



Diagnóstico y plan de mejoramiento productivo de procesos de conformado por moldeo de arena y terminación para la manufactura de piezas en aluminio de la empresa Fundalco Zona Franca

Andrea Fernanda Muegues Pedraza

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor

Ricardo Moreno Sánchez, Doctor (PhD) en Mecatrónica

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	Muegues [1]
Referencia	[1] Muegues, “Diagnóstico y plan de mejoramiento productivo de procesos de conformado por moldeo de arena y terminación para la manufactura de piezas en aluminio de la empresa Fundalco Zona Franca”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.
Estilo IEEE (2020)	



Centro de documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mis padres y hermanos.

Agradecimientos

Agradezco a mis asesores por el apoyo brindado en la realización de esta práctica. A la empresa Fundalco Zona Franca S.A.S. y a todos los que me aportaron su conocimiento y experiencia durante mi formación académica.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
I. INTRODUCCIÓN	12
II. OBJETIVOS	13
A. Objetivo general	13
B. Objetivos específicos	13
III. MARCO TEÓRICO	14
A. Six Sigma	14
B. Lean Six Sigma	15
C. Medición de tiempos de operaciones	15
1. Tamaño de muestra	16
D. Análisis de varianza	17
E. Proceso de análisis jerárquico (AHP)	18
F. Principios de diseño de montajes de mecanizado	21
IV. METODOLOGÍA	22
A. Diagnóstico de productividad de procesos de fundición en molde de arena y maquinado convencional	22
1. Definiciones	23
2. Medición de tiempos de operaciones	27
3. Análisis de varianza	28
4. Métricas de control: seis sigma	29
B. Diseño de montajes de mecanizado	30

1. Consideraciones generales	30
C. Evaluación de la conveniencia de inclusión del taladro multihusillos en la línea de producción	32
1. Eficiencia de operación	33
2. Costos	34
3. Definición de prioridades locales	35
4. Cálculo de prioridades globales	36
5. Comparación de tiempos de montaje	36
6. Comparación de tiempos de operación	37
7. Comparación de costo de reparación	39
8. Comparación de costos operativos	42
9. Evaluación de alternativas	44
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS	46
A. Registro de tiempos de operaciones de mecanizado	46
1. Perforado para platinas	46
2. Planeado para platinas	47
3. Perforado para pisadores	49
4. Mecanizado de radios	50
5. Formación de molde en arena	52
B. Métricas seis sigma de cada proceso	54
1. Formación de molde en arena	54
2. Perforado para pisadores	55
3. Perforado para platinas	55
4. Planeado para platinas	56
5. Mecanizado de radios	56

C. Análisis de varianza	56
D. Montajes de mecanizado	59
1. Propuesta cono-abrazadera	59
2. Propuesta mesa de vacío	60
E. Niveles de preferencia de alternativas Fresadora vs Taladro Multihusillos	62
VI. CONCLUSIONES	64
REFERENCIAS	65
ANEXOS	68

LISTA DE TABLAS

Tabla I	19
Tabla II	20
Tabla III.....	37
Tabla IV.....	54
Tabla V	55
Tabla VI.....	55
Tabla VII.....	56
Tabla VIII.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tamaño de muestra requerido para mediciones de tiempos según el valor de R/χ	16
Figura 2. Valores de z	17
Figura 3. Ejemplo de solución al proceso de análisis jerárquico.	21
Figura 4. Proceso de moldeo en arena verde.	24
Figura 5. Piezas para medición del proceso de moldeo en arena.	24
Figura 6. Proceso de perforado de platinas.	25
Figura 7. Proceso de planeado de platinas.	25
Figura 8. Proceso de perforado para pisadores.	26
Figura 9. Proceso de mecanizado para radios.	26
Figura 10. Formato para el registro de tiempos de mecanizado.....	27
Figura 11. Montaje para mecanizado de radio con fresa redonda.	28
Figura 12. Montaje para mecanizado de radio con buril y dispositivo de sujeción.	29
Figura 13. Formato de registro para análisis de varianza.....	29
Figura 14. Planos de referencia en un conector genérico.....	31
Figura 15. Lados adyacentes libres en un conector eléctrico.....	32
Figura 16. Meta, criterios y subcriterios del proceso de análisis jerárquico.	33
Figura 17. Operación de perforado de platina. 4 perforaciones de $\varnothing 18$ mm y espesor de 20 mm.	34
Figura 18. Matrices de prioridades locales para criterios y subcriterios de comparación.	36
Figura 19. Prioridades globales para cada subcriterio de comparación.	36
Figura 20. Consideraciones y matriz de comparación para la variable tiempo de montaje.....	37
Figura 21. Velocidades de corte para operaciones de taladrado.	38
Figura 22. Avances de taladro para brocas helicoidales expresado en mm/rev.....	38
Figura 23. Consideraciones y matriz de comparación para la variable tiempo de operación.	39
Figura 24. Junta telescópica universal.....	39
Figura 25. Representación esquemática de la junta universal.....	40
Figura 26. Elementos de acople faltantes.....	41
Figura 27. Representación esquemática de los elementos de acople faltantes.....	41
Figura 28. Costos de reparación estimados y matriz de comparación para la variable costo de reparación.....	42

Figura 29. Placa del motor de la fresadora.....	43
Figura 30. Placa del motor del taladro multihusillos.	43
Figura 31. Costos operativos estimados y matriz de comparación para la variable costos operativos.	44
Figura 32. Tiempos registrados para la realización de 4 perforaciones en platina.	46
Figura 33. Tiempos registrados para la realización de 6 perforaciones en platina.	46
Figura 34. Tiempos registrados para la realización de 8 perforaciones en platina.	47
Figura 35. Tiempos registrados para el planeado de platina 100x100 mm.	47
Figura 36. Tiempos registrados para el planeado de platina 100x120 mm.	48
Figura 37. Tiempos registrados para el planeado de platina 130x130 mm.	48
Figura 38. Tiempos registrados para el planeado de platina 200x100 mm.	49
Figura 39. Tiempos registrados para la realización de 6 perforaciones para ensamble de pisadores.	49
Figura 40. Tiempos registrados para la realización de 4 perforaciones para ensamble de pisadores.	50
Figura 41. Tiempos registrados para la realización del ranurado para el radio de los conectores cable M45.	50
Figura 42. Tiempos registrados para la realización del ranurado para el radio de los conectores cable M61.	51
Figura 43. Tiempos registrados para la realización del ranurado para el radio de los conectores cable M90.	51
Figura 44. Tiempos registrados para la realización del ranurado para el radio de los conectores tubo M129.	52
Figura 45. Tiempos registrados para la realización del ranurado para el radio de los conectores tubo M150.	52
Figura 46. Tiempos registrados para la formación del molde en arena para conectores rectos cable M45.	53
Figura 47. Tiempos registrados para la formación del molde en arena para conectores a 90 cable M61.	53
Figura 48. Tiempos registrados para la formación del molde en arena para conectores en T cable M90.	54

Figura 49. Resultados de análisis de varianza para la pieza cable M45.....	57
Figura 50. Resultados de análisis de varianza para la pieza tubo M129.	58
Figura 51. Pieza para localización en los montajes de mecanizado.....	59
Figura 52. Propuesta de montaje de mecanizado con cono y abrazadera.	60
Figura 53. Conexiones neumáticas para mesa de vacío.	61
Figura 54. Propuesta de montaje de mecanizado con mesa de vacío.....	62
Figura 55. Resultados de la comparativa AHP entre el taladro y la fresadora.....	63

RESUMEN

En este informe fue llevada a cabo la evaluación de procesos de fabricación de conectores eléctricos por medio de fundición en molde de arena y mecanizado en la empresa Fundalco Zona Franca S.A.S, para la cual se realizó un análisis estadístico que permitió identificar las operaciones con mayor variabilidad entre tiempo registrado y tiempo real. Se incluyeron soluciones prácticas para fortalecer la eficiencia de los procesos, como el diseño de montajes de mecanizado para agilizar el posicionamiento de piezas y la evaluación de la puesta en funcionamiento de un taladro multihusillos, para comparar su rendimiento con una máquina herramienta de uso convencional (fresadora) para el proceso de perforado de conectores.

***Palabras clave* —Análisis de varianza, fundición por moldeo en arena, maquinado convencional, diseño de montajes de mecanizado, proceso de análisis jerárquico.**

ABSTRACT

The evaluation of manufacturing processes of electrical connectors, focusing in the subprocesses of sand-casting mold creation and milling, in the company Fundalco Zona Franca S.A.S. was conducted in this work, for which a statistical analysis was performed to identify the operations with greater variability between recorded time and real time. Practical solutions were included to strengthen the efficiency of the processes, such as the design of fixturing assemblies to speed up the positioning of parts; and the evaluation of the implementation of a multi-spindle drill, to compare its performance with a conventional machine tool (milling machine) for the process of through-hole drilling.

Keywords — ANOVA, sand casting, machining, fixture design, analytical hierarchy process.

I. INTRODUCCIÓN

La continua búsqueda del mejoramiento de procesos es un componente crucial en las empresas de la industria de la manufactura, pues es un aspecto que no influye únicamente en la calidad del producto final y reducción de costos de operativos, sino también en la eficiencia y capacidad de generar valor agregado. En la fabricación de conectores eléctricos de la empresa Fundalco S.A.S., ubicada en Rionegro, Antioquia, confluyen diversas etapas susceptibles de análisis, en particular la fundición con molde de arena y el maquinado son dos procesos en los que la mejora continua y la optimización se hacen esenciales, ya que la variedad de las operaciones involucradas da lugar a diversos puntos de mejora.

En este trabajo se aborda el diagnóstico de estos procesos, centrándose en el registro estadístico de tiempos de los subprocesos propios de la fabricación de esta línea de productos, incluyendo a su vez un análisis de la influencia de factores como el tipo de operario en el tiempo final de realización de operaciones. Se incluyen soluciones prácticas para mejorar el flujo de trabajo en el área de mecanizado, para lo cual se proponen montajes de mecanizado que permitan agilizar el posicionamiento de piezas en la maquinaria, pretendiendo disminuir tiempos de alistamiento y ajuste en las operaciones de maquinado. Se analiza la condición actual y se realiza una evaluación sobre la consideración de la inclusión de una perforadora multihusillos en la línea de operación, para lo cual hace una comparativa entre esta máquina y una fresadora convencional.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Realizar un diagnóstico del proceso de fabricación de conectores eléctricos y plantear mejoras en el proceso de maquinado por medio del diseño de montajes de mecanizado, y el análisis de operaciones y tiempos.

B. Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico de productividad de los procesos de fundición en molde de arena y maquinado convencional, que son requeridos para la fabricación de conectores eléctricos, mediante análisis estadístico de los tiempos de las operaciones involucradas y el análisis de causas de sobretiempos y reprocesos.
- Diseñar 2 montajes de mecanizado que faciliten el posicionamiento de las piezas en las máquinas herramientas para disminuir los tiempos de preparación en las operaciones de maquinado.
- Comparar la eficiencia de operación de perforado de un conector, utilizando una máquina convencional con montaje de mecanizado versus máquina perforadora multihusillos para analizar la conveniencia de incluir la máquina multihusillos en la línea de producción.

III. MARCO TEÓRICO

A. Six Sigma

El método Six Sigma es un enfoque sistemático y basado en datos para mejorar la calidad y la eficiencia de los procesos. Según [1], el six sigma utiliza una metodología estructurada conocida como *DMAIC*, que significa Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. Este enfoque se utiliza para identificar y eliminar defectos o variaciones no deseadas en un proceso, lo que resulta en una mayor consistencia y calidad del producto final.

- Definir: en esta etapa, se establecen claramente los objetivos del proyecto y se identifican las necesidades y expectativas de los clientes [2].
- Medir: se recopilan datos relevantes para comprender mejor el proceso y determinar su rendimiento actual. Esto puede implicar la recopilación de datos de producción, mediciones de calidad y retroalimentación de los clientes.
- Analizar: los datos recopilados son analizados, para identificar las causas raíz de los problemas, o, las áreas de mejora. Según [2], se utilizan herramientas estadísticas y de análisis para identificar patrones y tendencias en los datos.
- Mejorar: se implementan soluciones para abordar las causas raíz identificadas durante la fase de análisis. Estas soluciones se prueban y se ajustan según sea necesario, para garantizar que conduzcan a mejoras significativas en el proceso.
- Controlar: Se establecen que medidas para monitorear, y, mantener las mejoras realizadas durante el proyecto. Esto implica la implementación de controles y procedimientos para garantizar que el proceso se mantenga en un estado predecible y medible, i.e, controlable, y, que los cambios positivos se mantengan a lo largo del tiempo.

Para evaluar el desempeño de un proceso, respecto a seis sigma, se cuenta con las siguientes herramientas básicas:

$$Nivel_{sigma} = \min\left(\frac{USL - \tilde{x}}{\sigma}, \frac{LSL - \tilde{x}}{\sigma}\right) \quad (1)$$

Donde *USL*, *LSL*, \tilde{x} y σ representan el límite superior de especificación, el límite inferior de especificación, la mediana y la desviación estándar, respectivamente. El nivel sigma se refiere a qué tanto se desempeña el proceso, en medidas de desviación estándar, respecto al cumplimiento de las especificaciones límite, y, varía de [0, 6]; donde 6, se refiere a un proceso que cumple adecuadamente, y 0, a uno que se desvía bastante de las especificaciones.

$$C_{pk} = \frac{Nivel_{sigma}}{3} \quad (2)$$

Donde C_{pk} se refiere a la capacidad del proceso de cumplir unas determinadas especificaciones en cuanto a un proceso dado. Según Pyzdek (2003) [1], un proceso con un nivel sigma de 4, con un consecuente valor de $C_{pk} = 1.33$, implica que se trata de un proceso en donde se satisface, mínimamente los requerimientos del cliente; y, si se trata de un proceso estadísticamente controlado, el valor de C_{pk} se busca llevar a 2, aunque 1.5 es un valor mínimo aceptable.

B. *Lean Six Sigma*

Tal como puede encontrarse en [3], las metodologías de manufactura esbelta y Seis Sigma constituyen destacados esfuerzos por mejorar el rendimiento de los procesos, especialmente en entornos de fabricación. Las empresas centradas en la fabricación y la tecnología con conocimientos cuantitativos pueden preferir Seis Sigma, mientras que las empresas menos avanzadas técnicamente u orientadas a los servicios pueden inclinarse por las técnicas de *lean manufacturing*. Lean Six Sigma (LSS) es una metodología de gestión que cuenta con un enfoque más general, pues combina elementos de las ambas (manufactura esbelta y seis sigma), siendo especialmente fuerte en su versatilidad, teniendo en cuenta los factores económicos, competitividad, comportamientos estadísticos, entre otros. Sus herramientas de mejora son:

- **Gráfica de Pareto:** Herramienta de manejo de datos que permite evaluar la relevancia de la información tratada en un análisis de datos, posibilitando la toma de decisiones a través de una curva de distribución ABC, que ordena los datos de mayor a menor frecuencia
- **Diagrama de Ishikawa:** Posibilita analizar las causas principales de un problema, contribuyendo a su resolución al mostrar la relación entre causas y efectos.
- **Control estadístico de procesos:** La clave del *lean six sigma* se encuentra en este control, ya que permite reconocer la relevancia, ubicación, frecuencia y causas de los problemas que se presentan en los procesos, logrando aplicar un monitoreo expresado estadísticamente y adoptar un paradigma objetivo en la planificación y toma de decisiones, obteniendo datos que expresen el desempeño de los procesos, lo cual conlleva una evaluación informada y sistemática de las proposiciones de mejoramiento.

C. *Medición de tiempos de operaciones*

El estudio de tiempos es una herramienta que se usa en diferentes enfoques de control de calidad, y da cuenta del ritmo de trabajo que se maneja en un proceso [4]. Consiste en la toma de muestras de tiempo para conocer el estado de este y comprobar su mejoramiento.

1. *Tamaño de muestra*

El proceso de muestreo para la toma de tiempos determina el número de ciclos de trabajo que deben medirse empleando criterios que obedecen al comportamiento y variabilidad de los datos. Se determina matemáticamente el tamaño de muestra por medio de métodos estadísticos. El método Maytac consiste en la toma de tiempos de 5 ciclos, posteriormente se encuentra el valor R como la diferencia de los valores extremos de la muestra de 5 tiempos.

$$R = t_{max} - t_{min} \quad (3)$$

Posteriormente, se calcula la media de los tiempos tomados ($\bar{\chi}$), y se obtiene el valor de $R/\bar{\chi}$, el cual debe buscarse en la Fig. 1 para leer el tamaño de muestra adecuado para el proceso en cuestión.

$\frac{R}{\bar{X}}$	Data from Sample of		$\frac{R}{\bar{X}}$	Data from Sample of		$\frac{R}{\bar{X}}$	Data from Sample of	
	5	10		5	10		5	10
.10	3	2	.42	52	30	.74	162	93
.12	4	2	.44	57	33	.76	171	98
.14	6	3	.46	63	36	.78	180	103
.16	8	4	.48	68	39	.80	190	108
.18	10	6	.50	74	42	.82	199	113
.20	12	7	.52	80	46	.84	209	119
.22	14	8	.54	86	49	.86	218	125
.24	17	10	.56	93	53	.88	229	131
.26	20	11	.58	100	57	.90	239	138
.28	23	13	.60	107	61	.92	250	143
.30	27	15	.62	114	65	.94	261	149
.32	30	17	.64	121	69	.96	273	156
.34	34	20	.66	129	74	.98	284	162
.36	38	22	.68	137	78	1.00	296	169
.38	43	24	.70	145	83			
.40	47	27	.72	153	88			

Fig. 1. Tamaño de muestra requerido para mediciones de tiempos según el valor de $R/\bar{\chi}$. Recuperado de [5].

Otro método para el cálculo del tamaño de muestra es el que emplea la ecuación:

$$n = \frac{zs^2}{h\bar{\chi}} \quad (4)$$

Donde z puede elegirse de la Fig. 2. Por su parte, s es la desviación estándar de la muestra, h es el nivel de precisión deseado en decimal y $\bar{\chi}$ es la media.

Valores z comunes	
Confianza deseada (%)	Valor z (desviación estándar requerida para el nivel de confianza deseado)
90.0	1.65
95.0	1.96
95.45	2.00
99.0	2.58
99.73	3.00

Fig. 2. Valores de z. Recuperado de [6].

D. Análisis de varianza

El análisis de varianza (ANOVA) es una técnica estadística poderosa y ampliamente utilizada en el diseño de experimentos y la ingeniería mecánica. Según [7], el ANOVA permite comparar las medias de tres o más grupos para determinar si existen diferencias significativas entre ellos. En el contexto del diseño de montajes de mecanizado para mecanizar conectores eléctricos, el ANOVA se puede aplicar para evaluar la influencia de diferentes variables de diseño en la calidad y la eficiencia del proceso.

El enfoque ANOVA permite descomponer la variabilidad total en diferentes componentes, como la variabilidad debida a factores de interés y la variabilidad aleatoria. En [8] se destaca que esta descomposición facilita la identificación de los factores que tienen un efecto significativo en la respuesta del proceso y aquellos que no lo tienen. Esto es crucial para tomar decisiones informadas sobre cómo optimizar el diseño de los montajes de mecanizado y mejorar el proceso de mecanizado de los conectores eléctricos.

Además, [9] señalan que el ANOVA proporciona una forma rigurosa de evaluar la importancia relativa de cada factor y su interacción en el resultado del proceso. Esta información es fundamental para identificar áreas de mejora y desarrollar estrategias efectivas para optimizar el diseño y la operación de los montajes de mecanizado.

E. Proceso de análisis jerárquico (AHP)

El proceso de análisis jerárquico (*Analytical Hierarchy Process, AHP*) es una metodología ampliamente utilizada en la toma de decisiones complejas y multifactoriales [10]. Desarrollado por Thomas L. Saaty en la década de 1970, el AHP se basa en la teoría matemática de la estructura jerárquica y la toma de decisiones multicriterio. Su objetivo es descomponer un problema complejo en una jerarquía de criterios y subcriterios, lo que facilita la evaluación ponderada y sistemática de las alternativas disponibles.

