas: integrando tekla structures y el corte por plasma CNC**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Luz Delia Oliva Rodriguez

Elvis Quispe Chalco

Asesor:

Mg. Arnaldo Cahui Galarza

Juliaca, agosto de 2024

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo: Mg. Arnaldo Cahui Galarza, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **"INNOVACIÓN EN LA FABRICACIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS PARABÓLICAS: INTEGRANDO TEKLA STRUCTURES Y EL CORTE POR PLASMA CNC"** de los autores Luz Delia Oliva Rodriguez y Elvis Quispe Chalco tiene un índice de similitud de 12 % verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 20 días del mes de septiembre del año 2024



Mg. Arnaldo Cahui Galarza
Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 20 día(s) del mes de agosto del año 2024 siendo las 17:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Mtro. Leonel Chahueros Paucar el (la) secretario(a): Ing. Honor
 Deberly Para Luis y los demás miembros: Mg. Lily Zea
 Gonzales y el (la) asesor(a) Mg. Arnaldo
 Cahui Galarga con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

Innovación en la fabricación de estructuras metálicas parabólicas: integrando tabla
 structures y el corte por plasma cnc

del (los) bachiller(es) a) Mg. Delia Oliva Rodriguez
 b) Elio Quipe Chales
 c)

conducente a la obtención del título profesional de
 Ingeniero Civil
(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Mg. Delia Oliva Rodriguez

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	16	B	Buena	Muy Buena

Bachiller (b) Elio Quipe Chales

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	17	B+	Muy Buena	Sobresaliente

Bachiller (c)

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente(a)

 Asesor(a)

 Bachiller (a)

 Miembro

 Bachiller (b)

 Secretario(a)

 Miembro

 Bachiller (c)

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	7
I. INTRODUCCIÓN.....	8
II. ANTECEDENTES.....	9
IV. RESULTADOS.....	14
A. Capacidades de Tekla Structures en la Creación de Modelos 3D para Estructuras Metálicas	14
B. Precisión en los Cortes por Plasma CNC.....	24
C. Beneficios y Desafíos de la Integración.....	29
D. Comparación con Métodos Tradicionales.....	36
V. DISCUSION.....	39
A. Capacidades de Tekla Structures en la Creación de Modelos 3D para Estructuras Metálicas	39
B. Optimización del Proceso de Fabricación de Estructuras Metálicas Parabólicas mediante Plasma CNC.....	41
C. Optimización del Proceso de Fabricación de Estructuras Metálicas Parabólicas mediante Integración de Tekla Structures y Plasma CNC.....	42
D. Transformación Económica a través de la Tecnología.....	44
VI. CONCLUSIONES.....	45
VII. REFERENCIAS.....	48
VIII. ANEXOS.....	52
A. EVIDENCIA DE SUMISION DEL ARTÍCULO EN UNA REVISTA.....	52
B. RESOLUCION DE INSCRIPCION DEL PERFIL DE PROYECTO DE TESIS EN FORMATO ARTICULO APROBADO POR EL CONSEJO DE FACULTAD CORRSPPONDIENTE.....	53

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	29
Tabla 2.	37

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1.....	25
Cuadro 2.....	25
Cuadro 3.....	27
Cuadro 4.....	30
Cuadro 5.....	31
Cuadro 6.....	33
Cuadro 7.....	36

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	10
Figura 2	14
Figura 3	15
Figura 4	16
Figura 5	18
Figura 6	19
Figura 7	21
Figura 8	21
Figura 9	22
Figura 10	23
Figura 11	24
Figura 12	27
Figura 13	30
Figura 14	33
Figura 15	34
Figura 16	39

Innovación en la fabricación de estructuras metálicas parabólicas: integrando tekla structures y el corte por plasma CNC

RESUMEN

En este estudio, se evaluó el impacto de las tecnologías avanzadas, incluyendo Tekla Structures, el corte por plasma CNC y su integración, en la industria de las estructuras metálicas parabólicas. El objetivo principal fue analizar su eficiencia operativa, calidad del producto final y contribución a prácticas sostenibles. La metodología, de enfoque mixto, comprendió una encuesta detallada para datos cuantitativos y un análisis cualitativo para obtener percepciones subjetivas de los profesionales encuestados. Los resultados revelaron que Tekla Structures es utilizada en la industria de las estructuras metálicas, con un 70% de profesionales que la emplean frecuentemente y un 20% en todos sus proyectos. Su capacidad para generar modelos 3D detallados, reduce errores de diseño en un 80% y crear uniones precisas, demostrado en el caso de estudio como el Estadio Municipal Publio Castro. En cuanto a la velocidad de corte promedio para material de 12 mm fue de 837.22 mm/minuto con plasma CNC, en contraste con 411.46 mm/minuto y 339.66 mm/minuto para los métodos manuales, y mostró una desviación promedio de ± 0.49 mm y ± 0.51 mm y pérdidas de material del 6.00%-5.01%. La integración de estas tecnologías redujo el tiempo total de producción de 95:49 horas a 74:02 horas, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo costos laborales en un 22.50%. Además, logró un ROI del 15.56%, demostrando su solidez financiera. En la discusión, se destacó la importancia crítica de estas tecnologías para mejorar la calidad y competitividad del producto final. En conclusión, Tekla Structures es ampliamente utilizada en la industria de estructuras metálicas, con un 70% de profesionales que la emplean frecuentemente. Su capacidad para generar modelos 3D detallados reduce errores de diseño en un 80%, mientras que la integración del corte por plasma CNC reduce el tiempo de producción de 95:49 horas a 74:02 horas, con una mejora del 22.50% en eficiencia operativa y un ROI del 15.56%. La combinación de estas tecnologías establece un estándar en la industria y garantiza el éxito en un mercado competitivo.

Palabras Clave: Corte por Plasma CNC, Eficiencia, Estructuras Metálicas Parabólicas, Fabricación, Innovación, Tekla Structures.

Innovation in the manufacture of parabolic metal structures: integrating tekla structures and cnc plasma cutting

ABSTRACT

In this study, the impact of advanced technologies, including Tekla Structures, CNC plasma cutting and their integration, on the parabolic metal structures industry was evaluated. The main objective was to analyze its operational efficiency, quality of the final product and contribution to sustainable practices. The methodology, with a mixed approach, included a detailed survey for quantitative data and a qualitative analysis to obtain subjective perceptions of the professionals surveyed. The results revealed that Tekla Structures is used in the metal structures industry, with 70% of professionals using it frequently and 20% in all their projects. Its ability to generate detailed 3D models reduces design errors by 80% and creates precise joints, demonstrated in the case study such as the Publio Castro Municipal Stadium. Regarding the average cutting speed for 12 mm material, it was 837.22 mm/minute with CNC plasma, in contrast to 411.46 mm/minute and 339.66 mm/minute for manual methods, and showed an average deviation of ± 0.49 mm and ± 0.51 mm and material losses of 6.00%-5.01%. The integration of these technologies reduced total production time from 95:49 hours to 74:02 hours, improving operational efficiency and reducing labor costs by 22.50%. In addition, it achieved an ROI of 15.56%, demonstrating its financial strength. In the discussion, the critical importance of these technologies to improve the quality and competitiveness of the final product was highlighted. In conclusion, Tekla Structures is widely used in the metal structures industry, with 70% of professionals using it frequently. Its ability to generate detailed 3D models reduces design errors by 80%, while the integration of CNC plasma cutting reduces production time from 95:49 hours to 74:02 hours, with a 22.50% improvement in operational efficiency and an ROI of 15.56%. The combination of these technologies sets an industry standard and ensures success in a competitive market.

Keywords: CNC Plasma Cutting, Efficiency, Parabolic Metal Structures, Manufacturing, Innovation, Tekla Structures.

I. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción ha visto un crecimiento constante en la demanda de estructuras metálicas debido a su versatilidad, resistencia y eficiencia en diversas aplicaciones, desde puentes y edificios hasta infraestructuras industriales complejas [1]. La precisión en el diseño y fabricación de estas estructuras es esencial para garantizar la integridad y la seguridad de las construcciones en las que se utilizan [2].

La tecnología BIM ha revolucionado el diseño y la planificación en la construcción, mejorando la precisión y eficiencia. Tekla Structures, una plataforma de diseño y detallado de estructuras, permite crear modelos tridimensionales para una visualización y análisis completos. [3]. No obstante, la transición del diseño a la fabricación sigue siendo un desafío, a pesar de los avances en el diseño asistido por ordenador. Una innovación clave es la integración entre Tekla Structures y el corte por plasma CNC, facilitando una comunicación fluida entre el software de diseño y el proceso de fabricación. Los archivos CN generados a partir de modelos 3D en Tekla Structures sirven como guía precisa para el corte por plasma CNC, proporcionando detalles exactos sobre dimensiones, cortes y componentes [4]. Esta implementación tecnológica transforma la manera en que se fabrican las estructuras metálicas parabólicas, haciendo que la producción sea más eficiente y mejore en términos de eficacia. La tecnología de corte por plasma CNC es una solución eficiente para fabricar componentes metálicos, permitiendo cortes precisos y complejos en diversos materiales [5]. Su integración con Tekla Structures, a través de la creación e interpretación de archivos CN, asegura una producción consistente y precisa, marcando una nueva etapa en la industria de la construcción.

En esta investigación, se analiza el papel del Diseño Asistido por Computadora (CAD) y la Fabricación Asistida por Computadora (CAM) en optimizar el diseño y fabricación de estructuras metálicas parabólicas. El CAD utiliza software para crear modelos digitales en 2D o 3D, mientras que el CAM traduce estos diseños en instrucciones de fabricación automatizadas [6]. La integración de Tekla Structures con el corte por plasma CNC representa un ejemplo de cómo estas tecnologías se combinan para mejorar la eficiencia y la calidad en la fabricación de estructuras metálicas.

Este artículo explora cómo la integración de Tekla Structures y el corte por plasma CNC puede transformar la fabricación de estructuras metálicas parabólicas. Se analiza el proceso de generación de archivos CN a partir de modelos 3D en Tekla Structures y los beneficios económicos, de rendimiento y calidad de esta asociación tecnológica. Además, se presentan antecedentes detallados, la metodología del estudio, resultados y conclusiones. La innovación en la fabricación de estructuras metálicas parabólicas mediante esta integración tecnológica tiene el potencial de mejorar la eficiencia y calidad en la industria de la construcción. El artículo ofrece información relevante para profesionales, investigadores y empresas que buscan optimizar sus procesos de producción.

II. ANTECEDENTES

En los últimos años, la industria de la construcción ha transformado con la adopción del Modelado de Información para la Construcción (BIM) [6]. Esta metodología ha cambiado la concepción y ejecución de proyectos, permitiendo la creación y gestión de modelos virtuales con información precisa sobre todos los aspectos de una estructura [7]. En este contexto, Tekla Structures se ha destacado como una herramienta esencial para la creación de modelos BIM, especialmente en el ámbito de las estructuras metálicas. [8].

El CAD (Diseño Asistido por Computadora) utiliza software especializado para crear modelos digitales en 2D o 3D de componentes o sistemas, revolucionando el diseño y desarrollo de estructuras metálicas. Esta tecnología permite a los ingenieros visualizar, modificar y analizar modelos con precisión y eficiencia antes de la fabricación [9]. En nuestra investigación, Tekla Structures se destaca como una de las principales plataformas de CAD en la industria de la construcción metálica, proporcionando herramientas avanzadas para el modelado y documentación de proyectos estructurales.

Por otro lado, el CAM (Fabricación Asistida por Computadora) se centra en la traducción de diseños CAD en instrucciones de fabricación mediante la automatización de procesos de

producción [10]. En particular, el corte por plasma CNC (Control Numérico Computarizado) ha ganado prominencia en la fabricación de estructuras metálicas debido a su capacidad para realizar cortes precisos y eficientes en una variedad de materiales [11]. La integración de Tekla Structures con sistemas de corte por plasma CNC representa un paso adelante en la optimización de los procesos de fabricación, permitiendo una mayor coherencia entre el diseño digital y la producción física [12].

La integración entre Tekla Structures y el software CAM para máquinas CNC de corte por plasma ha transformado la fabricación de estructuras metálicas. En Tekla Structures, se modela la estructura detallada, incluyendo geometría, conexiones y materiales, y se exporta en formatos como STEP, DXF y DSTV. Los archivos CN generados contienen información detallada sobre cada pieza, que luego se importa al software CAM para crear trayectorias de herramientas y código G para la máquina CNC. Esta integración asegura una comunicación precisa entre diseño y fabricación, optimizando la producción y mejorando la calidad de las piezas cortadas por plasma, lo que representa un avance significativo en la industria de la construcción. Ver Figura 1 para una ilustración del proceso.

