



Universidad Tecnológica de la Mixteca

División de Estudios de Posgrado

MANUFACTURA DE UN MOLINO DE AGAVE HACIENDO USO DE LA METODOLOGÍA QFD

Tesis

para obtener el grado de:

Maestro en Tecnología Avanzada de Manufactura

Presenta:

Ing. Jesús Enrique Ruíz Carrera

Director de tesis:

Dr. Salvador Montesinos González

Codirector de tesis:

Dr. Carlos Vázquez Cid De León

Hca. Cd. de Huajuapán de León, Oaxaca, México, octubre de 2025

Dedicatoria

A mis padres, cuya fortaleza y amor sembraron en mí la convicción de seguir adelante; a mis hermanas, presencia luminosa en los días inciertos; a mis abuelos, guardianes de la memoria y del esfuerzo que me sostiene. Este logro florece en la tierra que todos ellos cultivaron.

A mi director de tesis, por su guía paciente, que orientó este proyecto con sabiduría y respeto.

Y a mi universidad, por ser hogar y horizonte. En sus aulas encontré no solo conocimiento, sino también la certeza de que aprender es un acto de esperanza.

Agradecimientos

A la Lic. en Educación Lesly Carrera Guerrero, madre, consuelo y cobija, quien no tuvo compasión por disciplinarme y formar buenos hábitos en mí, por enseñarme el valor de la vida y de dar pasos firmes y no acelerados. Gracias mamá.

A el Lic. en Educación Asis Ruíz Martínez, padre, héroe y villano, quien motivo a cumplir mis sueños con bases y no aspiraciones sin grandezas, porque hay que hacer las cosas bien, sí hay que hacerlas. Gracias papá.

A mis amadas hermanas la Lic. en Odont. Leticia Saray, Karen Alelí y Wendy Ivette, por ser confidentes, cómplices y fieles aventureras, por impulsarme a exceder mis límites personales, apoyo total incondicional y recordarme que siempre hay nuevos horizontes. Gracias pequeñas.

A mis abuelos, Inez y Rafael, Eulalia y Federico†, por su aliento sereno, consejos, apoyo incondicional, recordarme de dónde vengo y hacia donde debo mirar.

A mi director de tesis, el Dr. Salvador Montesinos González, por su guía paciente, su exigencia justa y su compromiso con la enseñanza. Su orientación no solo enriqueció el desarrollo de este proyecto, sino también mi manera de comprender la responsabilidad que implica crear y mejorar.

A mi codirector y sinodales, el Dr. Carlos Vázquez Cid De León, Dra. Patricia Magaly Gallegos Acevedo, Dr. Juan M. Espinoza Cuadra, Dr. Galdino Cardenal Santos y Dr. Miguel Alberto Domínguez Gurría, por su valioso tiempo, consejos brindados y momentos gratos en mi estancia en la universidad, gracias.

A los técnicos y personal de limpieza de los diversos talleres en los que trabajé, que no dudaron en corregirme y apoyarme durante prácticas, clases y proyectos.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca, por brindarme el espacio académico y humano donde este trabajo pudo tomar forma. En sus aulas y talleres encontré el impulso necesario para transformar una idea en una propuesta concreta.

A mis amigos, que se convirtieron en mi familia durante estos años. Ustedes fueron el mejor recordatorio de que esta tesis no era la única parte importante de mi vida. Gracias por cada distracción necesaria, cada abrazo y cada palabra de aliento.

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada, que fue fundamental para la realización de esta tesis. Cabe señalar que, a partir de enero de 2025, el CONAHCYT fue sustituido por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

Resumen

La producción de mezcal en Oaxaca representa una actividad de gran importancia económica y cultural. Sin embargo, enfrenta desafíos en términos de eficiencia y sostenibilidad. Uno de los principales problemas radica en la molienda del agave, proceso que aún se efectúa con tahonas de piedra o molinos industriales, los cuales suelen ser poco accesibles para los pequeños productores. Con el objetivo de mejorar la eficiencia y calidad de este proceso, esta investigación se centra en el diseño y fabricación de un molino de cuchillas optimizado mediante la metodología del Despliegue de la Función de Calidad (*Quality Function Deployment*, por sus siglas en inglés QFD). El estudio toma en cuenta las necesidades específicas de una cooperativa mezcalera situada en El Camarón, Yautepec, Oaxaca.

Para el desarrollo del molino se aplicó la metodología QFD, una herramienta de ingeniería que permite traducir los requerimientos del cliente en especificaciones técnicas de diseño. Con base en un estudio entre productores de mezcal se identificaron aspectos clave como resistencia, seguridad, facilidad de limpieza y movilidad. A partir de ellos se diseñó un molino que cumple con las condiciones de operación y mantenimiento requeridas por pequeños y medianos productores.

Para la manufactura del molino se seleccionaron materiales resistentes a la corrosión para cumplir con normativas sanitarias y evitar alteraciones en el sabor y color del mezcal. Además, para facilitar su uso en distintos entornos de producción, el molino es compacto.

Este proyecto demuestra que la implementación de herramientas de diseño estructurado como QFD permite desarrollar soluciones que responden a las necesidades reales de los productores. La fabricación del molino con materiales adecuados y su optimización para pequeñas cooperativas representa una alternativa viable para incrementar la productividad y calidad en la producción de mezcal en Oaxaca.

Índice general

| | |
|--|------|
| Dedicatoria | I |
| Agradecimientos | II |
| Resumen | IV |
| Índice de tablas | VIII |
| Índice de figuras | IX |
| Estructura del proyecto de investigación | 1 |
| CAPÍTULO I. GENERALIDADES | 3 |
| 1.1. Introducción | 4 |
| 1.2. Planteamiento del problema | 5 |
| 1.3. Justificación | 7 |
| 1.3.1. Pertinencia y relevancia | 8 |
| 1.4. Hipótesis | 8 |
| 1.5. Objetivos | 8 |
| 1.5.1. Objetivo general | 9 |
| 1.5.2. Objetivos específicos | 9 |
| 1.6. Metas | 9 |
| 1.7. Tipo de investigación | 11 |
| 1.8. Metodología | 11 |
| 1.9. Límites y alcances | 15 |
| CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO | 16 |
| 2.1. Producción de mezcal | 17 |
| 2.1.1. Proceso de molienda | 17 |
| 2.1.2. Maquinaria similar | 19 |
| 2.2. Manufactura | 22 |
| 2.2.1. Procesos de manufactura | 22 |

| | |
|--|----|
| 2.2.2. Diagramas de manufactura y ensamble | 31 |
| 2.3. QFD | 32 |
| 2.3.1. Conceptualización..... | 33 |
| 2.3.2. Beneficios y limitaciones del QFD | 33 |
| 2.4. Análisis de elementos finitos..... | 34 |
| 2.4.1. FEA en ANSYS..... | 35 |
| 2.5. Resistencia a la fatiga y curva S-N | 36 |
| 2.6. Factor de seguridad..... | 38 |
| CAPÍTULO III. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA..... | 40 |
| 3.1. Requerimientos del cliente | 41 |
| 3.2. Requerimientos técnicos..... | 47 |
| 3.3. Desarrollo de la primera matriz del QFD | 49 |
| 3.4. Definición de los componentes críticos | 54 |
| 3.5. Propuestas de diseño | 55 |
| 3.5.1. Generar conceptos alternativos de producto..... | 57 |
| 3.5.2. Seleccionar conceptos de producto | 58 |
| 3.5.3. Probar conceptos de producto..... | 60 |
| 3.5.4. Fijar especificaciones finales | 63 |
| 3.6. Elección de procesos de manufactura | 64 |
| 3.7. Identificación de factores clave | 66 |
| 3.8. Planeación de la manufactura del molino..... | 69 |
| 3.8.1. Generación de planos de manufactura | 71 |
| 3.8.2. Generación de despieces explosionados..... | 72 |
| 3.8.3. Diagramas de operaciones..... | 73 |
| 3.8.4. Diagrama de ensamble..... | 75 |
| 3.8.5. Parámetros para la manufactura del molino..... | 76 |

| | |
|---|-----|
| 3.9. Adquisición de materiales..... | 79 |
| CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS..... | 81 |
| 4.1. Análisis de elementos finitos: “ANSYS”..... | 82 |
| 4.2. Resultados de parámetros de manufactura..... | 91 |
| 4.3. Manufactura..... | 93 |
| CAPÍTULO V. CONCLUSIONES..... | 99 |
| 5.1. Discusiones..... | 100 |
| 5.2. Conclusiones..... | 101 |
| REFERENCIAS..... | 103 |
| APÉNDICE A..... | 109 |
| Entrevista..... | 109 |
| APÉNDICE B..... | 113 |
| Encuesta..... | 113 |
| APÉNDICE C..... | 118 |
| APÉNDICE D..... | 119 |
| APÉNDICE E..... | 121 |
| APÉNDICE F..... | 123 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Objetivos específicos y metas..... | 10 |
| Tabla 2: Áreas de la HoQ..... | 13 |
| Tabla 3: Comparación de máquinas similares. | 20 |
| Tabla 4: Actividades y recursos [22]..... | 22 |
| Tabla 5: Datos sin procesar cliente 1..... | 42 |
| Tabla 6: Datos sin procesar cliente 2..... | 43 |
| Tabla 7: Datos sin procesar cliente 3..... | 44 |
| Tabla 8: Respuestas de las encuestas. | 45 |
| Tabla 9: Necesidades del cliente ordenadas por importancia..... | 48 |
| Tabla 10: Lista de métricas para el MC. | 49 |
| Tabla 11: Simbología para las relaciones de la Casa de la Calidad. | 50 |
| Tabla 12: Simbología del techo de la Casa de la Calidad..... | 50 |
| Tabla 13: Resultados de la Casa de la Calidad..... | 52 |
| Tabla 14: Resultados de la segunda matriz QFD..... | 55 |
| Tabla 15: Resultados de la tercera matriz QFD – Procesos de manufactura..... | 66 |
| Tabla 16: Factores clave..... | 68 |
| Tabla 17: Piezas del MC..... | 69 |
| Tabla 18: Fórmulas para cálculo de parámetros para fresado. | 77 |
| Tabla 19: Electrodo para soldar acero 304. | 77 |
| Tabla 20: Fórmulas para cálculo de parámetros para soldadura. | 78 |
| Tabla 21: Fórmulas para cálculo de parámetros para corte por plasma..... | 78 |
| Tabla 22: Fórmulas para cálculo de parámetros para torneado..... | 79 |
| Tabla 23: Costos de maquinaria similar. | 79 |
| Tabla 24: Costos de materiales. | 80 |
| Tabla 25: Curva S-N [51]..... | 83 |
| Tabla 26: Ordenamiento de fuerzas en el eje. | 86 |
| Tabla 27: Parámetros de fresado..... | 91 |
| Tabla 28: Parámetros de soldadura. | 91 |
| Tabla 29: Parámetros de soldado por puntos. | 92 |
| Tabla 30: Parámetros de corte por plasma. | 92 |
| Tabla 31: Parámetros de libros de referencia. | 93 |
| Tabla 32: Parámetros de torneado. | 93 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Procesos de molienda tradicional. | 5 |
| Figura 2: Desarrollo de la QFD [14]. | 12 |
| Figura 3: Casa de Calidad (HoQ)..... | 14 |
| Figura 4: Molino tahona (egipcio) [20]..... | 18 |
| Figura 5: Picadora de forraje 1800 6.5 HP motor [24]..... | 21 |
| Figura 6: Molino martillos azteca n.6 motor Kohler Ukura Criba [23]. | 21 |
| Figura 7: Picadora de forraje grande con motor Kohler [22]. | 21 |
| Figura 8: Trituradora para nopal agave forrajes motor Kohler 6.5 HP [21]. | 21 |
| Figura 9: Deshebradora de agave mod. HA 2500 [18]. | 21 |
| Figura 10: Clasificación de los procesos de manufactura [27]..... | 23 |
| Figura 11: Proceso de torneado [27]..... | 24 |
| Figura 12: Proceso de taladrado [27]..... | 25 |
| Figura 13: Procesos de fresado [27]. | 26 |
| Figura 14: Partes de fresadora CNC [27]. | 27 |
| Figura 15: Proceso de cizallado [26]. | 28 |
| Figura 16: Terminología utilizada en el proceso de doblado [26]. | 28 |
| Figura 17: Fundamentos de soldadura con arco [27]..... | 29 |
| Figura 18: Proceso de soldadura por puntos [28]..... | 30 |
| Figura 19: Diagrama S-N – acero inoxidable 304 [45]..... | 38 |
| Figura 20: Necesidades del cliente..... | 47 |
| Figura 21: Primera matriz del QFD – Casa de calidad. | 53 |
| Figura 22: Segunda matriz QFD – Componentes Críticos. | 55 |
| Figura 23: Diagrama funcional de un MC – Caja negra..... | 58 |
| Figura 24: Diagrama funcional de un MC – Subfunciones..... | 58 |
| Figura 25: Combinación de conceptos..... | 59 |
| Figura 26: Matriz de selección de conceptos para el motor. | 59 |
| Figura 27: Matriz de selección de conceptos para la transmisión..... | 60 |
| Figura 28: Esquema de funcionalidad del MC..... | 61 |
| Figura 29: Agrupación de elementos en trozos..... | 62 |
| Figura 30: Disposición geométrica aproximada. | 63 |
| Figura 31: QFD para empresas de manufactura [16]..... | 64 |
| Figura 32: Tercera matriz QFD – Procesos de manufactura..... | 65 |
| Figura 33: Cuarta matriz QFD – Planeación de la producción..... | 67 |
| Figura 34: Piezas en 3D..... | 70 |
| Figura 35: Plano del chasis..... | 71 |
| Figura 36: Despiece explosionado de MC. | 72 |
| Figura 37: Vista a detalle..... | 72 |
| Figura 38: Explosivo del subensamble S1. | 73 |

Figura 39: Diagrama de operaciones.....74

Figura 40: Diagrama de ensamble.....75

Figura 41: Diagrama de ensamble – Subensamble.....76

Figura 42: Propiedades del acero 304 [50].....82

Figura 43: Geometría en el modelador (Design Modeler).....83

Figura 44: Posición de puntos para el análisis.....84

Figura 45: Condiciones de frontera (Mechanical).....84

Figura 46: Mallado de eje.....86

Figura 47: Solución del análisis.....87

Figura 48: Diagrama de momento.....88

Figura 49: Geometría en 3D (Design Modeler).....88

Figura 50: Solución del análisis 3D – Deformación.....89

Figura 51: Solución del análisis 3D – Vida del material.....90

Figura 52: Solución del análisis 3D – Factor de seguridad.....90

Figura 53: Manufactura del chasis.....94

Figura 54: Manufactura de poleas.....94

Figura 55: Manufactura de contracuchillas.....95

Figura 56: Rectificado de cuchillas en fresa convencional.....96

Figura 57: Manufactura de eje y discos.....97

Figura 58: Montaje de subensamble S1.....97

Figura 59: Molino de cuchillas manufacturado.....98

Estructura del proyecto de investigación

El presente proyecto de tesis se desarrolla en cinco capítulos, los cuales se describen a continuación:

Capítulo I. Generalidades

En este primer capítulo se da una introducción al contexto del trabajo a desarrollar y se establece el enfoque de la investigación. Así mismo en esta primera parte se define el planteamiento del problema, la justificación, la pertinencia y la relevancia del estudio. Además, se enuncia la hipótesis, el objetivo general y específicos, relacionando estos últimos con sus respectivas metas, finalmente se describe la metodología utilizada, los alcances y limitaciones del proyecto de investigación.

Capítulo II. Marco Teórico

Este capítulo está dedicado al análisis conceptual y teórico relacionado con la manufactura de un molino para agave. También se describe el proceso de molienda, la maquinaria empleada y otros aspectos de la fabricación. Además, se analiza el enfoque del QFD y de los procesos de manufactura involucrados en el desarrollo del molino.

Capítulo III. Desarrollo de la Metodología

El desarrollo de la metodología de este trabajo involucra la recopilación de los requerimientos del cliente hasta la manufactura del molino, esto con base a las cuatro matrices de la metodología del QFD. Así también se incorporan los planos, diagramas de procesos de manufactura y de ensamble del molino.

Capítulo IV. Resultados y manufactura

En el cuarto capítulo se muestran los resultados de las operaciones realizadas de los procesos de manufactura críticos, así mismo la manufactura de las piezas del molino.

Capítulo V. Conclusiones

Se exponen las conclusiones derivadas de la evaluación del cumplimiento de los objetivos planteados en el primer capítulo. Asimismo, se destacan las recomendaciones

para futuros trabajos de investigación y el posible desarrollo de mejoras en el sistema de fabricación, basado en las necesidades identificadas a lo largo del proyecto.

Apéndices

Finalmente, se incluyen apéndices que contienen las entrevistas y encuestas realizadas a clientes, así como tablas esenciales que recogen los parámetros de fabricación utilizados en el estudio.

Al final de todos los capítulos se presentan las referencias consultadas, complementando la base teórica y empírica de la investigación.