En el contexto del diseño de montajes de mecanizado para mecanizar conectores eléctricos, el AHP se convierte en una herramienta valiosa para evaluar y comparar diferentes diseños en función de múltiples criterios [11]. Estos criterios pueden incluir la facilidad de fabricación, la precisión dimensional, la durabilidad, el costo, la seguridad y la ergonomía, entre otros. Cada uno de estos criterios se desglosa en subcriterios más específicos, lo que permite un análisis detallado y exhaustivo de cada aspecto relevante del diseño de los montajes de mecanizado.

Una de las ventajas del AHP es su capacidad para asignar pesos relativos a cada criterio y subcriterio en función de su importancia percibida. Esto se logra mediante la comparación de parejas, donde se asignan valores de preferencia a cada par de criterios en una escala numérica. Posteriormente, estos valores se normalizan y se utilizan para calcular los pesos relativos, lo que permite una evaluación más objetiva y sistemática de las alternativas.

Además, el AHP permite la incorporación de la opinión de múltiples partes interesadas en el proceso de toma de decisiones [10]. Al involucrar a todas las partes interesadas en el proceso de evaluación y selección, el AHP fomenta la transparencia, la colaboración y el compromiso con la solución final.

En el proceso de análisis jerárquico se realiza la ponderación de los criterios de comparación elegidos, para la cual se asigna una intensidad de importancia, definida según criterio del evaluador. En la Tabla I es mostrada la escala Saaty, típicamente empleada en dicha asignación.

Tabla I
Escala fundamental de comparación de Saaty [12].

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Misma importancia	Ambos elementos contribuyen igualmente al objetivo
3	Importancia moderada	Un elemento se ve favorecido ligeramente frente al otro
5	Importancia fuerte	Un elemento se ve fuertemente favorecido frente al otro
7	Importancia muy fuerte	Un elemento domina fuertemente sobre el otro
9	Importancia extrema	Dominancia de un elemento sobre el otro con el mayor orden de magnitud posible
Intensidades para expresar valores intermedios: 2, 4, 6, 8. Intensidades para elementos de importancia cercana: 1.1, 1.2, 1.3, etc.		

Las comparaciones por pares en el *AHP* se realizan entre el elemento i y el elemento j , para cada uno de los criterios, creando una matriz de preferencias definida como [13]:

$$[a_{i,j}] \text{ donde } i, j = 1, 2, \dots, n$$

$$a_{i,j} = 1 \text{ para } i = j \quad (5)$$

$$a_{i,j} = \frac{1}{a_{j,i}} \text{ para } i \neq j \quad (6)$$

Lo mostrado anteriormente indica que la matriz tiene dimensión $n \times n$, siendo n el número de elementos presentes en la comparación dentro de un mismo nivel jerárquico. Un elemento i se compara siempre con un elemento j , donde los valores $a_{i,j}$ son el resultado de la comparación según la escala de Saaty, indicando cuánto más importante es el elemento i -ésimo que el elemento j -ésimo. Esto quiere decir que en la matriz de comparaciones sólo se requiere llenar los elementos por encima de la diagonal, puesto que los demás valores son iguales a 1 (la comparación de cada elemento consigo mismo) o son el recíproco de los valores ya computados, de modo que el número de comparaciones necesarias es $\frac{n(n-1)}{2}$.

Siguiendo el método de Saaty, la normalización de la matriz de preferencias se define así:

$$B = [b_{i,j}] \quad (7)$$

$$b_{i,j} = \frac{a_{i,j}}{\sum_{i=1}^n a_{i,j}} \quad (8)$$

Luego, se define el cálculo de la preferencia entre los criterios comparados, por medio del vector propio $w_{i,j}$, obtenido con las medias aritméticas de cada fila de valores en la matriz normalizada, de acuerdo con la ecuación:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{i,j}}{n} \quad (9)$$

El valor propio máximo se calcula como:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i} \quad (10)$$

Para evaluar la consistencia de la comparación entre elementos realizada, teniendo en cuenta el grado de error debido a la mezcla de unidades de medida, Saaty propone un índice de consistencia *CI*:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (11)$$

donde $\lambda_{max} - n$ mide la desviación entre la matriz consistente definida en la ecuación 7 y la matriz de preferencias mostrada en la ecuación 5. Luego, el *CI* se refiere al promedio de soluciones de la ecuación característica para la matriz de preferencias. Este índice de consistencia aumenta de acuerdo con la inconsistencia de la estimación. De acuerdo con el método, se emplea además el valor *CR*:

$$CR = \frac{\lambda_{max} - n}{r(n-1)} \cdot 100 \quad (12)$$

Este *CR* es la expresión que evalúa la diferencia entre comparaciones aleatorias, donde *r* es el valor *CI* para comparaciones aleatorias, tal como aparece en la Tabla II:

Tabla II

Valores de r para el cómputo de CR, y valores de CR aceptables.

Tamaño de la matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CI promedio aleatorio (r)	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.4	1.45	1.49
CR aceptable	0	0	0.052	0.089	0.111	0.125	0.135	0.14	0.145	0.149

De esta manera, el chequeo de consistencia para la comparativa consiste en el cálculo del valor *CR*, el cual debe ser menor al 10% del *CI*.

La evaluación de las alternativas se realiza en parejas, construyendo una matriz de comparación para cada uno de los criterios definidos. Estas matrices permiten crear la matriz C , cuyas columnas contienen los vectores propios de las comparaciones por pares de alternativas. Multiplicando la matriz C por el vector de preferencias w , se obtiene el vector de preferencias x (esto es mostrado en la Fig. 3, que da cuenta de la alternativa más adecuada para el problema de decisión planteado).

$$\mathbf{x} = \mathbf{C}\mathbf{w} = \begin{bmatrix} 0,0882 & 0,7234 & 0,2605 & 0,1327 & 0,2605 & 0,3767 & 0,2842 \\ 0,6687 & 0,2062 & 0,6333 & 0,0769 & 0,6333 & 0,1513 & 0,0964 \\ 0,2431 & 0,0704 & 0,1062 & 0,7903 & 0,1062 & 0,4720 & 0,6194 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,0606 \\ 0,0469 \\ 0,1788 \\ 0,1723 \\ 0,0395 \\ 0,4700 \\ 0,0319 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,30510 \\ 0,27591 \\ 0,41899 \end{bmatrix}$$

↓

Matriz de preferencias $m \times n$
 m : número de alternativas
 n : número de criterios de selección

↓

Vector de preferencias
criterios

↓

Vector de preferencias
alternativas

Fig. 3. Ejemplo de solución al proceso de análisis jerárquico.

F. Principios de diseño de montajes de mecanizado

El diseño de los montajes de mecanizado juega un papel crucial en la manufactura de piezas mecánicas, especialmente en el ámbito del mecanizado, donde la precisión y la estabilidad son fundamentales para obtener resultados óptimos. Los montajes de mecanizado son dispositivos diseñados para sostener y posicionar las piezas de trabajo de manera precisa y segura durante las operaciones de mecanizado. Para lograr un diseño efectivo de los montajes de mecanizado, es esencial considerar cuidadosamente dos aspectos principales: la localización y el clamping.

La localización se refiere al posicionamiento preciso de la pieza de trabajo en relación con el sistema de coordenadas de la máquina herramienta. Este proceso implica determinar la posición y la orientación correctas de la pieza para garantizar que las operaciones de mecanizado se realicen con la máxima precisión y consistencia. Por otro lado, el clamping se refiere al método utilizado para sujetar la pieza de trabajo en su posición durante el mecanizado. Esto puede incluir el uso de

dispositivos de sujeción mecánicos, como mordazas, tornillos o sistemas hidráulicos, que aplican fuerzas de sujeción adecuadas para evitar movimientos no deseados de la pieza durante el proceso.

El diseño de montajes de mecanizado implica una serie de pasos, desde la identificación de los requisitos de sujeción y posicionamiento de la pieza hasta la selección de los componentes y materiales adecuados para el montaje de mecanizado. Las herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) son fundamentales para modelar y simular el comportamiento de los montajes de mecanizado antes de su fabricación, lo que permite identificar y corregir posibles problemas de diseño antes de que ocurran. Además, es importante considerar aspectos ergonómicos y de seguridad durante el diseño de los montajes de mecanizado, asegurando que sea fácil de usar y cumpla con las normativas de seguridad pertinentes.

Varios autores han contribuido significativamente al campo del diseño de montajes de mecanizado y han proporcionado valiosos aportes sobre los principios y prácticas fundamentales. Autores como [14] han destacado la importancia de optimizar la geometría y la disposición de los montajes de mecanizado para garantizar una sujeción adecuada de la pieza de trabajo. Asimismo, han abordado en detalle los aspectos de diseño y fabricación de montajes de mecanizados, enfatizando la importancia de considerar la tolerancia y la rigidez de los montajes de mecanizado para garantizar la precisión y la estabilidad durante el mecanizado.

En autores como [15], se puede encontrar la exploración de una variedad de técnicas y enfoques para el diseño de montajes de mecanizados, incluyendo la aplicación de herramientas de simulación y optimización para mejorar el rendimiento de los montajes de mecanizado.

IV. METODOLOGÍA

A. Diagnóstico de productividad de procesos de fundición en molde de arena y maquinado convencional

La observación, análisis y mejoramiento de procesos son acciones de ocurrencia constante en cualquier empresa que requiera controlar la calidad de los productos y servicios que ofrece. En particular, en la empresa Fundalco Zona Franca S.A.S., la calidad de los conectores eléctricos fundidos y mecanizados es fundamental, ya que la provisión de piezas que se ajusten a las

necesidades del cliente aporta una ventaja competitiva frente a otros fabricantes. Adicionalmente, la detección temprana de defectos reduce los costos asociados a reprocesamientos. En este sentido, la metodología *Six Sigma* ha sido ampliamente empleada en el mejoramiento de procesos industriales dado su enfoque en el análisis de la variabilidad, el cual proporciona un excelente punto de partida en la consecución de especificaciones de calidad consistentes.

El método de mejoramiento de procesos DMAIC (Definición, Mejoramiento, Análisis, Mejoramiento y Control, por sus siglas en inglés), que se enmarca en la metodología *Lean Six Sigma*, fue usado como punto de partida estructural en el diagnóstico de procesos de fundición en molde de arena y mecanizado convencional.

1. Definiciones

El método DMAIC requiere, en primer lugar, la caracterización de los requerimientos y problemas del proceso. Para este apartado, se definieron las operaciones de conformado sujeto de este estudio: fundición en arena y maquinado convencional. Los parámetros y características de estas operaciones se describen a continuación.

Fundición en molde de arena:

En este proceso, que puede verse en la Fig. 4, el operario lleva a cabo la fabricación del molde en arena verde que permitirá la conformación de la pieza, para ello se usan modelos para la conformación de las cavidades mediante el vertimiento y compactación de arena en cajas de moldeo. La fundición en molde de arena es un proceso que conlleva unos tiempos inherentemente largos y es un tipo de proceso que no es apto para grandes volúmenes de producción [16], ya que la formación del molde debe realizarse nuevamente para cada pieza que deba conformarse.



Fig. 4. *Proceso de moldeo en arena verde.*

Para el registro de tiempos de esta operación se consideraron 3 tipos de piezas distintas, de las cuales se conoce el tiempo promedio de formación de molde, de acuerdo con registros de la empresa. Las piezas elegidas se muestran en la Fig. 5.

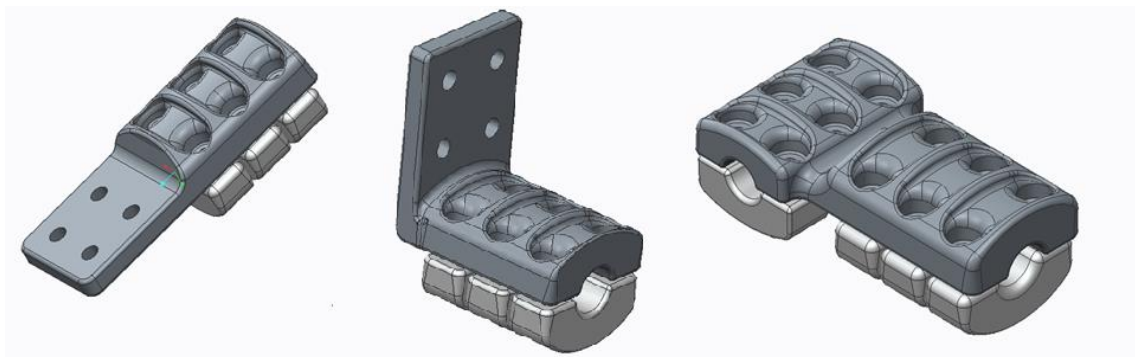


Fig. 5. Piezas para medición del proceso de moldeo en arena.

Maquinado convencional:

Luego de la obtención de las piezas fundidas, a los conectores eléctricos les son realizados los siguientes procesos de mecanizado, los cuales varían según el tipo de conector que se tiene:

- Perforado de platinas: Taladrado realizado con fresadora. Consiste en la realización de perforaciones en las platinas de los conectores. En la Fig. 6 se muestra la operación en cuestión, que se requiere para la conexión de otros sistemas eléctricos al conector por medio de tornillos.



Fig. 6. Proceso de perforado de platinas.

- Planeado de platinas: Fresado frontal. Se le da acabado superficial a las platinas de los conectores, como puede verse en la Fig. 7., ya que la superficie que se mecaniza debe tener un acabado de 1,6 micras para facilitar la conducción eléctrica.



Fig. 7. Proceso de planeado de platinas.

- Perforado para pisadores: Taladrado realizado con fresadora. Las perforaciones realizadas en esta operación, mostradas en la Fig. 8 permiten la sujeción de los pisadores del conector eléctrico, elementos que se emplean en la fijación de los cables, pines o tubos como elementos de conducción.



Fig. 8. Proceso de perforado para pisadores.

- Mecanizado para radios: Ranurado circular con fresadora. En esta operación se obtiene la sección del conector eléctrico sobre la que se apoya el elemento conductor, la cual es semicircular con un diámetro equivalente al del elemento que va a unirse a ella. según especificación del cliente. La Fig. 9 muestra este proceso.



Fig. 9. Proceso de mecanizado para radios.

Estas operaciones se incluyen en el registro de tiempos. Para cada una de ellas se eligió una cantidad de piezas fija, procurando realizar al menos 5 mediciones con cada tipo de pieza.

2. Medición de tiempos de operaciones

Uno de los propósitos del presente diagnóstico es la observación de los tiempos actuales de mecanizado para los subprocesos ya mencionados. La toma de tiempos de operaciones implica un proceso de muestreo, el cual lleva asociado un error de muestreo que es inversamente proporcional al tamaño de la muestra. Entonces, en el análisis de tiempos se precisa un tamaño de muestra adecuado. Para realizar esta estimación existen varios métodos, y, como se puede ver en [4], uno de los más empleados es el método Maytac, que implica la toma de un número mínimo de lecturas de tiempos a partir de las cuales se calcula el tamaño de muestra necesario para obtener una precisión y un nivel de confianza predeterminados; en este caso, se determinó que la precisión fuese del 5% y el nivel de confianza del 95%. Habiendo establecido esto, realizó el cálculo de $R/\bar{\chi}$ según se ha visto en la ecuación 3, a partir del cual se entra en la Fig. 1 para leer el número de observaciones necesarias. Otra forma de estimar este tamaño de muestra, como menciona [6], es con el uso de la ecuación 4. Ambos métodos fueron empleados en esta estimación, y requirieron la misma muestra inicial de mediciones.

La elección del tamaño de muestra para la medición de los tiempos de las operaciones mostró que no era necesaria realizar una segunda toma de tiempos. Los tiempos se midieron desde el inicio de la operación hasta el momento en que el operario cambia de pieza; se registró, entonces, el tiempo observado promedio, es decir, la media de los tiempos para cada tipo de pieza medida. La Fig. 10 muestra el formato con el cual se realizaron las mediciones de tiempo anteriormente nombradas.

Pieza	Operario	Tiempo (s)

Fig. 10. Formato para el registro de tiempos de mecanizado.

3. *Análisis de varianza*

De acuerdo con [17], el análisis de varianza (ANOVA) es la prueba estadística adecuada para realizar una comparación entre varios grupos. En este caso se empleó para plantear una serie de mediciones de mecanizado de radios en los conectores eléctricos, y determinar la significancia estadística de variables que intervienen en la línea de producción. Estas mediciones consistieron en el registro de los tiempos de mecanizado de 2 piezas diferentes (cable M45 y Tubo M129). Para cada una de estas piezas se registró el tiempo de mecanizado total, el operario y el tipo de montaje de mecanizado empleado. Para esta operación se identificaron 2 montajes de mecanizado diferentes, que se usan dependiendo de la disponibilidad de fresas del diámetro especificado por el cliente, en cuyo caso se usa la prensa de la fresadora (esto puede verse en la Fig. 11). Este primer montaje solo se usó en la pieza Cable M45, ya que para el mecanizado del Tubo M129 se usa como herramienta de corte una barra con un buril de acero rápido, que se muestra en la Figura 12, la cual también se emplea en la pieza Cable M45 cuando el radio a mecanizar es demasiado grande para las fresas disponibles.



Fig. 11. Montaje para mecanizado de radio con fresa redonda.

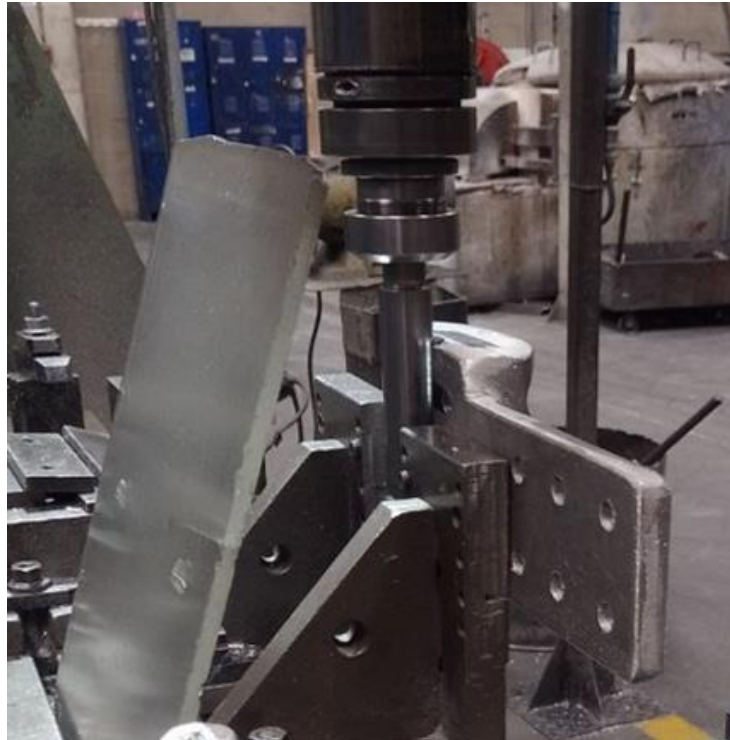


Figura 12. Montaje para mecanizado de radio con buril y dispositivo de sujeción.

En el análisis de varianza, la variable dependiente es el tiempo total de mecanizado de los conectores, y las variables independientes, para el caso de la pieza Cable M61, son el tipo de montaje y el operario, en tanto que para la pieza Tubo M129 solo varía el operario; ambas variables cuentan con dos niveles dentro de ellas, pues se tienen 2 tipos de montaje y 2 operarios. En la Fig. 13 se muestra el formato de registro de los datos de este análisis.

Pieza	Operario	Tiempo (s)	Dispositivo de montaje

Fig. 13. Formato de registro para análisis de varianza.

4. Métricas de control: seis sigma

Según las medidas de tiempo tomadas para los procesos en cuestión, y, respecto a lo expuesto en la sección III.A, se determinaron los valores de Nivel sigma y de capacidad del proceso, haciendo

una distinción según el tipo de pieza en cuestión en cada proceso. Adicionalmente, el valor de tolerancia correspondiente, para el límite superior de especificación, fue de 21% de la mediana, y, para el límite inferior, de 26% de la mediana, teniendo en cuenta que, al igual que en la sección IV.A.3, con respecto a los valores dados para los promedios cotizados, se está determinando qué tan bien cumplen los procesos sobre las especificaciones establecidas. Con estos dos valores, se dispuso a determinar qué procesos son los más aptos para ser intervenidos.