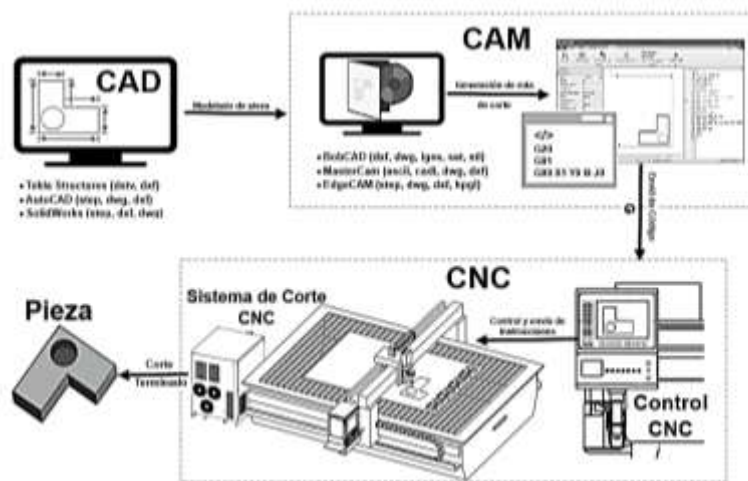


Fig. 1. Esquema de un sistema CAD/CAM.

Fuente: elaboración propia

La fabricación de estructuras metálicas parabólicas presenta desafíos debido a su geometría curva y la necesidad de precisión en cada componente [9]. Estudios recientes han demostrado que la implementación de tecnologías BIM como Tekla Structures en proyectos de estructuras metálicas ha llevado a una reducción del 25% en los tiempos de diseño y planificación [16]. Además, estas estructuras tienen aplicaciones en diversas industrias, incluidas las energías renovables [10]. Investigaciones anteriores han señalado que la fabricación de estructuras metálicas mediante corte por plasma CNC ha mejorado la precisión de los cortes en un 20%, lo que se traduce en una disminución del 8% en el desperdicio de material [17].

A pesar de los avances en la modelación 3D y la planificación a través de Tekla Structures, el desafío radica en la eficiente transición desde el diseño hasta la fabricación [12]. Estudios comparativos han revelado que, en proyectos que emplean la generación manual de instrucciones de corte, se registran tasas de error de hasta el 10% en la producción [18]. Este desafío ha impulsado la exploración de tecnologías innovadoras como el corte por plasma CNC, que automatiza el proceso de corte de piezas metálicas [14].

La tecnología de corte por plasma CNC ha evolucionado, permitiendo cortes precisos y limpios en una variedad de espesores y tipos de metales [15]. Estudios recientes han demostrado que la precisión del corte por plasma CNC ha mejorado en un 30%, reduciendo los retrabajos y ajustes posteriores [19]. La vinculación entre Tekla Structures y el corte por plasma CNC a través de archivos CN ha resultado en una asociación que optimiza la fabricación de estructuras metálicas. Estos archivos CN contienen información detallada sobre cada corte, sirviendo como guía para la máquina de corte por plasma, asegurando que los componentes producidos se ajusten al diseño original [4]

El estudio se enfoca en la interacción entre Tekla Structures y el corte por plasma CNC en la fabricación de estructuras metálicas parabólicas. Analiza cómo la generación automatizada de archivos CN desde modelos 3D en Tekla Structures mejora la eficiencia y calidad del proceso de producción, comparándolo con técnicas de fabricación convencionales. Además de los beneficios económicos, se exploran los impactos técnicos y medioambientales de esta colaboración tecnológica. La metodología, resultados y conclusiones del estudio se presentan en las siguientes

secciones, destacando esta integración como un avance significativo en la industria de la construcción.

III. METODOLOGIA

La investigación emplea un enfoque metodológico mixto que fusiona elementos de investigación aplicada y estudio de caso para examinar la asociación entre Tekla Structures y el corte por plasma CNC en la fabricación de estructuras metálicas parabólicas. Se utiliza un diseño de estudio de caso para analizar detalladamente esta colaboración, combinando métodos cualitativos y cuantitativos para comprender el fenómeno estudiado.

En el diseño de la muestra, se seleccionan empresas especializadas en la producción de estructuras metálicas que emplean Tekla Structures y corte por plasma CNC, además de métodos de fabricación tradicionales como el plasma manual. Se prioriza la inclusión de empresas de diversos tamaños y niveles de experiencia en estas tecnologías. Se estudian específicamente TESUCSA y SEDIMAC mediante un muestreo intencionado. El estudio comprende la funcionalidad de Tekla Structures en la creación de modelos 3D para estas estructuras, explora las capacidades del corte por plasma CNC en la fabricación de piezas, evalúa la optimización de procesos mediante esta integración, y analiza aspectos económicos y de rendimiento derivados de esta implementación conjunta.

En cuanto a las técnicas de recolección de datos, se utilizan tres métodos principales: encuestas, entrevistas semiestructuradas y observaciones directas, implementando así una estrategia de triangulación. Las encuestas sirven para comparar la percepción entre empleados de TESUCSA y SEDIMAC respecto al uso del software Tekla Structures. Las entrevistas semiestructuradas, que incluyen once preguntas, se utilizan para extraer temas y patrones sobre las capacidades del corte por plasma CNC, la optimización de procesos mediante la integración de Tekla Structures y el corte por plasma CNC, y el análisis de los aspectos económicos y de rendimiento de esta implementación conjunta. En total, se encuestan a veinte profesionales, incluyendo ingenieros mecánicos, civiles y técnicos. Las observaciones directas se llevan a cabo en un estudio de caso

para documentar los procesos y prácticas implicadas en la implementación de Tekla Structures y el corte por plasma CNC. Este estudio se centra en la fabricación e instalación de estructuras metálicas, coberturas y canaletas para las tribunas de oriente y occidente del Estadio Municipal Públío Castro, en el distrito de Curahuasi, Abancay, Apurímac.

Se realizó un análisis de confiabilidad para asegurar la precisión de las mediciones. Se utilizó el coeficiente Alfa de Cronbach en el software SPSS V26, obteniendo un valor perfecto de 1.000. Este resultado indica que las variables analizadas de la encuesta son consistentes entre sí. La alta consistencia de las variables asegura la solidez de las escalas de medición utilizadas en el estudio, lo que permite una interpretación de los resultados. Se realizó un análisis cuantitativo para comparar la eficiencia en la producción y los costos asociados entre el método Tekla Structures y corte por plasma CNC, y los métodos tradicionales de fabricación. Se utilizaron pruebas estadísticas como la prueba t de Student, el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de chi-cuadrado, con un nivel de significancia del 5%, para evaluar estas diferencias. Estas pruebas se realizaron en Microsoft® Excel® 2016 MSO (versión 2406). Los resultados identificaron diferencias significativas entre los grupos, lo que permite una evaluación de la eficacia comparativa de las metodologías estudiadas [5]. También, se lleva a cabo el cálculo del ROI (Return on Investment) como una medida adicional para evaluar la rentabilidad financiera de la implementación de esta metodología. La selección de solo dos empresas para el análisis puede no representar completamente la variabilidad del sector. Además, la dependencia de datos proporcionados por las empresas puede introducir sesgos. Futuras investigaciones podrían ampliar la muestra y considerar otros sectores industriales para una comprensión más amplia de la aplicabilidad de estas tecnologías.

Ecuación 1: ROI (Return on Investment)

$$ROI = \frac{\text{Ingreso Total} - \text{Costo de la Inversion}}{\text{Costo de la Inversion}} \quad (1)$$

El retorno de la inversión (ROI) de Tekla Structures se evalúa utilizando la fórmula estándar, que implica comparar los beneficios netos generados por el software con los costos de inversión inicial. Estos costos incluyen los gastos relacionados con la adquisición e implementación de Tekla

Structures, la capacitación del personal y la configuración del sistema de corte por plasma CNC. Se está utilizando el ROI, junto con datos ficticios, para evaluar la rentabilidad de un método para fabricar estructuras metálicas. Es importante tener en cuenta que este estudio tiene limitaciones, ya que se basa en datos simulados.

IV. RESULTADOS

A. Capacidades de Tekla Structures en la Creación de Modelos 3D para Estructuras Metálicas

1) Generación de Modelos Detallados

La capacidad de generar modelos 3D detallados es una de las características de Tekla Structures en el diseño de estructuras metálicas. A través de una amplia gama de herramientas, esta plataforma permite a los ingenieros crear representaciones precisas de cada componente estructural, desde vigas y columnas hasta conexiones complejas. Esta capacidad se ilustra claramente en la Figura 2, que muestra un ejemplo de un modelo 3D generado con Tekla Structures. Este nivel de detalle no solo mejora la comprensión del diseño, sino que también simplifica el proceso de ensamblaje y reduce los errores durante la construcción.



Fig. 2. Ejemplo de modelo 3D generado con tekla structures, este modelo incluye información detallada sobre dimensiones, geometría y propiedades de los materiales, lo que facilita la planificación precisa de la fabricación y el montaje.

Fuente: <https://www.tekla.com/us/bim-awards/comcast-technology-center>.

La generación de modelos detallados con Tekla Structures no solo mejora la visualización del proyecto final, sino que también contribuye a la calidad y durabilidad de las estructuras metálicas parabólicas. Al proporcionar información precisa sobre dimensiones, geometría y propiedades de los materiales, estos modelos facilitan la planificación precisa de la fabricación y el montaje, asegurando que cada elemento se ajuste perfectamente dentro del diseño general.

2) Representación de Elementos de Diseño

Tekla Structures sobresale en su capacidad para representar con gran detalle los elementos de diseño en estructuras metálicas, como se ilustra en la Figura 3. Esta herramienta permite a los diseñadores incorporar información específica sobre elementos arquitectónicos complejos, como barandas, escaleras y revestimientos, en el modelo 3D. Más que una simple visualización, esta funcionalidad constituye una herramienta integral que captura cada detalle de la visión arquitectónica. La capacidad de representar fielmente estos elementos no solo mejora la colaboración entre los equipos de diseño y construcción, sino que también garantiza la precisión estética y funcional de la estructura final.



Fig. 3. Representación de elementos arquitectónicos en tekla Structures, Esta característica facilita la colaboración entre equipos de diseño y construcción al proporcionar una vista completa de la estructura, incluyendo detalles estéticos.

Fuente: <https://www.tekla.com/us/bim-awards/744-s-figueroa-residential-tower>.

La representación detallada de elementos arquitectónicos facilita la toma de decisiones informadas durante todas las etapas del proyecto. Al proporcionar una vista completa de la estructura, incluyendo detalles estéticos, Tekla Structures mejora la comprensión y evaluación del impacto de estos elementos en el diseño general. Esto fomenta una colaboración más efectiva entre los equipos, permitiendo una ejecución más satisfactoria del proyecto.

3) Frecuencia de Uso de Tekla Structures

La evaluación de la frecuencia de uso de Tekla Structures en proyectos de diseño y modelado de estructuras metálicas se llevó a cabo mediante encuestas a ingenieros mecánicos, ingenieros civiles y técnicos. Estas encuestas fueron realizadas entre los miembros de Tesucsa en Juliaca y Sedimac en Cusco, con un total de 20 encuestados. Los resultados se presentan en la Figura 4, que ilustra la frecuencia de Tekla Structures en la industria de las estructuras metálicas.

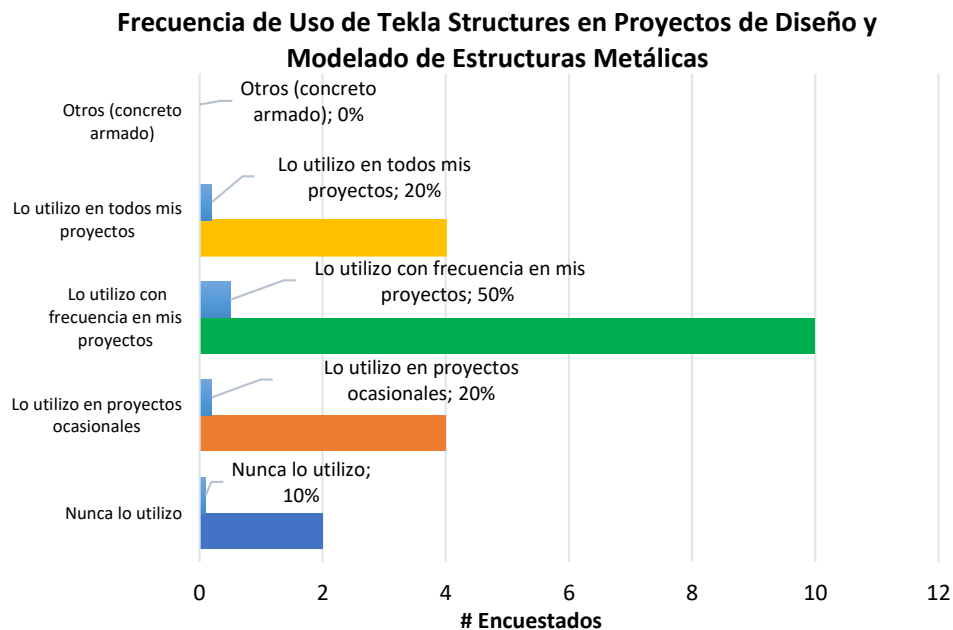


Fig. 4. Gráfico Frecuencia de Uso de Tekla Structures, este hallazgo destaca la prevalencia de Tekla Structures en la industria de las estructuras metálicas parabólicas, con la mitad de los profesionales empleándolo con regularidad.

Fuente: elaboración propia.