CAPÍTULO I GENERALIDADES

En el primer capítulo se presentan las generalidades del proyecto de tesis, sirviendo como base introductoria para el desarrollo del trabajo. Este capítulo abarca desde la introducción general al tema, hasta el establecimiento de las metas, hipótesis y el tipo de investigación, proporcionando así el marco necesario para comprender el enfoque y la dirección del estudio.

Se inicia con el planteamiento del problema, donde se identifica y describe la situación que da origen al proyecto, seguida por la justificación, en la que se argumenta la importancia y pertinencia de la investigación, así como su relevancia social, económica o técnica. A continuación, se expone la hipótesis que guiará el trabajo, y los objetivos, tanto generales como específicos, que definen lo que se busca alcanzar con el desarrollo del proyecto.

También se detallan las metas, que funcionan como indicadores de avance y cumplimiento, y se establece el tipo de investigación, lo que permite ubicar el enfoque metodológico adoptado. Así mismo, se incluye una descripción de la metodología, la cual será utilizada a lo largo del estudio para alcanzar los objetivos propuestos. Finalmente, se delimitan los límites y alcances, precisando el campo de aplicación y las restricciones del trabajo.

Este capítulo es fundamental, ya que proporciona el contexto y estructura necesarios para entender el desarrollo de los capítulos posteriores, donde se profundizará en el análisis técnico, la planeación de la manufactura y la ejecución del proyecto.

1.1. INTRODUCCIÓN

El mezcal es, sin duda, una bebida emblemática de México y especialmente asociada con Oaxaca. Su historia se remonta a las civilizaciones prehispánicas, donde era considerada una bebida sagrada y se utilizaba en ceremonias religiosas y rituales. Aunque su popularidad ha crecido en todo el mundo en los últimos años, sigue profundamente arraigada en la cultura mexicana, y Oaxaca es reconocida como la capital del mezcal, con una rica tradición de producción artesanal que se ha transmitido de generación en generación. La diversidad de sabores y aromas que ofrece el mezcal refleja la riqueza de las tradiciones y la biodiversidad de México, convirtiéndolo en un verdadero tesoro cultural [1].

El agave, miembro de la familia de las amarilidáceas, presenta hojas largas y fibrosas con forma lanceolada y una tonalidad verdeazulada. Su parte utilizada para la producción de mezcal es la piña o cabeza, que comprende el tallo y la base de las hojas. Según la Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016, que regula las especificaciones de las bebidas alcohólicas, el mezcal se define como “Bebida alcohólica destilada mexicana, 100 % de maguey o agave, obtenida por destilación de jugos fermentados con microorganismos espontáneos o cultivados, extraídos de cabezas maduras de magueyes o agaves cocidos” [2, 3].

Los estudios sobre la fabricación del mezcal han identificado cinco etapas clave en su proceso: horneado de la piña de agave, molienda del agave hidrolizado (un punto crítico debido a su influencia en el rendimiento del producto final), fermentación, destilación y acabado. Estos estudios han señalado diversos problemas técnicos en estas etapas que aún no han sido resueltas mediante tecnología adecuada para mejorar los rendimientos del producto [1,4].

Durante el proceso de molienda, surgen una variedad de desafíos que reducen la cantidad de mieles obtenidas de las piñas o corazones del maguey. La molienda puede ser clasificada en dos tipos: manual y asistida por tracción animal (Figura 1). La molienda manual implica el uso de mazos de madera y es común en áreas con bajos niveles de producción, siendo discontinua debido al esfuerzo físico agotador que requiere. Por otro

lado, la molienda que utiliza un molino de piedra con tracción animal es observada en lugares donde se produce mezcal de manera continua [5].



Figura 1: Procesos de molienda tradicional.

Nota. En la figura A) se muestra el proceso de la molienda del agave manual con mazo [6], y en la figura B) se muestra el proceso de la molienda asistida por tracción animal [7].

La necesidad de construir maquinaria en procesos industriales surge para abordar desafíos técnicos específicos y optimizar la eficiencia en la producción. Estas máquinas resuelven problemas y mejoran etapas del proceso, desde la manipulación de materias primas hasta la fabricación del producto final. Al mecanizar ciertas tareas, se puede aumentar la productividad y calidad del resultado final en comparación con los métodos tradicionales, en los cuales la fuerza de trabajo es humana o animal. Además, la construcción de máquinas especializadas puede reducir costos laborales y minimizar riesgos para los trabajadores al realizar tareas peligrosas o repetitivas [8].

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La cooperativa ubicada en la localidad de “El Camarón”, Yautepec, Oaxaca ha solicitado al Departamento de Promoción al Desarrollo de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, el apoyo para la manufactura de un molino de agave destinado a la producción de mezcal. La razón principal de esta petición radica en las necesidades variables de producción y el limitado presupuesto con el que cuentan. Solicitando un molino que se ajuste a sus requerimientos específicos y que sea una herramienta útil para su operación.

Este proyecto de tesis se centra en manufacturar un molino de cuchillas de agave para el proceso de molienda en la producción de mezcal, asegurando que cumpla con los requisitos específicos de la cooperativa. Esta fase es importante, ya que implica triturar las fibras de agave para su posterior fermentación.

Tradicionalmente el proceso de molienda, en la producción de mezcal, se realizaba con una tahona (molino de rueda de piedra volcánica de gran volumen y masa), el cual era impulsado con ayuda de animales equinos, para poder exprimir las fibras de agave y extraer la miel. En este proceso, se molía hasta el 55% del total de agave, así mismo es uno de los molinos que requiere mucho espacio y sufre pérdidas debido al escurrimiento y/o absorción de piedras durante el tiempo que permanecen en él [1].

Hoy en día este proceso se ha modernizado incorporando un motor mecánico o eléctrico en sustitución del arrastre animal, hasta llegar a la construcción de mecanismos para el apoyo en la producción eficiente del mezcal, esto para aumentar el nivel de competitividad de los productores.

Actualmente existen diferentes tipos de molinos, capaces de procesar desde 100 kg/h hasta 5 ton/h. La mayoría de estos son fijos, pesados y difíciles de acceder para su limpieza y mantenimiento. Por ello, se pretende diseñar un molino característico que cumpla con requerimientos propuestos por la cooperativa, tales como los siguientes:

- Ligereza.
- Motor eléctrico a 220 V.
- Compacto.
- Materiales resistentes.
- Cuchillas resistentes.
- Pinturas no tóxicas.
- Facilidad de limpieza.
- Seguridad.
- Facilidad de anclaje.
- Facilidad de ensamble/desensamble para transportación.

Lo que le permitiría un fácil funcionamiento en sus instalaciones, así como el uso en sus producciones intermitentes.

Por lo tanto, al existir modelos comerciales de molinos con configuraciones más estandarizadas, estos no cumplen con los requerimientos que la cooperativa necesita, siendo el caso de un modelo innecesario para el usuario, es por ello por lo que nace la necesidad de manufacturar un molino de cuchillas exclusivo que esté ajustado a sus necesidades de producción y de instalaciones.

Una de las especificaciones principales del molino propuestas por la cooperativa es el uso de materiales inoxidables, dado a la acidez de las mieles del agave, al igual que normativas incitan al uso de aceros inoxidables para maquinaria utilizada en procesos alimenticios NOM-251-SSA1-2009 [9].

Formulación de la pregunta de investigación:

¿Cómo diseñar y manufacturar un molino de cuchillas para agave que cumpla con los requisitos específicos solicitados por la cooperativa de "El Camarón", Yautepec, Oaxaca, garantizando su adaptabilidad a las condiciones de producción de mezcal y limitaciones presupuestarias?

1.3. JUSTIFICACIÓN

En la presente investigación se propone la manufactura de un molino de cuchillas para agave, el cual se empleará en la producción de mezcal, específicamente en el proceso de molienda, donde se necesita extraer la mayor cantidad posible de jugo de agave, ya que en esta etapa es donde se generan la mayoría de sus desperdicios.

Oaxaca es uno de los estados con mayor producción de mezcal, por denominación de origen. Por esta razón, muchas de las cooperativas buscan disminuir sus tiempos de producción y áreas de trabajo, ya que estas son donde se reflejan principalmente los altos costos de producción.

Por consiguiente, el propósito de fabricar este molino de cuchillas es otorgar una ventaja competitiva a la cooperativa ubicada en la localidad de "El Camarón", Yautepec, Oaxaca, para poder competir a nivel regional con su producción de mezcal, lo que beneficiará a las familias originarias de la comunidad.

1.3.1. Pertinencia y relevancia

La pertinencia y relevancia del proyecto propuesto radica en varios aspectos:

- Optimización del proceso de producción: La fabricación del molino para agave tiene como objetivo mejorar el proceso de molienda en la producción de mezcal, permitiendo extraer la mayor cantidad posible de jugo de agave. Esto puede conducir a una mayor eficiencia en la producción y a una reducción de los desperdicios, lo que a su vez podría disminuir los costos operativos.
- Competitividad regional: Oaxaca es uno de los principales productores de mezcal, y muchas cooperativas buscan mejorar su competitividad regional. Al proporcionar a la cooperativa de "El Camarón" un equipo eficiente y moderno, se le permite competir en igualdad de condiciones con otras productoras de la región, lo que puede resultar en un aumento de las ventas y de la participación en el mercado.
- Beneficios económicos para la comunidad: La mejora de la competitividad de la cooperativa puede tener un impacto positivo en las familias originarias de la comunidad de "El Camarón", ya que podría generar empleo y aumentar los ingresos locales. Esto podría contribuir al desarrollo económico y social de la comunidad, mejorando la calidad de vida de sus habitantes.

En resumen, el proyecto no solo busca mejorar la eficiencia y competitividad de la cooperativa en la producción de mezcal, sino que también tiene el potencial de generar beneficios económicos tangibles para la comunidad local.

1.4. HIPÓTESIS

Mediante la metodología QFD se planea fabricar un molino de cuchillas de 6.5 HP de acuerdo con las necesidades planteadas.

1.5. OBJETIVOS

Esta sección presenta los objetivos que guiarán el desarrollo de la investigación. En primer lugar, se define el objetivo general, que establece el propósito central del estudio y el resultado esperado. Posteriormente, se enuncian los objetivos específicos, enfocados en

aspectos clave del problema planteado, y orientan cada etapa del proceso de investigación para asegurar la coherencia y el cumplimiento de las metas propuestas.

1.5.1. Objetivo general

Manufacturar un molino de cuchillas para el proceso de molienda de agave utilizando la metodología QFD.

1.5.2. Objetivos específicos

- ✓ Investigar molinos comerciales para detectar las ventajas y desventajas.
- ✓ Desarrollar la primera matriz (casa de calidad) para priorizar las necesidades del cliente.
- ✓ Identificar los componentes principales del molino de cuchillas para definir valores objetivo.
- ✓ Definir los procesos críticos para establecer los parámetros de la manufactura del molino de cuchillas.
- ✓ Manufacturar el molino de cuchillas que cumpla con los requerimientos de la cooperativa.
- ✓ Validar la funcionalidad del molino de cuchillas utilizando herramientas de elementos finitos.

1.6. METAS

Para llevar a cabo la fabricación del molino de cuchillas para agave en el proceso de molienda en la producción de mezcal, es necesario desglosar el objetivo general en una serie de objetivos específicos que guíen el desarrollo del proyecto de manera estructurada. Estos objetivos buscan abordar de manera detallada las distintas fases del diseño, fabricación y evaluación del equipo.

Cada objetivo específico permite cubrir aspectos clave como el diseño técnico, la selección de materiales, el proceso de fabricación y las pruebas de funcionamiento. De este modo, se asegura que todas las etapas críticas del proyecto sean consideradas y ejecutadas de manera eficiente.

Así mismo, se establecen metas cuantificables (Tabla 1), que servirán como indicadores de éxito para evaluar el cumplimiento de cada uno de los objetivos propuestos. Estas metas permitirán monitorear el avance del proyecto y garantizar que el molino cumpla con los estándares de calidad y rendimiento necesarios para el proceso de producción de mezcal.

Tabla 1: Objetivos específicos y metas.

| Metas | Objetivo específico |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Elaborar una tabla comparativa de los molinos comerciales. ✓ Generar la primera matriz (casa de calidad). ✓ Analizar competencia. ✓ Obtener valores meta. ✓ Ponderar requerimientos. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Investigar molinos comerciales para detectar las ventajas y desventajas. ✓ Desarrollar la primera matriz (casa de calidad) para priorizar las necesidades del cliente. |
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Generar el diseño del producto. ✓ Establecer las características críticas de los componentes. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Identificar los componentes principales del molino de cuchillas para definir valores objetivo. |
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Identificar procesos críticos. ✓ Definir requerimientos del equipo ✓ Establecer los parámetros del proceso. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Definir los procesos críticos para establecer los parámetros de la manufactura del molino de cuchillas. |
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Hacer el producto de manera física. ✓ Determinar características críticas del proceso. ✓ Establecer parámetros y métodos de control. ✓ Establecer métodos de inspección. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Manufacturar el molino de cuchillas que cumpla con los requerimientos de la cooperativa. |

| Metas | Objetivo específico |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Realizar análisis de elementos finitos. ✓ Realizar pruebas de funcionamiento. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Validar la funcionalidad del molino de cuchillas utilizando herramientas de elementos finitos. |

1.7. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Para determinar los métodos a utilizar en el proceso de investigación, es importante definir el tipo o alcance de la investigación que se va a llevar a cabo [10]. Existen diversos tratados sobre las tipologías de investigación. Las controversias para aceptar las diferentes tipologías sugieren situaciones confusas en estilos, formas, enfoques y modalidades [10–12]. Considerando que, por lo general, toda clasificación presenta cierto grado de ambigüedad, es importante tener en cuenta que en realidad no existen tipos puros de investigación; la clasificación en un tipo específico no excluye la posibilidad de que también presente ciertos rasgos de otro tipo [10]. Por lo tanto, este trabajo se clasifica como investigación aplicada, según el criterio de su finalidad.

Según Bunge [11], este tipo de investigación se caracteriza por elegir el problema a estudiar con un objetivo final definido, y al estar relacionada con el desarrollo, su propósito principal es resolver problemas prácticos inmediatos. En este caso particular, el objetivo es desarrollar un molino de cuchillas de agave destinado a la producción de mezcal.

1.8. METODOLOGÍA

El modelo del QFD es una herramienta de planificación que convierte las necesidades y deseos del cliente en requisitos de diseño para servicios o productos, con el objetivo de traducir la Voz del Cliente (VoC) en características de calidad para lograr la satisfacción total del cliente. Este enfoque consiste en transformar "Qué desean los clientes" en "Cómo se puede satisfacer esa necesidad", aplicando este proceso a lo largo de toda la cadena de clientes externos e internos. El modelo QFD proporciona el mecanismo para traducir las necesidades (Qué) en características de diseño (Cómo), junto con su valoración relativa [14].

El modelo más utilizado de QFD es una metodología estructurada y lógica que incluye un conjunto de matrices. Estas matrices permiten identificar las necesidades del cliente, según lo mencionado por Yepes [15], con el objetivo de ofrecer servicios competitivos y bien planificados que aseguren la satisfacción y la demanda del cliente, teniendo en cuenta sus preferencias y necesidades.

El concepto básico de la metodología QFD es trasladar los requerimientos del usuario hasta los requerimientos de producción, utilizando una serie de fases y matrices que facilitan este proceso de traducción y alineación entre las necesidades del cliente y las capacidades de producción [16], como se muestra en la Figura 2.