B. Diseño de montajes de mecanizado

Se buscó llegar a soluciones de diseño que implementen mejoras en la sujeción de los conectores eléctricos en las máquinas herramienta durante las operaciones de mecanizado. Para ello, se revisaron los métodos de sujeción empleados históricamente en la producción de conectores eléctricos. Además, se observó la operación de perforado para ensamble de pisadores, que es una operación clave dentro del mecanizado de los conectores eléctricos, puesto que suele ser la primera que se realiza, dado que las perforaciones obtenidas son el punto de partida para la fijación de los conectores durante las siguientes operaciones de mecanizado (los agujeros son empleados para atornillar las piezas a la mesa de la fresadora). También fue posible notar que en la operación de perforado en platina la medición y marcación que debe realizar el operario es una labor repetitiva que puede disminuirse en frecuencia si se implementa un montaje de mecanizado que facilite definir la ubicación de las perforaciones. No obstante, la fabricación de un montaje que sirva para estos procesos, si bien podría ayudar a mejorar la celeridad del perforado, es también una forma de intervención que no puede afirmarse que ayude a mejorar los tiempos, pues no han sido abordadas adecuadamente otras causas de atrasos como el nivel de capacitación de los operarios o la proporción de tiempos muertos. De acuerdo con esto, se determinó enfocar el diseño de los montajes de mecanizado hacia la obtención de sistemas que permitan la sujeción de piezas de mayor tamaño, pues actualmente los conectores que no pueden ser sujetados con la prensa presentan dificultades de montaje.

1. Consideraciones generales

La correcta aplicación de los principios de localización de montajes de mecanizado requiere la identificación de las superficies de las piezas que cuenten con la tolerancia dimensional suficiente

para fungir como puntos de referencia. En piezas obtenidas mediante fundición en molde de arena no es posible definir totalmente estas superficies, pues la variación que presentan las mismas es propia del proceso, no obstante, en los conectores eléctricos fabricados por Fundalco pueden definirse los planos de referencia mostrados en la Fig. 14.

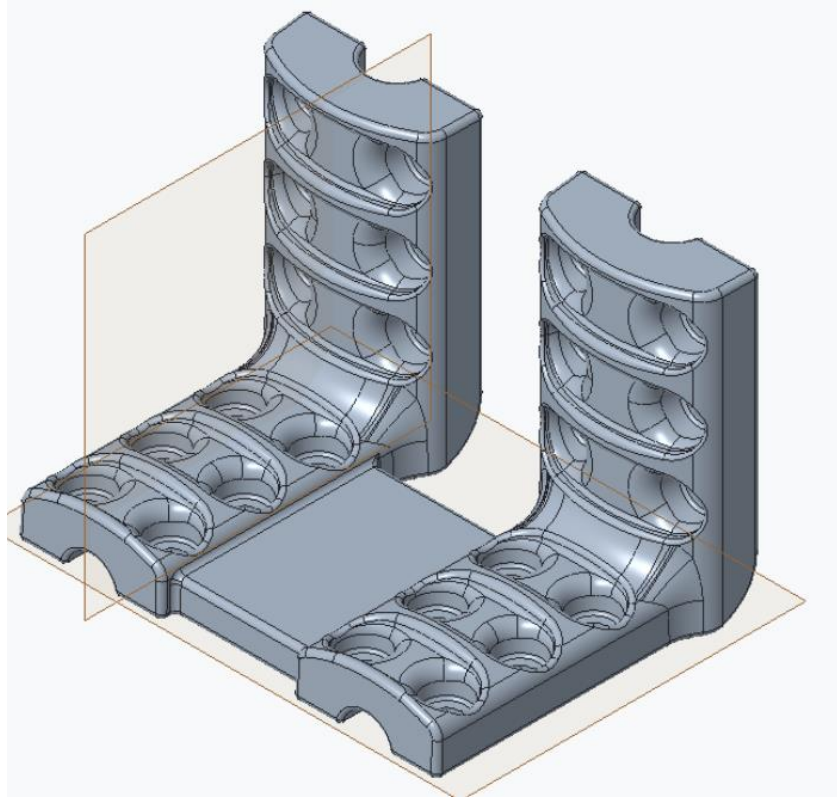


Fig. 14. Planos de referencia en un conector genérico.

El primer plano de referencia es el plano que pasa por la superficie mecanizada para alojar un cable, tubo o pin en el conector. El segundo es un plano ortogonal al primero que define el respaldo plano del conector. Se hace necesario, además, acotar el tipo de conectores para los cuales se realizó diseño de los montajes. La empresa ofrece un amplio catálogo de estos productos, con geometrías dispares entre sí, así que para simplificar el diseño se consideraron únicamente conectores que contaran con dos lados adyacentes libres (es decir, que no estén unidos a otro elemento de conexión en dichos lados), como ilustra la Fig. 15.

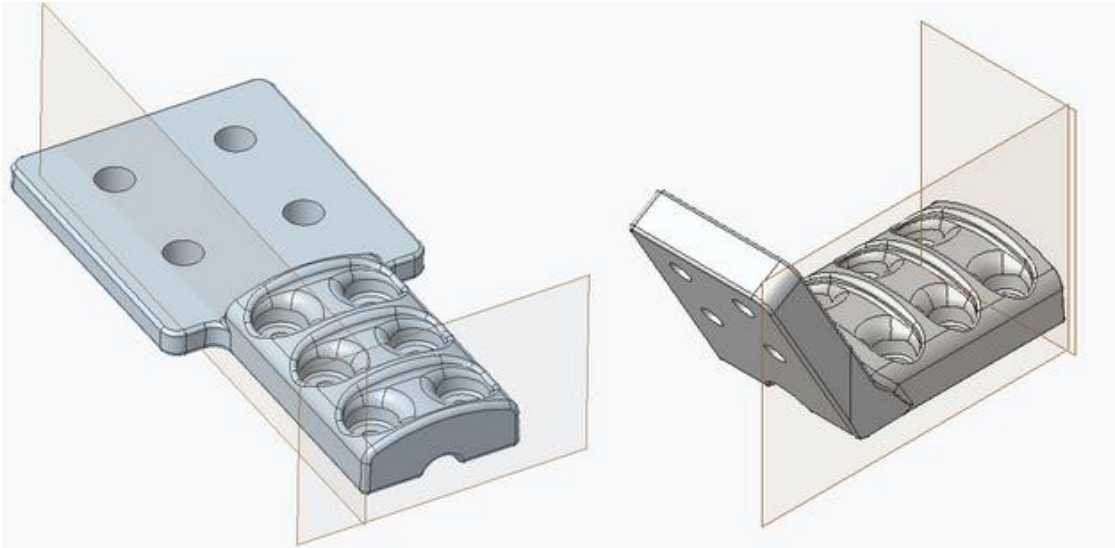


Fig. 15. Lados adyacentes libres en un conector eléctrico.

Los principios de localización de piezas en montajes de mecanizado nos dicen que es necesario restringir 6 grados de libertad para definir correctamente la posición de una pieza. En el diseño de los dos montajes presentes en este informe se empleó el plano de simetría de la ranura para el cable del conector como punto de partida para la propuesta de localizadores que permitieran situar la pieza de trabajo en cierta posición relativa a dicho plano.

En cuanto a los elementos de sujeción, se realizaron comprobaciones de la fuerza lograda en dichos elementos para asegurar la fijación de las piezas que se van a mecanizar.

C. Evaluación de la conveniencia de inclusión del taladro multihusillos en la línea de producción

La empresa Fundalco Zona Franca S.A.S. cuenta con un taladro multihusillos que sirve para realizar múltiples perforaciones en una pieza de manera simultánea. Se pretende que esta máquina sea empleada en el perforado de conectores, operación que actualmente se realiza en fresadora. Con el fin de explorar la posibilidad de introducción del multihusillos en la línea de producción, se realizó una evaluación que hace uso del proceso de análisis jerárquico (AHP, *Analytical Hierarchy Process*) para determinar la importancia relativa de una serie de criterios de comparación definidos previamente. Esta valoración se llevó a cabo entre la máquina

multihusillos y la fresadora, estableciendo una escala de importancia comparativa con la cual evaluar la toma de decisión (la posibilidad de inclusión de la máquina en la línea de operación).

Como primer paso en el proceso de análisis jerárquico, se modeló el problema abordado en forma de jerarquía. La Fig. 16 muestra una representación esquemática de esta modelación, en la que se observa la meta del proceso, la cual es evaluar la conveniencia de la inclusión del taladro en la línea de producción, así como también los criterios de comparación definidos, que son la eficiencia de operación y los costos asociados. Estos criterios orientan este estudio hacia dos aspectos clave: el ahorro de tiempo debido al uso del taladro multihusillos, y los costos asociados a las reparaciones necesarias para implementar su uso.

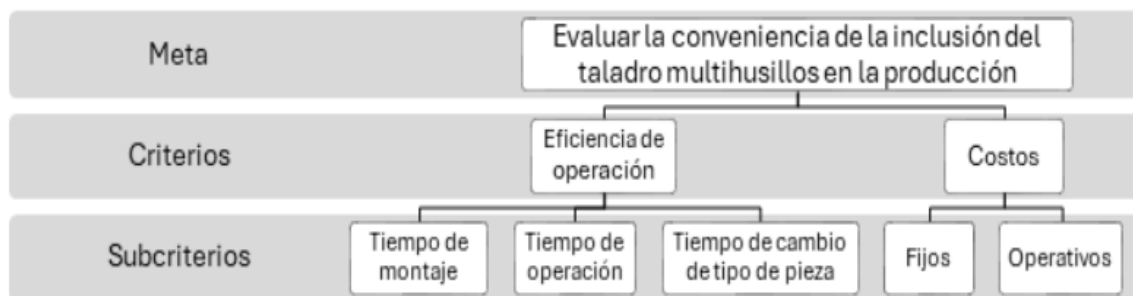


Fig. 16. Meta, criterios y subcriterios del proceso de análisis jerárquico.

1. Eficiencia de operación

Con el fin de estimar la eficiencia operativa se consideraron tres aspectos encaminados a dar una medida del ahorro de tiempos esperado con la incorporación del taladro multihusillos, los cuales son el tiempo de montaje y el tiempo de operación. Una de las operaciones de mecanizado más frecuentes en el caso de los conectores eléctricos es el perforado y la máquina herramienta disponible para su realización es la fresadora. Ahora bien, el taladro multihusillos está equipado para la realización de hasta 4 perforaciones de manera simultánea, mientras que en la fresadora se realizan individualmente. El perforado es necesario en todos los conectores que requieren el ensamble de pisadores por medio de tornillos, además, los conectores que llevan platina suelen requerir perforaciones en esta. Dado que la configuración actual del taladro permite la adecuación de 4 husillos, se consideró pertinente realizar la comparativa empleando únicamente la operación de perforado en platina, y fijando el número de perforaciones consideradas en 4, como puede

verse en la Fig. 17. En lo que sigue se analizaron las condiciones y tiempos de operación en la máquina tradicional empleada; en la realización de esta comparativa se empleó el registro de tiempos de perforado en fresadora suministrado por la empresa, mientras que el rendimiento del taladro fue hallado teniendo en cuenta sus condiciones operativas teóricas.



Fig. 17. Operación de perforado de platina. 4 perforaciones de $\text{Ø}18$ mm y espesor de 20 mm.

1. **Tiempo de montaje:** Hace referencia al tiempo que tarda el operario en montar una nueva pieza para realizar las perforaciones.
2. **Tiempo de operación:** Tiempo total de realización del perforado. En la fresadora, se posee un registro de los tiempos de taladrado, en el cual se incluye el tiempo que se tarda en realizar 4 perforaciones. En cuanto al taladro, existen diferentes formas de estimar la duración del perforado; en este planteamiento se realizó una aproximación a la operación real, teniendo la capacidad de esta máquina herramienta y las características del perforado.

2. Costos

Aunque la perspectiva de realizar 4 agujeros en una sola operación da una idea de la agilización de los tiempos que puede presentarse con la adición del taladro multihusillos en la línea de producción, este no es el único factor que se observó en el presente análisis. Dado que la máquina no se encuentra totalmente operativa, se identificaron las piezas faltantes para lograr su puesta a punto y se estimó el costo de reemplazo de estas. Similarmente, la comparativa entre las máquinas implica considerar los costos en que se incurre durante la operación de estas.

1. **Costos de reparación:** Se definieron como costos de reparación todos aquellos en que se incurriría para poner en funcionamiento la máquina multihusillos, obtenidos según las piezas faltantes, para lo cual se hizo la inspección visual de la máquina y mediciones de los componentes a intervenir.

2. **Costos operativos:** Se establecieron los gastos de la operación de la fresadora y el taladro, tales como mano de obra, consumo de energía y mantenimiento. Se estimó que los costos asociados a consumibles y materia prima no son un factor diferenciador, dado que los parámetros de corte y las piezas son las mismas.

3. Definición de prioridades locales

El proceso de análisis jerárquico involucra la construcción de una matriz conteniendo los diferentes criterios de la comparación, y el nivel de intensidad de estos que, como se ha visto, se define empleando la escala Saaty, definiendo las prioridades según juicio del evaluador. Esto se realiza mediante comparación directa entre pares de criterios. Ahora bien, dado que se tienen 2 niveles de jerarquía, se realizó la ponderación de cada subcriterio de comparación de manera separada, definiendo una matriz asociada a la comparativa.

En primer lugar, se evaluaron la eficiencia de operación y el costo, estableciéndose que la primera tiene una importancia mayor que la segunda. Ahora, tanto para la eficiencia de operación como para los costos se crearon las matrices de prioridad que incluyan los subcriterios ya nombrados. En el caso de la eficiencia operativa, dado que el tiempo total de mecanizado es la variable que se ve modificada sustancialmente en cada alternativa, su importancia fue definida como muy fuerte con respecto al tiempo de montaje. Para el caso de los costos, se definió que el costo de reparación tenga una importancia moderada respecto al costo operativo, ya que este último es similar para ambas máquinas. La Fig. 18 muestra las matrices de prioridades locales obtenidas de acuerdo con lo expresado en la ecuación 5, usando la tabla de Saaty (Tabla I).

Inclusión del taladro	Eficiencia de operación	Costos
Eficiencia de operación	1	5
Costos	0,2	1

Eficiencia de operación	Tiempo de montaje	Tiempo de operación
Tiempo de montaje	1,00	0,14
Tiempo de operación	7,00	1,00

Costos	Costos reparación	Costos operativos
Costos reparación	1,00	3,00
Costos operativos	0,33	1,00

Fig. 18. Matrices de prioridades locales para criterios y subcriterios de comparación.

4. Cálculo de prioridades globales

Se emplearon las ecuaciones 8 y 9 para encontrar las prioridades globales, a partir de los pesos relativos de cada subcriterio y la matriz normalizada. La Fig. 19. muestra las prioridades globales encontradas para cada subcriterio de comparación.

	Prioridad	Peso relativo
Tiempo de montaje	0,104167	0,125
Tiempo de operación	0,729167	0,875
Costos reparación	0,125	0,75
Costos operativos	0,041667	0,25
Total	1,0000	

Fig. 19. Prioridades globales para cada subcriterio de comparación.

5. Comparación de tiempos de montaje

El tiempo de montaje de las piezas en la fresadora para las operaciones de perforado es conocido, pues se cuenta con un registro de este tiempo en los archivos de la empresa. En cuanto al tiempo

de montaje en el taladro multihusillos, se encontró un fabricante de este tipo de máquinas herramienta que reporta un tiempo de montaje y desmontaje de 12 segundos por pieza [18].

Es posible definir el peso de cada uno de los valores de la escala Saaty, obteniéndose los pesos de cada valoración en porcentaje con respecto al total. Esto se presenta en la Tabla III.

Tabla III

Porcentajes correspondientes a cada intensidad de importancia en la escala Saaty.

Intensidad de importancia	Porcentaje
1	50%
3	75%
5	83,333%
7	87,5%
9	90%

Luego, teniendo estos valores como medida de referencia, se realizó la asignación de prioridades locales para el tiempo de montaje según los porcentajes encontrados. La Fig. 20 presenta la matriz de comparación encontrada siguiendo este procedimiento.

	Fresadora (s)	Taladro (s)	% Fresadora	% Taladro
Tiempo de montaje	70	48	41%	59%

Tiempo de montaje	Fresadora	Taladro
Fresadora	1	1
Taladro	1	1

Fig. 20. Consideraciones y matriz de comparación para la variable tiempo de montaje.

6. Comparación de tiempos de operación

Nuevamente, el tiempo total que tarda la realización de 4 perforaciones con la fresadora es conocido, mientras que el tiempo de la operación de taladrado en la máquina-herramienta multihusillos se encontró con la expresión:

$$Tc = \frac{I_d \cdot i}{n \cdot f_r} \quad (13)$$

Donde $I_d = 20$ mm; $i = 1$

Para ello, se tuvo en cuenta que el espesor de platina I_d considerado en esta comparación es de 20 mm, el número de repeticiones necesario para realizar las 4 perforaciones i es igual a 1. Por otro lado, los parámetros de taladrado $n = 442$ rpm y $f_r = 0,25$ mm/rev se obtuvieron por medio de las tablas presentes en la Fig. 21. (velocidades de corte en el proceso de taladrado), la Fig. 22 (avances de taladro para brocas helicoidales en mm/rev) y la ecuación 14.

Material	Velocidad			
	Para trabajos corrientes		Para producción con buena refrigeración, con brocas de acero rápido	
Nota: dentro del mismo tipo de material puede variar la dureza. se elegirán las velocidades mínimas para la máxima dureza.	Con brocas de acero al carbono	Con brocas de acero rápido		
	Fundición	8 a 12	15 a 20	30 a 45
	Fundición dura	6 a 8	10 a 15	20 a 30
	Fundición maleable	6 a 12	10 a 15	25 a 27
	Acero dulce	10 a 12	20 a 25	25 a 35
	Acero semiduro	8 a 10	15 a 20	20 a 25
	Acero duro	6 a 8	12 a 15	15 a 20
	Bronce, latón y aluminio ordinarios	15 a 20	25 a 40	60 a 90
	Acero moldeado	6 a 10	10 a 15	10 a 20

Fig. 21. Velocidades de corte para operaciones de taladrado. Recuperado de [19].

Material	Broca	Diámetro en mm				
		1 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 25	25 a 40
Hierro, acero, fundición maleable	Acero al carbono	0.05 a 0.1	0.1	0.1	0.15	0.2
	Acero rápido	0.05 a 0.1	0.1 a 0.15	0.15 a 0.2	0.2 a 0.25	0.25 a 0.30
Fundición, bronce, latón y aluminio	Acero al carbono	0.05 a 0.1	0.125	0.175	0.2	0.225
	Acero rápido	0.05 a 0.15	0.15 a 0.2	0.2 a 0.25	0.25 a 0.3	0.3 a 0.35

Fig. 22. Avances de taladro para brocas helicoidales en mm/rev. Recuperado de [19].

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{n \cdot D} \quad (14)$$

Entonces, luego del cálculo de los tiempos de operación para cada máquina, se determina el porcentaje que da cuenta de cuál es el proceso que se prefiere en este subcriterio, nuevamente empleando la Tabla III. En la Fig. 23. pueden verse los porcentajes referidos y la matriz de comparación del subcriterio.

	Fresadora (s)	Taladro (s)	% Fresadora	% Taladro
Tiempo de operación	192	10,91	5%	95%

Tiempo de operación	Fresadora	Taladro
Fresadora	1	1/9
Taladro	9	1

Fig. 23. Consideraciones y matriz de comparación para la variable tiempo de operación.

7. Comparación de costo de reparación

Este subcriterio es sólo aplicable al taladro multihusillos, en tanto que a la fresadora se le da un valor simbólico de 1. Por otro lado, en la inspección visual del taladro (Fig. 24.) se encontró que los engranajes de salida a cada husillo están en buen estado, pero que la junta universal (cuya representación esquemática en este tipo de taladros se muestra en la Fig. 25).

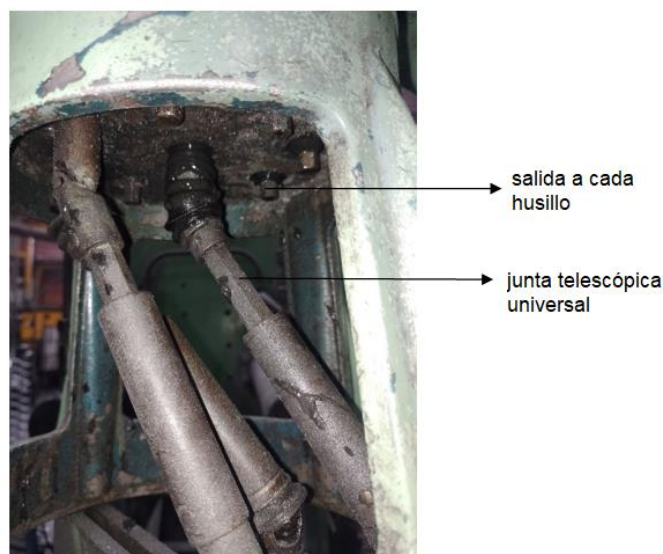


Fig. 24. Junta telescópica universal.