Se formuló una hipótesis nula para analizar la diferencia en la frecuencia de uso de Tekla Structures entre Tesucsa y Sedimac. Se realizó un análisis de chi-cuadrado, obteniendo un valor calculado de

3.23. Con un nivel de significancia del 5% y 4 grados de libertad, el valor crítico fue aproximadamente 9.488. Comparando el valor calculado de chi-cuadrado (3.23) con el valor crítico (9.488), se concluye que no se rechaza la hipótesis nula. Esto sugiere que no hay suficiente evidencia para afirmar que existe una diferencia significativa en la frecuencia de uso de Tekla Structures entre Tesucsa y Sedimac, indicando que las variaciones observadas podrían ser aleatorias o atribuibles a factores no relacionados con diferencias justificadas en el uso del software entre las dos empresas.

a) Características Más Útiles de Tekla Structures

Se evaluaron las características de Tekla Structures en el diseño y modelado de estructuras metálicas mediante encuestas realizadas a miembros de Tesucsa en Juliaca y Sedimac en Cusco, con un total de 20 encuestados. Los resultados se presentan en la tabla, donde se observa que el modelado en 3D de la obra a ejecutar fue la característica más destacada, con el 35% de los encuestados señalándola como la más útil. Le siguen la resolución fácil de uniones y nudos estructurales mediante macros y soluciones predefinidas, con el 25%, y la integración con programas de cálculo y posibilidad de interoperabilidad con otras aplicaciones de ingeniería y arquitectura, con el 15%. Este hallazgo se confirma visualmente en la Figura 5, que muestra el gráfico de las características más útiles de Tekla Structures. En este gráfico, se destaca la importancia del modelado en 3D de la obra a ejecutar, lo que refleja la percepción de los profesionales sobre la utilidad de esta característica en particular.

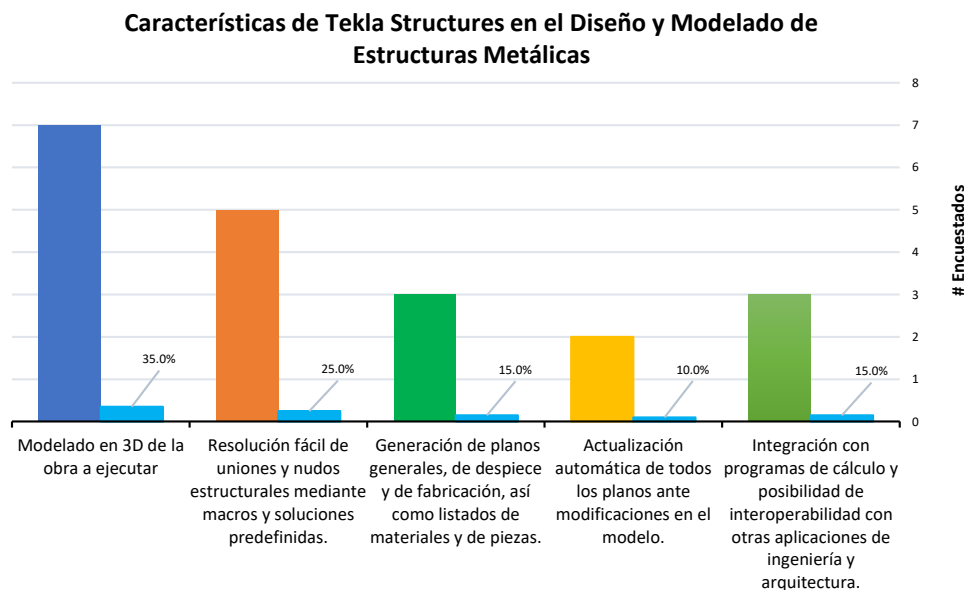


Fig. 5. Gráfico Características Más Útiles de Tekla Structures, estos resultados subrayan la importancia de la generación de modelos 3D detallados en la percepción de los profesionales sobre Tekla Structures.

Fuente: elaboración propia.

Además, se formuló una hipótesis nula (H_0) para determinar si existía una diferencia significativa en la percepción de las características de Tekla Structures entre Tesucsa y Sedimac. Se realizó un cálculo de chi-cuadrado, obteniendo un valor de 0.387. Con un valor crítico de aproximadamente 9.488 para un nivel de significancia del 5% y 4 grados de libertad, se concluye que no hay evidencia suficiente para afirmar que existe una diferencia significativa en la percepción de las características de Tekla Structures entre las dos empresas evaluadas.

b) Reducción de Errores de Diseño o Fabricación

sobre el uso de Tekla Structures en el diseño y fabricación de estructuras metálicas, se evaluó la percepción de empleados de Tesucsa en Juliaca y Sedimac en Cusco a través de encuestas con la participación de 20 empleados en total. El 80% de los encuestados reportó una disminución de errores gracias a Tekla Structures, mientras que el 20% restante no percibió una reducción significativa en errores. Estos hallazgos subrayan el potencial de Tekla Structures para mejorar la

precisión y calidad en el proceso de diseño y fabricación de estructuras metálicas, como se muestra en la Figura 6.

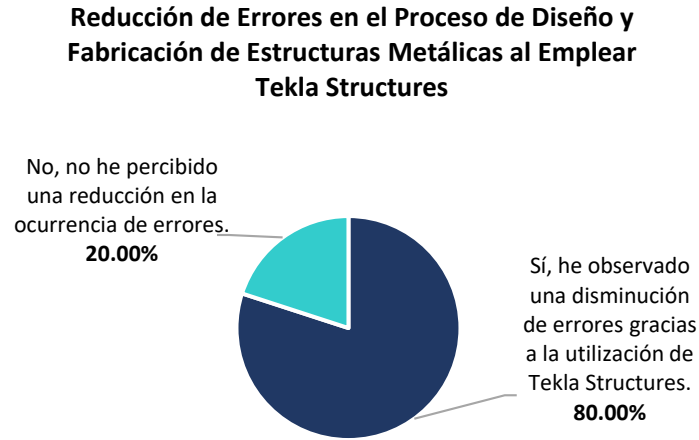


Fig. 6. Gráfico Reducción de Errores de Diseño o Fabricación, estos resultados sugieren que Tekla Structures desempeña un papel crucial en la mejora de la precisión y la calidad en el proceso de diseño y fabricación.

Fuente: elaboración propia.

Se realizó un análisis de chi-cuadrado para evaluar la diferencia en la percepción de la reducción de errores entre empleados de Tesucsa y Sedimac debido al uso de Tekla Structures. Con un valor calculado de chi-cuadrado de 1.25 y un valor crítico de aproximadamente 3.84 para un nivel de significancia del 5% y 1 grado de libertad, no se encontraron suficientes evidencias para rechazar la hipótesis nula (H_0). Esto indica que no existe una diferencia significativa en la percepción de la reducción de errores entre los empleados de ambas empresas debido a la utilización de Tekla Structures.

c) Optimización del Proceso de Diseño y Fabricación

En nuestro estudio exhaustivo sobre la eficacia de Tekla Structures en los procesos de diseño y fabricación de estructuras metálicas, encuestamos a miembros de Tesucsa en Juliaca y Sedimac en Cusco, con una participación total de 20 encuestados. Los resultados revelan que el 40% de los

encuestados resaltó que Tekla Structures contribuye a la eficiencia y productividad en sus procesos laborales, mientras que un 25% afirmó que su contribución es total. Además, solo un 5% de los participantes consideró que Tekla Structures no aporta a la eficiencia y productividad. Este hallazgo es visualizado en la Figura 7, que destaca la percepción general de los profesionales encuestados sobre la optimización del proceso de diseño y fabricación de estructuras metálicas gracias a Tekla Structures.

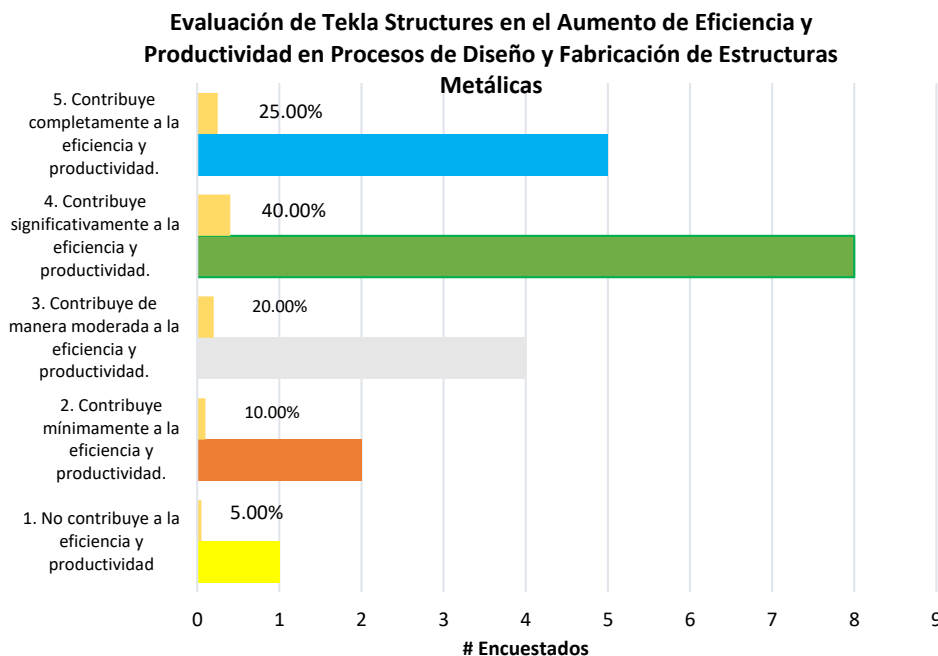


Fig. 7. Gráfico Optimización del Proceso de Diseño y Fabricación. Estos resultados indican que la mayoría de los profesionales encuestados perciben que Tekla Structures optimiza sustancialmente el proceso de diseño y fabricación de estructuras metálicas.

Fuente: elaboración propia.

Se realizó un análisis estadístico para investigar posibles diferencias en las evaluaciones de eficiencia y productividad entre los empleados de Tesucsa y Sedimac en relación con Tekla Structures. Las medias de las evaluaciones fueron de 3.667 para Tesucsa y 3.750 para Sedimac. Con un valor calculado de prueba de t de Student de -0.163, el cual cae dentro del intervalo establecido por la tabla t de Student para 18 grados de libertad y un nivel de significancia del 5%, no se encontraron diferencias significativas entre las evaluaciones de eficiencia y productividad entre los empleados de ambas empresas en relación con Tekla Structures.

4) Estudio de Caso: Modelado 3D con Tekla Structures

a) Estadio Municipal Publio Castro

El Estadio Municipal Publio Castro, ubicado en el Distrito de Curahuasi, Provincia de Abancay, Departamento de Apurímac, es una destacada instalación deportiva en una región montañosa a una altitud de 2,688.00 msnm. Con una amplia superficie de 14,597.380 m², el estadio consta de dos tribunas principales: la Tribuna Oriente y la Tribuna Occidente. Cada tribuna está compuesta por siete pórticos, distribuidos de la siguiente manera: Portico 1-3, Portico 4-7, Portico 8-11, Portico 12-15, Portico 16-19, Portico 20-23, y Portico 24-26. El estadio se encuentra en la Calle Los Rosales s/n, en la localidad de Curahuasi, a aproximadamente 120 minutos en vehículo desde la ciudad de Abancay. Este proyecto, denominado "SERVICIO DE FABRICACIÓN E INSTALACIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS COBERTURA Y CANALETAS PARA LAS TRIBUNAS DE ORIENTE Y OCCIDENTE EN LA OBRA "MEJORAMIENTO DEL ESTADIO MUNICIPAL PUBLIO CASTRO, DISTRITO DE CURAHUASI - ABANCAY - APURÍMAC", se llevó a cabo entre julio de 2023 y diciembre de 2023 (ver Figura 8).



Fig. 8. Imagen del estadio Municipal Publio Castro situado en el Departamento de Apurímac, Provincia Abancay, Distrito Curahuasi.

Fuente: elaboración propia.

Además de ser un importante centro para actividades deportivas, el Estadio Municipal Publio Castro ejemplifica cómo Tekla Structures ha transformado el diseño y fabricación de estructuras metálicas. A lo largo de los años, el estadio ha sido sede de numerosos eventos deportivos. La integración de Tekla Structures y el corte por plasma CNC ha permitido la creación de una estructura metálica que destaca tanto por su funcionalidad como por su estética. Este enfoque innovador ha establecido al Estadio Municipal Publio Castro como un referente en la construcción civil, impulsando el desarrollo de infraestructuras deportivas en la región.

b) Generación de Modelos 3D Detallados

Tekla Structures se destacó en el proyecto del Estadio Municipal Publio Castro al generar modelos 3D detallados de la estructura, proporcionando precisión desde el diseño inicial hasta los detalles (ver Figura 9). Estos modelos fueron fundamentales para asegurar la exactitud en la fabricación e instalación de cada componente. Además, la inclusión de una fotografía de la obra en proceso (ver Figura 10) permitió comparar el modelo 3D con la estructura física en construcción, facilitando la detección temprana de desviaciones y mejorando la toma de decisiones en el sitio.



Fig. 9. Modelo 3D detallado del estadio municipal Publio Castro creado con Tekla Structures.

Fuente: elaboración propia.



Fig. 10. Fotografía real de la obra.

Fuente: elaboración propia.