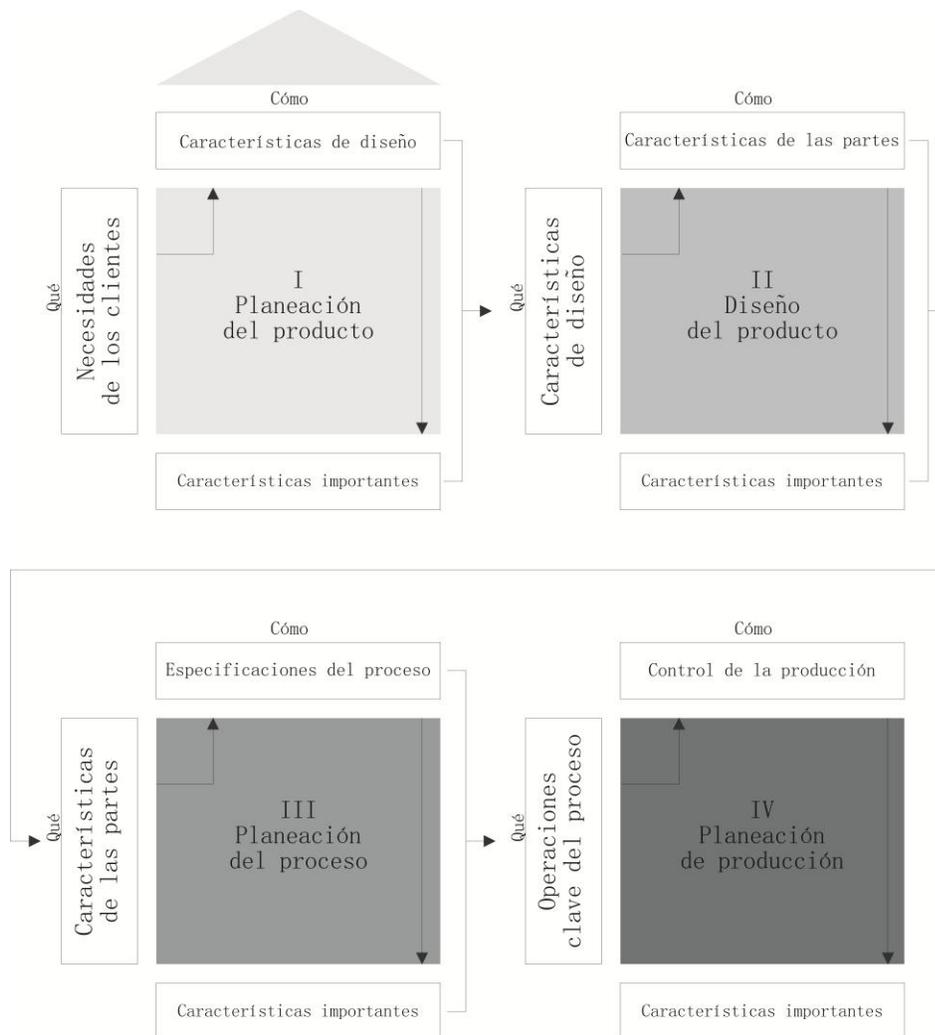


Figura 2: Desarrollo de la QFD [14].

Las fases del QFD se componen de la siguiente manera [17]:

➤ Fase 1: Matriz de la planeación del producto

Esta primera fase también es llamada Casa de la Calidad (*House of Quality*, por sus siglas en inglés HoQ), la cual es la más importante, debido a la cantidad de información que se documenta y analiza, además de ser la base para las siguientes fases.

El desarrollo de la matriz QFD tiene objetivos claros:

- ✓ Identificar los requisitos del cliente.
- ✓ Detectar oportunidades competitivas.
- ✓ Establecer requisitos y especificaciones de diseño.
- ✓ Definir requisitos para futuros estudios.

La HoQ, al ser una parte esencial de la metodología QFD, abarca ocho áreas fundamentales (Tabla 2). Estas áreas se organizan en cuatro vectores que forman los límites básicos de la casa. Las relaciones entre estos vectores generan cuatro matrices fundamentales que orientan el proceso de traducción de las necesidades del cliente a los requisitos de diseño y producción (Figura 3).

Tabla 2: Áreas de la HoQ.

| Nomenclatura | Área |
|--------------|------------------------------------|
| RC | Requerimientos del Cliente/Usuario |
| ET | Evaluación Técnica |
| RD | Requerimientos de Diseño |
| FE | Factores de Evaluación |
| MC | Matriz de Correlación |
| MS | Matriz de Sensibilidad |
| ME | Matriz de Evaluación |
| MP | Matriz de Puntuación |

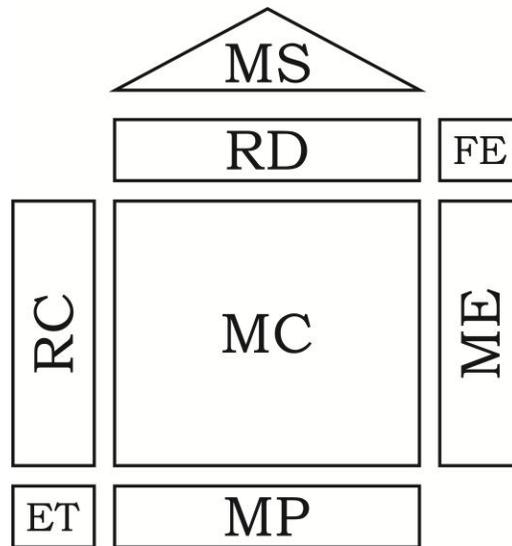


Figura 3: Casa de Calidad (HoQ).

➤ Fase 2: Diseño del producto

Los objetivos de esta fase incluyen seleccionar la mejor idea de diseño, identificar las partes críticas del producto, definir las características clave de estas partes críticas, y establecer los ítems necesarios para desarrollos posteriores.

➤ Fase 3: Planeación del Proceso

Los propósitos de la fase de planificación de procesos son determinar la mejor combinación entre el diseño y los procesos, identificar los parámetros críticos de los procesos y establecer los valores objetivo para dichos parámetros.

➤ Fase 4: Planeación de Producción

En la fase de control de procesos, se establecen indicadores de desempeño para monitorear el proceso de producción, evaluar el mantenimiento y medir las habilidades de los operadores.

1.9. LÍMITES Y ALCANCES

El alcance de este tema de investigación estará centrado en el proceso de manufactura del molino de cuchillas para agave que cumpla con los requerimientos de la cooperativa, aplicando la metodología QFD para determinar el diseño óptimo a fabricar.

Así mismo, este proyecto de investigación presenta las siguientes limitaciones:

- ✓ Inversión inicial.
- ✓ Requerimientos.
- ✓ Espacio físico en donde se instalará el molino.
- ✓ Potencia del motor del molino.
- ✓ Materiales.

CAPÍTULO

II

MARCO TEÓRICO

El marco teórico es una sección esencial de la investigación, ya que proporciona las bases conceptuales y metodológicas que sustentan el desarrollo del proyecto. En este trabajo, se busca fabricar un molino de cuchillas para agave que optimice el proceso de molienda en la producción de mezcal, un campo donde convergen aspectos técnicos, mecánicos y culturales.

Para abordar de manera integral el diseño y fabricación de dicho equipo, es fundamental explorar y comprender las teorías, principios y antecedentes relacionados con ingeniería, el procesamiento de agave, y los métodos actuales de producción de mezcal.

En primer lugar, se analizarán los fundamentos de la molienda en el contexto del procesamiento de agave, explicando su papel crucial en la extracción de azúcares fermentables para la posterior destilación.

Además, se explorarán los procesos de manufactura que se tienen dentro de la universidad y cuales podrían aplicarse en la fabricación del molino

Finalmente, se presentará la metodología QFD, explicando las cuatro matrices que conlleva, así como herramientas a usar durante la elaboración del trabajo de investigación.

Este marco teórico no solo permitirá entender los desafíos y necesidades del proceso de producción de mezcal, sino también sustentar las decisiones técnicas y metodológicas adoptadas a lo largo del proyecto.

2.1. PRODUCCIÓN DE MEZCAL

La producción del mezcal implica cinco etapas principales [4, 17, 18]:

1. **Cocimiento:** El proceso de cocimiento del maguey puede llevarse a cabo de diversas maneras, ya sea en hornos de subsuelo, hornos verticales de mampostería, hidrolizadores o autoclaves. Este paso es fundamental, ya que permite la hidrólisis de los almidones presentes en el maguey, convirtiéndolos en glucosa y fructuosa. Una vez cocidas, las piñas se conocen como mezcal.
2. **Molienda:** La molienda se lleva a cabo de varias formas, como el macerado a mano, la trituración en una tahona (un molino que funciona con la fuerza de caballos o mulas), o mediante una desgarradora, complementada con una prensa. Al finalizar este proceso, se obtiene el mosto y el bagazo. El mosto se deposita o bombea a las tinajas de fermentación.
3. **Fermentación:** La fermentación tiene lugar en tinajas de madera, pilas revestidas de madera o tanques de acero inoxidable. Durante este proceso, que suele durar de 1 a 3 días, los azúcares presentes en el mosto se convierten en alcohol. El líquido fermentado se conoce como mosto muerto y tiene un contenido alcohólico de aproximadamente entre 6 y 7%.
4. **Destilación:** La destilación se realiza utilizando diversas tecnologías, como ollas de barro superpuestas, alambiques de cobre o alambiques de acero inoxidable. Durante esta fase, se separa el alcohol del resto de los componentes aprovechando sus diferentes puntos de ebullición. El producto obtenido se denomina mezcal de primera destilación.
5. **Acabado:** El acabado del mezcal es el proceso final en la producción, donde se busca darle las características sensoriales que definen la calidad del producto. Esta fase incluye la mezcla de destilados de diferentes grados, su reposo en barricas o tanques, y en algunos casos, la adición de ingredientes como hierbas o frutas, según las preferencias del productor. El objetivo es estabilizar el sabor, aumentar la complejidad de los aromas y preparar el mezcal para su embotellado y comercialización.

2.1.1. Proceso de molienda

Tradicionalmente, el proceso de molienda es realizado con molino chileno o tahona, el cual está compuesto por una piedra amonedada, usualmente de cantera o cemento, con un

peso que oscila entre 500 y 3000 kg, pudiendo tener una superficie dentada o lisa en la zona de contacto (Figura 4). En el centro de la piedra, atraviesa un tubo metálico o una barra de madera, que la conecta a un eje vertical de hormigón o madera, permitiendo su movimiento de traslación. En su circunferencia, sobre la superficie del suelo, se encuentra un borde de piedra o cemento que evita la salida de las mieles y del bagazo. La energía necesaria para el funcionamiento del molino puede provenir de un motor, un tractor o mediante tracción animal. La rueda del molino experimenta movimientos de giro, torsión y traslación alrededor del eje central; las piñas de maguey cocido se fragmentan y se colocan en la trayectoria de la piedra para ser prensadas y exprimidas, aprovechando los movimientos de giro y traslación. La torsión contribuye a aflojar y desgarrar las fibras de la piña, facilitando la salida de las mieles. Además, la superficie de la cama del molino presenta una ligera inclinación y pequeños canales para dirigir las mieles obtenidas hacia las tinas de fermentación [4].



Figura 4: Molino tahona (egipcio) [20].

Existen cuatro principios para abrir mecánicamente las fibras de material biológico, según Durán y Pulido [4]: presión, golpe, choque y corte, los cuales se aplican mediante los fenómenos de romper, moler y cortar. En la molienda de la masa orgánica del maguey, la fricción y la resistencia al corte son aspectos importantes. Desde una perspectiva energética, las máquinas que operan mediante el principio de corte por deslizamiento (utilizando

cuchillos) reducen más efectivamente el tamaño del material (piña de maguey); sin embargo, la cantidad de fibras abiertas es menor en comparación con otros principios [2].

2.1.2. Maquinaria similar

Al diseñar y manufacturar un molino de cuchillas específicamente para la molienda de agave, es importante considerar otras maquinarias similares que se utilizan en procesos industriales relacionados. Estas maquinarias pueden incluir trituradoras y deshebradoras, cada una con sus propias características y aplicaciones específicas (Tabla 3). Al analizar estas máquinas, podemos obtener referencias valiosas para optimizar el diseño y funcionamiento del molino de cuchillas, asegurando su funcionalidad en el proceso de molienda del agave.

Para los casos analizados, la mayoría de las fuentes de potencia que utilizan los molinos son motores a gasolina, aun así, fuese el caso que estos pudieran ser eléctricos, los materiales que se usan son aceros comerciales como lo especifican en sus fichas técnicas, aceros al carbón, lo que hace que la vida útil disminuya, por otra parte, los molinos mostrados son voluminosos, a lo cual la cooperativa tiene como restricción.

Por lo tanto, así como estos molinos no cumplen con los requerimientos iniciales de la cooperativa podemos descartarlos como posibles soluciones a sus necesidades, aunado, podemos analizar sus diseños, para así evaluar cuál de ellos pudiera ser tomado como modelo para hacer el molino solicitado.

Tabla 3: Comparación de máquinas similares.

| Modelo | Deshebradora de agave mod. HA 2500 (Figura 5) [21] | Trituradora para nopal agave forrajes motor Kohler 6.5 HP (Figura 6) [22] | Picadora de forraje grande con motor Kohler (Figura 7) [23] | Molino martillos azteca N.6 motor Kohler Ukura criba (Figura 8) [24] | Picadora de forraje 1800 6.5 HP Motor (Figura 9) [25] |
|-----------------------|--|--|---|--|---|
| Tipo | De cuchillas | De cuchillas | De cuchillas | De martillos | De martillos |
| Motor | Gasolina | Gasolina | Gasolina y eléctrico | Gasolina | Gasolina |
| Potencia (HP) | 13 | 6.5 | - | 8 | 6.5 |
| Materiales | Acero comercial | Acero comercial | Acero comercial | Acero comercial | Acero comercial |
| Otras características | 18 cuchillas 1 contracuchilla Embrague de motor Guarda para motor Bandas en medida "B" Llantas de 13" | 3 cuchillas 18 desgarradoras Tolva de alimentación amplia Llantas de 8" | 6 cuchillas Soporta motor eléctrico y de gasolina de 2 HP a 14 HP, no incluido Llantas de 13" | Con encostador Forraje seco Motor no incluido Llantas de 8" | 2 cuchillas Cuchilla móvil 6 martillos escalonados Criba de 3/4" |

| | | | | | |
|------------|---|---|---|---|--|
| Modelo | Deshebradora de agave mod. HA 2500 (Figura 5) [21] | Trituradora para nopal agave forrajeador Kohler 6.5 HP motor (Figura 6) [22] | Picadora de forraje grande con motor Kohler (Figura 7) [23] | Molino martillos azteca N.6 motor Kohler Ukura criba (Figura 8) [24] | Picadora de forraje 1800 6.5 HP Motor (Figura 9) [25] |
| Costo (MN) | \$59,100.00 | \$33,900.00 | \$30,500.00 | \$27,500.00 | \$10,864.00 |
| Maquinaria |  <p>Figura 9: Deshebradora de agave mod. HA 2500 [18].</p> |  <p>Figura 8: Trituradora para nopal agave forrajeador Kohler 6.5 HP [21].</p> |  <p>Figura 7: Picadora de forraje grande con motor Kohler [22].</p> |  <p>Figura 6: Molino martillos azteca n.6 motor Kohler Ukura Criba [23].</p> |  <p>Figura 5: Picadora de forraje 1800 6.5 HP motor [24].</p> |

2.2. MANUFACTURA

La manufactura, en un sentido completo, se refiere al proceso de transformar materias primas en productos acabados. Además, abarca las actividades en las que los productos fabricados se utilizan para elaborar otros productos [26].

La palabra "manufactura" proviene del latín manu factus, que significa "hecho a mano", y apareció por primera vez en 1567. "Manufacturar" se registró en 1683. Por otro lado, la palabra "producto" significa "algo que se produce" y, junto con "producción", comenzó a usarse en algún momento del siglo XV. Aunque los términos "manufacturar" y "producción" se emplean con frecuencia de manera indistinta, tienen diferencias en su contexto [27].

La manufactura puede producir tanto productos discretos como continuos. Los clavos, engranajes, bolas para rodamientos, latas para bebidas y monobloques para motores son ejemplos de productos discretos, aunque se producen en grandes volúmenes y capacidades de producción. En cambio, el alambre, las láminas metálicas, los tubos y las tuberías de plástico son productos continuos que, al cortarse en piezas individuales, se convierten en productos discretos [26].

En general, la manufactura es una actividad compleja que abarca una amplia variedad de recursos y actividades, como se puede apreciar en la Tabla 4:

Tabla 4: Actividades y recursos [22].

| Actividades | Recursos |
|--|---|
| Diseño del producto. Planeación del proceso. Compra. Manufactura. Control de la producción. Servicios de soporte. Mercadeo. Ventas. Embarque. Servicios al cliente. | Maquinaria y herramienta. Materiales |

2.2.1. Procesos de manufactura

En la literatura se mencionan diversas clasificaciones de los procesos de manufactura, Kalpajian y Schmid [26] los clasifican en varias categorías principales:

- Fundición, que implica moldear materiales en estado fundido; conformado, donde se aplica fuerza para deformar el material y darle forma;
- Mecanizado, que consiste en la remoción de material para obtener la geometría deseada; unión, que incluye métodos como soldadura y adhesivos para ensamblar piezas;
- Acabado, destinado a mejorar las propiedades superficiales o funcionales de las piezas;
- Fabricación aditiva, que construye componentes capa por capa a partir de un modelo digital;
- Procesos especiales, que abarcan técnicas avanzadas como electroerosión o corte por láser; y
- Tratamiento de materiales, que modifica las propiedades del material para optimizar su rendimiento.

Esta clasificación ofrece una visión integral de los métodos utilizados en la industria para transformar materias primas en productos terminados.

Por otra parte, Groover [27] divide estos procesos en categorías según el tipo de material trabajado y la forma en que se manipulan. Esta clasificación incluye procesos de conformado, separación, unión y acabado, cada uno con características y aplicaciones específicas (Figura 10).