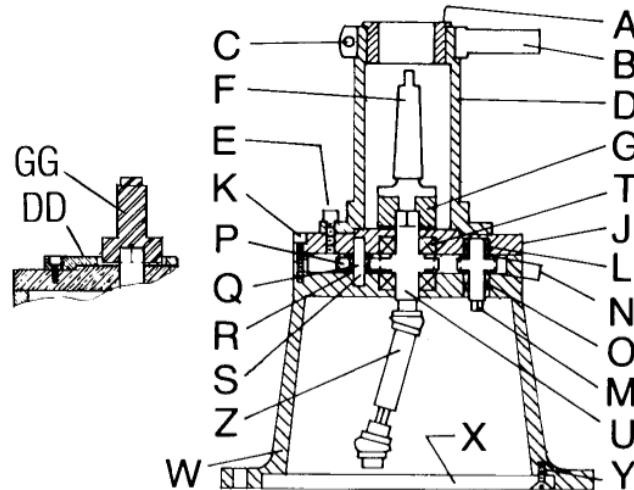


Fig. 25. Representación esquemática de la junta universal. Recuperado de [20].

La cotización de la junta telescópica se realizó buscando satisfacer los siguientes requerimientos observados durante la inspección visual:

1. El agujero de unión en un extremo debe ser hexagonal de lado $l = 7\text{mm}$.
2. La unión debe tener una longitud L_{min}/L_{max} que cubra el rango 250/340 mm.
3. La junta debe permitir una velocidad de accionamiento de 1000 rpm.

Luego de definir todo esto, se promediaron los precios consultados de [21] y [22].

Otros elementos que deben ser tenidos en cuenta en la estimación de gastos de reparación son los acoples y tuercas para el montaje de las brocas en el multihusillos. En la inspección visual se identificó la falta del acople de unión hacia uno de los husillos de salida, así como la ausencia de 3 tuercas de unión para algunos de los husillos (Fig. 26). Se realizó la búsqueda de componentes comerciales con la cual se estimó el precio del acople ER32-ER32 [23] y las tuercas para boquilla ER32 UM [24].

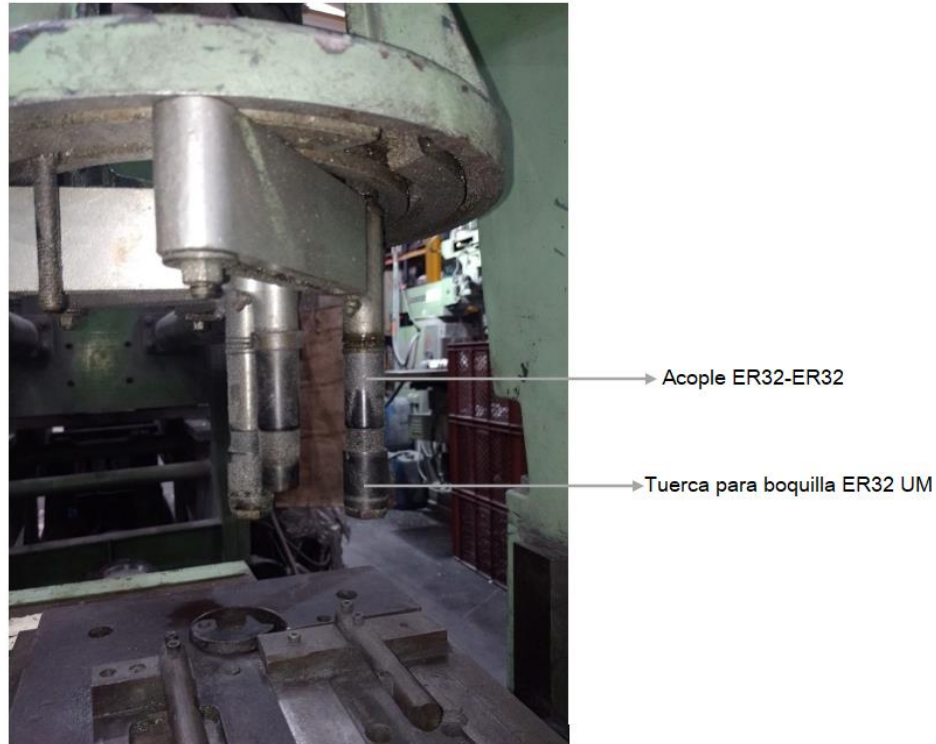


Fig. 26. Elementos de acople faltantes.

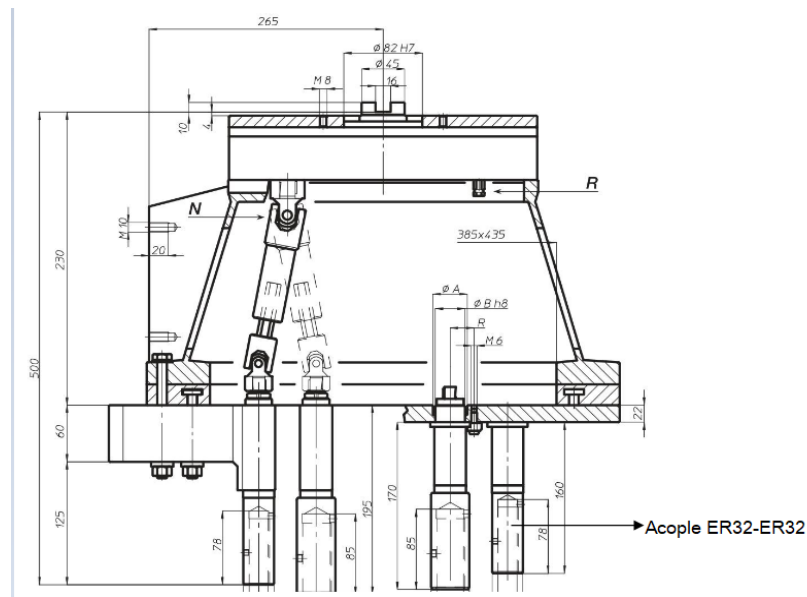


Fig. 27. Representación esquemática de los elementos de acople faltantes. Recuperado de [25].

Luego de realizarse la estimación del costo de reparación de la máquina multihusillos, fue evidente que en este subcriterio la preferencia por la fresadora sería muy importante, ya que no requiere intervenciones para su funcionamiento. En la Fig. 28. se muestra la estimación del costo

de reparación, donde se incluyeron, además de las piezas faltantes previamente mencionadas, el costo de horas-hombre, y un 10% del total destinado a gastos misceláneos. Finalmente, se presenta la matriz de comparación respectiva.

	Costo (COP)
Junta telescópica universal	\$822.891,00
Acople ER32-ER32	\$145.800,00
Tuerca para boquilla ER32 UM (Cant: 2)	\$381.810,00
Horas-Hombre (35 horas)	\$189.581,88
Misceláneos	\$154.008,29
Total	\$1.694.091,16

	Fresadora	Taladro (COP)	% Fresadora	% Taladro
Costos reparación	\$1,00	\$1.694.091,16	100%	0%

Tiempo de operación	Fresadora	Taladro
Fresadora	1	9
Taladro	1/9	1

Fig. 28. Costos de reparación estimados y matriz de comparación para la variable costo de reparación.

8. Comparación de costos operativos

Los costos operativos para ambas máquinas fueron estimados considerando el consumo eléctrico anual, los costos de mantenimiento y la mano de obra que se requiere para la operación de las máquinas-herramienta. Para el costo de consumo eléctrico se observó la potencia de los motores de cada máquina. La Fig. 29 muestra la placa del motor de la fresadora, cuya potencia puede calcularse como $P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos(\phi)$, donde $V = 230 \text{ V}$, $I = 10,4 \text{ A}$, y el ángulo de desfase ϕ se asume como 10. En cuanto al taladro multihusillos, la Fig. 30. muestra que su potencia va de 1,8 a 2,5 kW.



Fig. 29. Placa del motor de la fresadora.



Fig. 30. Placa del motor del taladro multihusillos.

El cálculo del consumo anual, teniendo la potencia del motor, se hizo asumiendo una utilización de ambas máquinas de 12 h/día, que es un estimado basado en el porcentaje de ocupación de turnos en la fabricación de conectores eléctricos, además se consultó la tarifa del kWh para el sector industrial, siendo este de \$1.061,05 COP [26]. Entonces, el consumo eléctrico anual se encontró así:

$$\text{Consumo} = \text{Potencia} \times \frac{\text{horas}}{\text{año}} \times \text{tarifa kWh} \quad (15)$$

Posteriormente, se calculó el costo de mantenimiento anual como un 3% del total del costo de una máquina parecida. Para la fresadora, se consultó un precio de \$44.921.875 COP [27], y para el taladro multihusillos de \$19.613.100 COP [28]. En cuanto a la mano de obra, se estimó un ahorro del 40% en cuanto a horas de operación de la máquina cuando se emplea el taladro multihusillos. En la fresadora se consideraron 12 h/día. El costo de la hora-hombre se consultó como \$5416,625 COP [29].

Finalmente, en la Fig. 31. se encuentra el resumen de los costos operativos encontrados, donde se manifiesta que el ahorro de tiempo en horas-operario que tiene lugar con el empleo del taladro también tiene un impacto en los costos anuales de operación. Por ello, la matriz de comparación construida le otorga un nivel de preferencia moderado a esta máquina-herramienta, en contraposición a la fresadora.

	Fresadora	Taladro
Potencia Motor (kW)	4,08	2,5
Consumo (kWh-día)	48,96	30
Tarifa kWh (COP)	\$1.061,05	\$1.061,05
Costo consumo anual (COP)	\$18.701.642,88	\$11.459.340,00
Costo estimado máquina (COP)	\$44.921.875,00	\$19.613.100,00
Costo de mantenimiento (COP)	\$1.347.656,25	\$588.393,00
Mano de obra (COP)	\$23.399.820,00	\$14.039.892,00
Total (COP)	\$43.449.119,13	\$26.087.625,00

	Fresadora	Taladro (COP)	% Fresadora	% Taladro
Costos operativos	\$43.449.119,13	\$26.087.625,00	38%	62%

Tiempo de operación	Fresadora	Taladro
Fresadora	1	1/3
Taladro	3	1

Fig. 31. Costos operativos estimados y matriz de comparación para la variable costos operativos.

9. Evaluación de alternativas

El procedimiento para la evaluación de las alternativas planteadas requiere el cómputo de las diferentes alternativas, para la obtención del vector que da cuenta de la opción más adecuada. Como se ha mencionado, las matrices de preferencias definidas en cada subcriterio son

introducidas en el modelo de cálculo descrito por la Fig. 3.. Para este desarrollo se implementó un código en Python que da como variable de salida los valores del vector de evaluación de las alternativas, el cual contiene la prioridad de cada opción evaluada.

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Registro de tiempos de operaciones de mecanizado

1. Perforado para platinas

Se calculó, usando las ecuaciones 3 y 4, que el tamaño de muestra es de 4, 3 y 4 para cada una de las piezas medidas. Como el número de mediciones realizadas es mayor a este tamaño de muestra, no es necesario realizar más registros. La Fig. 32 muestra el registro de tiempos encontrados para 4 perforaciones en platina, mientras que en la Fig. 33 se encuentran los tiempos para 6 perforaciones, y en la Fig. 34 están los tiempos registrados para 8 perforaciones en platina.

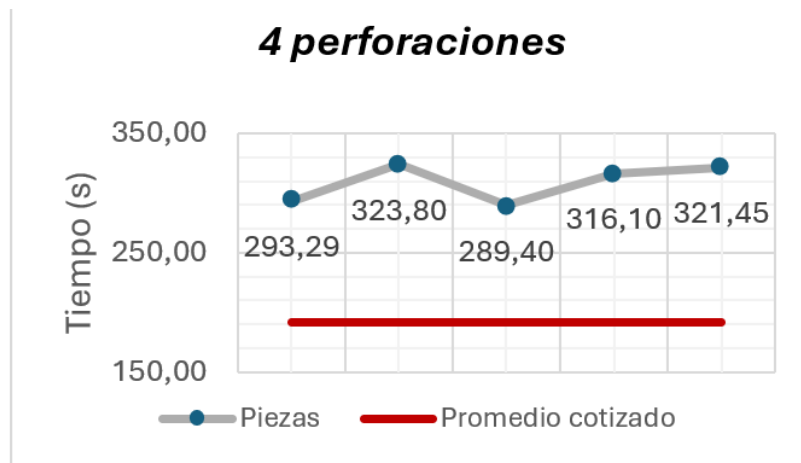


Fig. 32. Tiempos registrados para la realización de 4 perforaciones en platina.

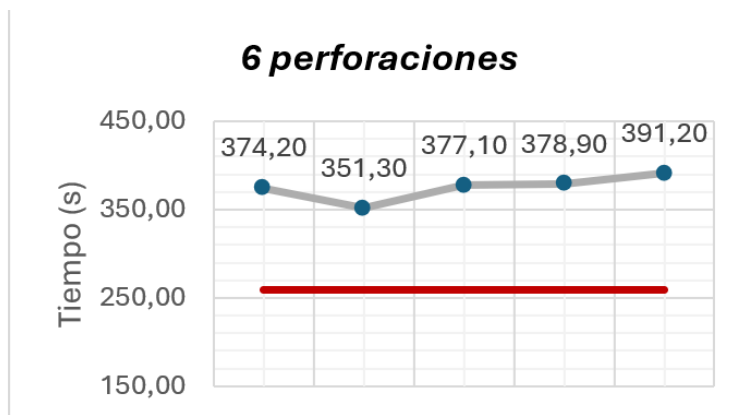
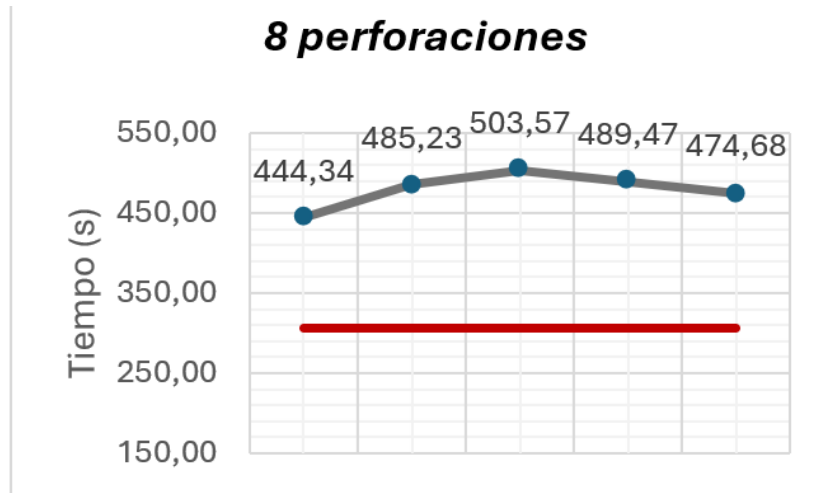


Fig. 33. Tiempos registrados para la realización de 6 perforaciones en platina.

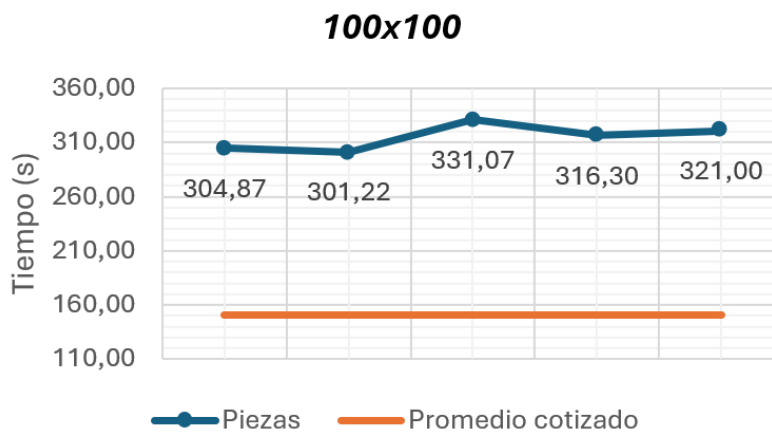


Promedio cotizado: 306 s - Promedio actual: 479,46 s

Fig. 34. Tiempos registrados para la realización de 8 perforaciones en platina.

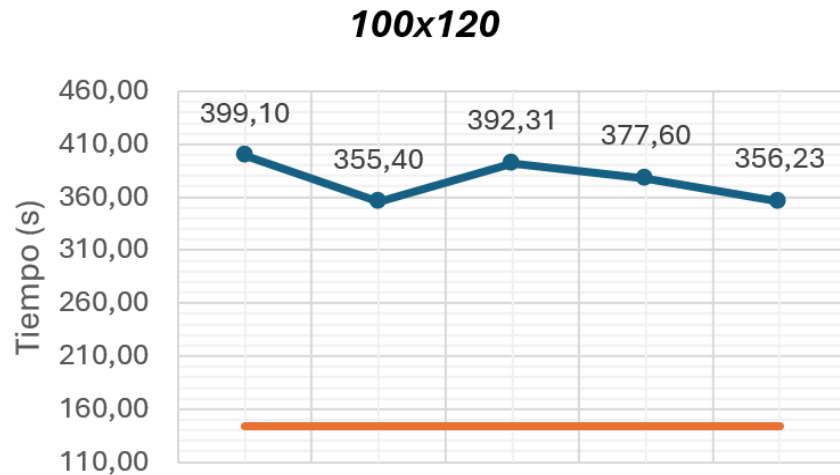
2. Planeado para platinas

Los tamaños de muestra encontrados fueron de 3, 4, 3 y 4 mediciones respectivamente para el planeado de platina 100x100, 100x120, 130x130 y 200x100. Los tiempos encontrados fueron, en todos los casos, mayores al tiempo promedio consignado en los planes de cotización de la empresa, y se presentan en la Fig. 35, Fig. 36, Fig. 37 y Fig. 38.



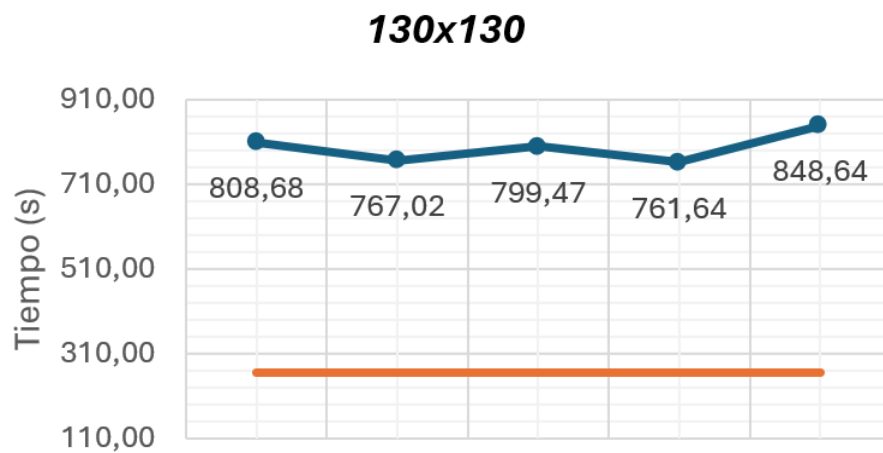
Promedio cotizado: 151,2 s - Promedio actual: 314,89 s

Fig. 35. Tiempos registrados para el planeado de platina 100x100 mm.



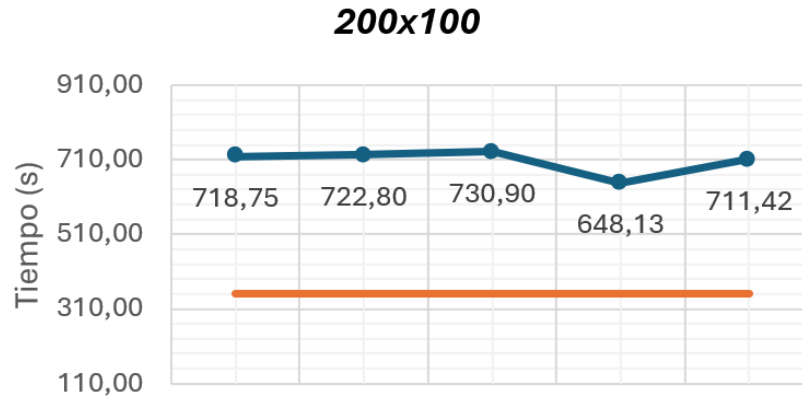
Promedio cotizado: 144 s - Promedio actual: 376,13 s

Fig. 36. Tiempos registrados para el planeado de platina 100x120 mm.