La versatilidad de Tekla Structures para abordar los desafíos arquitectónicos complejos se mostró en este proyecto, contribuyendo en la eficiencia y precisión en la ejecución de estructuras metálicas. Este detallado modelo 3D del Estadio Municipal Publio Castro ejemplifica cómo Tekla Structures facilita la visualización y comprensión de un proyecto, al tiempo que mejora la colaboración entre los diversos equipos involucrados en su construcción.

c) Diseño y Representación de Uniones

En el proyecto del Estadio Municipal Publio Castro, Tekla Structures se ha consolidado como una herramienta esencial para gestionar la complejidad de las uniones estructurales (ver Figura 11). Los diseñadores utilizaron Tekla Structures para modelar estas uniones con precisión milimétrica, asegurando una conexión exacta entre los elementos estructurales del estadio. La capacidad de Tekla Structures para generar modelos detallados para cada unión, ángulo y componente se representará con exactitud, lo que no solo simplificó el proceso de diseño, sino que también proporcionó una confianza en la integridad y estabilidad del estadio.



Fig. 11. Modelo detallado de las uniones en Tekla Structures junto con una imagen real de la unión en la obra.

Fuente: elaboración propia.

La precisión en el modelado de uniones no solo simplificó la construcción física, sino que también aseguró la integridad estructural, destacando la importancia de Tekla Structures en la creación de estructuras metálicas complejas y seguras. Este caso ejemplifica cómo la capacidad de Tekla Structures para representar con precisión las uniones contribuye a la eficiencia y seguridad en la construcción de proyectos de gran envergadura.

B. Precisión en los Cortes por Plasma CNC

1) Comparación de la Velocidad de Corte

Este estudio comparó la velocidad de corte entre dos métodos: plasma CNC asistido por CAD/CAM y plasma manual con diseño CAD. Se utilizaron piezas de muestra representativas del proceso de fabricación, como placas base y placas de refuerzo. Se realizaron 48 cortes (16 por cada método) en material de 12 mm de espesor, con una longitud de corte de 1800 mm (perímetro de la placa base de la conexión-02) y una sección de 300 mm x 600 mm. La velocidad de corte se midió con un cronómetro calibrado y certificado de acuerdo a la normativa ISO 3159, garantizando la precisión y confiabilidad de las mediciones en ambos espesores de material (12 mm y 9 mm). Los resultados del Cuadro 1 muestran la velocidad promedio de corte para material de 12 mm de espesor. Para evaluar el rendimiento en material de 9 mm de espesor, se realizaron 50 cortes por cada método bajo las mismas condiciones. La longitud de corte en este caso fue de 430.28 mm (perímetro de las cartelas de refuerzo en las conexiones-01, 02 y 04), con una sección en forma de

triángulo rectángulo. Los resultados del Cuadro 2 muestran la velocidad promedio de corte para material de 9 mm de espesor.

CUADRO 1. COMPARACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORTE PARA MATERIAL DE 12 MM DE ESPESOR.

Tipo de Corte	Velocidad Promedio de Corte (mm/min)	Tiempo Promedio de Corte (min)	Descripción
Plasma CNC	837.22	2.15	El corte por plasma CNC, en material de 12 mm de espesor, demuestra una velocidad superior en comparación con el plasma manual, lo que resulta en un tiempo promedio de corte más corto. Esto resalta la eficiencia y rapidez que aporta la tecnología CNC en la fabricación de componentes para estructuras metálicas parabólicas.
Plasma Manual 1	411.46	4.37	El plasma manual, utilizando herramientas convencionales, muestra una velocidad de corte más lenta y, por lo tanto, un tiempo de corte más prolongado en material de 12 mm de espesor.
Plasma Manual 2	339.66	5.30	Otra técnica de plasma manual con herramientas tradicionales, en material de 12 mm de espesor, también resulta en un tiempo de corte más largo en comparación con el plasma CNC.

CUADRO 2. COMPARACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORTE PARA MATERIAL DE 9 MM DE ESPESOR.

Tipo de Corte	Velocidad de Corte (mm/min)	Tiempo Promedio de Corte (min)	Descripción
Plasma CNC	1000.65	0.43	Nuevamente, el corte por plasma CNC supera en velocidad al plasma manual, esta vez en material de 9 mm de espesor, lo que se traduce en un tiempo promedio de corte más corto. Esto refuerza la eficiencia y rapidez de la tecnología CNC en la fabricación de componentes para estructuras metálicas parabólicas.
Plasma Manual 1	337.34	1.28	El plasma manual muestra una vez más una velocidad de corte más lenta y, por lo tanto, un tiempo de corte más prolongado en material de 9 mm de espesor.
Plasma Manual 2	270.34	1.59	La otra técnica de plasma manual con herramientas tradicionales, en material de 9 mm de espesor, también resulta en un tiempo de corte más largo en comparación con el plasma CNC.

Estos cuadros comparativos detallan la velocidad de corte y el tiempo promedio de corte para materiales de 12 mm y 9 mm de espesor, mostrando las diferencias entre el sistema de corte por plasma CNC y el plasma manual. Los resultados subrayan la eficiencia y rapidez que aporta la tecnología de plasma CNC en la fabricación de piezas para estructuras metálicas, lo que puede tener un impacto en la optimización del proceso de producción. La cantidad de pruebas realizadas (16 por cada tipo de corte con espesor de material de 12 mm, y 50 por cada tipo de corte en material de 9 mm) fue para asegurar resultados confiables y representativos. Para validar estas observaciones, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) que confirmó diferencias significativas entre las velocidades de corte de los tres grupos analizados. Para el material de 12 mm, el p-valor fue 3.35E-83 y el valor crítico para F fue 3.20, indicando una diferencia significativa. Para el material de 9 mm, el p-valor fue 1.21E-187 y el valor crítico para F fue 3.06, reafirmando que los cortes por plasma CNC son más rápidos y eficientes que los métodos manuales.

2) *Precisión del Corte*

En este estudio se comparó la precisión del corte en placas base de conexión-01 de acero A-36, con dimensiones de 300 mm x 600 mm y un espesor de 12 mm, utilizando dos métodos: plasma CNC asistido por CAD/CAM y plasma manual tradicional con diseño CAD. Se realizaron un total de 48 cortes (16 por cada método) y las mediciones de precisión se llevaron a cabo con un calibre vernier, siguiendo las normas ISO 3611 para garantizar la exactitud. Se analizó la desviación promedio con respecto a las dimensiones especificadas de 600 mm x 300 mm, utilizando datos observacionales recopilados durante el corte y la medición posterior de las piezas. Los resultados, presentados en el Cuadro 3 ("Comparación de la Precisión del Corte") y en la Figura 12 ("Calidad del Borde entre Plasma CNC y Métodos Tradicionales (plasma manual)"), demuestran que el método plasma CNC ofrece una mayor precisión dimensional en comparación con el plasma manual tradicional.

CUADRO 3. COMPARACIÓN DE LA PRECISIÓN DEL CORTE ENTRE PLASMA CNC Y MÉTODOS TRADICIONALES.

Tipo de Corte	Dimensión Real (mm)	Dimensión Especificada (mm)	Desviación Promedio (mm)	Calidad de Borde
---------------	---------------------	-----------------------------	--------------------------	------------------

Plasma CNC	599.51 x 299.49	600 x 300	$\pm 0.49 \times \pm 0.51$	Excelente (Suave y Uniforme)
Plasma Manual 1	598.48 x 298.53	600 x 300	$\pm 1.53 \times \pm 1.48$	Buena (Algunas Irregularidades)
Plasma Manual 2	597.00 x 297.01	600 x 300	$\pm 3.00 \times \pm 2.99$	Deficiente (Irregularidades Pronunciadas)

Además, se observó una calidad de borde excelente con el plasma CNC, caracterizada por su suavidad y uniformidad (Figura 12), mientras que los métodos manuales mostraron algunas irregularidades notables en el borde de las piezas cortadas. El análisis de varianza (ANOVA) confirmó diferencias significativas entre los tres grupos analizados ($p\text{-valor} = 7.99\text{E-}08$, valor crítico para $F = 2.32$), apoyando la hipótesis alternativa de que al menos un grupo presenta una media diferente en términos de precisión de corte. Este hallazgo refuerza la superioridad del plasma CNC sobre los métodos manuales en términos de precisión y calidad de corte para aplicaciones en estructuras metálicas.



Fig. 12. Comparación del borde de una pieza cortada con plasma CNC y plasma manual. Se observa la suavidad y uniformidad del borde en plasma CNC en contraste con algunas irregularidades en el plasma manual.

Fuente: elaboración propia.

La figura comparativa ilustra claramente la diferencia en la precisión del corte y la calidad del borde entre el plasma CNC y el plasma manual. Mientras que el plasma CNC exhibe bordes suaves y uniformes, el plasma manual muestra irregularidades pronunciadas. Este análisis subraya la relevancia del plasma CNC en la fabricación de estructuras metálicas, destacando su capacidad para mejorar la precisión dimensional y la calidad superficial. Estos factores son para garantizar la integridad estructural y el rendimiento a largo plazo de las estructuras metálicas, reforzando al plasma CNC como una solución eficiente y precisa en este campo especializado de la ingeniería.

3) Eficiencia en el Uso de Material

En este estudio comparativo se analizó la eficiencia en el uso de material durante el corte utilizando plasma CNC asistido por CAD/CAM (diseño y fabricación asistidos por computadora) y plasma manual, que empleó únicamente CAD para el diseño, en placas base de conexión-01, 02 y 04 de Acero Estructural ASTM A36. Las planchas de acero A36, con espesores de 12 mm y 9 mm, y dimensiones de 1220 mm x 2440 mm, fueron evaluadas respecto a su área total de 2,976,800 mm². El costo total del material fue de S/ 1,665.00 para el espesor de 12 mm y S/ 1,250.00 para el de 9 mm. Los resultados, detallados en la Tabla 1, muestran las áreas de material utilizado, las pérdidas de material en porcentaje y el costo asociado a las pérdidas para cada método de corte. Este análisis proporciona una comprensión clara de cómo el uso integrado de CAD/CAM puede optimizar la eficiencia material en procesos de fabricación industrial, minimizando desperdicios y reduciendo costos.

TABLA 1. COMPARACIÓN DE PÉRDIDAS DE MATERIAL EN PROCESOS DE CORTE.

Tipo de Corte	Área de Material Utilizado (mm ²)	Pérdida de Material (%)	Costo de Material Perdido (S/.)
Plasma CNC (e=12 mm)	2798200.00	6.00%	S/ 99.90
	2797200.00	6.03%	S/ 100.45
	2797200.00	6.03%	S/ 100.45
Plasma Manual (e=12 mm)	2558200.00	14.06%	S/ 234.13
	2563200.00	13.89%	S/ 231.34
	2553200.00	14.23%	S/ 236.93
Plasma CNC (e=9 mm)	2827700.00	5.01%	S/ 62.61

mm)	2826700.00	5.04%	S/ 63.03
Plasma manual (e=9 mm)	2619200.00	12.01%	S/ 150.16
	2619200.00	12.01%	S/ 150.16

En todas las pruebas realizadas, se observó que el área y el porcentaje de pérdida de material fueron consistentemente menores en los cortes realizados con plasma CNC en comparación con los cortes realizados con plasma manual. Además, un análisis de prueba t para dos muestras con varianzas desiguales mostró que la diferencia en las pérdidas de material entre los dos métodos de corte es estadísticamente significativa. El valor calculado del estadístico t fue -13.58, lo cual es menor que el valor crítico de ± 2.45 para un nivel de significancia del 5% y 6 grados de libertad, lo que permite rechazar la hipótesis nula de que no hay diferencia significativa entre las pérdidas de material de ambos métodos de corte.

C. Beneficios y Desafíos de la Integración

1) Tiempo de Fabricación y Montaje

Para evaluar la optimización de los procesos de fabricación y montaje de estructuras metálicas parabólicas mediante la integración de Tekla Structures y el corte por plasma CNC, se llevó a cabo una comparativa detallada de los tiempos involucrados en dos escenarios distintos. El Escenario A corresponde al pórtico 24-26 sin integración de Tekla Structures, mientras que el Escenario B corresponde al pórtico 1-3 con la integración mencionada (ver Figura 13). Se emplearon cronómetros calibrado y certificado de acuerdo a la normativa ISO 3159, para registrar con precisión el inicio y finalización de cada actividad. Con el fin de asegurar la precisión de los resultados, se realizaron mediciones en diferentes días y se promediaron los tiempos. Además, se documentaron las interrupciones y observaciones relevantes durante los procesos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos según se detalla en el Cuadro 4 y 5:

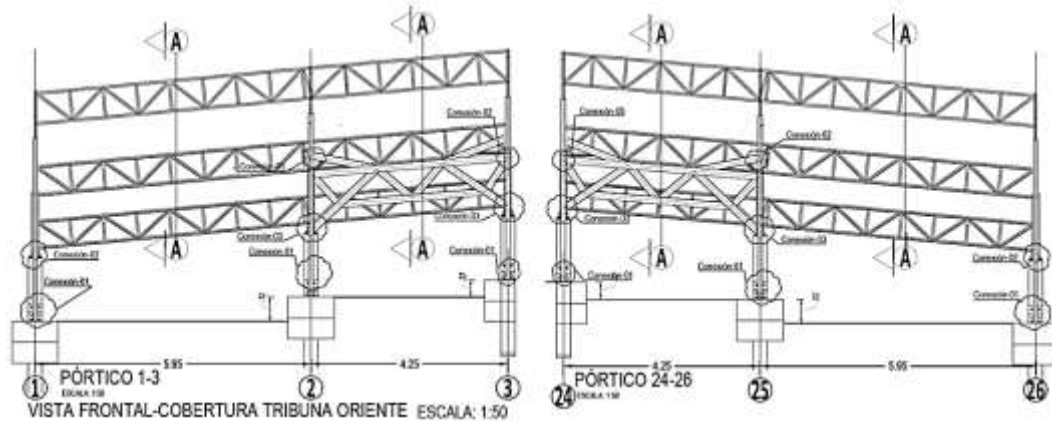


Fig. 13. Plano del pórtico 1-3 y 24-26, mostrando la estructura metálica evaluada en el Escenario A y B con la integración de Tekla Structures y plasma CNC y sin integración.