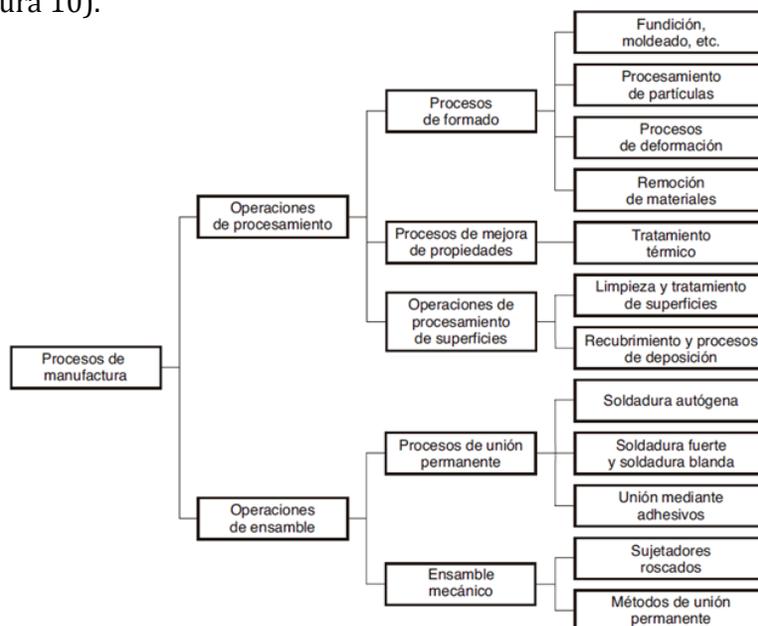


Figura 10: Clasificación de los procesos de manufactura [27].

A continuación, se describen los procesos utilizados en la fabricación del MC, esto tomando en cuenta la maquinaria, equipo y herramientas que se encuentren dentro de las instalaciones de la universidad.

❖ Procesos de formado

• Torneado

El torneado es uno de los procesos de mecanizado más fundamentales y ampliamente utilizados en la industria manufacturera (Figura 11). Groover [27] menciona que este proceso se lleva a cabo en una máquina llamada torno, donde la pieza de trabajo gira sobre su eje mientras una herramienta de corte de un solo punto se desplaza linealmente para remover material. El torneado permite la fabricación de piezas cilíndricas, cónicas o de geometría compleja, como ejes, tornillos y discos. Entre sus ventajas destacan la alta precisión dimensional, la capacidad de trabajar con una amplia variedad de materiales (metales, plásticos y compuestos) y la eficiencia en la producción de piezas simétricas. Además, el torneado puede realizarse en operaciones de desbaste (para remover grandes cantidades de material) o acabado (para lograr tolerancias estrechas y superficies de alta calidad). Este proceso es esencial en la manufactura moderna, ya que combina versatilidad, productividad y calidad en la producción de componentes mecánicos.

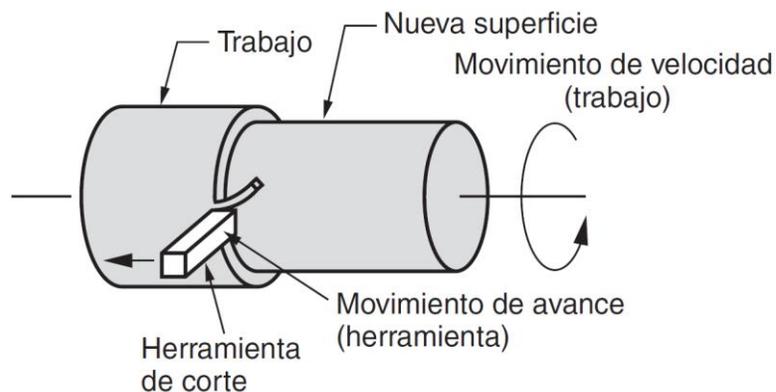


Figura 11: Proceso de torneado [27].

- Taladrado

El taladrado es un proceso de mecanizado esencial en la manufactura, utilizado para crear agujeros cilíndricos en piezas de trabajo. Este proceso se realiza mediante una herramienta de corte llamada broca, que gira a altas velocidades mientras se aplica una fuerza axial para penetrar el material. El taladrado es ampliamente utilizado en la industria debido a su versatilidad, ya que puede aplicarse a una gran variedad de materiales, como metales, plásticos y compuestos. Además, es un proceso clave en operaciones de ensamblaje, donde los agujeros sirven para alojar tornillos, pernos u otros elementos de fijación (Figura 12). El taladrado puede realizarse en máquinas específicas, como taladradoras de columna, o integrado en centros de mecanizado CNC para mayor precisión y automatización. Aunque es un proceso aparentemente simple, factores como la selección de la broca, la velocidad de rotación y la lubricación son críticos para garantizar la calidad del agujero, evitando problemas como desgaste prematuro de la herramienta o deformación del material. En conjunto, el taladrado es una operación fundamental que combina eficiencia y precisión en la fabricación de componentes mecánicos [27].

Los agujeros taladrados pueden ser agujeros completos o agujeros ciegos (Figura 12).

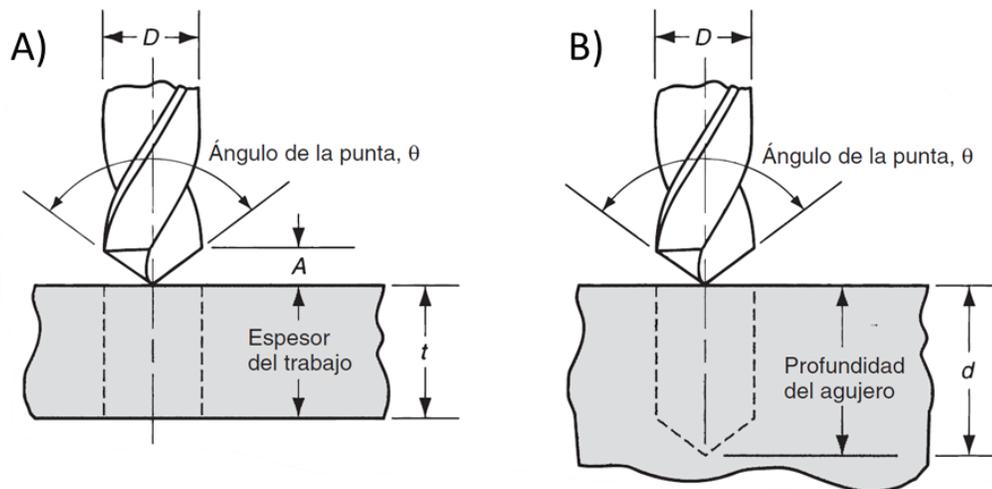


Figura 12: Proceso de taladrado [27].

Nota. A) agujero pasado y B) agujero ciego

- Fresado

El fresado es un proceso de maquinado en el que una pieza de trabajo pasa frente a una herramienta cilíndrica rotatoria con múltiples filos cortantes (Figura 13). A diferencia del taladrado, donde la herramienta avanza paralelamente a su eje de rotación, en el fresado el eje de la herramienta es perpendicular a la dirección de avance. La herramienta utilizada se llama fresa, y la máquina que realiza este proceso es la fresadora. El fresado crea superficies planas, aunque también puede producir otras formas dependiendo de la trayectoria de la herramienta. Es una operación de corte interrumpido, donde los dientes de la fresa entran y salen del material en cada rotación, lo que genera impactos y choques térmicos que requieren herramientas diseñadas para resistir estas condiciones [27].

La operación de fresado se divide en dos tipos básicos Figura 13:

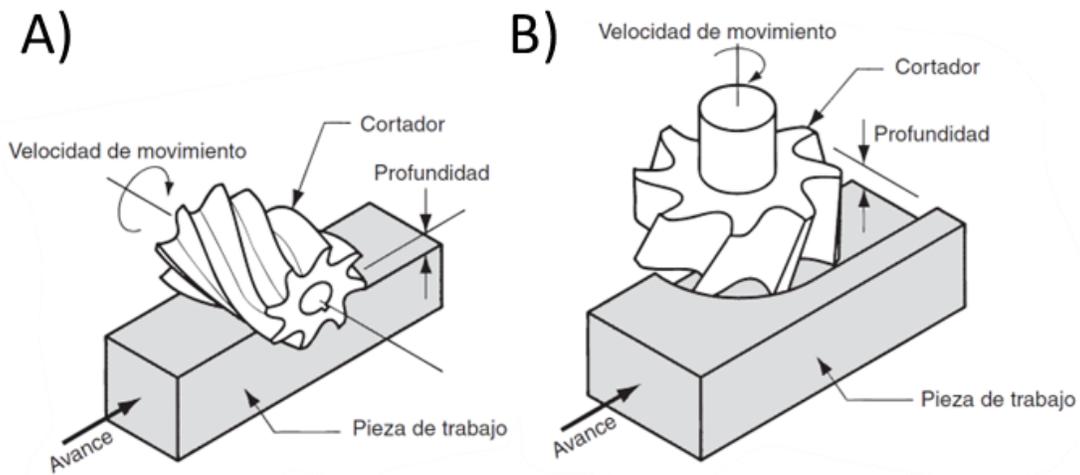


Figura 13: Procesos de fresado [27].

Nota. A) fresado periférico y B) fresado frontal.

- Fresado CNC

El fresado CNC, es un proceso de mecanizado en el cual se remueve material de una pieza usando una fresa controlada automáticamente por una computadora. A diferencia del fresado convencional, donde el operador guía manualmente la herramienta, el fresado CNC ofrece alta precisión, repetibilidad y la posibilidad de realizar geometrías complejas con múltiples ejes de movimiento [27].

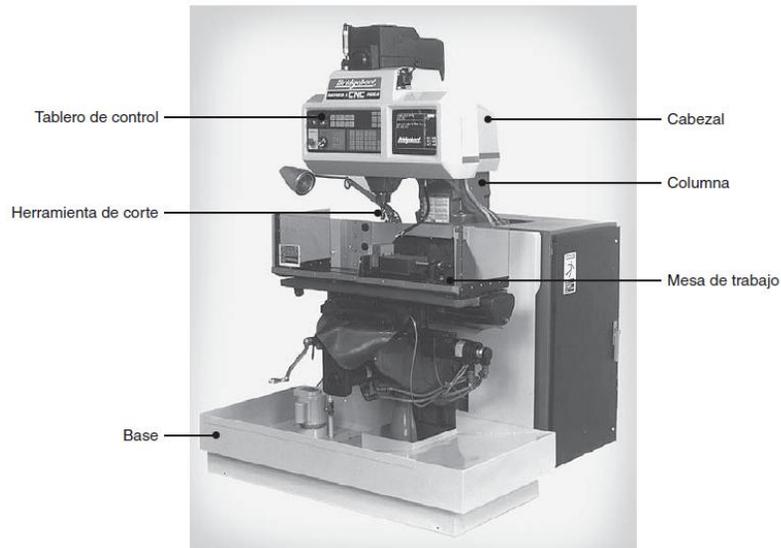


Figura 14: Partes de fresadora CNC [27].

- Cizallado

El cizallado es un proceso de corte mecánico utilizado principalmente en el trabajo de láminas metálicas, mediante el cual se separa el material aplicando esfuerzos de corte entre un punzón y una matriz con bordes afilados. Este proceso forma parte del grupo de procesos de formado de lámina metálica [26].

Durante el cizallado, el material experimenta inicialmente deformación elástica, seguida de fluencia plástica localizada hasta que ocurre la fractura. El corte no remueve material en forma de viruta y se caracteriza por una superficie con dos regiones típicas: una zona pulida (de corte limpio) y una zona rugosa (de fractura) [26].

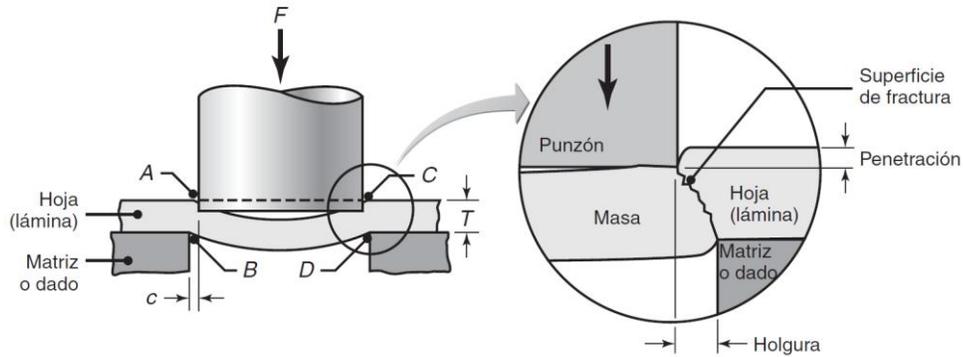


Figura 15: Proceso de cizallado [26].

- Dobladora

El doblado es un proceso de deformación plástica utilizado para dar forma a láminas metálicas, generando una curvatura permanente sin pérdida significativa de material [26].

Durante el doblado, el material es deformado al aplicar un momento flexionante, de modo que una parte de la lámina queda bajo tensión (cara externa) y otra bajo compresión (cara interna). Existe una fibra neutra donde no hay deformación [26].

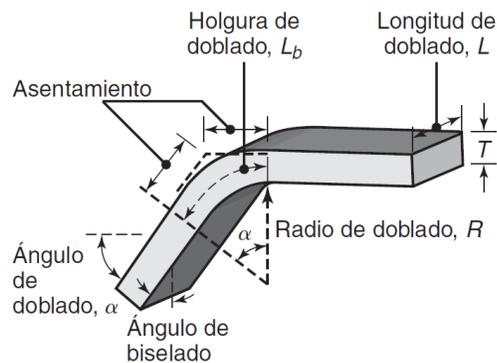


Figura 16: Terminología utilizada en el proceso de doblado [26].

- ❖ Procesos de unión permanente

- Soldadura SMAW

La soldadura de arco con electrodo de aporte, también conocida como soldadura por arco manual con electrodo revestido (*Shielded Metal Arc Welding, SMAW*), es un proceso de unión ampliamente utilizado en la industria. Este método se basa en la generación de un arco

eléctrico entre un electrodo revestido y la pieza de trabajo, lo que produce suficiente calor para fundir tanto el electrodo como el material base (Figura 17). El electrodo, que actúa como material de aporte, está cubierto por un revestimiento que cumple varias funciones clave: estabiliza el arco, genera gases protectores para evitar la contaminación del baño de fusión y forma una capa de escoria que protege el metal solidificado [27].

Groover [27] destaca que este proceso es especialmente valorado por su portabilidad y versatilidad, ya que no requiere equipos complejos y puede utilizarse en una amplia gama de materiales, como aceros al carbono, aceros inoxidables y aleaciones de níquel.

Sus variables clave a regular durante la aplicación son:

- Amperaje de trabajo
- Longitud de arco
- Velocidad de avance
- Angulo de electrodo
- Preparación de la junta
- Condiciones ambientales
- Técnica del soldador

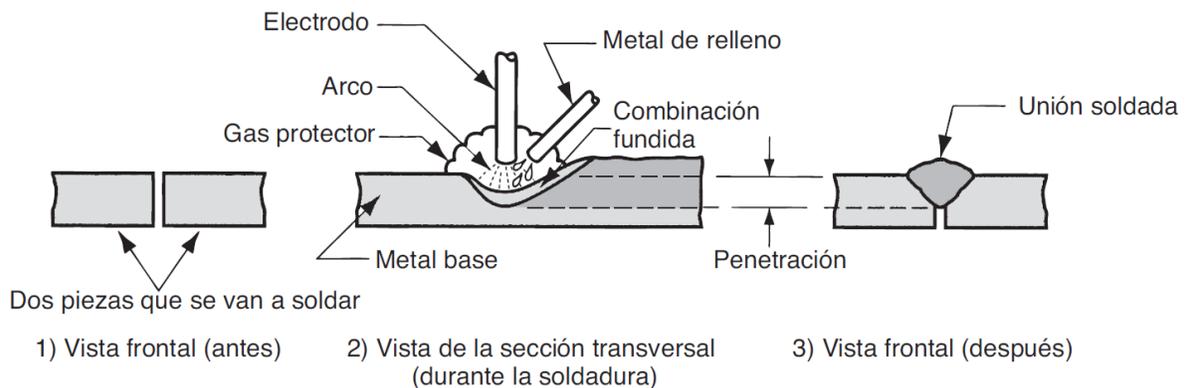


Figura 17: Fundamentos de soldadura con arco [27].

- Soldadura por RSW

La soldadura por puntos (*Resistance Spot Welding*, RSW) es un proceso de soldadura por resistencia en el cual se unen dos o más láminas de metal mediante la aplicación de calor y presión en puntos específicos (Figura 18). Este método se basa en el principio de la resistencia eléctrica: cuando una corriente eléctrica de alta intensidad pasa a través de las

piezas de trabajo, la resistencia al flujo de corriente genera calor en la interfaz entre los materiales. Este calor, combinado con la presión aplicada por los electrodos, funde el metal y forma una *nugget* (pequeña masa fundida) que, al solidificarse, crea una unión sólida [27].