Promedio cotizado: 265,2 s - Promedio actual: 797,09 s

Fig. 37. Tiempos registrados para el planeado de platina 130x130 mm.

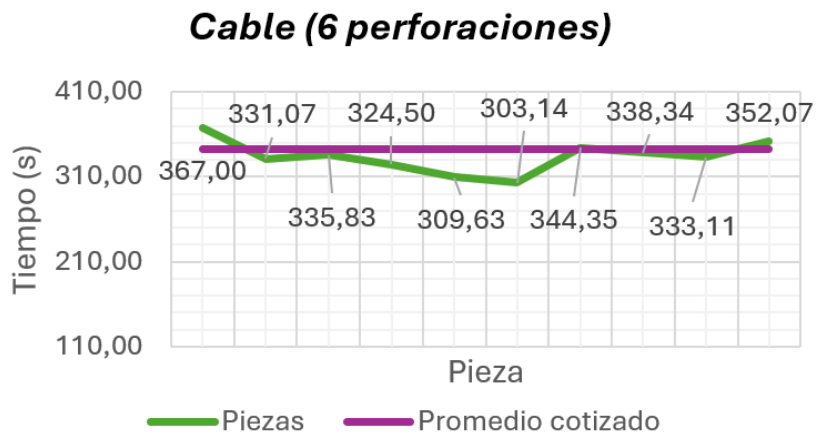


Promedio cotizado: 349,8 s - Promedio actual: 706,4 s

Fig. 38. Tiempos registrados para el planeado de platina 200x100 mm.

3. Perforado para pisadores

Para este subproceso se debió aumentar el tamaño de muestra que, de acuerdo con lo calculado, resultó ser de 7 y 13 mediciones respectivamente para las piezas que requieren 6 y 4 perforaciones. De este modo, se realizaron 15 mediciones para cada tipo de pieza. La Fig. 39 muestra el resultado de la toma de tiempos para 6 perforaciones y la Fig. 40 hace lo propio para 4 perforaciones.



Promedio cotizado: 342 s - Promedio actual: 333,9 s

Fig. 39. Tiempos registrados para la realización de 6 perforaciones para ensamble de pisadores.

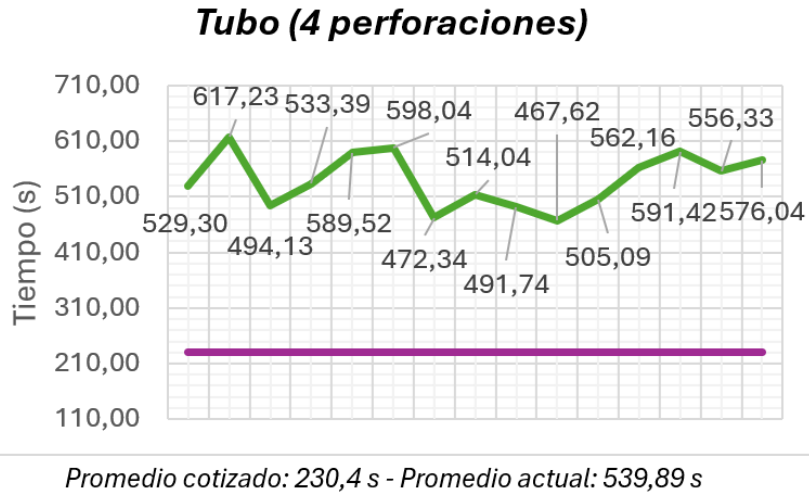


Fig. 40. Tiempos registrados para la realización de 4 perforaciones para ensamble de pisadores.

4. Mecanizado de radios

Para esta operación los tamaños de muestra calculados para cada pieza en ningún caso excedieron el número de mediciones tomadas (5 para cada tipo de pieza). La Fig. 41, Fig. 42, Fig. 43, Fig. 44 y Fig. 45 contienen los resultados obtenidos en la toma de tiempos para las diferentes piezas.

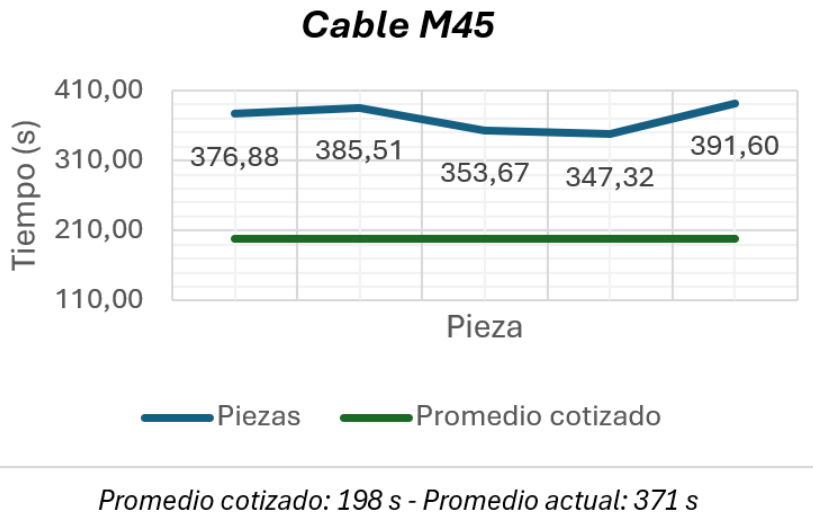


Fig. 41. Tiempos registrados para la realización del ranurado para el radio de los conectores cable M45.

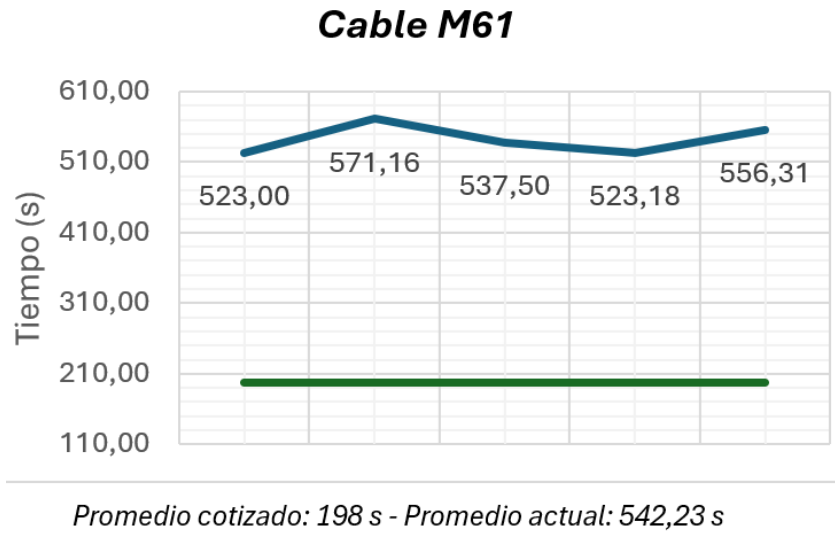


Fig. 42. Tiempos registrados para la realización del ranurado para el radio de los conectores cable M61.

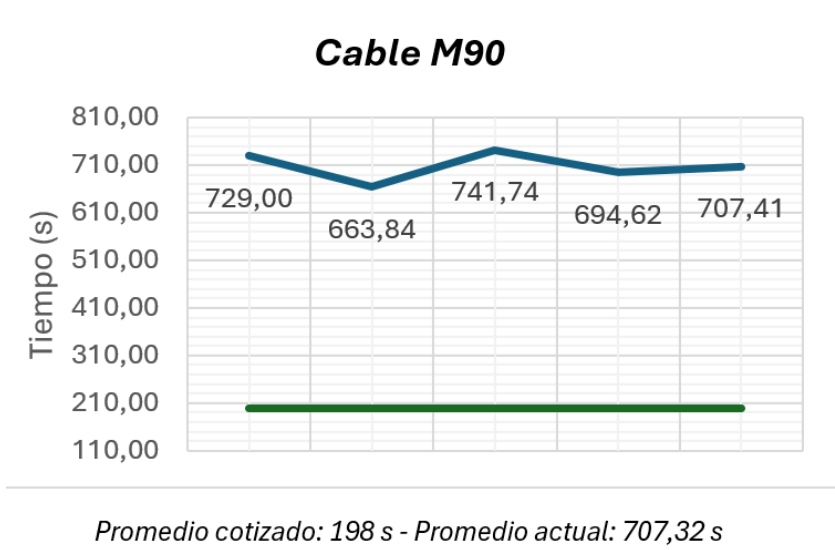
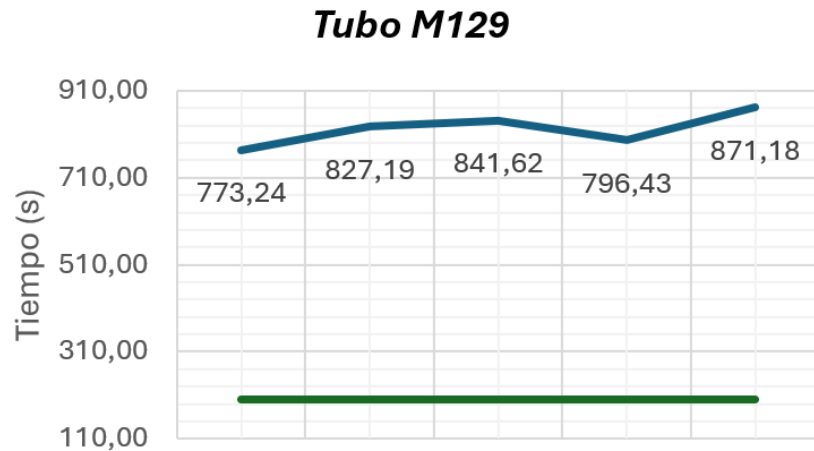
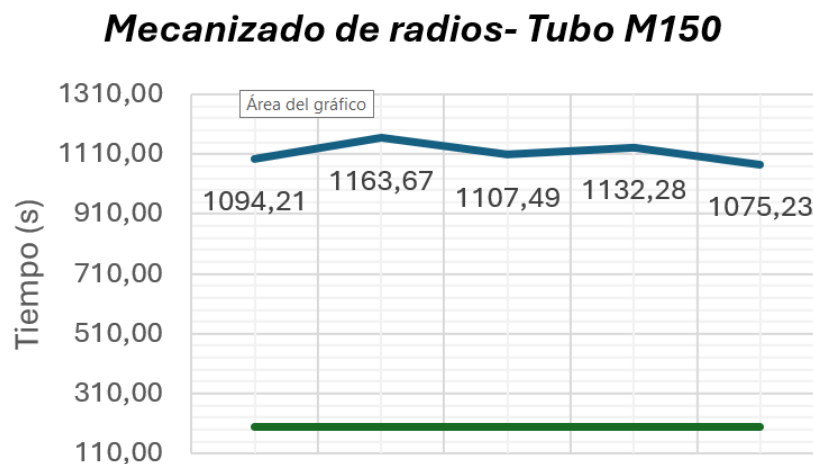


Fig. 43. Tiempos registrados para la realización del ranurado para el radio de los conectores cable M90.



Promedio cotizado: 199,2 s - Promedio actual: 821,93 s

Fig. 44. Tiempos registrados para la realización del ranurado para el radio de los conectores tubo M129.



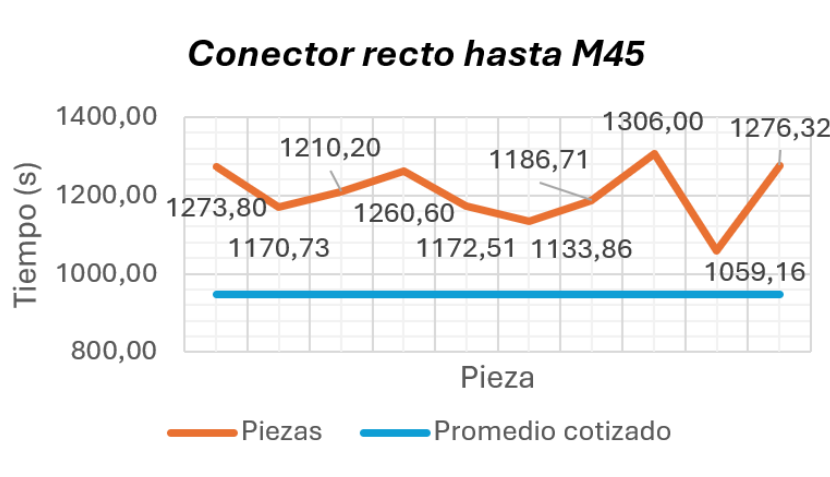
Promedio cotizado: 199,2 s - Promedio actual: 1114,58 s

Fig. 45. Tiempos registrados para la realización del ranurado para el radio de los conectores tubo M150.

5. Formación de molde en arena

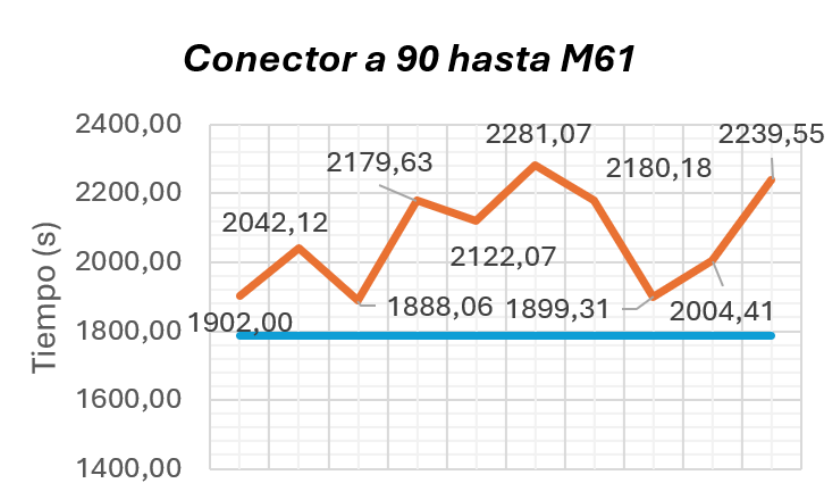
En este subproceso de realizaron 10 tomas de tiempos para cada tipo de pieza y se encontró que el tamaño de muestra en ambos casos era menor al número de mediciones ya realizadas (7 mediciones calculadas según fórmulas del tamaño de muestra). En la Fig. 46 se encuentran los tiempos medidos para un conector recto cable M45, en la Fig. 47 están aquellos correspondientes

al segundo tipo de pieza observada en este proceso, que es un conector a 90 cable M61 y en la Fig. 48 son mostrados los tiempos para un conector en T cable M90.



Promedio cotizado: 948 s - Promedio actual: 1204,9 s

Fig. 46. Tiempos registrados para la formación del molde en arena para conectores rectos cable M45.



Promedio cotizado: 1788 s - Promedio actual: 2073,84 s

Fig. 47. Tiempos registrados para la formación del molde en arena para conectores a 90 cable M61.

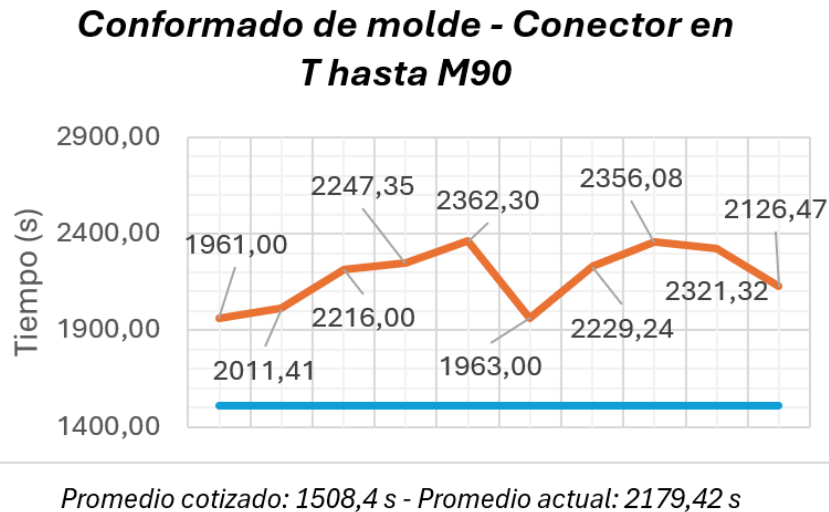


Fig. 48. Tiempos registrados para la formación del molde en arena para conectores en T cable M90.

En términos generales, la medición de tiempos realizada permitió documentar el aumento en tiempos de procesos que se ha presentado en la fabricación de conectores eléctricos. Este hallazgo es de utilidad a la hora de realizar el costeo de piezas para producción, ya que la variación significativa de estos tiempos debería verse reflejada en el precio de los productos. Por otro lado, los niveles de variabilidad en cuanto a los tipos de piezas fabricadas dificultaron la obtención de mayor cantidad de tiempos. Este tipo de variaciones pueden entorpecer los registros que se lleven sobre el proceso, por tanto, es buena idea buscar ampliar la base de registros de tiempos para tratar de capturar en alguna medida el comportamiento de piezas poco habituales, y obtener métricas ajustadas de su tiempo de procesamiento.

B. Métricas seis sigma de cada proceso

1. Formación de molde en arena

Tabla IV

Valor de nivel sigma e índice de capacidad del proceso: formación de molde en arena

	Parte	sigma_level	cpk
0	Conector Recto hasta M45	3.309924	1.103308
1	Conector a 90 hasta M61	2.966200	0.988733
2	Conector en T hasta M90	2.993519	0.997840

El proceso de formación de molde en arena muestra resultados mixtos en términos de nivel sigma y C_{pk} . La pieza **Conector Recto hasta M45** alcanza un nivel sigma de 3.31 y un C_{pk} de 1.10, lo

que indica que el proceso está produciendo piezas dentro de las especificaciones, pero con margen de mejora. Por otro lado, las piezas **Conector a 90 hasta M61** y **Conector en T hasta M90** muestran un nivel sigma ligeramente más bajo y un C_{pk} por debajo de 1, lo que sugiere que estas piezas tienen mayores desviaciones con respecto a las especificaciones.

2. Perforado para pisadores

Tabla V

Valor de nivel sigma e índice de capacidad del proceso: perforado de pisadores

	parte	sigma_level	cpk
0	Cable 6 Perforaciones	3.730451	1.243484
1	Tubo 4 perforaciones	2.314627	0.771542

En el proceso de perforado de pisadores, la pieza **Cable 4 perforaciones** muestra un nivel sigma aceptable de 3.73 y un C_{pk} de 1.24, indicando que el proceso produce piezas dentro de las especificaciones de manera consistente. Sin embargo, la pieza **Tubo 4 perforaciones** muestra un nivel sigma más bajo y un C_{pk} por debajo de 1, lo que sugiere que el proceso necesita mejoras para cumplir con las especificaciones del cliente de manera consistente.

3. Perforado para platinas

Tabla VI

Valor de nivel sigma e índice de capacidad del proceso: perforado de platinas

	parte	sigma_level	cpk
0	Platina 4 Perforaciones	4.086954	1.362318
1	Platina 6 y 8 perforaciones	1.511173	0.503724

En el proceso de perforado de platinas, la pieza **platina 4 perforaciones** muestra un nivel sigma alto de 4.09 y un C_{pk} de 1.36, indicando que el proceso está produciendo piezas dentro de las especificaciones de manera consistente. Sin embargo, la pieza **platina 6 y 8 perforaciones** muestra un nivel sigma más bajo y un C_{pk} por debajo de 1, lo que sugiere que esta pieza tiene mayores desviaciones con respecto a las especificaciones y necesita mejoras.

4. Planeado para platinas

Tabla VII

Valor de nivel sigma e índice de capacidad del proceso: planeado de platinas.

	parte	sigma_level	cpk
0	Platina 100 x 100	4.955108	1.651703
1	Platina 100 x 120	3.567944	1.189315
2	Platina 130 x 130	4.314389	1.438130
3	Platina 200 x 100	4.097852	1.365951

En el proceso de planeado de platinas, todas las piezas muestran niveles sigma y C_{pk} altos, lo que indica que el proceso está produciendo piezas dentro de las especificaciones de manera consistente.