Fuente: elaboración propia.

CUADRO 4. ESCENARIO A SIN INTEGRACIÓN

Proceso	Tiempo Estimado (horas)	Descripción
Diseño en AutoCAD y Planificación	11:30:00	Se realiza un diseño detallado de la estructura utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD), teniendo en cuenta factores como cargas, condiciones ambientales y estética.
Corte de piezas metálicas y Formado	14:40:00	El material se corta y forma según las especificaciones del diseño. Se utilizan técnicas como corte por plasma, láser o sierras de cinta para el corte, y prensas y rodillos para el formado.
Ensamblaje	36:21:00	Las piezas cortadas y formadas se ensamblan para formar las partes de la estructura. Esto se puede hacer mediante soldadura, pernos o remaches, asegurando una unión precisa y resistente.
Tratamientos de Superficie	8:34:00	Se aplican tratamientos de superficie para proteger la estructura contra la corrosión y mejorar su aspecto estético. Esto puede incluir galvanizado, pintura anticorrosiva u otros recubrimientos.
Control de Calidad	2:09:00	Antes de ser enviada o montada, la estructura se somete a pruebas rigurosas de control de calidad para garantizar que cumpla con los estándares y especificaciones requeridos.
Montaje de la estructura	22:35:00	Una vez aprobada, la estructura se transporta al sitio de construcción y se monta utilizando equipos especializados como grúas y andamios. El montaje se realiza siguiendo el diseño y planificación previos.
Tiempo Total	95:49:00	Tiempo total para el proceso de diseño, fabricación y montaje.

CUADRO 5. ESCENARIO B CON INTEGRACIÓN DE TEKLA STRUCTURES Y PLASMA CNC.

Proceso	Tiempo Estimado (horas)	Descripción
Diseño en Tekla Structures y Planificación	8:45:00	Se realiza un diseño detallado de la estructura utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD), teniendo en cuenta factores como cargas, condiciones ambientales y estética.
Corte de piezas metálicas y Formado	7:15:00	El material se corta y forma según las especificaciones del diseño. Se utilizan técnicas como corte por plasma, láser o sierras de cinta para el corte, y prensas y rodillos para el formado.
Ensamblaje	32:28:00	Las piezas cortadas y formadas se ensamblan para formar las partes de la estructura. Esto se puede hacer mediante soldadura, pernos o remaches, asegurando una unión precisa y resistente.
Tratamientos de Superficie	6:58:00	Se aplican tratamientos de superficie para proteger la estructura contra la corrosión y mejorar su aspecto estético. Esto puede incluir galvanizado, pintura anticorrosiva u otros recubrimientos.
Control de Calidad	1:55:00	Antes de ser enviada o montada, la estructura se somete a pruebas rigurosas de control de calidad para garantizar que cumpla con los estándares y especificaciones requeridos.
Montaje de la estructura	16:41:00	Una vez aprobada, la estructura se transporta al sitio de construcción y se monta utilizando equipos especializados como grúas y andamios. El montaje se realiza siguiendo el diseño y planificación previos.
Tiempo Total	74:02:00	Tiempo total para el proceso de diseño, fabricación y montaje con la integración de Tekla Structures y Plasma CNC.

En el cuadro 4, titulado "Escenario A Sin Integración", se presenta un desglose detallado del tiempo estimado para cada etapa del proceso de fabricación y montaje de estructuras metálicas parabólicas, resultando en un tiempo total de 95:49 horas. Por otro lado, el cuadro 5, "Escenario B Con Integración de Tekla Structures y Plasma CNC", muestra un desglose similar, pero con la integración de Tekla Structures y el corte por plasma CNC, logrando reducir el tiempo total a 74:02 horas.

La comparación entre ambos escenarios resalta la eficiencia y reducción de tiempo que se logra mediante la integración de Tekla Structures y el corte por plasma CNC. Esta integración permite acelerar el proceso de fabricación y montaje de las estructuras metálicas parabólicas, resultando

en una mayor productividad y ahorros en costos laborales. Para asegurar la precisión de estas mediciones, se registraron múltiples mediciones en diferentes días, considerando interrupciones necesarias y observaciones relevantes. El personal capacitado, siguiendo protocolos establecidos, utilizó relojes digitales para registrar el inicio y final de cada actividad. Los datos recopilados se utilizaron en una prueba t de Student, donde el estadístico t resultó en -3.59, con valores críticos de t de 2.02 (una cola) y 2.57 (dos colas). Esto refuerza la decisión de rechazar la hipótesis nula, indicando una diferencia significativa en los tiempos estimados entre los dos escenarios, siendo los tiempos sin integración mayores.

2) Precisión del Ensamblaje

En este estudio, se comparó la precisión del ensamblaje de estructuras metálicas utilizando dos métodos: uno sin tecnologías avanzadas (Escenario A) y otro con la integración de Tekla Structures y Plasma CNC (Escenario B). Para evaluar la precisión, se utilizaron herramientas de medición directa como nivel magnético de mano, vernier (pie de metro) y micrómetro. Se siguieron las normas ISO 3611 para el uso del vernier y las normas ISO 3611 y ISO 6906 para el uso del micrómetro, lo que garantiza la confiabilidad de las mediciones. Se registraron las desviaciones en la alineación y nivelación de las piezas durante el ensamblaje. Se realizaron un total de 22 mediciones para cada tipo de desviación (alineación y nivelación) en ambos escenarios. Las mediciones se enfocaron en las armaduras metálicas AM-01, AM-02, AM-03 del pórtico 1-3 y en las armaduras metálicas AM-24, AM-25, AM-26 del pórtico 24-26. Los resultados se presentan en el Cuadro 6 y se complementan con una imagen detallada del plano de la armadura metálica AM-01 (Figura 14). Esta imagen muestra los puntos de medición y ayuda a comprender mejor la estructura analizada.

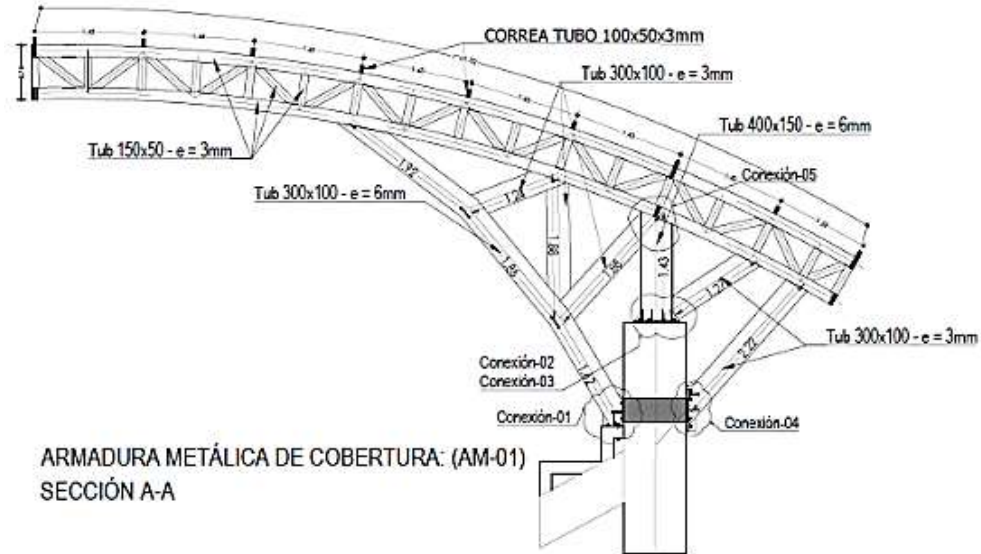


Fig. 14. La imagen muestra el plano detallado de la armadura metálica AM-01, un componente fundamental de un pórtico metálico. El plano incluye las dimensiones, materiales y detalles de las uniones de la armadura, lo que permite visualizar con precisión la estructura y los puntos donde se realizaron las mediciones para evaluar la precisión del ensamblaje.

Fuente: elaboración propia.

CUADRO 6. COMPARACIÓN DE DESVIACIONES EN EL ENSAMBLAJE.

Escenario	Parámetro	Desviación Promedio (mm)	Calidad del Corte	Observaciones
Escenario A	Alineación de piezas	±5.01	Moderada	Desviación significativa en la alineación de las piezas ensambladas. La falta de precisión es evidente en el ensamblaje.
	Nivelación de la estructura	±6.03	Baja	Notables desviaciones en la nivelación de la estructura. La falta de uniformidad es un problema evidente en este escenario.
Escenario B	Alineación de piezas	±0.51	Alta	Reducción significativa en las desviaciones de alineación. La precisión mejora considerablemente, facilitando un ensamblaje más preciso y rápido.
	Nivelación de la estructura	±3.06	Moderada	Mejora notable en la nivelación de la estructura. Las desviaciones se reducen, indicando una mayor

En el Escenario A, sin integración tecnológica, se observaron desviaciones significativas que afectan la precisión y uniformidad del ensamblaje. Por otro lado, el Escenario B, con la integración de Tekla Structures y Plasma CNC, mostró mejoras notables en la alineación y nivelación de las estructuras metálicas. Las pruebas t realizadas para evaluar estas diferencias arrojaron resultados significativos: para la alineación de piezas, el valor p extremadamente bajo (casi cero) y el estadístico t de -16.66 indican una diferencia altamente significativa entre los procesos con y sin integración. Respecto a la nivelación de la estructura, el estadístico t de -10.90 también confirma diferencias significativas entre ambos procesos.

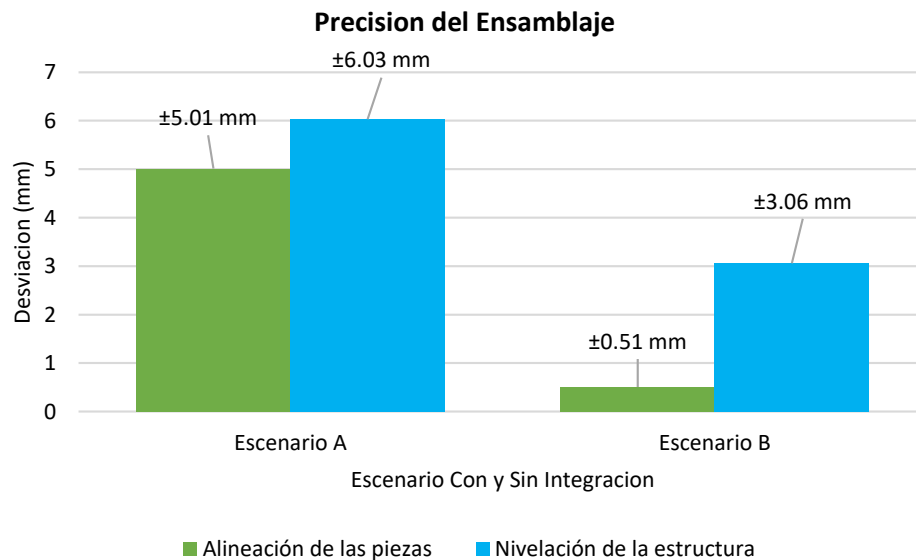


Fig. 15. Reducción de la Desviación en el Ensamblaje, el gráfico ilustra claramente la reducción de la desviación en el ensamblaje de las estructuras metálicas parabólicas al implementar la integración de Tekla Structures y Plasma CNC. Las barras más cortas en el Escenario B indican una mayor precisión en comparación con las barras más largas del Escenario A.

Fuente: elaboración propia.

Estos resultados demuestran que la integración de Tekla Structures y Plasma CNC no solo optimiza el proceso de diseño y fabricación, sino que también mejora la precisión del ensamblaje de las estructuras metálicas parabólicas, lo que lleva a una construcción más precisa y eficiente.

3) Reducción de Residuos

En el contexto actual por el impacto ambiental de la construcción, este análisis compara dos enfoques en la fabricación de estructuras metálicas: Escenario A, que carece de integración tecnológica, y Escenario B, que utiliza Tekla Structures y Plasma CNC. Se seleccionaron dos conjuntos de pórticos metálicos con el mismo peso total de material para cada escenario: 3867.43 kg de tubos estructurales y 367.23 kg de planchas de acero. En el Escenario A (pórticos 24-26), se observó una alta generación de residuos de 192.66 kg para tubos estructurales y 17.27 kg para planchas de acero, con 153.30 kg y 12.88 kg de residuos de corte y desecho respectivamente, debido a métodos ineficientes de corte manual por plasma. En contraste, en el Escenario B (pórticos 1-3), la integración tecnológica redujo los residuos, con 85.91 kg para tubos estructurales y 8.74 kg para planchas de acero en residuos de material metálico, y 52.75 kg y 5.36 kg en residuos de corte y desecho respectivamente, gracias a las tecnologías avanzadas de corte. Estos resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 7, donde se evidencia cómo la integración de estas tecnologías puede reducir el impacto ambiental asociado con la fabricación de estructuras metálicas, evaluando la eficiencia en la conservación de recursos y la reducción de emisiones y residuos.