Sus variables clave a regular durante la aplicación son:

- Corriente eléctrica
- Tiempo de soldadura
- Presión de electrodos
- Forma de electrodos
- Espesor de material
- Proceso presoldado

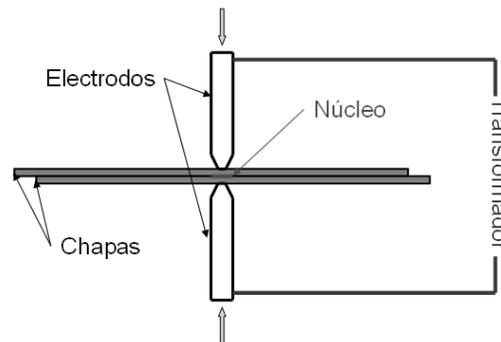


Figura 18: Proceso de soldadura por puntos [28].

❖ Otros procesos

- Corte con plasma

El corte con plasma es un proceso térmico de corte que utiliza un arco de plasma gas ionizado a alta temperatura para fundir y expulsar el material del área de corte. El plasma se genera mediante un arco eléctrico que pasa a través de un gas (generalmente aire, nitrógeno o argón) forzado a través de una tobera.

- Aserrado/Corte con sierra cinta

El aserrado es un proceso de corte con desprendimiento de viruta, utilizado para separar materiales mediante una herramienta dentada (serrucho, segueta o sierra). Aunque históricamente se considera un proceso básico, sigue siendo esencial para operaciones de corte inicial en piezas de trabajo.

En el contexto industrial, el aserrado se realiza con máquinas automáticas que utilizan sierras de cinta (*band saw*), alternativas (*reciprocating saw*) o circulares (*circular saw*), dependiendo del tipo de material, volumen de producción y precisión requerida.

- Corte con esmeril

El corte con esmeril es un proceso abrasivo en el cual se utiliza un disco de esmeril (generalmente de óxido de aluminio o carburo de silicio) para cortar materiales por medio de la fricción.

- Corte con metalizadora

En el contexto de manufactura, lo que comúnmente se llama "metalizadora" suele referirse a una cortadora de disco abrasivo de alta velocidad, usada para cortar perfiles metálicos rápidamente. Funciona con el principio de fricción abrasiva, similar al corte con esmeril.

2.2.2. Diagramas de manufactura y ensamble

Para llevar a cabo la manufactura del molino, es necesario considerar diversos diagramas que faciliten tanto la fabricación como el ensamble del MC, así como el adecuado mantenimiento. Por ello, se elaboraron dos de los diagramas más comunes en la fabricación de maquinaria: el diagrama de operaciones y el diagrama de ensamble.

➤ Diagrama de operaciones

El diagrama de operaciones del proceso es una herramienta fundamental utilizada en la ingeniería de métodos para representar gráficamente, en forma secuencial, las operaciones y verificaciones que se llevan a cabo en la fabricación de un producto. En el contexto del diseño y construcción del molino de cuchillas para agave, este diagrama permite visualizar de forma clara cada etapa del proceso, desde la preparación de materiales hasta el ensamblaje final del equipo.

Su aplicación facilita la identificación de pasos críticos, posibles cuellos de botella, y oportunidades para mejorar la eficiencia, seguridad y calidad del proceso productivo. Además, es clave para estandarizar procedimientos, capacitar al personal técnico y documentar el flujo de trabajo de forma ordenada.

➤ Diagrama de ensamble

El diagrama de ensamble es una representación gráfica a detalle del proceso de ensamblaje de un producto en particular, en el que se muestra la secuencia y relación entre las piezas y subensambles. Estos diagramas son fundamentales para comprender y optimizar el flujo de trabajo en la fabricación de productos complejos [29].

2.3. QFD

Es crucial señalar que, en el proceso de desarrollo y fabricación de un producto, la elección de la metodología adecuada puede variar según los requisitos específicos del proyecto. Dado que este proyecto se enfoca en la implementación de procesos avanzados de manufactura, se ha seleccionado la metodología QFD.

Diversos autores han definido el QFD de la siguiente manera:

Según Akao, “La conversión de las demandas del consumidor características de calidad y el desarrollo de una calidad de diseño para el producto terminado, mediante el despliegue sistemático de relaciones entre demandas y características, comenzando con la calidad de cada componente funcional y extendiendo el despliegue de la calidad a cada parte del proceso. La calidad global del producto se logra a través de la red de relaciones” [30].

Hauser y Clausing lo describen como “El Despliegue de la Función de la Calidad es un sistema para traducir los requisitos del consumidor en requisitos apropiados de la empresa en cada etapa, desde la investigación y el desarrollo de productos hasta la ingeniería y la manufactura, pasando por el marketing, las ventas y la distribución” [31].

Para Govers, “El Despliegue de la Función de la Calidad (QFD) es un enfoque de innovación de productos orientado al cliente. Guía a los gerentes de producto y a los equipos de diseño a través del proceso de conceptualización, creación y realización de nuevos productos. El QFD apoya a los equipos de diseño para desarrollar productos de manera estructurada, relacionando la demanda del mercado con las especificaciones de ingeniería, las especificaciones de las piezas, las variables del proceso de producción y, en consecuencia, con la planificación de las operaciones de fabricación” [32].

Por su parte, Carnevalli y Miguel señalan que “El QFD es un método que ayuda a transformar las necesidades y expectativas de los clientes en características técnicas y en el despliegue de la calidad en el producto y el proceso, incrementando la comunicación y reduciendo los tiempos del ciclo de desarrollo” [33].

2.3.1. Conceptualización

En este proyecto se implementa la metodología QFD e acuerdo con lo planteado por Cuatrecasas [34]. El origen del QFD se remonta a 1966, como parte de las iniciativas de mejora desarrolladas en Japón tras la Segunda Guerra Mundial. Esta metodología fue concebida por Yoji Akao y Shigeru Mizuno con el propósito de establecer un sistema que permitiera identificar, interpretar y traducir las necesidades, requerimientos y expectativas de los clientes; en otras palabras, captar su voz [35].

El QFD persigue dos objetivos fundamentales:

- Desplegar la calidad en el diseño del producto o servicio. Esto implica que el desarrollo de la solución esté orientado directamente a satisfacer los requerimientos expresados por los usuarios, asegurando que cada característica responda a lo que realmente demandan.
- Extender la función de calidad a todas las áreas de la organización. Con ello, la calidad deja de ser un aspecto exclusivo del diseño o la manufactura, y se convierte en un principio transversal que involucra procesos de producción, mercadotecnia, servicio al cliente y gestión administrativa. Así, la calidad se establece como una responsabilidad compartida en toda la estructura empresarial.

2.3.2. Beneficios y limitaciones del QFD

Según Govers [36], el enfoque del QFD se centra en la satisfacción del cliente y la innovación de productos. Este proceso guía a los líderes empresariales desde la conceptualización hasta la realización de nuevos productos, proporcionando un marco estructurado para el desarrollo de productos que cumplan con las demandas del mercado a través de especificaciones técnicas.

El proceso del QFD ayuda a las empresas a establecer los principios fundamentales al alinear lo que el cliente desea con lo que la empresa puede producir. Esta metodología ofrece

una serie de resultados y beneficios significativos, tanto tangibles como intangibles, como han señalado Revelle et al., Raharjo y Pastor [37] [38] [39]. A continuación, se destacan algunos de los beneficios más importantes.

- Reducción significativa del ciclo de desarrollo del producto, entre un treinta y sesenta por ciento.
- Disminución de las modificaciones, tiempo de desarrollo y cambios posteriores de ingeniería.
- Reducción de costos relacionados con el diseño y lanzamiento del producto.
- Menor número de reclamaciones por parte de los clientes.
- Mejora en la calidad y fiabilidad del producto.
- Incremento en la satisfacción del cliente.
- Mayor transparencia en los procesos de desarrollo.
- Mejores relaciones entre los diferentes servicios y departamentos.
- Facilita la toma de decisiones.
- Identifica fortalezas y debilidades comparativas de los productos en relación con la competencia.
- Fomenta una comunicación y trabajo en equipo más efectivos entre el personal involucrado en todas las etapas, desde el diseño hasta la comercialización.

Según Carnevalli y Miguel [33], las empresas encuentran varios desafíos al introducir y utilizar el QFD, como:

- Dificultad en interpretar la voz del cliente.
- Definición y priorización de características de calidad.
- Trabajo con matrices de gran tamaño.

2.4. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

El análisis de elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés *Finite Element Analysis*) es una técnica de simulación numérica ampliamente utilizada en ingeniería para modelar, analizar y predecir el comportamiento de sistemas y componentes bajo diversas condiciones de operación. Este método divide un cuerpo o sistema complejo en un conjunto finito de subdominios denominados elementos, conectados entre sí mediante nodos, sobre los cuales se formulan y resuelven las ecuaciones que rigen su respuesta física [40].

El FEA es fundamental en el diseño y optimización de componentes mecánicos, estructurales, térmicos, eléctricos y multifísicos; en la evaluación de la resistencia y durabilidad de materiales mediante teorías de falla; y en la mejora de productos antes de su fabricación. También se aplica en campos industriales, biomédicos y aeroespaciales, permitiendo simular y comprender fenómenos que serían costosos, peligrosos o inviables de reproducir experimentalmente [41].

2.4.1. FEA en ANSYS

El análisis por elementos finitos es una técnica numérica ampliamente utilizada en ingeniería para resolver problemas físicos complejos que requieren discretización, como los de tipo estructural, transferencia de calor o dinámica de fluidos. Su aplicación mediante software especializado sigue un procedimiento general dividido en tres etapas principales [41].

En primer lugar, el preprocesamiento, que corresponde a la fase de preparación del modelo. En esta etapa se establece el dominio geométrico del problema, se selecciona el tipo de elemento a utilizar (unidimensional, bidimensional, tridimensional o de propósito específico) y se asignan tanto las propiedades del material como las características geométricas correspondientes. Asimismo, se definen las condiciones de frontera, las restricciones mecánicas y las cargas externas, además de generarse la malla, ya sea de manera manual, semiautomática o automática, según el nivel de precisión requerido.

Posteriormente, el procesamiento o solución, donde el software ensambla y resuelve el sistema de ecuaciones que describe el modelo de manera matricial. A partir de este procedimiento se obtienen los valores de las variables de interés, tales como desplazamientos nodales, esfuerzos, deformaciones, aceleraciones o velocidades, dependiendo del tipo de análisis planteado.

Finalmente, el postprocesamiento, fase en la cual los resultados son interpretados y representados gráficamente de acuerdo con los objetivos del estudio. Entre las opciones más comunes se encuentran los mapas de esfuerzos y deformaciones, la verificación del equilibrio estático, la estimación de factores de seguridad, así como animaciones y gráficas dinámicas que ilustran el comportamiento del sistema bajo las condiciones simuladas.

Este procedimiento constituye la base de cualquier estudio de ingeniería con elementos finitos, ya que garantiza que el modelo represente de manera adecuada la realidad física del sistema y que los resultados puedan emplearse en la validación y optimización del diseño.

En este contexto, uno de los programas más difundidos para la aplicación del FEA es *ANSYS*, cuya utilidad abarca desde el análisis estructural hasta estudios de transferencia de calor o dinámica de fluidos. Si bien en sus primeras versiones presentaba limitaciones en cuanto a usabilidad, pues requería conocimientos de programación para la generación de modelos y la ejecución de los análisis, con el paso del tiempo evolucionó hacia un entorno más amigable. A partir de la versión 12.1, el software incorporó *ANSYS Workbench*, una plataforma gráfica que integra en un mismo espacio los distintos módulos necesarios para la simulación, lo que permite definir geometrías, aplicar condiciones de frontera, generar mallas y analizar resultados de manera mucho más intuitiva y ordenada.

2.5. RESISTENCIA A LA FATIGA Y CURVA S–N

La resistencia a la fatiga se define como la capacidad de un material para soportar esfuerzos variables o cíclicos durante un número determinado de ciclos sin presentar falla. A diferencia de las cargas estáticas, en las que el comportamiento del material se evalúa con base en la resistencia a la fluencia o a la fractura, en la fatiga el parámetro relevante es el número de ciclos hasta la falla bajo un nivel de esfuerzo específico [42].

Este fenómeno se representa experimentalmente mediante la curva esfuerzo–número de ciclos (S–N curve), la cual se obtiene sometiendo probetas normalizadas a ensayos de carga cíclica. La curva se construye a partir de pares de datos (σ , N), donde σ es el esfuerzo aplicado y N es el número de ciclos hasta la fractura [43].

En materiales ferrosos, como los aceros, la curva S–N tiende a estabilizarse después de un número elevado de ciclos, definiendo así el límite de fatiga, que corresponde al valor máximo de esfuerzo que el material puede resistir de manera indefinida sin fracturarse [44]. Sin embargo, en materiales no ferrosos, como los aluminios, la curva no presenta un límite claro, por lo que su resistencia a la fatiga se establece convencionalmente a un número base de ciclos, comúnmente 10^7 [26].

La relevancia de la resistencia a la fatiga radica en que gran parte de los componentes mecánicos en servicio están sometidos a cargas repetidas o fluctuantes, como ejes, resortes, engranajes, rodamientos o uniones atornilladas. En tales casos, la fatiga constituye uno de los modos de falla más frecuentes, llegando a representar alrededor del 90 % de las fracturas reportadas en ingeniería mecánica y estructural [43].

En conclusión, la resistencia a la fatiga y la curva S-N constituyen herramientas esenciales para el diseño y la evaluación de componentes, ya que permiten predecir la vida útil de los materiales y establecer factores de seguridad adecuados frente a condiciones de carga variable [44].

De manera complementaria, en la Figura 19 se presenta el diagrama S-N correspondiente al acero inoxidable AISI 304, el cual servirá como base para el análisis de fatiga en este trabajo. Dicho diagrama permite visualizar la relación entre el esfuerzo aplicado y el número de ciclos hasta la falla, facilitando la identificación del límite de fatiga y, por ende, la predicción de la vida útil del material bajo cargas repetidas. La incorporación de este gráfico es fundamental para interpretar los resultados obtenidos en el análisis numérico y contrastarlos con el comportamiento esperado del material según la literatura.

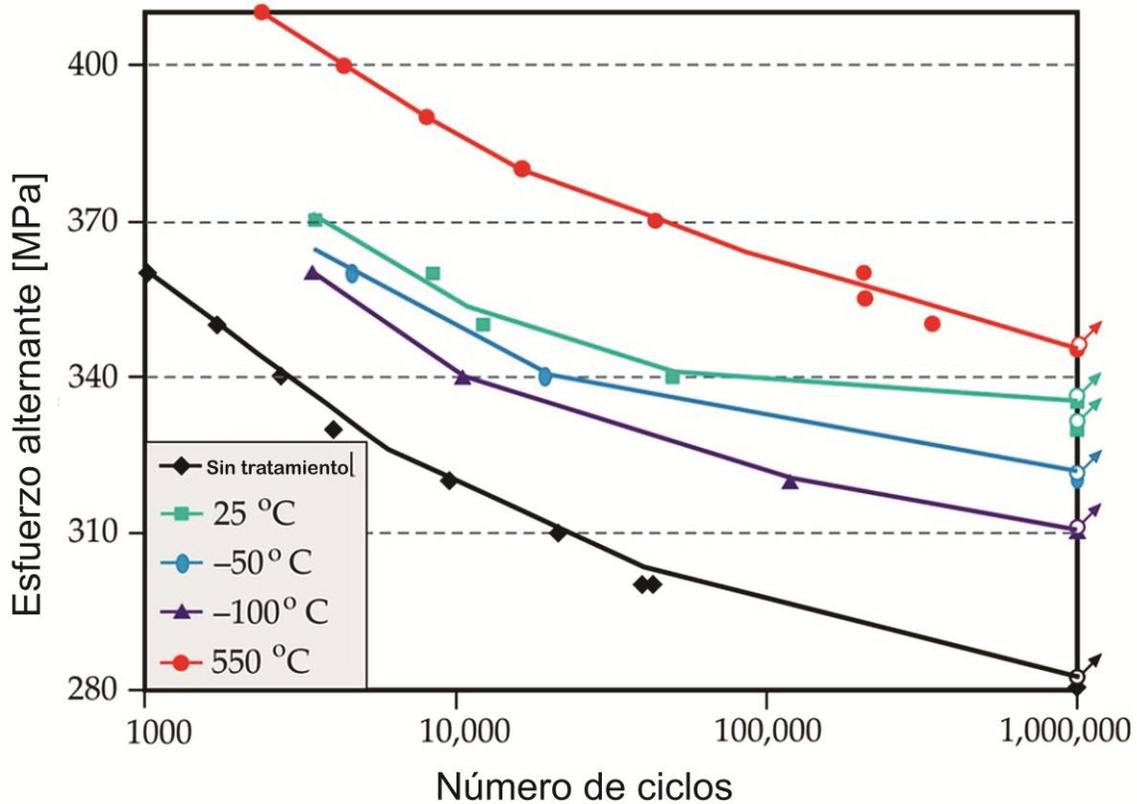


Figura 19: Diagrama S-N – acero inoxidable 304 [45].

2.6. FACTOR DE SEGURIDAD

El factor de seguridad (*factor of safety*, por sus siglas en inglés FoS) es un criterio fundamental en el diseño y la evaluación de componentes mecánicos y estructurales. Se define como la relación entre la resistencia de un material y el esfuerzo máximo al que será sometido en servicio [42].