5. Mecanizado de radios

Tabla VIII

Valor de nivel sigma e índice de capacidad del proceso: mecanizado de radios.

	parte	sigma_level	cpk
0	Cable M61	4.008036	1.336012
1	Tubo M129	6.141911	2.047304

En el proceso de mecanizado de radios, ambas piezas muestran niveles sigma y C_{pk} altos, lo que sugiere que el proceso está fabricando piezas que cumplen con las especificaciones, y, además, de forma sostenida.

C. Análisis de varianza

El análisis de varianza de multifactorial fue aplicado al registro de tiempos de mecanizado para el tipo de pieza "Cable M45", para lo cual se utilizó el software Statgraphics. La Fig. 49 muestra los resultados obtenidos, en los cuales se observa que el valor P calculado, tanto en el caso de la variable dispositivo de montaje como para la variable operario, no supera el valor de 0,05, esto nos dice que ninguna de estas variables tiene un efecto significativo en el tiempo total de operaciones.

Análisis de Varianza para Tiempo total - Suma de Cuadrados**Tipo III**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Dispositivo de montaje	561,694	1	561,694	0,60	0,4681
B: Operario	741,876	1	741,876	0,79	0,4078
INTERACCIONES					
AB	7,30806	1	7,30806	0,01	0,9325
RESIDUOS	5620,09	6	936,682		
TOTAL (CORREGIDO)	6716,31	9			

Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que ningún valor-P es menor que 0,05, ninguno de los factores o interacciones tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Tiempo total con un 95,0% de nivel de confianza.

Medias y 95,0% de Fisher LSD

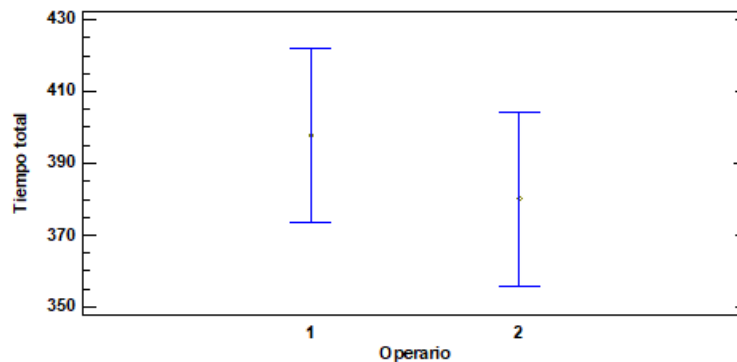


Fig. 49. Resultados de análisis de varianza para la pieza cable M45.

En cuanto al análisis de varianza simple implementado para la pieza Tubo M129, en la Fig. 50 son mostrados sus resultados. Similarmente, puede decirse con un nivel de confianza del 95% que la variable operario no afecta de manera significativa el tiempo total de mecanizado.

Tabla ANOVA para Tiempo total por Operario

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	527,221	1	527,221	0,68	0,4330
Intra grupos	6189,09	8	773,636		
Total (Corr.)	6716,31	9			

La razón-F, que en este caso es igual a 0,681484, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Tiempo total entre un nivel de Operario y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

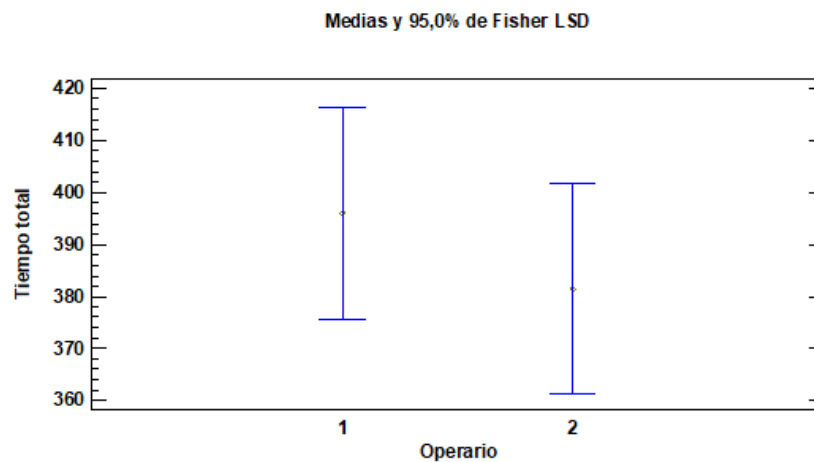


Fig. 50. Resultados de análisis de varianza para la pieza tubo M129.

Ahora bien, aunque se encuentra que el tipo de montaje de mecanizado actual para el maquinado de radios con buril no tiene una influencia en el tiempo de procesamiento o la agilización del maquinado. Es decir, no hay diferencia significativa en los tiempos encontrados para los conectores mecanizados usando el montaje disponible y los conectores sujetos directamente con la prensa de la fresadora. Esto, sin embargo, no impide el análisis e implementación de nuevos montajes de mecanizado que tengan un enfoque mayor en el aumento de la productividad, o que faciliten la sujeción de piezas complejas. En cuanto a la falta diferencia al cambiar el operario, nos dice que todos los operarios obtienen resultados similares en este proceso.

D. Montajes de mecanizado

Empleando el plano de simetría de los conectores, definido como el plano central de la ranura que define el radio de los conectores eléctricos, se diseñó una pieza cónica con un rango de diámetros para un tipo de conector en concreto (el modelo incluido en este informe corresponde a los conectores para cable M90 (con diámetros entre 42 y 63 mm)). Dicho tipo de pieza es usado en ambos montajes propuestos. La Fig. 51 muestra una imagen de la pieza cónica descrita.

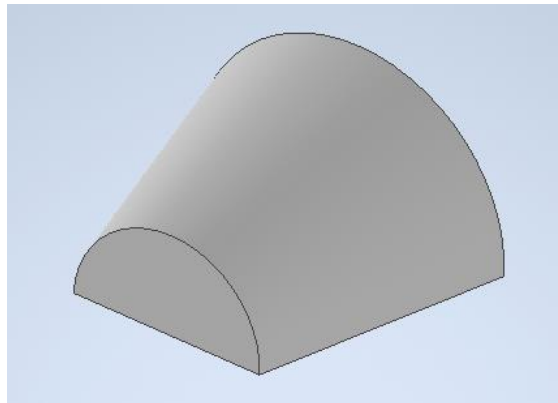


Fig. 51. Pieza para localización en los montajes de mecanizado.

A continuación, se muestran las propuestas de diseño, cada una de las cuales incluye un método de sujeción que termina de limitar los grados de libertad del montaje.

1. Propuesta cono-abrazadera

En esta propuesta se usa una abrazadera, compuesta por espárrago, tuerca y arandelas comerciales, junto con un bloque para el ajuste de la pieza, esto es mostrado en la Fig. 52.

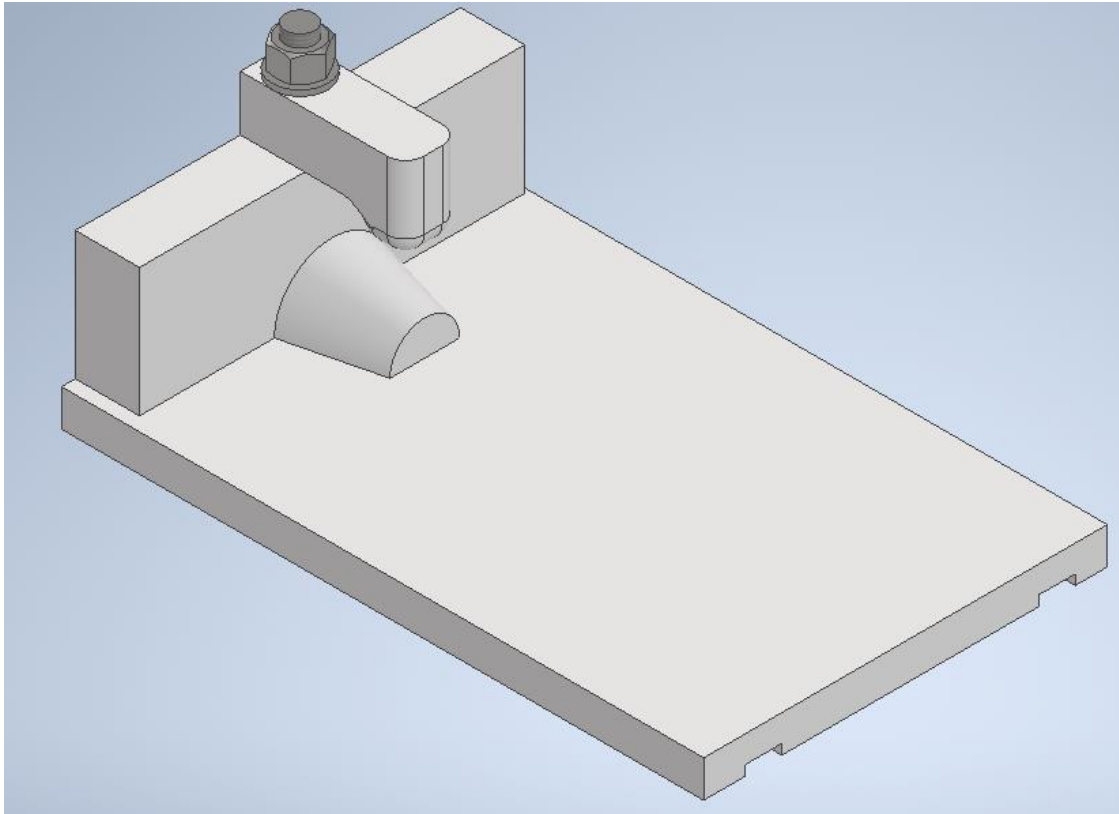


Fig. 52. Propuesta de montaje de mecanizado con cono y abrazadera.

En este montaje se consigue que la sujeción de piezas grandes que no pueden ser fijadas con la prensa incorporada de la fresadora, asegurando el equilibrio estático del sistema. La base y el cono restringen 2 traslaciones y 2 rotaciones, mientras que la abrazadera superior logra restringir los grados de libertad restantes. Esta propuesta constituye una opción sencilla y de rápida implementación, que serviría para facilitar el mecanizado de piezas grandes. Otra característica de este montaje es que presenta poca obstrucción a la maquinabilidad de las piezas.

2. Propuesta mesa de vacío

Se propuso el empleo de válvulas generadoras de vacío y platinas mecanizadas para la obtención de una mesa de sujeción por vacío. La propuesta consta de 2 líneas de entrada de área, cada una con una válvula generadora de vacío acoplada. La base del montaje cuenta con una serie de perforaciones y ranuras que comunican hacia la parte superior, donde se ubica el conector. En la Fig. 53 es presentado el plano de las conexiones neumáticas requeridas.

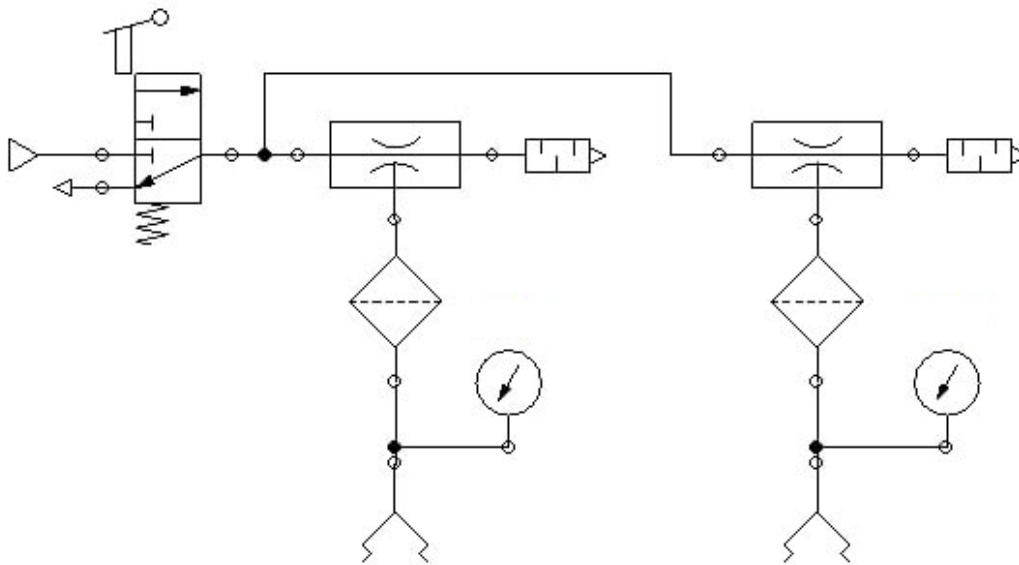


Fig. 53. Conexiones neumáticas para mesa de vacío.

Teniendo en cuenta que un generador de vacío tiene una salida del 85% [30] se calculó la fuerza de sujeción ejercida por el sistema de vacío empleando la ecuación:

$$F = P \cdot A \quad (16)$$

Donde P es la presión de vacío obtenida con el accionamiento del generador, y A es el área de la sección de la base en contacto con la pieza. Para una presión de trabajo de 6 bar, la presión de vacío obtenida es -5,1 bar, y la fuerza de sujeción será de 160 N.

Ahora bien, la fuerza de sujeción requerida se estima con la ecuación [31]:

$$F = \frac{m}{\mu} \times (g + a) \times S \quad (17)$$

Donde m es la masa del conector en kilogramos; como el sistema de vacío maneja cargas menores de fijación, se determinó que se trabajarían conectores de hasta 3kg de peso. μ es el coeficiente de fricción entre el aluminio y el acero (0.61 [32]), S es un factor de seguridad, que se establece que es 2 para piezas con acabado burdo. Conociendo todo esto, se encontró que la fuerza requerida es de 145 N; al ser esta fuerza menor a la fuerza de succión generada, se cumple el chequeo. La Fig. 54 presenta el diseño propuesto de este montaje.

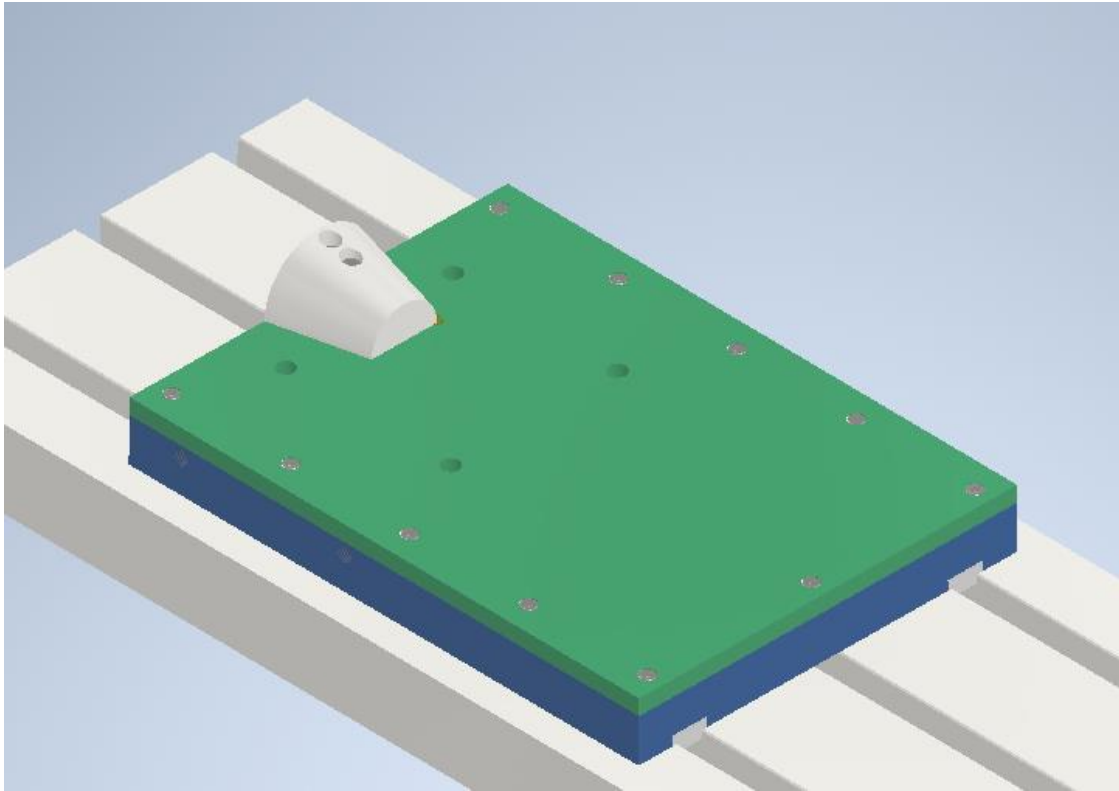


Fig. 54. Propuesta de montaje de mecanizado con mesa de vacío.

Planos de fabricación de los componentes no comerciales de los montajes de mecanizado que se proponen son incluidos en los archivos anexos.

E. Niveles de preferencia de alternativas Fresadora vs Taladro Multihusillos

Luego de definir las matrices de comparación para cada alternativa, los valores de éstas se introdujeron al código en Python que calcula los niveles de preferencia de cada alternativa. En la Fig. 55 se muestran los resultados obtenidos. La fila "Total" corresponde a los valores obtenidos para ambas alternativas. De esto puede notarse que incluir el taladro en la línea de producción es una opción más recomendable que continuar haciendo todas las operaciones de perforado de platina con la fresadora, puesto que el taladro tiene un nivel de prioridad del 75%. Este resultado da cuenta del impacto que tiene el ahorro de tiempos de operación (65% vs 7% de preferencia) que se proyecta con la utilización del taladro. Además, los gastos operativos serían un punto de diferenciación entre ambas máquinas, ya que se tuvo en cuenta que el multihusillos permitiría realizar las operaciones en menor tiempo y, por tanto, la máquina se usaría menos. En cuanto al

tiempo de montaje, se observa que no es un factor decisivo para inclinarse por una u otra alternativa (5% de preferencia para ambas). Ahora bien, también se estableció que, si bien los gastos de reparación no contribuyen en la elección de inclusión del taladro (1,25% de preferencia vs. 11,25% de la fresadora), tampoco se encontró que sean lo suficientemente significativos para revertirla, ya que el peso asignado a las demás variables es un factor que reviste mayor consideración.

	Fresadora	Taladro
Tiempo de montaje	0.052083	0.052083
Tiempo de operación	0.072917	0.656250
Gastos reparacion	0.112500	0.012500
Gastos operativos	0.010417	0.031250
Total	0.247917	0.752083

Fig. 55. Resultados de la comparativa AHP entre el taladro y la fresadora.

VI. CONCLUSIONES

- Se halló que en todos los procesos (excepto el perforado de 6 agujeros para pisadores) el tiempo promedio actual de mecanizado es mayor al tiempo cotizado. El aumento se encuentra entre el 116% y el 560%, según la operación y el tipo de conector, siendo el perforado de platina y la formación de molde de arena las operaciones que menos aumento sufrieron, y el mecanizado de radios la operación con mayor aumento.
- Se observa que el proceso de perforado de pisadores presenta problemas significativos en cuanto a su capacidad y calidad de producción. Específicamente, la pieza "tubo 4 perforaciones" muestra un nivel sigma bajo y un C_{pk} inferior a 1, lo que indica una alta variabilidad en la producción de piezas y la generación de productos fuera de las especificaciones de manera inconsistente. Se recomienda una intervención prioritaria en este proceso para identificar y abordar las causas raíz de las deficiencias y mejorar su desempeño.
- En el proceso de perforado de platinas, las platinas con 6 y 8 perforaciones también muestran un nivel sigma relativamente bajo y un C_{pk} inferior a 1, lo que indica una capacidad de proceso deficiente y una alta variabilidad en la producción de piezas. Es necesario llevar a cabo una intervención significativa en este proceso para mejorar su capacidad y calidad de producción, identificando y abordando sus causas.
- El análisis de varianza mostró que el tipo de montaje de mecanizado y el operario no afectan significativamente el tiempo de mecanizado de las piezas analizadas.
- Se diseñó un montaje de mecanizado con abrazadera superior que permite la fijación de piezas grandes que no pueden sostenerse con la prensa de la fresadora.
- Se propuso un montaje de mecanizado para sujeción de piezas por medio de una mesa de vacío. Este montaje es adecuado para piezas pequeñas (menores a 3 kg).
- En el proceso de análisis jerárquico se encontró que, pese a los costos asociados a su reparación, la inclusión del taladro multihusillos en la fabricación de conectores eléctricos es preferible a la alternativa de realizar todos los perforados con fresadora.