CUADRO 7. REDUCCIÓN DE RESIDUOS SIN INTEGRACIÓN Y CON INTEGRACIÓN DE TEKLA STRUCTURES Y PLASMA CNC.

Escenario	Descripción	Tipo de Residuo	Porcentaje del Material Utilizado	Observaciones
Escenario A: Sin Integración	Tubos Estructurales (Armadura Metálica)	Residuos de material metálico	5.02%	Mayor desperdicio de material debido a cortes ineficientes.
		Residuos de corte y desecho	3.99%	Desperdicio moderado debido a procesos de corte por plasma manual.
	Planchas De Acero (Armadura Metálica)	Residuos de material metálico	4.70%	Mayor desperdicio de material debido a cortes ineficientes.
		Residuos de corte y desecho	3.51%	Desperdicio moderado debido a procesos de corte por plasma manual.
Escenario B: Con Integración de	Tubos Estructurales (Armadura	Residuos de material metálico	2.24%	Reducción significativa gracias a cortes precisos.

Tekla Structures y Plasma CNC	Metálica)	Residuos de corte y desecho	1.37%	Minimización destacada debido a tecnologías eficientes.
	Planchas De Acero (Armadura Metálica)	Residuos de material metálico	2.38%	Reducción significativa gracias a cortes precisos.
		Residuos de corte y desecho	1.46%	Minimización destacada debido a tecnologías eficientes.

Además, se realizó una prueba t para medir la diferencia en la cantidad de residuos de material metálico y de corte y desecho generados antes y después de la integración tecnológica. Los resultados muestran que el porcentaje promedio de los residuos de material metálico fue mayor en el Escenario A (4.86 %) en comparación con el Escenario B (2.31 %), con una diferencia estadísticamente significativa según la prueba de dos colas (valor $p = 7.81e-07$). Esto respalda la hipótesis alternativa (H_1), indicando que la integración de Tekla Structures y Plasma CNC reduce de manera significativa los residuos de material metálico. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H_0), que afirmaba que no había diferencia en los residuos entre los dos escenarios. Estos resultados subrayan los beneficios ambientales tangibles de adoptar tecnologías avanzadas en la fabricación de estructuras metálicas, promoviendo prácticas más sostenibles y eficientes en términos de gestión de residuos industriales.

D. Comparación con Métodos Tradicionales

1) Mejora en la Calidad del Producto Final

En ambos escenarios se realizaron inspecciones detalladas de las estructuras metálicas fabricadas para evaluar la calidad del producto final. Los resultados obtenidos se compararon cuidadosamente. Cada armadura metálica, tanto en el escenario con integración de software (AM-01, AM-02 y AM-03) como en el escenario sin integración (AM-24, AM-25 y AM-26), fue inspeccionada en 13 puntos específicos durante la fase de montaje. Las inspecciones se enfocaron en puntos críticos específicos de cada estructura, como Conx01-E03, E02-D03-D03, E01-E02-D01, CerchaP-E01, CerchaP-D01-D02, D03-C01, CerchaP-C01, E02-E04, C01-D04, Conx02-

C01, Conx04-D05, D04-CerchaP y D05-CerchaP. Para las mediciones se utilizaron herramientas especializadas como calibrador (vernier) y micrómetro, siguiendo las normativas ISO 3611 para el uso del vernier y las normativas ISO 3611 e ISO 6906 para el uso del micrómetro. Esto permitió registrar con precisión cualquier variación dimensional. Los datos recopilados se documentaron y compararon entre los diferentes escenarios de producción, lo que permitió evaluar el impacto de la integración de software en la precisión dimensional. Los resultados, que incluyen la precisión dimensional promedio y las observaciones detalladas, se resumen en la Tabla 2 para facilitar la comparación entre los métodos de producción.

TABLA 2. COMPARACIÓN DE LA CALIDAD DEL PRODUCTO FINAL ENTRE LOS ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN

Escenario	Armadura Metálica	Precisión dimensional promedio	Observaciones
Sin Integración (Pórtico 24-26)	AM-24	± 14.16 mm	La falta de precisión en las dimensiones indica problemas en la alineación y el ajuste, lo que puede afectar negativamente la integridad estructural y el correcto ensamblaje de las piezas.
	AM-25	± 12.26 mm	Las medidas imprecisas generan problemas de alineación y ajuste, lo que puede afectar negativamente la resistencia estructural y el correcto ensamble de los componentes.
	AM-26	± 11.84 mm	La imprecisión dimensional sugiere problemas en la alineación y el ajuste, lo que puede impactar negativamente en la integridad estructural y el montaje adecuado de las piezas.
Con Integración de Tekla Structures y Plasma CNC (Pórtico 1-3)	AM-01	± 3.19 mm	La mejora en la precisión dimensional indica una alineación y ajuste más exactos, lo que facilita el ensamblaje y asegura una mayor estabilidad en las estructuras metálicas producidas.
	AM-02	± 5.22 mm	Una mejor precisión en las dimensiones implica una alineación y un ajuste más exactos, lo que se traduce en un ensamblaje más simple y una mayor estabilidad en las estructuras metálicas fabricadas.
	AM-03	± 3.35 mm	La precisión dimensional mejorada sugiere una alineación y ajuste más precisos, lo que garantiza un ensamblaje más sencillo y una mayor estabilidad en las estructuras metálicas fabricadas.

En el escenario sin integración, que corresponde a los pórticos 24-26, se detectó una falta de precisión dimensional significativa, indicativa de problemas en la alineación y ajuste que pueden comprometer la integridad estructural y la correcta unión de las piezas. Por otro lado, en el

escenario con integración de Tekla Structures y Plasma CNC, específicamente en los pórticos 1-3, se observó una notable mejora en la precisión dimensional. Esta mejora evidencia una alineación y ajuste más exactos, facilitando el ensamblaje y garantizando una mayor estabilidad en las estructuras metálicas fabricadas. Además, se realizó una prueba t para dos muestras asumiendo varianzas iguales, obteniendo un estadístico t de 7.653 con 76 grados de libertad. Este valor de t es mayor que los valores críticos de ± 1.665 y ± 1.992 para pruebas de una y dos colas respectivamente (nivel de significancia del 5%), lo que nos lleva a rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, se confirma que existe una diferencia significativa en la precisión dimensional entre los procesos con y sin integración, siendo la precisión dimensional mayor con la integración de Tekla Structures y Plasma CNC.

2) Retorno de la Inversión (ROI)

En el análisis del Retorno sobre la Inversión (ROI) para proyectos de implementación tecnológica en construcción civil, como el uso de Tekla Structures y el corte por plasma CNC, es bueno identificar estrategias para mejorar la rentabilidad. Este proyecto, aunque implican una inversión inicial significativa, ofrece optimizar procesos y aumentar la eficiencia operativa. Comparando dos escenarios distintos – uno sin integración tecnológica correspondiente al pórtico 24-26 y otro con integración tecnológica correspondiente al pórtico 1-3 – se revela que, aunque ambos son rentables, el escenario con implementación tecnológica presenta un ROI más alto. Esto subraya la importancia de adoptar tecnologías avanzadas para maximizar los beneficios financieros y operativos en proyectos de construcción civil. Aunque los números específicos y los porcentajes de ROI pueden ser ficticios para el propósito de este ejemplo, el concepto de evaluar el retorno sobre la inversión al adoptar nuevas tecnologías es realista y relevante para el sector de la construcción.

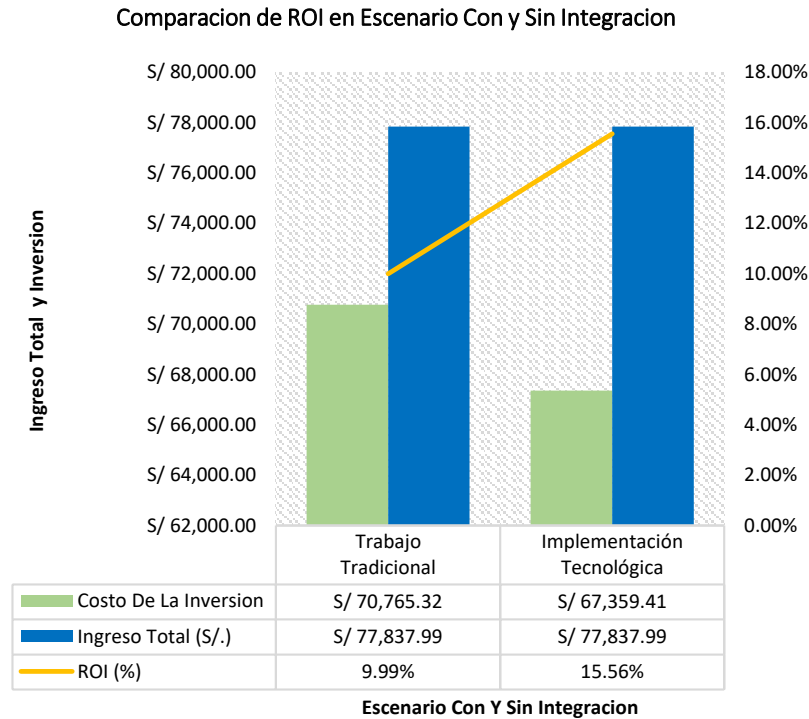


Fig. 16. Gráfico Comparativo de Retorno de la Inversión (ROI) en dos Escenarios A y B.

Fuente: elaboración propia.

Para mejorar los resultados del ROI en proyectos de construcción civil, es necesario implementar estrategias que optimicen los costos y maximicen los ingresos. Reducir los gastos generales mediante negociaciones con proveedores y optimización del uso de materiales, junto con un aumento en la productividad a través de la capacitación del personal y el uso eficiente de nuevas tecnologías, puede incrementar el ROI. La evaluación continua del desempeño y la retroalimentación del personal son también esenciales para ajustar las estrategias y asegurar una rentabilidad sostenida. Estas mejoras no solo aumentan la eficiencia operativa, sino que también refuerzan la viabilidad financiera a largo plazo, asegurando que las inversiones en tecnologías avanzadas sean altamente rentables.

V. DISCUSION

A. Capacidades de Tekla Structures en la Creación de Modelos 3D para Estructuras Metálicas

Tekla Structures se destaca por su capacidad para generar modelos 3D detallados y precisos de estructuras metálicas (Figura 2). Esto incluye información completa sobre dimensiones, geometría y propiedades de los materiales, facilitando la visualización y optimizando la planificación de fabricación y montaje. Esta precisión contribuye a minimizar errores durante la construcción, mejorando la calidad y durabilidad de las estructuras.

Tekla Structures sobresale en la representación de elementos de diseño, permitiendo a los diseñadores incorporar detalles arquitectónicos complejos en sus modelos 3D (ver Figura 3). Esta capacidad facilita una colaboración más efectiva entre los equipos de diseño y construcción, asegurando que cada detalle estético y funcional sea capturado con precisión [16], [17]. La herramienta no solo mejora la visualización de la estructura final, sino que también contribuye a decisiones más informadas durante todas las etapas del proyecto, lo que resulta en una ejecución más precisa y satisfactoria.

En la encuesta realizada revela que según una encuesta, Tekla Structures es ampliamente adoptado en el sector de estructuras metálicas, con un 50% de profesionales que lo utilizan frecuentemente y un 20% que lo emplea en todos sus trabajos (Figura 4). No se encontraron diferencias significativas en la frecuencia de uso entre Tesucsa y Sedimac, lo que refuerza su posición como estándar de la industria. [20].

El modelado en 3D es la característica más valorada de Tekla Structures, destacada por el 35% de los encuestados (Figura 5). Además, se reconoce su capacidad para resolver uniones estructurales mediante macros y soluciones predefinidas, así como su integración con otros programas de cálculo y aplicaciones de ingeniería. El 80% de los encuestados ha experimentado una reducción de errores gracias a Tekla Structures (Figura 6), subrayando su impacto positivo en la precisión y calidad del diseño y fabricación de estructuras metálicas. No se encontraron diferencias significativas en la percepción de reducción de errores entre los empleados de Tesucsa y Sedimac, lo que evidencia su eficacia general en diferentes organizaciones.

En cuanto a eficiencia y productividad, el 40% de los encuestados destacó su impacto positivo y el 25% afirmó su contribución (Figura 7). No se hallaron diferencias significativas entre las evaluaciones de eficiencia y productividad entre los empleados de ambas empresas, indicando que Tekla Structures optimiza procesos de manera efectiva en diferentes entornos.