Este parámetro constituye un margen de seguridad que permite compensar la incertidumbre inherente al diseño, como variaciones en las propiedades de los materiales, tolerancias de manufactura, errores en el modelo de cálculo, condiciones imprevistas de carga y factores ambientales [44].

El valor del FoS no es universal, sino que depende de la aplicación y del nivel de confiabilidad requerido. Por ejemplo, en estructuras críticas como aeronaves o reactores nucleares, se emplean factores de seguridad entre 1.5 y 2, debido a que se trabaja con

materiales caracterizados y procesos de alta precisión. En maquinaria industrial general se suelen utilizar valores entre 2 y 3, mientras que en construcción civil o equipos sometidos a condiciones severas de impacto o fatiga se recomiendan márgenes mayores, entre 3 y 5 [26].

En el análisis por elementos finitos, el FoS se calcula a partir de los esfuerzos máximos obtenidos en la simulación y se compara con los límites de resistencia del material, como el esfuerzo de fluencia (σ_y) o la resistencia última a la tracción (σ_u). Un valor de FoS mayor que 1 indica que el diseño es seguro en condiciones nominales, mientras que valores muy elevados pueden sugerir un sobredimensionamiento, con implicaciones en costo y eficiencia [46].

En resumen, el factor de seguridad no solo es una medida de confiabilidad estructural, sino también una herramienta de optimización en ingeniería, ya que busca equilibrar resistencia, costo y peso en los diseños.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo de tesis, es la metodología QFD, la cual permite traducir los requerimientos del cliente en características técnicas del producto y, posteriormente, en decisiones estratégicas de manufactura. En este capítulo se desglosa el proceso casa por casa hasta completar las cuatro matrices principales del QFD, integrando herramientas de diseño y manufactura que permitirán garantizar la calidad del MC a lo largo de su desarrollo [13].

La metodología inicia con la construcción de la primera matriz, enfocada en identificar y analizar los requerimientos del cliente. Para ello, se recabó información mediante entrevistas (ver APÉNDICE A) aplicadas a miembros clave de la cooperativa, especialmente a quienes participan directamente en el proceso de molienda. De forma complementaria, se diseñó y aplicó una encuesta (ver APÉNDICE B) a otras productoras de mezcal en localidades cercanas, con el fin de enriquecer la muestra y detectar otros requerimientos relevantes desde una perspectiva regional y colectiva [23].

Posteriormente, estos requerimientos se transforman en parámetros técnicos, los cuales conforman la segunda matriz. A partir de esta correlación se identifican los componentes críticos del diseño, lo que permite plantear diferentes propuestas conceptuales. Dichos conceptos se someten a un proceso de selección, validación y ajuste hasta fijar las especificaciones finales del producto.

Una vez definida la solución óptima, se procede a elegir los procesos de manufactura adecuados, identificar factores clave y realizar la planeación detallada de la manufactura, lo cual incluye la elaboración de planos técnicos, diagramas de operación y ensamble, así como el cálculo de los parámetros de mecanizado y procesamiento. Este enfoque sistemático

garantiza que el diseño cumpla con las expectativas del cliente y sea viable técnica y económicamente.

3.1. REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE

Para dar comienzo al análisis de los requerimientos del cliente, los datos obtenidos de las entrevistas se ordenaron de manera más específica con ayuda de una tabla, la cual permite visualizar de mejor manera los datos obtenidos (APÉNDICE C), para así obtener mejores parámetros para evaluar y ponderar los requisitos.

El formato anteriormente mencionado, se utilizó exclusivamente para las entrevistas. Para el caso de las encuestas, se utilizaron gráficos, en los cuales se muestran las respuestas y el porcentaje de incidencia de ellas, puesto que se utilizaron en su mayoría preguntas cerradas de opción múltiple.

Una vez obtenida la información por parte de los clientes principales (Tabla 5 – 7) y de clientes secundarios (Tabla 8), será posible detectar cuáles son las necesidades de los clientes.

Tabla 5: Datos sin procesar cliente 1.

| Categoría | Enunciado del cliente | Necesidad interpretada |
|-----------------------|--|--|
| Inversión | La menor posible | Materiales económicos |
| Funcionalidad | <p>Que muele toda la piña y no deje mucho desperdicio</p> <p>Que ocupe poco espacio para almacenarlo</p> <p>Los trabajadores son los que mueven las máquinas, yo no cargo.</p> <p>Que sirva para mucho tiempo y que sea de acero galvanizado</p> | <p>El MC corte las fibras de manera constante</p> <p>El MC sea compacto</p> <p>-----</p> <p>Que el MC sea funcional y resistente</p> |
| Diseño | <p>Que no cueste trabajo armarlo</p> <p>Que se limpie con pura agua</p> <p>Que se pueda sostener para que no camine</p> | <p>El MC sea de fácil ensamblaje.</p> <p>El MC sea fácil de limpiar</p> <p>El MC se pueda fijar</p> |
| Motor | <p>Muy potente para el trabajo</p> <p>Que se conecte a la luz</p> | <p>Motor potente</p> <p>Motor eléctrico</p> |
| Cuchillas | <p>Que sea de cuchillas filosas para que no se les quite el filo</p> <p>Que sea de material galvanizado</p> | <p>Cuchillas resistentes a la deformación</p> <p>Material inoxidable</p> |
| Principales problemas | Que se oxidan muy rápido | El MC sea de material inoxidable |
| Mejoras sugeridas | Se resistente, luego se andan desarmando | Método de unión permanente |

Tabla 6: Datos sin procesar cliente 2.

| Categoría | Enunciado del cliente | Necesidad interpretada |
|-----------------------|---|--|
| | <p>Cliente: Operador</p> <p>¿Dispuesto a otra llamada? sí</p> <p>Fecha: 11 - 05 - 2024</p> | <p>Tipo de molino que usa: de muelas</p> <p>Tipo de usuario: Encargado de molienda</p> |
| Inversión | Lo necesario para poder hacer el trabajo rápido por que se daña el producto. | Materiales de calidad |
| Funcionalidad | <p>Que pueda trabajarse sin necesidad de lavarse a cada rato.</p> <p>Que sea pequeño para guardarlo.</p> <p>Que no pese mucho.</p> <p>Que no se descomponga rápido.</p> | <p>El MC corte las fibras de manera constante</p> <p>El MC sea compacto</p> <p>El MC sea ligero</p> <p>Que el MC sea resistente</p> |
| Diseño | <p>Que se pueda armar fácil (no sabe leer).</p> <p>Que no tenga que limpiarlo a cada rato porque tardo mucho, y si no se limpia se daña.</p> <p>Que el molino pueda pegarse al piso por que se mueve.</p> | <p>El MC se ensamble fácil y su instructivo se pueda entender por cualquier persona</p> <p>El MC sea fácil y rápido de limpiar</p> <p>El MC se pueda fijar</p> |
| Motor | <p>De unos 4 HP</p> <p>Eléctrico</p> | <p>Motor de 4 HP o más</p> <p>Motor eléctrico</p> |
| Cuchillas | <p>Que tenga muchas cuchillas de forma plana y larga para que corte mucho.</p> <p>acero inoxidable</p> | <p>Cuchillas planas</p> <p>Material Inoxidable</p> |
| Principales problemas | Se tienen que limpiar a cada rato para que siga funcionando | Fácil acceso a las cuchillas |
| Mejoras sugeridas | Que tenga botones de encendido y que no se desarme a cada rato | <p>Botón de encendido/apagado</p> <p>Método de unión permanente</p> |

Tabla 7: Datos sin procesar cliente 3.

Cliente: Receptor de material

Tipo de molino que usa: de muelas

¿Dispuesto a otra llamada? sí

Tipo de usuario: Encargado de fermentación**Fecha:** 11 - 05 - 2024

| Categoría | Enunciado del cliente | Necesidad interpretada |
|-----------------------|--|--|
| Inversión | ---- | ---- |
| Funcionalidad | <p>Que muele todo el agave porque es difícil el almacenaje</p> <p>Que ocupe poco espacio para guardarse</p> <p>Que pueda llevarse hasta los tanques de fermentación porque están muy pesados para moverlos a cada rato</p> <p>Que no de sabores al agave porque daña el producto</p> | <p>El MC corte las fibras de manera uniforme</p> <p>El MC sea compacto</p> <p>Que sea ligero y tenga movilidad.</p> <p>Que sea de materiales inoxidables</p> |
| Diseño | <p>No es de interés</p> <p>No es de interés</p> <p>No es de interés</p> | <p>----</p> <p>----</p> <p>----</p> |
| Motor | <p>Suficientemente potente para moler bien</p> <p>No es de interés</p> | <p>Motor potente</p> <p>----</p> |
| Cuchillas | <p>No es de interés</p> <p>Acero inoxidable</p> | <p>----</p> <p>Cuchillas resistentes a la corrosión</p> |
| Principales problemas | <p>El agave no se muele bien y no sabe igual</p> | <p>Material resistente e inoxidable</p> |
| Mejoras sugeridas | <p>Que sea rápido</p> | <p>El MC debe tener un motor potente, cuchillas resistente y tolva lo suficientemente grande para el ingreso de agave</p> |

Tabla 8: Respuestas de las encuestas.

| Preguntas | Respuestas | | |
|--|---|---|--|
| | a) | b) | c) |
| ¿Cuál sería su rango de inversión inicial ideal para adquirir un molino de agave para la producción de mezcal? | Menos de \$50,000.00 41.20% | \$50,000.00 – \$90,000.00 52.90% | Más de \$90,000.00 5.90% |
| ¿Qué características considera esenciales en un molino de agave para la producción de mezcal? (Seleccione todas las que correspondan) | a) Eficiencia en la molienda 82.40% | b) Durabilidad 58.80% | c) Facilidad de uso 58.80% |
| ¿Cuánto espacio está disponible en su área de producción para instalar el molino de agave? | a) Menos de 5.00 m ² 70.60% | b) 5.00 – 7.00 m ² 23.50% | c) Más de 7.00 m ² 5.90% |
| ¿Qué tipo de materiales resistentes considera esenciales para la construcción del molino de agave? (Seleccione todas las que correspondan) | A) Acero Inoxidable 76.50% | b) Hierro fundido 58.80% | |
| ¿Qué nivel de potencia del motor preferiría para el molino de agave? | a) Menos de 2 HP 17.60% | b) 2–4 HP 58.80% | c) Más de 3HP 23.50% |
| Preguntas | a) sí | b) No | c) No estoy seguro |
| ¿Preferiría un molino de agave que sea ligero para facilitar su manipulación? | 76.50% | 11.80% | 11.80% |
| ¿Considera importante que el molino de agave sea fácilmente móvil para su transporte o reubicación? | 76.50% | 23.50% | 0.00% |
| ¿Preferiría que el molino de agave tenga un motor eléctrico que funcione a 220 V? | 35.30% | 29.40% | 35.30% |
| ¿Es importante para usted que el molino de agave sea compacto para ocupar menos espacio? | 47.10% | 23.50% | 29.40% |
| ¿Es importante para usted que el molino de agave tenga una estructura rígida para garantizar su estabilidad durante la operación? | 82.40% | 0.00% | 17.60% |
| ¿Preferiría que las cuchillas del molino de agave sean de acero inoxidable por su resistencia y durabilidad? | 70.60% | 11.80% | 17.60% |

| Preguntas | Respuestas | | |
|--|------------|--------|--------|
| ¿Es importante para usted que las pinturas utilizadas en el molino de agave sean no tóxicas para garantizar la seguridad alimentaria? | 88.20% | 5.90% | 5.90% |
| ¿Prefiere un molino de agave que sea fácil de limpiar para mantener altos estándares de higiene en la producción de mezcal? | 82.4% | 11.8% | 5.90% |
| ¿Considera esencial que el molino de agave cuente con características de seguridad para prevenir accidentes durante su uso? | 88.20% | 5.90% | 5.90% |
| ¿Considera crucial que las cuchillas del molino de agave sean resistentes para manejar eficientemente el proceso de molienda? | 88.20% | 0.00% | 11.80% |
| ¿Es importante para usted que el molino de agave sea fácil de anclar o fijar a una superficie para garantizar su estabilidad durante la operación? | 64.70% | 17.60% | 17.60% |
| ¿Preferiría que el molino de agave sea fácil de ensamblar y desensamblar para facilitar su transportación o almacenamiento? | 64.70% | 17.60% | 17.60% |

Nota. Las gráficas obtenidas de *Google Forms* se anexan en el APÉNDICE D.

Como resultado de las entrevistas y las encuestas, se obtuvieron las necesidades del cliente con mayor relevancia, las cuales se muestran en la Figura 20. Cabe resaltar que se mencionan los parámetros específicos, esto para poder convertirlos a requerimientos técnicos ponderables.

| | |
|--|--|
| <p>INVERSIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Materiales económicos • Materiales de calidad • Inversión entre \$50,000 - \$90,000 <p>ESPACIO FÍSICO</p> <ul style="list-style-type: none"> • El MC sea compacto • Menor a 5 m² <p>FUNCIONALIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> • El MC corte las fibras de manera constante <p>TIPO DE MOTOR</p> <ul style="list-style-type: none"> • Motor eléctrico • Voltaje a 220 V <p>POTENCIA DEL MOTOR</p> <ul style="list-style-type: none"> • Motor potente • Motor de 4 Hp | <p>MOVILIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> • El MC sea ligero • Tenga llantas <p>DISEÑO</p> <ul style="list-style-type: none"> • El MC sea de fácil ensamblaje • El MC sea fácil de limpiar • El MC se pueda fijar • Que sea de materiales inoxidable <p>CUCHILLAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Material inoxidable • Cuchillas planas • Cuchillas resistentes <p>SEGURIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> • Método de unión permanente • Botón de encendido/apagado • Pinturas no tóxicas • Equipo seguro e higiénico |
|--|--|

Figura 20: Necesidades del cliente.

3.2. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

Para determinar los requerimientos técnicos (métricas) se convirtieron las necesidades del cliente en variables ponderables, para así poder evaluar cuál de ellas tiene un mayor impacto respecto a otras.

Como primer paso, se ordenaron las necesidades del cliente por su importancia, esto tomando en cuenta los valores obtenidos en las entrevistas y encuestas realizadas (Tabla 9), asimismo, se consideraron factores que pudieran ser indispensables al diseño, basándonos en que al momento de realizar la matriz del QFD, se eliminen los que no tengan importancia, y así quedando los requerimientos técnicos indispensables para el sistema.

Tabla 9: Necesidades del cliente ordenadas por importancia.

| Núm. | | Necesidades | Importancia |
|------|----------------------------|--|-------------|
| 1 | Inversión | Inversión entre \$50,000.00 - \$90,000.00 | 1 |
| 2 | Diseño | Dimensión del MC menor a 5 m ² | 1 |
| 3 | Cuchillas | El MC corte las fibras de manera constante | 1 |
| 4 | Motor | Motor eléctrico | 1 |
| 5 | Motor | Motor de 4 HP | 1 |
| 6 | Diseño | Tenga llantas | 1 |
| 7 | Materiales de construcción | MC de materiales inoxidables | 1 |
| 8 | Cuchillas | Material inoxidable | 1 |
| 9 | Diseño | Pinturas no tóxicas | 1 |
| 10 | Materiales de construcción | Materiales de calidad | 2 |
| 11 | Diseño | El MC sea compacto | 2 |
| 12 | Motor | Voltaje a 220 V | 2 |
| 13 | Motor | Motor potente | 2 |
| 14 | Diseño | El MC sea ligero | 2 |
| 15 | Diseño | El MC sea fácil de limpiar | 2 |
| 16 | Cuchillas | Cuchillas resistentes | 2 |
| 17 | Diseño | Equipo seguro e higiénico | 2 |
| 18 | Materiales de construcción | Materiales económicos | 3 |
| 19 | Diseño | El MC sea de fácil ensamblaje | 3 |
| 20 | Cuchillas | Cuchillas planas | 3 |
| 21 | Diseño | Botón de encendido/apagado | 3 |
| 22 | Diseño | El MC se pueda fijar | 4 |
| 23 | Diseño | Método de unión permanente | 4 |

Nota. La escala usada para la importancia es de 1 a 5 (donde 1 es muy importante a 5 no tan importante).

Una vez definidas las importancias de las necesidades del cliente (Tabla 9), se establecen las métricas (Tabla 10), las cuales ayudan en la validación de los requerimientos del cliente, obtenidos de las encuestas, para ello se tomó en cuenta a maquinaria similar que pudiera ser competencia directa al MC. A su vez, estas deben estar relacionadas con los requerimientos.