REFERENCIAS

- [1] T. Pyzdek y P. A. Keller, *A complete guide for green belts, black belts, and managers at all levels*, New York: McGraw-Hill, 2003.
- [2] D. C. Montgomery, *Introduction to statistical quality control*, John Wiley & Sons, 2019.
- [3] R. J. Schonberger, *Best practices in lean six sigma process improvement: A deeper look*, John Wiley & Sons, 2007.
- [4] F. E. Meyers, *Estudios de tiempos y movimientos*, Pearson Educación, 2000.
- [5] M. Mireles, *Medición de Tiempos Con Cronometro*, Instituto Tecnológico de Piedras Negras, 2020.
- [6] J. H. Heizer y B. Render, *Principles of Operations Management*, Pearson/Prentice Hall, 2004.
- [7] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, John Wiley & Sons, 2017.
- [8] G. E. P. Box, W. H. Hunter, S. Hunter y others, *Statistics for experimenters*, vol. 664, John Wiley and Sons New York, 1978.
- [9] A. Agresti, *Statistical methods for the social sciences*, Pearson, 2018.
- [10] M. Tavana, M. Soltanifar y F. J. Santos-Arteaga, «Analytical hierarchy process: revolution and evolution,» *Annals of Operations Research*, vol. 326, p. 879–907, December 2021.
- [11] T. L. Saaty, «Decision making with the analytic hierarchy process,» *International journal of services sciences*, vol. 1, p. 83–98, 2008.
- [12] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, McGraw-Hill International Book Company, 1980.
- [13] P. Cabala, «Using the Analytic Hierarchy Process in Evaluating Decision Alternatives,» *Operations Research and Decisions*, vol. 1, pp. 1-23, January 2010.
- [14] P. H. Joshi, *Jigs and Fixtures*, 3rd Edition ed., New York: McGraw-Hill Education, 2010.
- [15] G. Boothroyd, P. Dewhurst y W. Knight, «Product Design for Manufacture and Assembly,» de *Product Design for Manufacture and Assembly*, CRC Press, 2010.

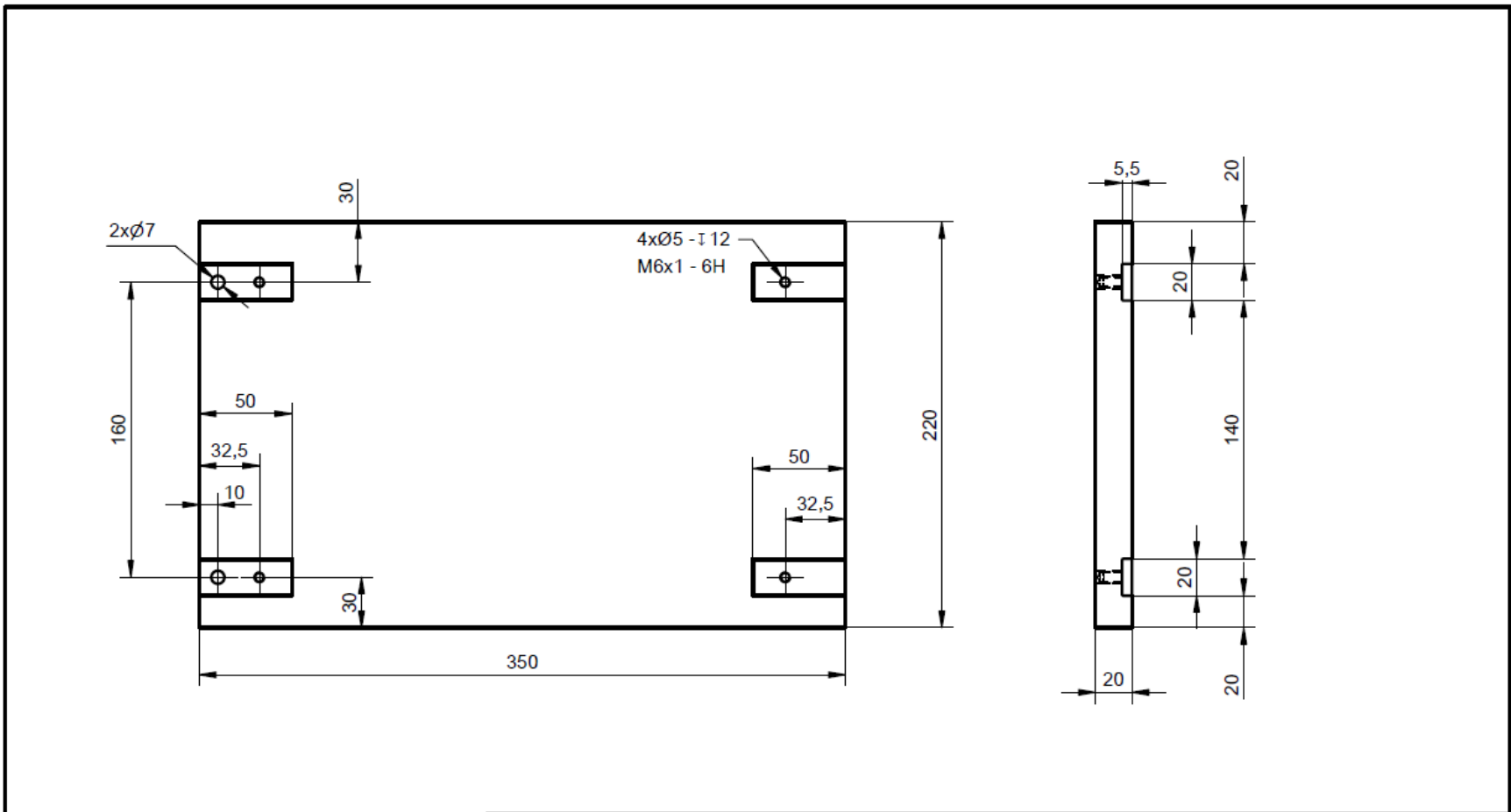
-
- [16] R. W. Heine, C. R. Loper y P. C. Rosenthal, *Principles of Metal Casting*, McGraw-Hill Education, 1976.
- [17] E. Flores-Ruiz, M. G. Miranda-Novales y M. Á. Villasís-Keever, «El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial,» *Revista Alergia México*, vol. 64, p. 364–370, 2017.
- [18] *Multi Spindle Drilling Machine or Tapping machine*. Tarwit. Lishui, Provincia de Zhejiang. 2020.
- [19] E. C. Styler Walter, *Fresado de tornillo sin fin*, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, 2018, pp. 94-95.
- [20] Catálogo Universal Type Multiple Drilling and Tapping Attachments, Proconier Safety Chuck Co. Lakeland, Florida. 2020.
- [21] Catálogo Disumtec, Suministros Técnicos Industriales. Disumtec. Castellón, España. 2024.
- [22] Catálogo R3681 Stainless Telescopic Universal Joints. Portfield Works, Chichester. Automotion C. Ltd. 2024.
- [23] Catálogo Spindle motor shaft Chuck Adapters, Machine Chuck Adapters ER Series. Hongyang. China. 2024.
- [24] Catálogo Type Er Collet Chuck Nut. TIB. Miami, Florida. 2024.
- [25] Adjustable joint multispindle heads. OMG America. Post Falls, Idaho. 2024.
- [26] EPM, «Tarifas de Energía EPM para el año 2024,» 2024.
- [27] Universal milling machine. Sajo. Scottsburg, Indiana. 2023.
- [28] Catálogo Column drilling machines: Easy to use and professional multi spindle column drill machine. ChanSin. Guangdong, China. 2024.
- [29] Ministerio de trabajo, «En el 2024 el salario mínimo es de un millón 300 mil pesos y auxilio de transporte de 162 mil pesos - Ministerio del trabajo,» 2024.
- [30] Festo, *Catálogo de generadores de vacío*, 2024, pp. 32-34.
- [31] Extremeltd *How to calculate vacuum suction force to find appropriate suction cups*, Eurotech 2022.
- [32] D. C. Ordoñez Ordoñez, «Validación del coeficiente de fricción dinámica mediante tres

- procedimientos para materiales de uso común en ingeniería,» 2015.
- [33] E. Y. T. Tan, A. S. Kumar, J. Y. H. Fuh y A. Y. C. Nee, «Modeling, analysis, and verification of optimal fixturing design,» *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 1, p. 121–132, 2004.
- [34] P. Rewers, J. Trojanowska y P. Chabowski, «Tools and methods of Lean Manufacturing-a literature review,» de *Proceedings of 7th international technical conference technological forum*, 2016.
- [35] Y. M. Poonam y Y. Mulge, «Remote temperature monitoring using LM35 sensor and intimate android user via C2DM service,» *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, vol. 2, p. 32–36, 2013.
- [36] P. S. Pande, R. P. Neuman y R. R. Cavanagh, *The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top Companies are Honing Their Performance*, McGraw Hill LLC, 2000.
- [37] G. Immerman, «Production and process optimization in manufacturing,» *online*. *MachineMetrics*, 2021.
- [38] O. M. Ikumapayi, E. T. Akinlabi, F. M. Mwema y O. S. Ogbonna, «Six sigma versus lean manufacturing—An overview,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, p. 3275–3281, 2020.
- [39] H. Gutiérrez Pulido y R. de la Vara Salazar, «Control estadístico de la calidad y Seis Sigma,» *México DF: Mc Graw Hill Education*, 2013.
- [40] M. L. George, *Lean Six Sigma: Combining Six Sigma Quality with Lean Production Speed*, McGraw Hill LLC, 2002.
- [41] S. A. Albliwi, J. Antony y S. A. halim Lim, «A systematic review of Lean Six Sigma for the manufacturing industry,» *Business Process Management Journal*, vol. 21, p. 665–691, 2015.

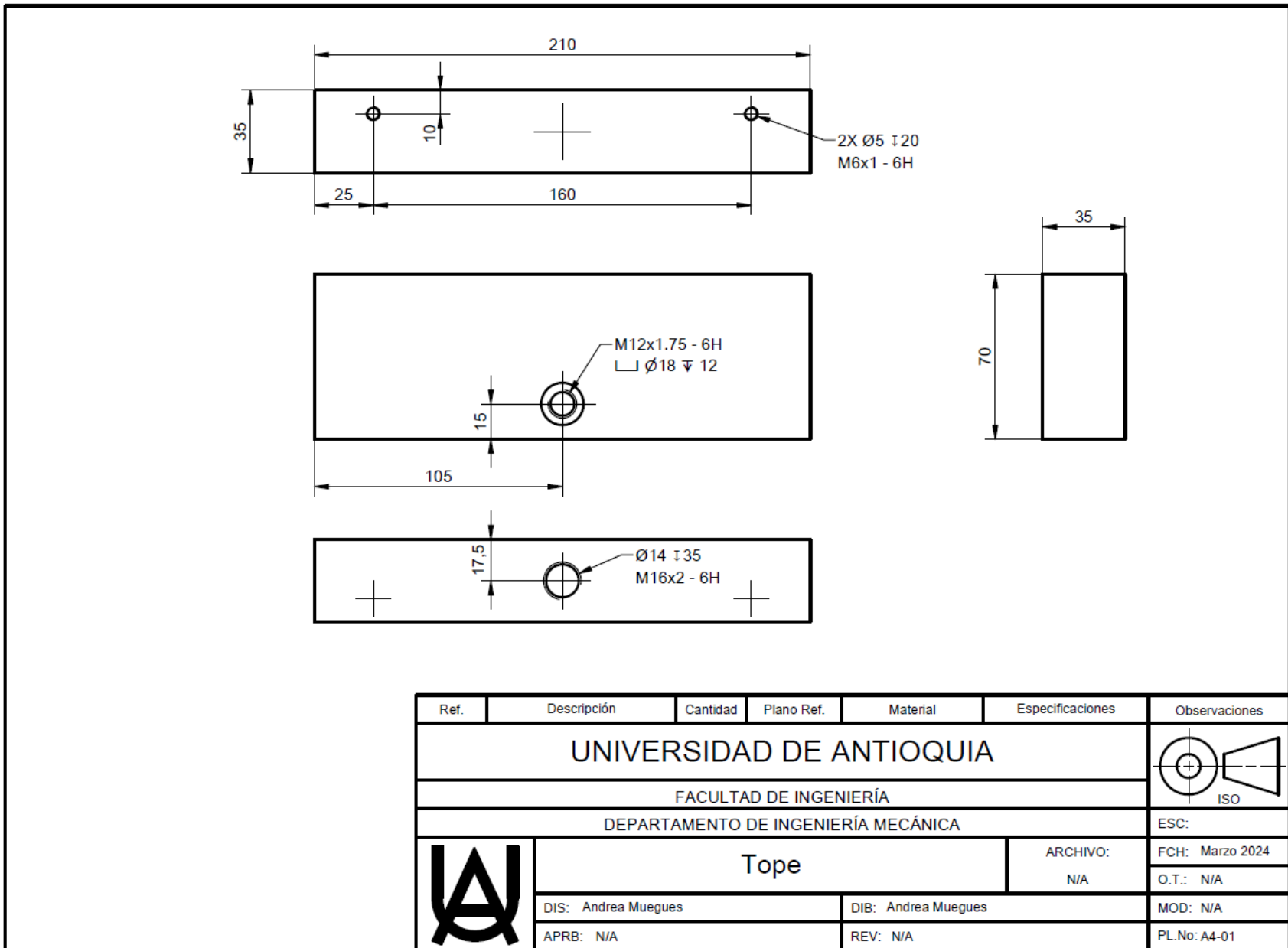
ANEXOS

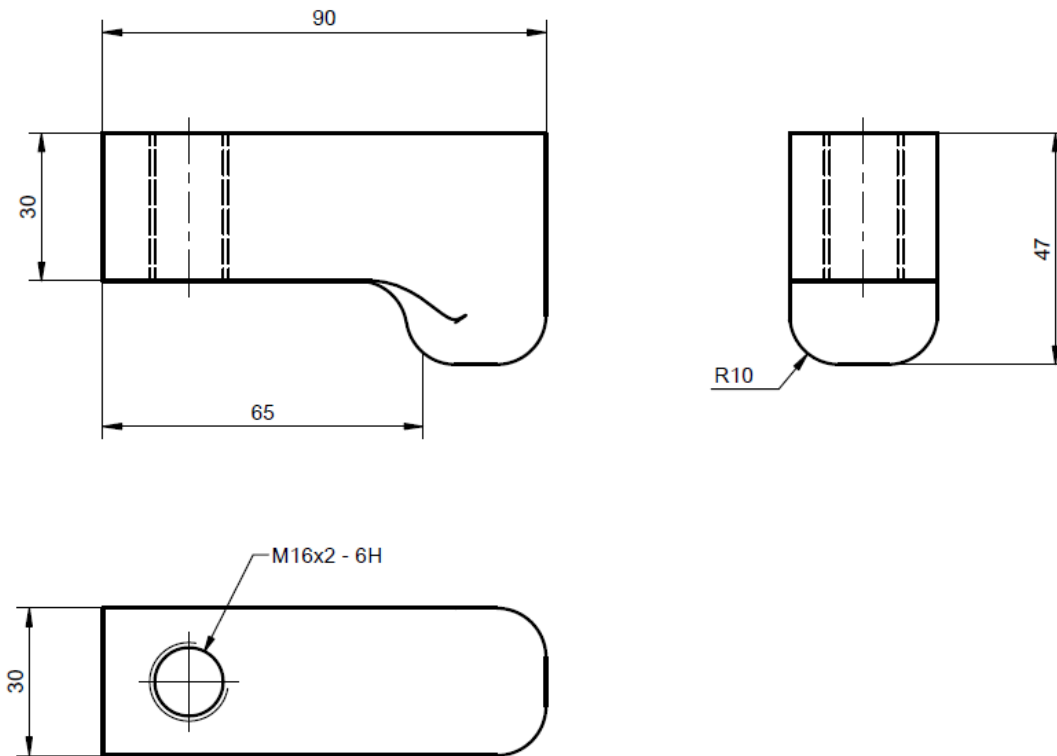
ANEXO A: PLANOS DE MONTAJE DE MECANIZADO CONO-ABRAZADERA

11	Tornillo socket M6x30	2	N/A	Comercial	DIN 912 M16x30	N/A
10	Tornillo socket M6x16	4	N/A	Comercial	DIN 912 M16x16	N/A
9	Tornillo M12x1,75x30	1	N/A	Acero inoxidable 304	DIN 912 M12x1,75x30	N/A
8	Cono	1	A4-03	AISI 1020	Ø65x52	N/A
7	Espárrago M16x2x80	1	N/A	Acero inoxidable 304	DIN 976-A M16x2x80	N/A
6	Tuerca hexagonal M16	1	N/A	Comercial	Tuerca DIN ISO 4032 M16	N/A
5	Arandela plana M16	1	N/A	Comercial	Arandela M16	N/A
4	Abrazadera	1	A4-02	AISI 1020	90x50x30	N/A
3	Tope	1	A4-01	AISI 1020	210x70x35	N/A
2	Tuerca cono en altura suelta	4	N/A	Comercial	Ranura 14x20	N/A
1	Base	1	A4-00	AISI 1020	Placa 350x220x20	N/A
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						 ISO
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
Montaje de mecanizado 1				ARCHIVO:	FCH: Marzo 2024	
DIS: Andrea Muegues				DIB: Andrea Muegues		O.T.: N/A
APRB: N/A				REV: N/A		MOD: N/A
						PL No: A3-00

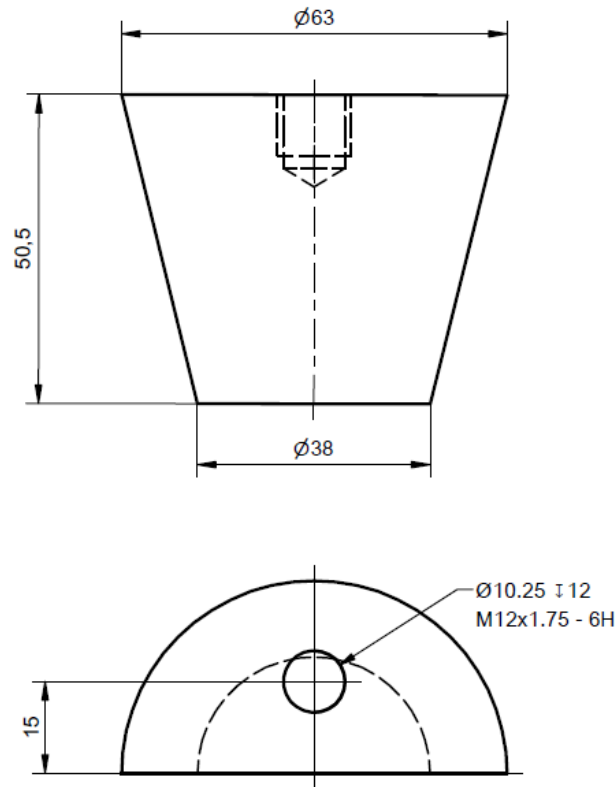


Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						 ISO
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
	Base				ARCHIVO:	ESC: 1:3
					N/A	FCH: Marzo 2024
	DIS: Andrea Muegues			DIB: Andrea Muegues		O.T.: N/A
	APRB: N/A			REV: N/A		MOD: N/A
						PL.No: A4-00