Nuestros hallazgos revelan que no hay una diferencia significativa en la frecuencia de uso de Tekla Structures entre los empleados de Tesucsa y Sedimac, indicando una adopción uniforme de la herramienta en la industria. Esto refleja una tendencia general hacia la aceptación de Tekla Structures en compañías de diversas ubicaciones y tamaños. El estudio de casos del Estadio Municipal Publio Castro ejemplifica la aplicabilidad práctica y los beneficios de Tekla Structures en proyectos reales, donde la generación de modelos 3D detallados facilitó la identificación temprana de problemas de diseño y la toma de decisiones informadas para garantizar la integridad estructural mediante una representación precisa de las uniones.

B. Optimización del Proceso de Fabricación de Estructuras Metálicas Parabólicas mediante Plasma CNC

Este estudio resalta las ventajas del corte por plasma CNC sobre los métodos tradicionales en la producción de componentes para estructuras metálicas parabólicas. Se encontró que el plasma CNC, asistido por CAD/CAM, ofrece una velocidad de corte superior tanto en materiales de 12 mm como de 9 mm de espesor. Los resultados indican que el plasma CNC reduce el tiempo promedio de corte y mejora la eficiencia del proceso de fabricación. En el material de 12 mm, la velocidad promedio de corte fue de 837.22 mm/min con plasma CNC, comparado con 411.46 mm/min y 339.66 mm/min con plasma manual. Para el material de 9 mm, el plasma CNC alcanzó una velocidad promedio de 1000.65 mm/min, frente a 337.34 mm/min y 270.34 mm/min con técnicas manuales. El análisis de varianza (ANOVA) confirmó diferencias significativas en la velocidad de corte, con p-valores de 3.35E-83 y 1.21E-187 para materiales de 12 mm y 9 mm, respectivamente, validando la superioridad del plasma CNC en términos de eficiencia y rendimiento en la fabricación de estructuras metálicas [24].

La precisión del corte también mostró una clara ventaja del plasma CNC sobre los métodos manuales. El Cuadro 3 y la Figura 12 indican que el plasma CNC logró desviaciones promedio

mínimas de ± 0.49 mm x ± 0.51 mm, con una calidad de borde excelente. En contraste, las técnicas manuales presentaron desviaciones de hasta ± 3.00 mm x ± 2.99 mm, con irregularidades pronunciadas en el borde. Estos resultados fueron validados por un ANOVA, que confirmó diferencias significativas en la precisión del corte con un p-valor de $7.99E-08$. La superioridad del plasma CNC en términos de precisión y calidad de corte es crucial para la integridad estructural y el rendimiento a largo plazo de las estructuras metálicas [25].

El estudio comparó la eficiencia en el uso de material entre el plasma CNC asistido por CAD/CAM y el plasma manual en la producción de componentes para estructuras metálicas parabólicas. Se encontró que el plasma CNC minimiza la pérdida de material, con un promedio de pérdida del 6.00% para material de 12 mm y del 5.01% para material de 9 mm, en comparación con el 14.06% y 12.01% respectivamente para métodos manuales. Estos hallazgos fueron respaldados por una prueba t para dos muestras con varianzas desiguales, que mostró una diferencia estadísticamente significativa en las pérdidas de material entre los dos métodos de corte (valor t = -13.58). La reducción en la pérdida de material no solo ofrece ventajas económicas, sino que también promueve la sostenibilidad del proceso de fabricación al conservar recursos naturales y minimizar el impacto ambiental [26].

En términos de calidad los resultados discutidos reflejan la clara superioridad del plasma CNC sobre los métodos manuales en términos de eficiencia, precisión y sostenibilidad en la fabricación de estructuras metálicas. Estos hallazgos no solo tienen implicaciones prácticas inmediatas para la industria, sino que también establecen una base sólida para la adopción continua de tecnologías avanzadas en el campo de la ingeniería de fabricación [27].

C. Optimización del Proceso de Fabricación de Estructuras Metálicas Parabólicas mediante Integración de Tekla Structures y Plasma CNC

La integración de Tekla Structures y el corte por plasma CNC en el Escenario B mostró una significativa reducción en el tiempo total de fabricación y montaje de estructuras metálicas parabólicas, disminuyendo de 95:49 horas en el Escenario A a 74:02 horas en el Escenario B. Esta mejora se atribuye principalmente a la optimización del diseño asistido por computadora y la

precisión del corte por plasma CNC, facilitando un proceso más rápido y coordinado desde el diseño inicial hasta el montaje final. La reducción en el tiempo total no solo mejora la eficiencia operativa y reduce los costos laborales asociados, sino que también permite una entrega más rápida de proyectos, lo cual beneficia la competitividad y la satisfacción del cliente. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas que han demostrado que la integración de sistemas CAD como Tekla Structures con tecnologías avanzadas de corte CAM como Plasma CNC conduce a mejoras sustanciales en los tiempos de producción [28]. Además, este enfoque integrado se alinea con las prácticas recomendadas en la industria, donde la adopción de tecnologías digitales se ha vuelto esencial para mejorar la eficiencia y la competitividad [29].

Se observó una mejora significativa en la precisión del ensamblaje en el Escenario B en comparación con el Escenario A. Las desviaciones promedio en la alineación de piezas se redujeron de ± 5.01 mm a ± 0.51 mm, y en la nivelación de la estructura de ± 6.03 mm a ± 3.06 mm. Esta mejora se atribuye directamente a la capacidad de Tekla Structures para optimizar el diseño y la planificación, combinada con la precisión del corte por plasma CNC, que asegura piezas más uniformes y ajustadas durante el ensamblaje. Estos resultados no solo mejoran la calidad y durabilidad de las estructuras, sino que también reducen la necesidad de retrabajos y ajustes durante la fase de construcción. Estas conclusiones están respaldadas por investigaciones anteriores que han demostrado que la implementación de sistemas de modelado de información de construcción (BIM) como Tekla Structures mejora la precisión del ensamblaje en la industria de la construcción [30]. Además, la combinación de BIM con tecnologías de corte avanzadas como Plasma CNC asegura una mayor coherencia entre el diseño digital y el producto físico final [31].

La implementación de Tekla Structures y Plasma CNC en el Escenario B demostró ser altamente efectiva en la reducción de residuos durante la fabricación de estructuras metálicas parabólicas, en comparación con el Escenario A que carecía de esta integración tecnológica. En el Escenario A, los residuos de material metálico para tubos estructurales y planchas de acero fueron del 5.02% y 4.70%, respectivamente, debido a cortes ineficientes, con residuos de corte y desecho del 3.99% y 3.51%, respectivamente, por el uso de procesos manuales de corte por plasma. En contraste, en el Escenario B, los residuos de material metálico se redujeron a 2.24% para tubos estructurales y 2.38% para planchas de acero, gracias a cortes más precisos facilitados por Tekla Structures y

Plasma CNC. Además, los residuos de corte y desecho se minimizaron a 1.37% y 1.46%, respectivamente, destacando la eficiencia de estas tecnologías avanzadas.

Estos resultados destacan la eficacia de esta integración en la minimización de residuos, promoviendo prácticas más sostenibles en la industria de las estructuras metálicas parabólicas. La reducción de residuos no solo tiene beneficios económicos al minimizar el desperdicio de material, sino que también tiene un impacto positivo en el medio ambiente al reducir los desechos industriales [32]. Además, esta reducción de residuos se alinea con las iniciativas globales para promover la sostenibilidad en la industria de la construcción [33].

D. Transformación Económica a través de la Tecnología

La comparación entre los escenarios de producción con y sin integración de Tekla Structures y CNC plasma reveló diferencias significativas en la precisión dimensional y la calidad del producto final. En el escenario sin integración (pórticos 24-26), se observaron precisiones dimensionales promedio de ± 14.16 mm, ± 12.26 mm y ± 11.84 mm, indicativas de problemas en la alineación y ajuste que podrían comprometer la integridad estructural y dificultar el ensamblaje preciso de las armaduras metálicas. En contraste, el escenario con integración (pórticos 1-3) mostró mejoras sustanciales con valores promedio de ± 3.19 mm, ± 5.22 mm y ± 3.35 mm, reflejando una ejecución más precisa y controlada del proceso de fabricación. La diferencia estadísticamente significativa confirmada por la prueba t para dos muestras subraya la superioridad del método integrado, no solo en términos de precisión dimensional, sino también en la eficiencia operativa y la capacidad para garantizar una mayor estabilidad en las estructuras metálicas fabricadas [38].

El análisis del Retorno sobre la Inversión (ROI) entre el escenario de trabajo tradicional sin integración tecnológica y el escenario con implementación de Tekla Structures y corte por plasma CNC destaca la significativa diferencia en rentabilidad y eficiencia operativa. Los resultados muestran que, mientras ambos escenarios son rentables con ROIs positivos del 9.99% y 15.56% respectivamente, la implementación tecnológica ofrece un retorno más alto por cada unidad monetaria invertida. Este hallazgo subraya la efectividad de adoptar tecnologías avanzadas para

optimizar procesos y aumentar la productividad en la construcción civil. El gráfico comparativo de ROI ilustra claramente esta ventaja, evidenciando cómo la integración de Tekla Structures y CNC plasma no solo mejora la precisión dimensional y la calidad del producto final, como se discutió previamente, sino que también incrementa la rentabilidad financiera del proyecto. Para maximizar los beneficios del ROI en proyectos similares, se recomienda implementar estrategias continuas de optimización de costos, capacitación del personal y evaluación constante del desempeño, asegurando así una rentabilidad sostenida y una competitividad mejorada en el mercado de la construcción [37].

VI. CONCLUSIONES

La encuesta destaca que Tekla Structures es una herramienta fundamental en el diseño y construcción de estructuras metálicas, permitiendo la generación de modelos 3D detallados que mejoran la visualización, planificación y ejecución de proyectos. Estos modelos facilitan a ingenieros, arquitectos y clientes comprender a fondo el diseño, optimizar la fabricación y montaje de componentes, y asegurar una colaboración efectiva entre equipos. Según la encuesta realizada a 20 profesionales de Tesucsa y Sedimac, el 70% utiliza Tekla Structures frecuentemente o en todos sus proyectos, sin diferencias significativas entre ambas empresas, indicando una adopción consistente del software. Entre las características más valoradas, el 35% mencionó el modelado en 3D como la función más útil, seguido por la resolución de uniones y nudos (25%) y la integración con otros programas (15%), subrayando su valor en el diseño estructural. Además, el 80% reportó una disminución de errores con Tekla Structures, mejorando la precisión y calidad en el diseño y fabricación de estructuras metálicas. En cuanto a la eficiencia y productividad, el 40% considera que Tekla Structures contribuye, con un 25% destacando su contribución total. El análisis de confiabilidad mediante el coeficiente Alfa de Cronbach en SPSS V26, que arrojó un valor perfecto de 1.000, valida la consistencia de las variables analizadas en la encuesta, asegurando la robustez de las escalas de medición utilizadas en el estudio y permitiendo una interpretación confiable de los resultados.

Este estudio comparativo entre el corte por plasma CNC y el plasma manual en la fabricación de estructuras metálicas destaca las ventajas significativas del plasma CNC. La velocidad de corte

promedio para material de 12 mm fue de 837.22 mm/minuto con plasma CNC, en contraste con 411.46 mm/minuto y 339.66 mm/minuto para los métodos manuales. Para material de 9 mm, el plasma CNC alcanzó una velocidad de 1000.65 mm/minuto, comparado con 337.34 mm/minuto y 270.34 mm/minuto del plasma manual. En términos de precisión dimensional, el plasma CNC mostró desviaciones promedio de ± 0.49 mm y ± 0.51 mm, mientras que el plasma manual presentó desviaciones de ± 1.53 mm a ± 3.00 mm. Estas diferencias resaltan la capacidad del plasma CNC para producir cortes más precisos y uniformes, esenciales para aplicaciones que requieren tolerancias estrictas en ingeniería estructural. En eficiencia de material, el plasma CNC redujo las pérdidas, con un promedio del 6.00% en material de 12 mm y del 5.01% en material de 9 mm, comparado con pérdidas del 14.06% y 12.01% respectivamente para el plasma manual. Estos resultados confirman al plasma CNC como una tecnología superior para la fabricación de estructuras metálicas, mejorando la competitividad y sostenibilidad económica en las operaciones industriales.

Este estudio comparativo ha demostrado los beneficios significativos de integrar Tekla Structures y el corte por plasma CNC en la fabricación y montaje de estructuras metálicas parabólicas. En el Escenario B, que incorpora estas tecnologías, se observó una reducción del 22.5% en el tiempo total de fabricación y montaje, pasando de 95:49 horas en el Escenario A a 74:02 horas. La precisión del ensamblaje mejoró notablemente con desviaciones promedio de ± 0.51 mm en comparación con ± 5.01 mm del Escenario A. Además, el Escenario B demostró una reducción en los residuos generados: del 4.86% al 2.31% para material metálico y del 3.99% al 1.37% para residuos de corte y desecho. Estos resultados destacan la eficiencia operativa y la gestión sostenible de recursos, posicionando la integración de Tekla Structures y el plasma CNC como estrategias clave para mejorar la competitividad y sostenibilidad en la fabricación de estructuras metálicas.

Este estudio comparativo entre métodos tradicionales y la implementación de Tekla Structures junto con el corte por plasma CNC ha revelado beneficios significativos en términos de calidad del producto final y retorno de la inversión (ROI) en la construcción de estructuras metálicas. En el escenario sin integración tecnológica (pórticos 24-26), se observó una precisión dimensional promedio de ± 12.42 mm, indicativa de problemas en la alineación y ajuste de piezas. En contraste, en el escenario con integración tecnológica (pórticos 1-3), se logró una precisión dimensional

promedio de ± 3.25 mm, destacando una mejora sustancial que facilita un ensamblaje más eficiente y asegura mayor estabilidad estructural.