Tabla 10: Lista de métricas para el MC.

| N. Métrica | Núm. de necesidad | Métrica | Unidades |
|------------|--|--|----------------|
| 1 | 1, 7, 8, 9, 10, 15, 17 | Inversión entre \$50,000.00 – \$90,000.00 | \$ |
| 2 | 1, 2, 11, 18, 22 | Molino de cuchillas compacto (5 m ²) | m ² |
| 3 | 3, 4, 5, 12 | Motor eléctrico de 4 HP | HP |
| 4 | 3, 4, 5, 12 | Motor eléctrico a 220 V | V |
| 5 | 2, 6, 10, 13, 18, 21, 22 | Molino de cuchillas ligero | kg |
| 6 | 1, 3, 8, 10, 13, 14, 15, 18, 19, 23 | Materiales de cuchillas inoxidables | Tiempo de vida |
| 7 | 1, 7, 8, 9, 10, 13, 18, 22, 23 | Materiales de estructura inoxidables | Tiempo de vida |
| 8 | 1, 11, 13, 14, 16, 18, 21, 22 | Tiempo de ensamblaje | s |
| 9 | 1, 3, 8, 10, 15, 19, | Cuchillas resistentes | N |
| 10 | 9, 14, 16, 18, 20, 21, 23 | Seguridad del MC | Estándares |
| 11 | 5, 10 | Eje rígido | T |
| 12 | 4, 6, 7, 8, 14, 16, 18, 19, 20, 22, 23 | Fácil mantenimiento | s |
| 13 | 1, 4, 7, 8, 15, 19, 22 | Piezas universales | \$ |
| 14 | 11, 16, 21, 22 | Tornillería estándar | \$ |

3.3. DESARROLLO DE LA PRIMERA MATRIZ DEL QFD

Ampliamente es mencionado que la Calidad es uno de los factores con mayor importancia en la manufactura de los productos, Castro Bernal menciona [47]:

Con frecuencia se han leído expresiones relacionadas con la Calidad y la forma de alcanzarla. Así, por ejemplo, desde hace algunas décadas es bien conocida la frase:

“la Calidad no se controla, la Calidad hay que fabricarla”

Los estudiosos de la Calidad descubrieron entonces que para fabricar Calidad era necesario disponer, entre otras cosas, de un diseño de Calidad. Por esa razón, surgió después otra expresión, igualmente conocida:

“la Calidad hay que diseñarla”

Esta segunda expresión establece la necesidad de obtener la calidad en el diseño, como condición imprescindible para alcanzar la Calidad final. La calidad ya tiene que nacer en el diseño del Producto o Servicio. Si el diseño no es de Calidad, los esfuerzos en la producción y en el Servicio al Cliente resultarán en vano.

Para el desarrollo de la primera matriz del QFD: Casa de la Calidad (HoQ, Figura 3), es necesario colocar los requerimientos del cliente y su prioridad en las primeras columnas de la izquierda (“Qué”), mientras que en la primera fila se colocan los requerimientos técnicos (“Cómo”), ambos ya presentados en las secciones anteriores.

La simbología usada para la evaluación de la HoQ entre los requerimientos del cliente por los requerimientos técnicos se designó conforme la Tabla 11.

Tabla 11: Simbología para las relaciones de la Casa de la Calidad.

| Concepto | | Símbolo |
|----------|--------------|---------------------|
| Relación | Fuerte | 9 |
| | Media | 3 |
| | Débil | 1 |
| | Sin relación | (espacio en blanco) |

Después, se realizó el techo, este evaluando la relación que se tiene entre requerimiento técnico y requerimiento técnico (“Cómo” x “Cómo”), usando la simbología (Tabla 12):

Tabla 12: Simbología del techo de la Casa de la Calidad.

| Concepto | Símbolo |
|--------------------------|---------------------|
| Fuerte Relación Positiva | ++ |
| Relación Positiva | + |
| Sin relación | (espacio en blanco) |
| Relación Negativa | - |
| Fuerte Relación Negativa | -- |

A la vez, se coloca una flecha hacia arriba si el requerimiento técnico planteado puede mejorarse, caso contrario, se utiliza una flecha hacia abajo, en el caso del símbolo igual, es ocupado por no poder definir en esta etapa si se puede realizar una mejora.

Para la parte derecha, denominada “Competencia”, se evalúan los principales molinos competitivos en el mercado, utilizando una escala del 5 al 1, donde 5 representa el mejor desempeño y 1 el peor.

Como resultado de la primera matriz, se obtiene una “Evaluación de importancia”, que corresponde a la suma del producto entre la columna de la prioridad de los requerimientos del cliente por la columna correspondiente a cada requerimiento técnico, entre la frecuencia absoluta (FA), este procedimiento permite calcular una frecuencia relativa (FR).

Para el cálculo de la frecuencia (F) se realiza el producto de la prioridad n por el requerimiento del diseño n (ambos tomados renglón a renglón):

$$F_{m,n} = \text{Prioridad}_m * \text{Cómo}_{m,n} \quad \text{Ec. 1}$$

Poniendo como ejemplo, y tomando en cuenta que para la HoQ los “cómo” son los requerimientos de diseño:

$$F_{1,1} = \text{Prioridad}_1 * \text{Requerimientos de diseño}_{1,1}$$

$$F_{1,1} = 7 * 9$$

$$F_{1,1} = 63$$

El cálculo de la suma de frecuencias (SF) se realiza sumando las F por columnas, es decir:

$$SF_n = \sum_{i=1}^m F_{i,n} \quad \text{Ec. 2}$$

Para la columna 1 ($n = 1$):

$$SF_n = 63 + 0 + 0 + 27 + 8 + 7 + 81 + 81 + 81 + 81 + 0 + 0 + 0 + 0 + 81 + 27 + 36 + 0 + 24 + 0 + 0 + 0 + 27$$

$$SF_n = 624$$

La FA se calcula sumado las SF:

$$FA = \sum_{j=1}^n SF_n \quad \text{Ec. 3}$$

Por lo tanto, la FA es:

$$FA = 624 + 444 + 408 + 319 + 561 + 642 + 633 + 508 + 537 + 637 + 313 + 858 \\ + 588 + 378$$

$$FA = 7\ 450$$

La FR se calcula:

$$FR_n = \frac{SF_n}{FA} * 100\% \quad \text{Ec. 4}$$

Calculando para la primera columna ($n = 1$):

$$FR_1 = \frac{624}{7\ 450}$$

$$FR_1 = 0.083 \approx 8.00\%$$

En el caso de la primera matriz (Figura 21), los requerimientos técnicos con mayor frecuencia relativa son:

Tabla 13: Resultados de la Casa de la Calidad.

| Requerimiento Técnico | Frecuencia Relativa |
|-----------------------------------|---------------------|
| Fácil Mantenimiento | 12.00% |
| Material de cuchillas inoxidable | 9.00% |
| Seguridad del MC | 9.00% |
| Inversión | 8.00% |
| MC ligero | 8.00% |
| Material de estructura inoxidable | 8.00% |
| Piezas universales | 8.00% |

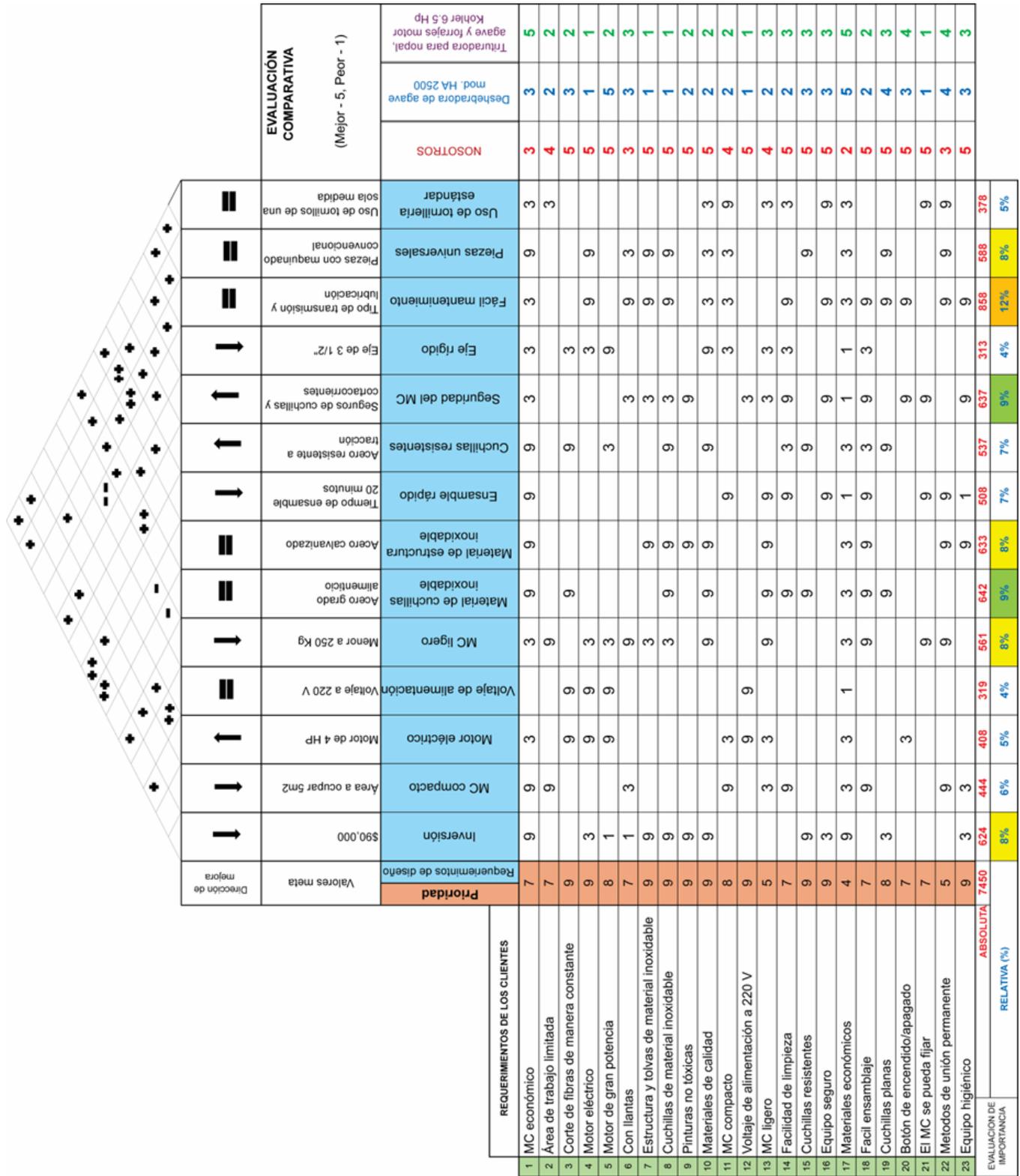


Figura 21: Primera matriz del QFD – Casa de calidad.

3.4. DEFINICIÓN DE LOS COMPONENTES CRÍTICOS

Para definir los componentes críticos, fue necesario ponderar los requerimientos técnicos (obtenidos en la sección anterior) y, a su vez, elaborar la segunda matriz de calidad.

En este proceso, los requerimientos técnicos se colocaron en la primera columna de la izquierda, junto con su prioridad ponderada, mientras que en la primera fila se ubicaron los componentes del molino de cuchillas (Figura 22). Este enfoque permitió evaluar la relación entre los requerimientos técnicos y los componentes del molino, con el objetivo de identificar los componentes críticos.

La segunda matriz evaluó la relación de los requerimientos técnicos con los componentes del molino utilizando la misma simbología que en la primera matriz.

Como resultado de esta evaluación, se obtuvo una “Evaluación por importancia”, que se calculó de la misma manera que en la sección 3.3. Desarrollo de la primera matriz del QFD (Ec. 1, 2, 3 y 4).

Ejemplo, y tomando en cuenta que para la segunda matriz los “cómo” son los componentes de diseño:

$$F_{1,1} = \text{Prioridad}_1 * \text{Componentes de diseño}_{1,1}$$

$$F_{1,1} = 5 * 3$$

$$F_{1,1} = 15$$

Para la columna 1 ($n = 1$):

$$SF_n = 15 + 81 + 0 + 0 + 63 + 0 + 81 + 21 + 0 + 21 + 0 + 15 + 0 + 81$$

$$SF_n = 378$$

Por lo tanto, la FA es:

$$FA = 378 + 312 + 252 + 224 + 302 + 127 + 109 + 30 + 117 + 354 + 450 + 432 + 432 \\ + 369 + 288 + 29 + 130 + 225$$

$$FA = 3\ 888$$

Calculando para la primera columna ($n = 1$):

$$FR_1 = \frac{378}{3888}$$

$$FR_1 = 0.097 \approx 10.00\%$$

Estos cálculos se repiten para obtener la frecuencia relativa y determinar los componentes críticos (Tabla 14).

| Requerimientos de diseño | Prioridad | Chasis | Toiva de Entrada | Toiva de Salida | Cubierta Chasis | Guarda | Llanta | Rin | Eje Llantas | Base de Motor | Motor | Cuchilla | Contracuchilla inferior | Contracuchilla Superior | Eje de Cuchillas | Disco de Cuchillas | Bisagra | Chumacera | Asas | |
|-------------------------------------|------------------------|--------|------------------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----|-------------|---------------|-------|----------|-------------------------|-------------------------|------------------|--------------------|---------|-----------|------|-----|
| | Componentes del molino | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 Inversión | 5 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 1 | 3 | 3 | |
| 2 MC compacto | 9 | 9 | 9 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 9 | |
| 3 Motor eléctrico | 9 | | | | | | | | | | 9 | | | | | | | | | |
| 4 Voltaje de alimentación | 8 | | | | | | | | | | 9 | | | | | | | | | |
| 5 MC ligero | 7 | 9 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | | | | 3 |
| 6 Material de cuchillas inoxidable | 9 | | | | | | | | | | | 9 | 9 | 9 | | | | | | |
| 7 Material de estructura inoxidable | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 3 | | | 1 | 1 | | | | | | | | 1 | 1 | |
| 8 Ensamble rápido | 7 | 3 | 3 | | | 9 | 1 | 1 | | | | | | | | | | 1 | 9 | |
| 9 Cuchillas resistentes | 9 | | | | | | | | | | | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | | | | |
| 10 Seguridad del MC | 7 | 3 | 3 | 9 | 9 | 9 | | | | 3 | 3 | | | | | | | 3 | 3 | |
| 11 Eje rígido | 9 | | | | | | | | | | | | | | 9 | | | | | |
| 12 Fácil mantenimiento | 5 | 3 | 9 | 9 | 9 | 3 | | | | 3 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 13 Piezas universales | 9 | | | | | | 9 | 9 | | | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | | | 3 | |
| 14 Uso de tornillería estandar | 9 | 9 | 3 | | | 9 | | | | 3 | | 9 | 9 | 9 | | | | | 3 | |
| EVALUACION DE IMPORTANCIA | ABSOLUTA | 3888 | 378 | 312 | 252 | 224 | 302 | 127 | 109 | 30 | 117 | 354 | 450 | 432 | 432 | 369 | 288 | 29 | 130 | 225 |
| | RELATIVA (%) | | 10% | 8% | 6% | 6% | 8% | 3% | 3% | 1% | 3% | 9% | 12% | 11% | 11% | 9% | 7% | 1% | 3% | 6% |

Figura 22: Segunda matriz QFD – Componentes Críticos.

Tabla 14: Resultados de la segunda matriz QFD.

| Componente crítico | Frecuencia Relativa |
|-------------------------|---------------------|
| Cuchilla | 12.00% |
| Contracuchilla inferior | 11.00% |
| Contracuchilla superior | 11.00% |
| Chasis | 10.00% |
| Motor | 9.00% |
| Eje de cuchillas | 9.00% |

3.5. PROPUESTAS DE DISEÑO

Para determinar la arquitectura del producto es necesario crear propuestas de diseño, esto con el fin de evaluar cuál de ellas tiene un mejor comportamiento en su funcionamiento y cumplimiento de las especificaciones dadas por el cliente. Para este caso

se usó la fase 1: desarrollo del concepto propuesta por Ulrich y Eppinger. La cual permite un desarrollo de conceptos paso a paso.

Esta fase contempla [48]:

- Establecer especificaciones objetivo

Una vez comprendidos los requerimientos del cliente, se establecen las especificaciones objetivas. Este proceso se realiza antes del diseño de los productos y la selección de los conceptos más adecuados. Es fundamental que dichas especificaciones sean realistas y factibles desde el punto de vista técnico.

- Generar conceptos de producto

El proceso de generar ideas comienza con las necesidades y requisitos del cliente, lo que da lugar a varias ideas para el producto. Luego, el equipo elige las mejores de esas ideas.

Cuando se generan buenas ideas, el equipo se siente seguro de haber considerado todas las posibilidades. Esto es crucial al principio del desarrollo, ya que evita sorpresas o que un competidor saque un producto mejor más tarde.

- Seleccionar conceptos del producto

La selección del concepto implica evaluar ideas según las necesidades del cliente y otros criterios, comparando sus fortalezas y debilidades. Se seleccionan uno o más conceptos para estudios posteriores. Aunque el proceso de desarrollo suele ser creativo y divergente, la selección del concepto es más convergente y puede requerir varias iteraciones. Se comienza con muchas ideas que se reducen y mejoran para ampliar temporalmente las opciones. A través de varias rondas de evaluación, se elige finalmente un concepto principal.