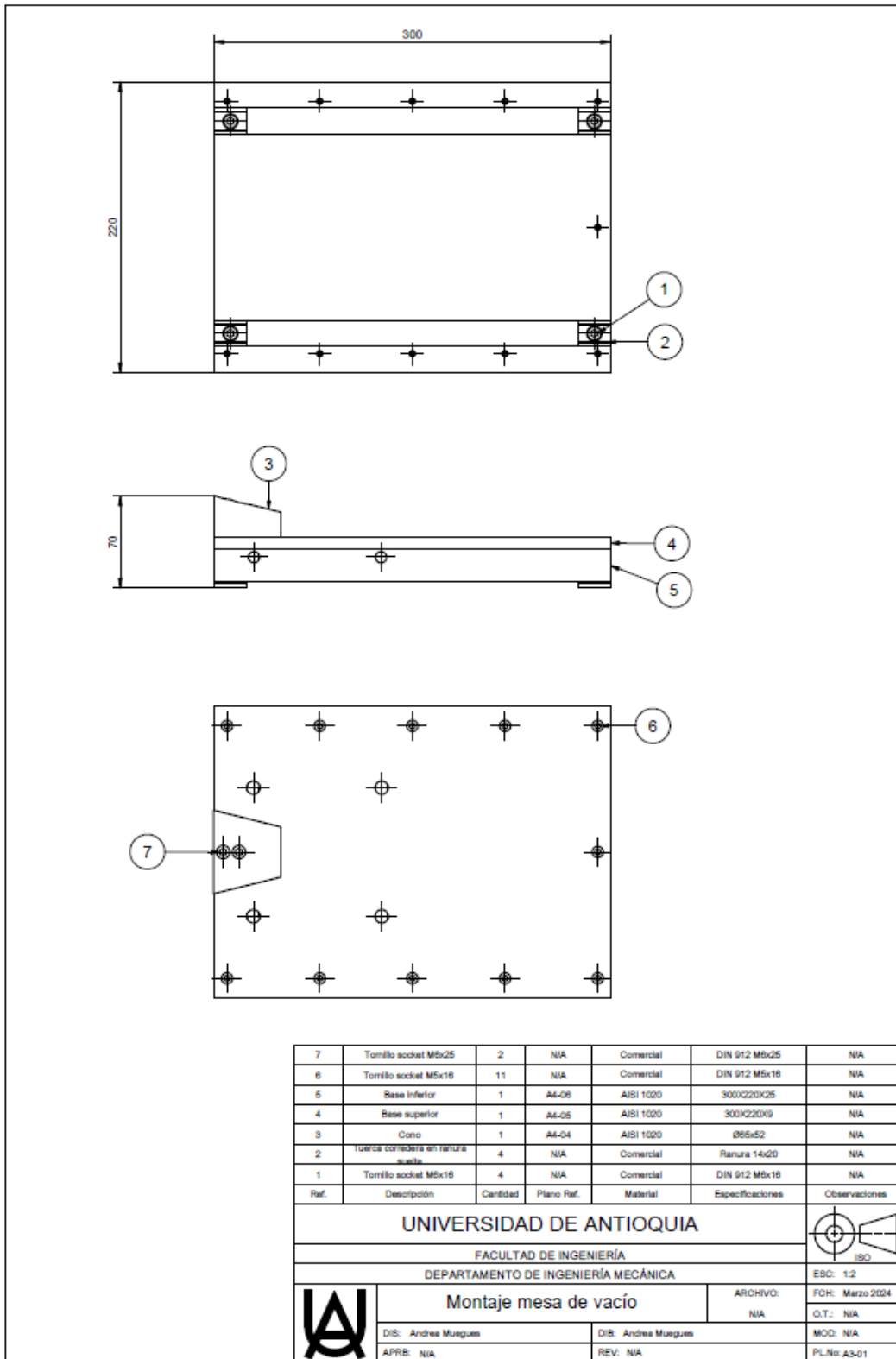


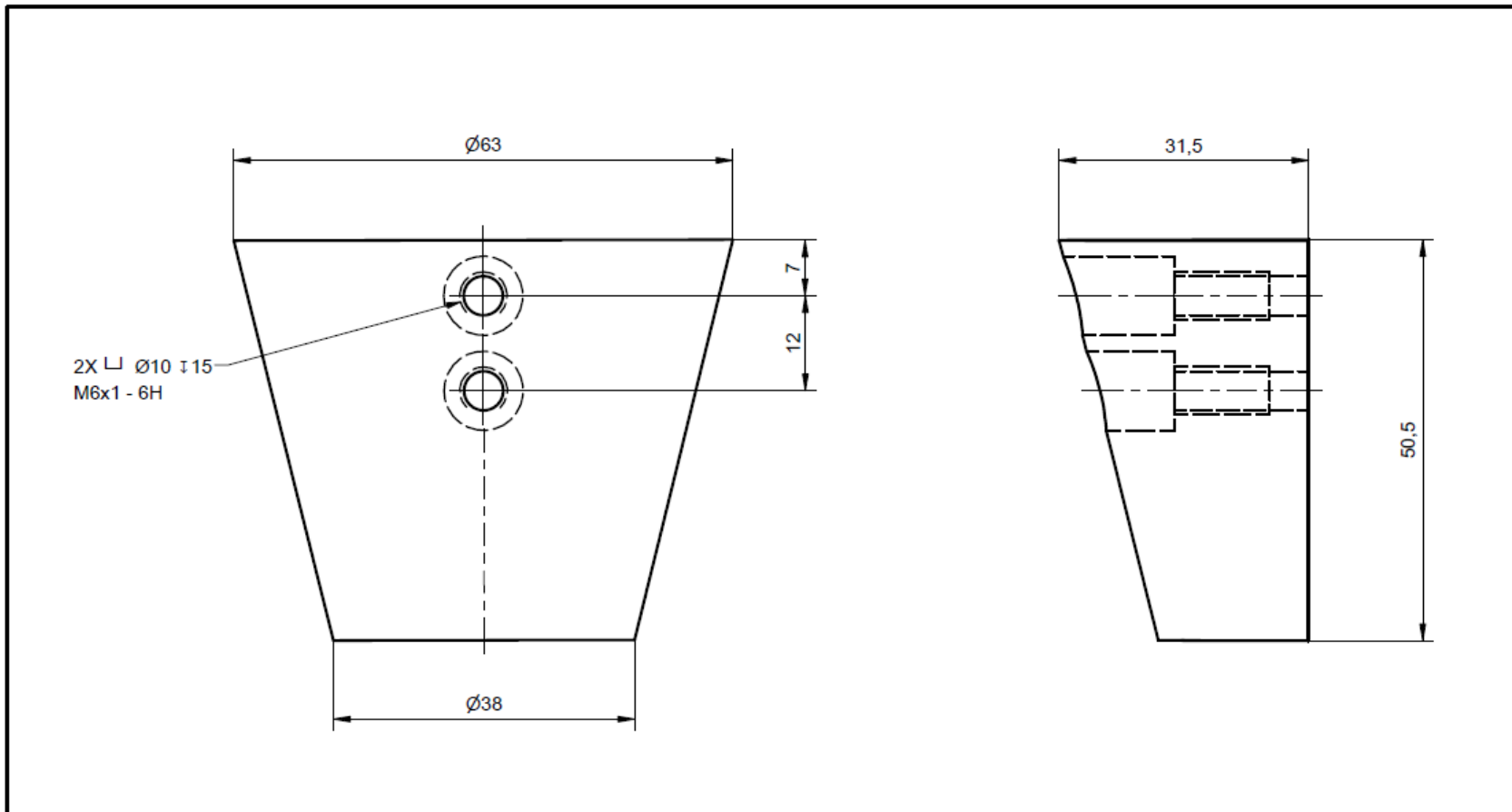
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						 ISO
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
	Abrazadera				ARCHIVO:	FCH: Marzo 2024
					N/A	O.T.: N/A
	DIS: Andrea Muegues			DIB: Andrea Muegues		MOD: N/A
	APRB: N/A			REV: N/A		PL.No: A4-02



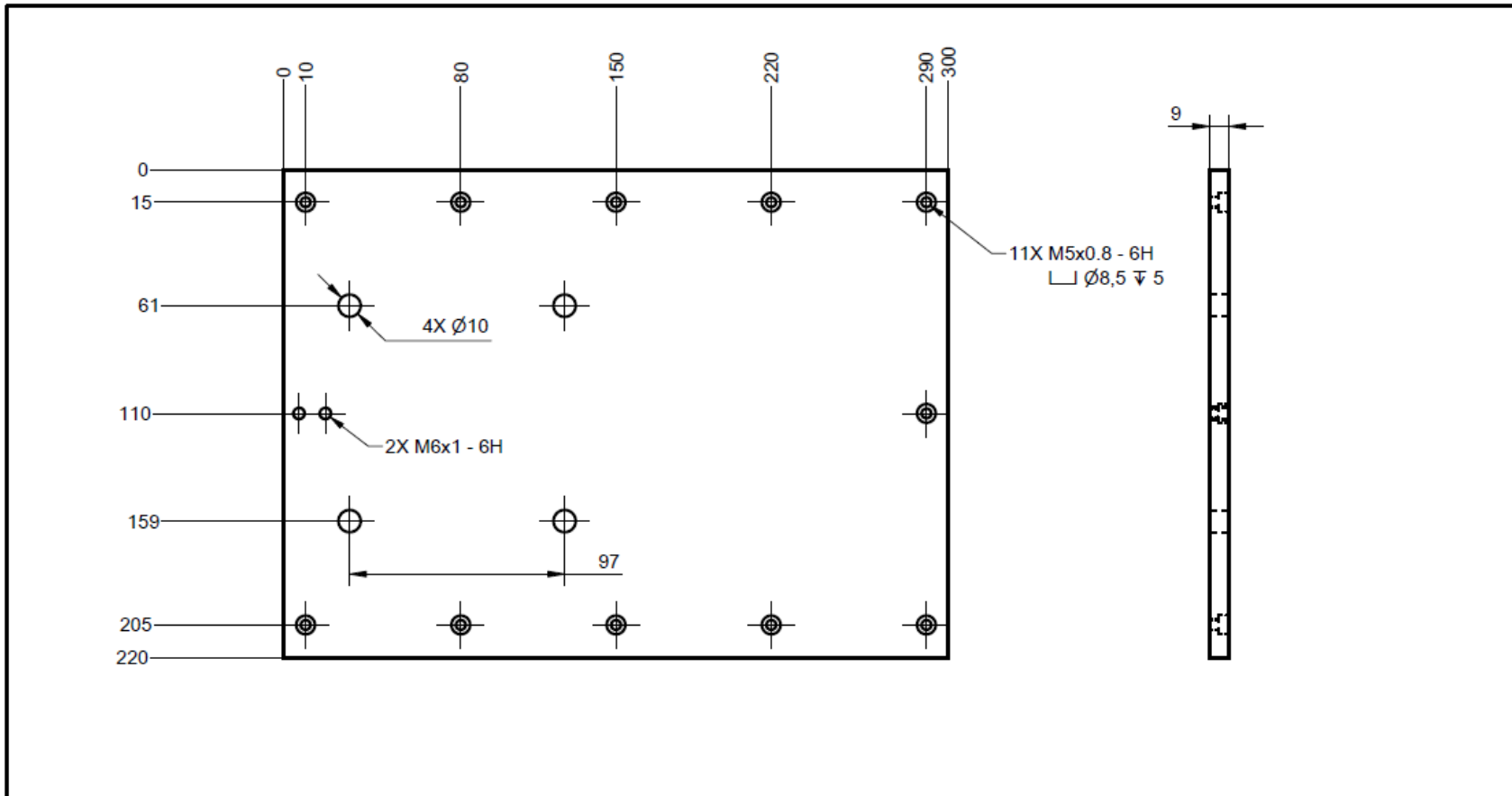
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						 ISO
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
	Cono				ARCHIVO:	ESC: 1:1
					N/A	FCH: Marzo 2024
	DIS: Andrea Muegues			DIB: Andrea Muegues		O.T.: N/A
	APRB: N/A			REV: N/A		MOD: N/A
						PL.No: A4-02

ANEXO B: PLANOS DE MONTAJE DE MECANIZADO MESA

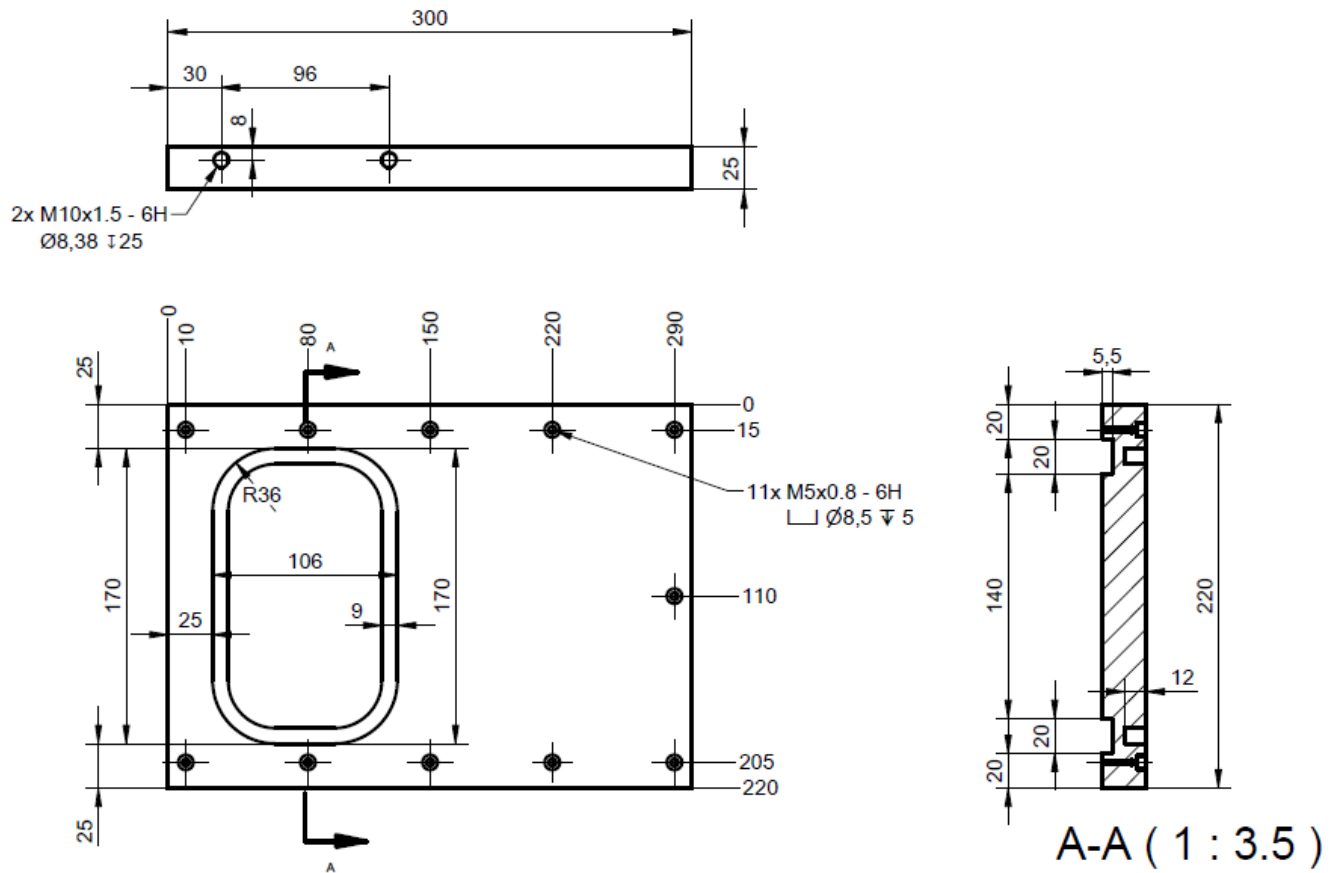


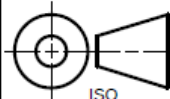


Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						 ISO
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
	Cono localizador 2				ARCHIVO:	ESC: 1:1
	DIS: Andrea Muegues			DIB: Andrea Muegues		FCH: Marzo 2024
	APRB: N/A			REV: N/A		O.T.: N/A
						PL.No: A4-04



Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						 ISO
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
	Base superior				ARCHIVO:	FCH: Marzo 2024
					N/A	O.T.: N/A
	DIS: Andrea Muegues			DIB: Andrea Muegues		MOD: N/A
	APRB: N/A			REV: N/A		PL.No: A4-05




Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						 ISO
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
Base inferior					ARCHIVO: N/A	ESC: 1:3
DIS: Andrea Muegues			DIB: Andrea Muegues			FCH: Marzo 2024
APRB: N/A			REV: N/A			O.T.: N/A
						MOD: N/A
						PL.No: A4-06

ANEXO C: PÓSTER

Departamento de Ingeniería Mecánica

Diagnóstico y plan de mejoramiento productivo de procesos de conformado por moldeo de arena y terminación para la manufactura de piezas en aluminio de la empresa Fundalco Zona Franca



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Facultad de Ingeniería

PRACTICANTE: Andrea Fernanda Muegues Pedraza
ASESORES: Ricardo Moreno Sánchez y Christian Ramírez

PROGRAMA: Ingeniería Mecánica
Semestre de la práctica: 2024-I



Introducción



Se abordó la optimización de los procesos de fundición con molde de arena y el maquinado convencional mediante:

- Análisis de tiempos de operaciones.
- Propuesta de montajes de mecanizado.
- Consideración de inclusión de una perforadora multihusillos vs. Fresadora convencional.



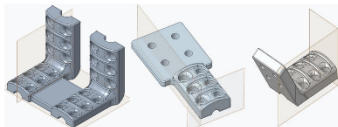
Metodología

Análisis de tiempos de operaciones

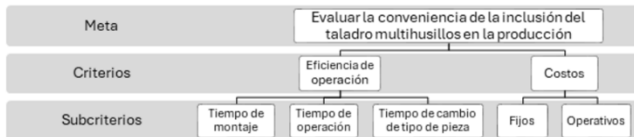
Pieza	Operario	Tiempo (s)



Montajes de mecanizado

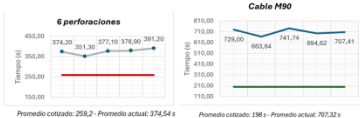


Análisis de incorporación de un taladro multihusillos en la línea de producción

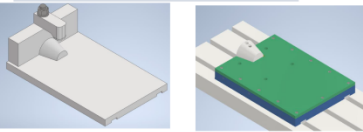


Resultados

Tiempos de operaciones



Montajes de mecanizado



Evaluación Taladro

Análisis de Varianza para Tiempo total - Suma de Cuadrados

Fuente	Suma de Cuadrados	Gr. de Libertad	Cuadrado Medio	F	P
INTERCIOS					
INTRACIPOS					
A. Operaciones	161.684	1	161.684	6.88	0.4681
B. Operarios	131.676	1	131.676	6.78	0.4973
RESIDUALES	1.3880	1	1.3880	0.07	0.9325
TOTAL	374.740	3	124.913		



Item	Costo (COP)	Fresadora	Taladro
Junta telescópica universal	\$822.881,00	0,052083	0,052083
Acople ER32-ER32	\$145.800,00	0,072917	0,059250
Tuerca para boquilla ER32 UM (Cant: 2)	\$381.810,00	0,112500	0,012500
Horas-Hombre (35 hours)	\$1.169.561,68	0,019417	0,031250
Misceláneos	\$154.008,29		
Total	\$1.664.091,16	0,247917	0,162083



Objetivos

- ✓ Realizar un diagnóstico de productividad de los procesos de fundición en molde de arena y maquinado convencional en la fabricación de conectores eléctricos.
- ✓ Diseñar 2 montajes de mecanizado para el posicionamiento de las piezas en las máquinas herramientas para disminuir los tiempos de preparación en las operaciones de maquinado.
- ✓ Comparar la eficiencia de operación de perforado de un conector, utilizando una máquina convencional versus perforadora multihusillos para analizar la conveniencia de incluir la máquina multihusillos en la línea de producción.

Conclusiones

- ✓ El tiempo actual de mecanizado de conectores es mayor al cotizado. El aumento se encuentra entre el 116% y el 560%, siendo el mecanizado de radios la operación con mayor aumento.
- ✓ El proceso de perforado de pisadores presenta un nivel sigma bajo y un Cpk inferior a 1, lo que indica una alta variabilidad en los tiempos de producción de piezas. Se recomienda una intervención en este proceso para identificar y abordar las deficiencias y mejorar el desempeño.
- ✓ El análisis de varianza mostró que el tipo de montaje de mecanizado y el operario no afectan significativamente el tiempo de mecanizado de las piezas analizadas.
- ✓ Se diseñó un montaje de mecanizado con abrazadera superior para la fijación de piezas grandes y un montaje para sujeción de piezas por medio de una mesa de vacío para piezas ligeras.
- ✓ Se encontró que, pese a los costos de reparación, la inclusión del taladro multihusillos en la fabricación de conectores eléctricos es preferible a la alternativa de realizar todos los perforados con fresadora.

DATOS DE CONTACTO DEL AUTOR:



+57 3188086582



andrea.muegues@udea.edu.co



http://ca.linkedin.com/in/andrea-muegues