La diferencia en la precisión dimensional entre ambos escenarios fue estadísticamente significativa ($t = 7.653$, $p < 0.05$), confirmando los beneficios de la integración tecnológica. En términos de ROI, la implementación de Tekla Structures y el plasma CNC en el escenario de los pórticos 1-3 generó un ROI del 15.56%, mientras que el escenario tradicional de los pórticos 24-26 alcanzó un ROI del 9.99%. Este hallazgo subraya la mayor rentabilidad de la inversión en tecnología avanzada, resaltando cómo la optimización de procesos y la mejora en la precisión contribuyen positivamente a los resultados financieros. Aunque ambos escenarios mostraron retornos positivos, el escenario con integración tecnológica demostró una ventaja competitiva clara en términos de rentabilidad. Futuras investigaciones podrían ampliar este análisis a diferentes contextos y escalas de proyectos para validar aún más la efectividad y viabilidad de estas tecnologías avanzadas.

VII. REFERENCIAS

- [1] Qiheng, W. A. N. G., Yang, L. I., & Zixuan, W. A. N. G. (2023). Application of Hyperbolic Paraboloid in Architectural Design. *Tehnicki vjesnik/Technical Gazette*, 30(5). M. Altieri y C. Nicholls, *Agroecología: teoría y práctica para una agricultura sostenible*, México: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente; Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe, 2000.
- [2] Koçak, M. (2010, July). Structural integrity of welded structures: Process-Property–Performance (3P) relationship. In *63rd Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding* (pp. 11-17).
- [3] Zaini, N., Zaini, A. A., Tamjehi, S. D., Razali, A. W., & Gui, H. C. (2020, May). Implementation of building information modeling (BIM) in sarawak construction industry: a review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 498, No. 1, p. 012091). IOP Publishing.
- [4] Byrne, G. & Dornfeld, David & Denkena, Berend. (2003). *Advancing Cutting Technology*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 52. 483-507.
- [5] Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2020). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*.
- [6] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*. John Wiley & Sons.
- [7] Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357-375.
- [8] Firoz, S., & Rao, S. K. (2012). Modelling concept of sustainable steel building by Tekla Software. *International Journal of Engineering Research and Development*, 1(5), 18-24.
- [9] Tang, Zj., Liu, Ww., Wang, Yw. et al. A review on in situ monitoring technology for directed energy deposition of metals. *Int J Adv Manuf Technol* 108, 3437–3463 (2020).
- [10] Yuehong Su, Saffa B. Riffat, Gang Pei, Comparative study on annual solar energy collection of a novel lens-walled compound parabolic concentrator (lens-walled CPC), *Sustainable Cities and Society*, Volume 4, 2012, Pages 35-40,.
- [11] A.A. Hachicha, I. Rodríguez, J. Castro, A. Oliva, Numerical simulation of wind flow around

- a parabolic trough solar collector, *Applied Energy*, Volume 107, 2013, Pages 426-437.
- [12] Vilutienė, Tatjana & Kalibatiene, Diana & Hosseini, M. Reza & Pellicer, Eugenio & Zavadskas, Edmundas. (2019). *Building Information Modeling (BIM) for Structural Engineering: A Bibliometric Analysis of the Literature*. *Advances in Civil Engineering*. 2019. 1-19. 10.1155/2019/5290690.
- [13] Vi Nguyen, Faisal Altarazi, Thanh Tran, "Optimization of Process Parameters for Laser Cutting Process of Stainless Steel 304: A Comparative Analysis and Estimation with Taguchi Method and Response Surface Methodology", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, Article ID 6677586, 14 pages, 2022.
- [14] Frahm, B. (2023). Sustainable manufacturing: Good for the environment and metal fabricators. *The Fabricator*, 25, 126-137.
- [15] Iosub, A., Nagit, G. & Negoescu, F. Plasma Cutting of Composite Materials. *Int J Mater Form 1 (Suppl 1)*, 1347–1350 (2008).
- [16] Tejada Ramos, IC. (2023). Metodología BIM para proyectos de estructuras metálicas: Aplicación en la empresa INSTRUMET S.R.L. de la República Dominicana. Universitat Politècnica de València.
- [17] Gajdzik B, Wolniak R. (2021). Digitalización e innovación en la industria del acero en Polonia: herramientas de TIC seleccionadas en un análisis de datos estadísticos y un estudio de caso. *Energías*; 14(11):3034.
- [18] S Firoz, SK Rao (2012). Modelling concept of sustainable steel building by Tekla Software, *International Journal of Engineering Research and Development*, Volume 1, PP.18-24.
- Higuchi y J. Dávalos, «Unveiling Peruvian organic consumers demand for organics: A latent class approach», *Ciencia e Investigación Agraria*, vol. 43, nº 3, pp. 408-417, 2016, doi: 10.4067/S0718-16202016000300007.
- [19] Wenwang Wu, Re Xia, Guian Qian, Zengqian Liu, Nima Razavi, Filippo Berto, Huajian Gao, *Mechanostructures: Rational mechanical design, fabrication, performance evaluation, and industrial application of advanced structures*, *Progress in Materials Science*, Volume 131, 2023, 101021, ISSN 0079-6425.
- [20] Manson, L. L. C. (2006). *Analysis and comparison of connections in steel structures* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [21] David Arditi & Krishna Mochtar (2010) Trends in productivity improvement in the US

- construction industry, *Construction Management and Economics*, 18:1, 15-27
- [22] Byrne, G. & Dornfeld, David & Denkena, Berend. (2003). Advancing Cutting Technology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 52. 483-507.
- [23] Uma Maheshwera Reddy Paturi, Vidhya Darshini B., N.S. Reddy, Progress of machinability on the machining of Inconel 718: A comprehensive review on the perception of cleaner machining, *Cleaner Engineering and Technology*, Vol. 5, 2021, 100323, 2666-7908.
- [24] Llanto, J.M.; Tolouei-Rad, M.; Vafadar, A.; Aamir, M. Recent Progress Trend on Abrasive Waterjet Cutting of Metallic Materials: A Review. *Appl. Sci.* 2021, 11, 3344.
- [25] Stephenson, DA y Agapiou, JS (2016). *Teoría y práctica del corte de metales (3ª ed.)*. Prensa CRC. Vol. 3 9(69)
- [26] Frahm, B. (2023). Sustainable manufacturing: Good for the environment and metal fabricators. *The Fabricator*, 25, 126-137.
- [27] Chen, J.C., Li, Y. & Cox, R.A. Taguchi-based Six Sigma approach to optimize plasma cutting process: an industrial case study. *Int J Adv Manuf Technol* 41, 760–769 (2009).
- [28] Nguyen, T. K., Phung, L. X., & Bui, L. T. (2020). Novel integration of CAPP in a G-Code generation module using macro programming for CNC application. *Machines*, 8(4), 61.
- [29] Shu Tang, Dennis R. Shelden, Charles M. Eastman, Pardis Pishdad-Bozorgi, Xinghua Gao. A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. *Automation in Construction*, Volume 101, 2019, Pages 127-139.
- [30] Eastman, C. M., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons.
- [31] Mohammed Sadiq Altaf, Ahmed Bouferguene, Hexu Liu, Mohamed Al-Hussein, Haitao Yu. Integrated production planning and control system for a panelized home prefabrication facility using simulation and RFID. *Automation in Construction*, Volume 85, 2018, Pages 369-383.
- [32] Huabo Duan, Travis R. Miller, Gang Liu, Vivian W.Y. Tam. Construction debris becomes growing concern of growing cities. *Waste Management*, Volume 83, 2019, Pages 1-5.
- [33] Sarkis, J., & Zhu, Q. (2010). *Environmental Sustainability and Production: Taking the Road*

- Less Travelled. *International Journal of Production Research*, 48(19), 5619-5641.
- [34] Huang, H., Yang, J., & Wu, T. (2022). Fusion of Building Information Modeling and Blockchain for Metaverse. *IEEE Open Journal of the Computer Society*, 2022, 195-207.
- [35] Garces, G., & Peña, C. (2023). A Review on Lean Construction for Construction Project Management: *Revista Ingeniería de Construcción. Sustainability*, 38(1).
- [36] Ansah, R., & Zhang, X. (2019). Quality Management of Construction Projects: A Literature Review Based on Chinese Journals. *Sustainability*, 11(10), 2772.
- [37] Contreras, I. (2006). Análisis de la rentabilidad económica (ROI) y financiera (ROE) en empresas comerciales y en un contexto inflacionario. *Visión gerencial*, (1), 13-28. L. Kuang et al., "A Numerical Method for Analyzing Electromagnetic Scattering Properties of a Moving Conducting Object", *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, Article ID 386315, 9 pages, Feb. 2014.
- [38] Aisc, (2016). Specification for Structural Steel Buildings Supersedes the Specification for Structural Steel Buildings dated and all previous versions Approved by the Committee on Specifications Mohammed Sadiq Altaf, Ahmed Bouferguene, Hexu Liu, Mohamed Al-Hussein, Haitao Yu. Integrated production planning and control system for a panelized home prefabrication facility using simulation and RFID. *Automation in Construction*, Volume 85, 2018, Pages 369-383.

VIII. ANEXOS

A. EVIDENCIA DE SUMISION DEL ARTÍCULO EN UNA REVISTA

19/9/24, 12:09

Gmail - [IC] Envío recibido de Ref. 7070



Elvis Chalco <chalcoqe65@gmail.com>

[IC] Envío recibido de Ref. 7070

1 mensaje

Juan Queipo de Llano Moya via Informes de la Construcción

12 de julio de 2024,

<administrador.revistas@csic.es>

19:09

Responder a: Juan Queipo de Llano Moya <direccion,informes@ietcc,csic.es>

Para: ELVIS QUISPE CHALCO <chalcoqe65@gmail.com>

Estimado ELVIS QUISPE CHALCO,

Gracias por enviarnos su manuscrito "Innovación en la fabricación de estructuras metálicas parabólicas: integrando tekla structures y el corte por plasma cnc" a Informes de la Construcción, que ha recibido el número de referencia 7070,

Previo a su evaluación por revisores externos, es el Consejo de Redacción quien decide sobre la adecuación del mismo a la línea editorial y las normas de la Revista. Gracias al sistema de gestión de revistas online que usamos podrá seguir su progreso a través del proceso editorial identificándose en el sitio web de la revista:

URL del manuscrito: <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/authorDashboard/submission/7070>

Nombre de usuario: elvisc

En cualquier caso la decisión se le comunicará lo antes posible.

Si tiene cualquier pregunta no dude en contactar con nosotros, haciendo mención al número de referencia asignado.

Agradeciéndole el envío de dicho artículo a nuestra redacción, reciba un cordial saludo.

Secretaría, Control y Gestión de Artículos
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja
[Serrano Galvache, 4, 28033 Madrid](mailto:Serrano.Galvache@ietcc.csic.es)
Tel.: 91 302 04 40 (Ext 870276)
<http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/>

Informes de la Construcción

<https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>

**B. RESOLUCION DE INSCRIPCION DEL PERFIL DE PROYECTO DE TESIS EN
FORMATO ARTICULO APROBADO POR EL CONSEJO DE FACULTAD
CORRSPONDIENTE**



**“AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA
CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO”**

RESOLUCIÓN N° 0608-2024/UPeU-FIA-CF

Lima, Naña, 30 de julio de 2024

VISTO:

El expediente de los (las) bachilleres **Luz Delia Oliva Rodriguez** identificado(a) con código universitario N° 201222101 y **Elvis Quispe Chalco** identificado(a) con código universitario N° 201121276, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO:

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la sustentación de la tesis en formato artículo;

Que el Comité Dictaminador ha emitido su dictamen aprobando el informe de tesis titulado “Innovación en la fabricación de estructuras metálicas parabólicas: integrando tekla structures y el corte por plasma cnc.”, presentado por los(las) bachilleres **Luz Delia Oliva Rodriguez** y **Elvis Quispe Chalco**, reuniendo de esta manera las condiciones previas para la declaratoria de expedito para la programación de la sustentación;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 30 de julio de 2024, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

1. Declarar expedito a los (las) bachilleres **Luz Delia Oliva Rodriguez** y **Elvis Quispe Chalco**, para que sustenten la tesis en formato artículo titulada “Innovación en la fabricación de estructuras metálicas parabólicas: integrando tekla structures y el corte por plasma cnc.”, conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Civil, el 20 de agosto de 2024, a las 17:00 horas, en el Auditorio Wellesley Muir.
2. Designar el Jurado de Sustentación, encargado de gestionar la sustentación respectiva, el mismo que queda constituido por los siguientes miembros:

Presidente: Mtro. Leonel Chahuares Paucar
Secretario: Ing. Herson Duberly Pari Cusi
Asesor: Mg. Arnaldo Cahui Galarza
Vocal: Mg. Lily Zea Gonzales

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA




Ph.D. Silvia Pilco Quesada
SECRETARIA ACADEMICA

cc:
-Interwado
-Jurado (04)
-Secretaria General
-Archivo