- Probar conceptos del producto

Esta prueba específica es útil para elegir entre varios conceptos, recopilar sugerencias de mejora de clientes potenciales y estimar las ventas potenciales de un producto. Es importante destacar que existen otros tipos de pruebas con clientes potenciales que se pueden realizar además de la prueba durante el desarrollo del concepto.

Además, se puede emplear una prueba para mejorar la predicción de demanda una vez que el desarrollo del producto esté avanzado, pero antes de la producción y lanzamiento.

- Fijar especificaciones finales

La arquitectura de un producto es la organización de sus partes funcionales en componentes físicos. Esta estructura se establece desde el desarrollo inicial del concepto hasta las fases de diseño a nivel de sistema.

Las decisiones tomadas en la arquitectura de un producto tienen un impacto significativo en áreas como la adaptabilidad del producto, la variedad de productos disponibles, la estandarización de componentes, su rendimiento, la facilidad de fabricación y la gestión del proceso de desarrollo.

En el caso particular de este proyecto, una vez definidas las especificaciones objetivo —que incluyen los requerimientos técnicos y métricas—, se procede a la siguiente etapa del proceso.

3.5.1. Generar conceptos alternativos de producto

Para iniciar la generación de conceptos, es necesario aclarar el problema; por lo tanto, se debe comprender con precisión lo que se desea lograr; una herramienta que ayuda a comprender el proceso de forma gráfica es el diagrama funcional (y Figura 24).



Figura 23: Diagrama funcional de un MC – Caja negra.

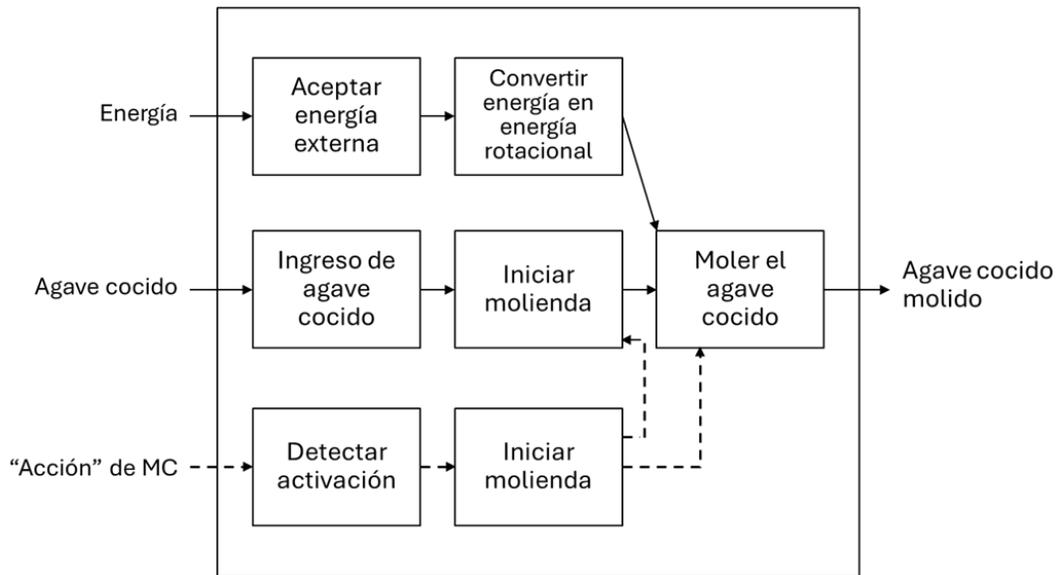


Figura 24: Diagrama funcional de un MC – Subfunciones.

3.5.2. Seleccionar conceptos de producto

De las posibles combinaciones, se deben considerar factores importantes, como el mantenimiento del motor y el tipo de transmisión (Figura 25). En consecuencia, se evaluarán los conceptos planteados para determinar la mejor combinación (Figura 26 y Figura 27).

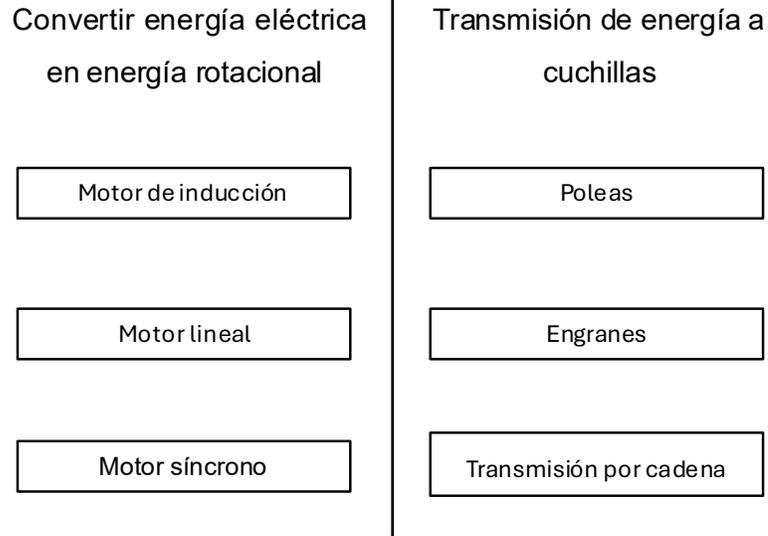


Figura 25: Combinación de conceptos.

| Criterios de selección | Concepto | | |
|--|--------------------|--------------|----------------|
| | Motor de inducción | Motor lineal | Motor síncrono |
| Mantenimiento | + | 0 | + |
| Repuestos | + | 0 | - |
| Tiempos de mantenimiento | - | 0 | + |
| Personal calificado para mantenimiento | - | 0 | - |
| Conocimientos previos del funcionamiento del motor | - | 0 | - |
| Durabilidad | + | 0 | + |
| Ruido | + | 0 | - |
| Peso | + | 0 | + |
| Suma + | 5 | 0 | 4 |
| Suma 0 | 0 | 8 | 0 |
| Suma - | 3 | 0 | 4 |
| Evaluación neta | 5 | 0 | 4 |
| Lugar | 1 | 3 | 2 |
| ¿Continuar? | Sí | No | Sí |

Figura 26: Matriz de selección de conceptos para el motor.

| Criterios de selección | Concepto | | |
|--|----------|----------|------------------------|
| | Poleas | Engranés | Transmisión por cadena |
| Mantenimiento | + | 0 | - |
| Repuestos | + | 0 | + |
| Tiempos de mantenimiento | + | 0 | - |
| Personal calificado para mantenimiento | + | 0 | - |
| Conocimientos previos del funcionamiento de la transmisión | + | 0 | - |
| Durabilidad | - | 0 | + |
| Ruido | + | 0 | + |
| Peso | + | 0 | - |
| Suma + | 7 | 0 | 3 |
| Suma 0 | 0 | 8 | 0 |
| Suma - | 1 | 0 | 5 |
| Evaluación neta | 6 | 0 | -2 |
| Lugar | 1 | 2 | 3 |
| ¿Continuar? | Sí | Sí | No |

Figura 27: Matriz de selección de conceptos para la transmisión.

3.5.3. Probar conceptos de producto

Para esta etapa, se elaboró un esquema que permite visualizar el recorrido del material a procesar, el flujo de la fuerza o energía, y el flujo de señales o datos, con el objetivo de obtener una mejor percepción del acomodo ideal el MC (Figura 28). Este esquema se desarrolló con base en los requerimientos del cliente y las especificaciones obtenidas.

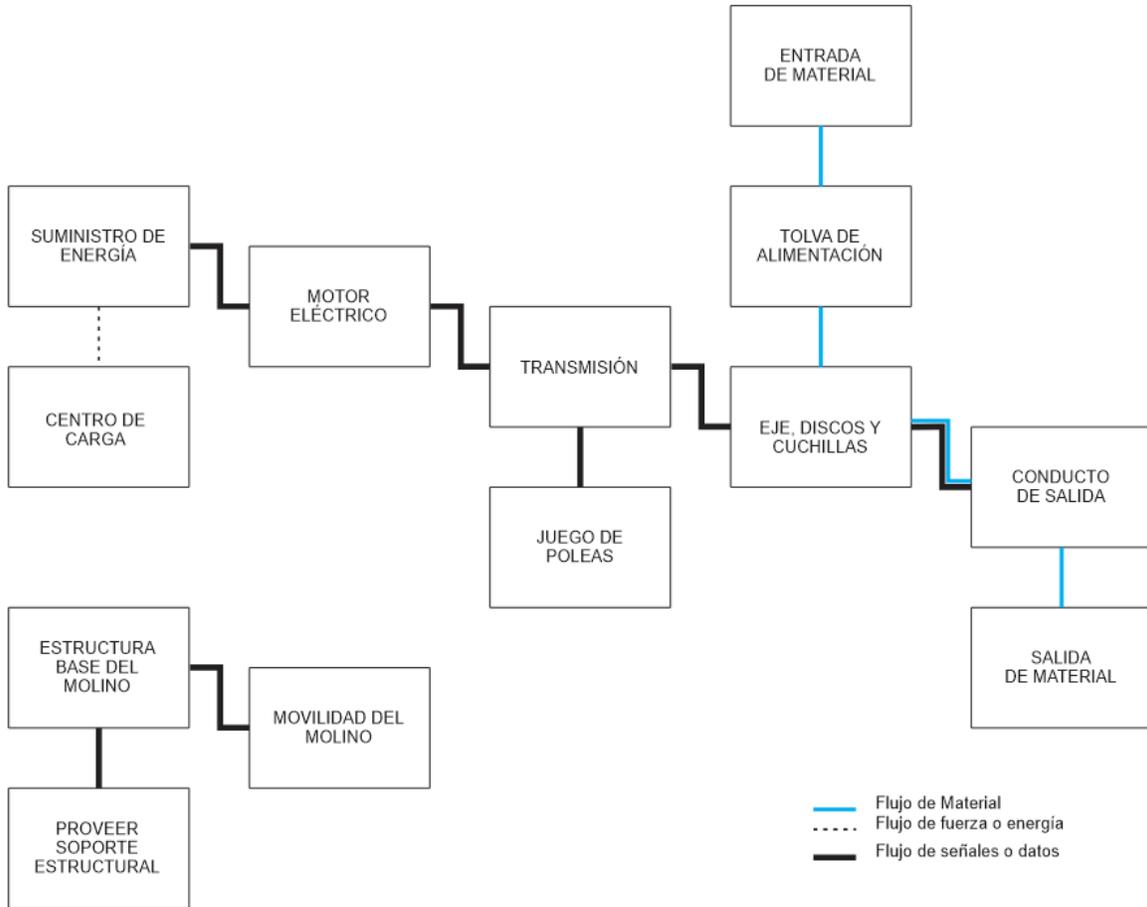


Figura 28: Esquema de funcionalidad del MC.

Nota. Se mencionan elementos funcionales y elementos físicos con conexiones no detalladas.

Para tener una mejor visión del MC, se identificaron los trozos críticos para su posterior evaluación (Figura 29), contemplando los componentes del MC.

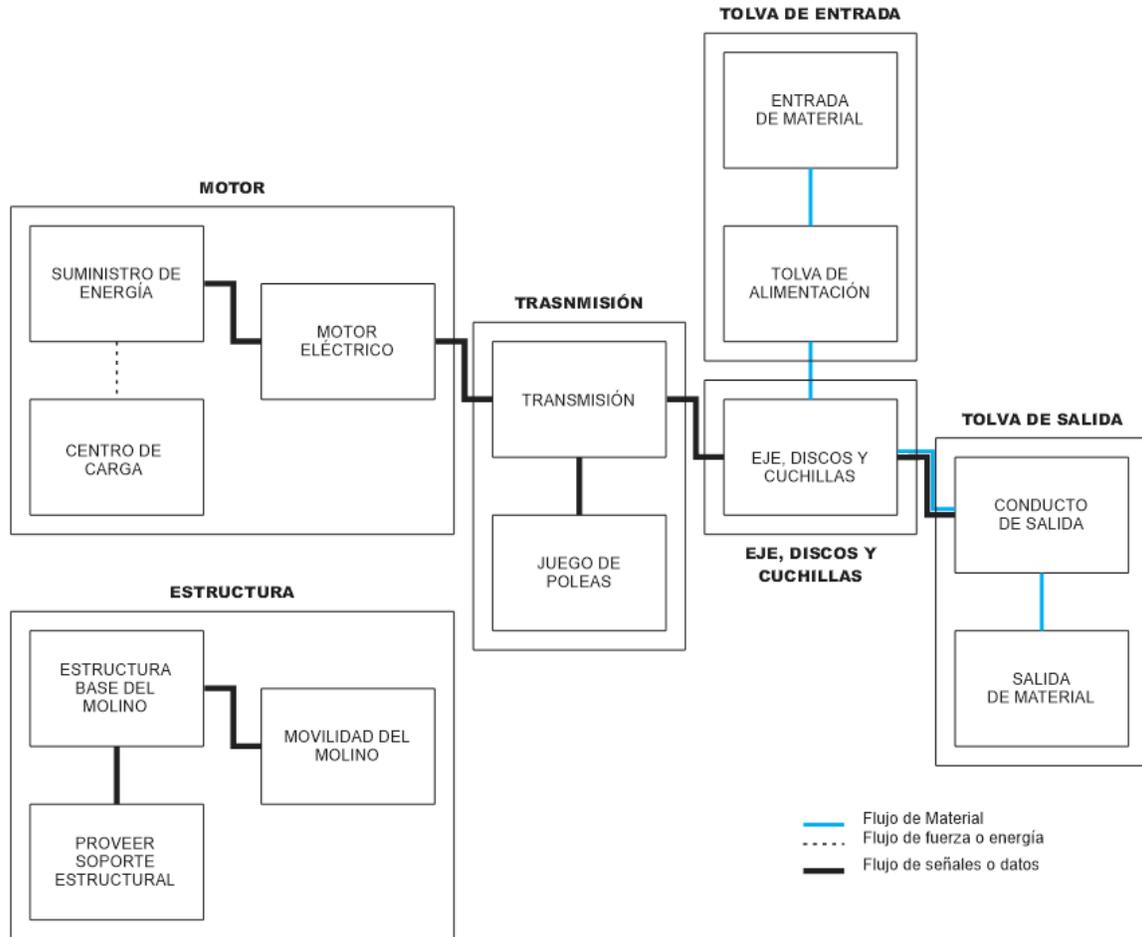


Figura 29: Agrupación de elementos en trozos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se definió una disposición geométrica aproximada con el objetivo de obtener un primer bosquejo del MC.

Para la creación de esta disposición geométrica de las piezas, se elaboró un boceto inicial en el software *SolidWorks*, en el cual se distinguen los trozos y partes principales del MC. En esta primera etapa, se excluyó la estructura, ya que será la encargada de brindar soporte a los componentes. Por lo tanto, se describen los demás trozos, exceptuando la estructura (Figura 30).



Figura 30: Disposición geométrica aproximada.

Nota. A) en 2D y B) en 3D.

3.5.4. Fijar especificaciones finales

Considerando los requerimientos del cliente (RC) y los requerimientos técnicos (RT), se tomó la decisión de manufacturar el MC utilizando materiales inoxidables de grado alimenticio para las cuchillas y acero galvanizado para la estructura y tolvas.

Asimismo, se consideró el uso de un motor eléctrico de 220 V, en función de las dimensiones de las cuchillas y criterios económicos. Para facilitar su movilidad, se incorporarán llantas, debido al peso total de la estructura.

En concordancia con lo expuesto previamente, y considerando la naturaleza y función de los principales componentes del molino de cuchillas (MC), se determinó dividir el diseño en cinco subconjuntos principales. Esta división obedece a criterios de funcionalidad, facilidad de manufactura y optimización de los procesos de ensamble, permitiendo distribuir de manera más eficiente las tareas durante la fabricación.

Los subconjuntos definidos son los siguientes:

1. Tolva de entrada: Encargada de recibir el material y guiarlo hacia el sistema de corte.
2. Motor: Fuente de potencia para el accionamiento del eje y las cuchillas.
3. Estructura: Soporte principal que integra y da estabilidad al conjunto.
4. Tolva de salida: Canaliza el material procesado hacia su recolección o siguiente etapa de producción.

5. Eje, discos y cuchillas (Subensamble S1): Elemento operativo encargado del corte y reducción del material, conformado por el eje de transmisión, discos porta cuchillas y cuchillas propiamente dichas.

Esta clasificación modular facilita el manejo de componentes, y permite un ensamblaje más ágil, así como también favorece el mantenimiento preventivo y correctivo del equipo.

3.6. ELECCIÓN DE PROCESOS DE MANUFACTURA

El presente proyecto de tesis se enfoca en la manufactura de un MC para agave, destinado al proceso de producción de mezcal. Considerando que, en la metodología QFD (Figura 31), la tercera matriz corresponde a la planeación y selección de los procesos de manufactura, se elaborará dicha matriz con el objetivo de identificar y priorizar los procesos de manufactura para el desarrollo del proyecto [15, 33].

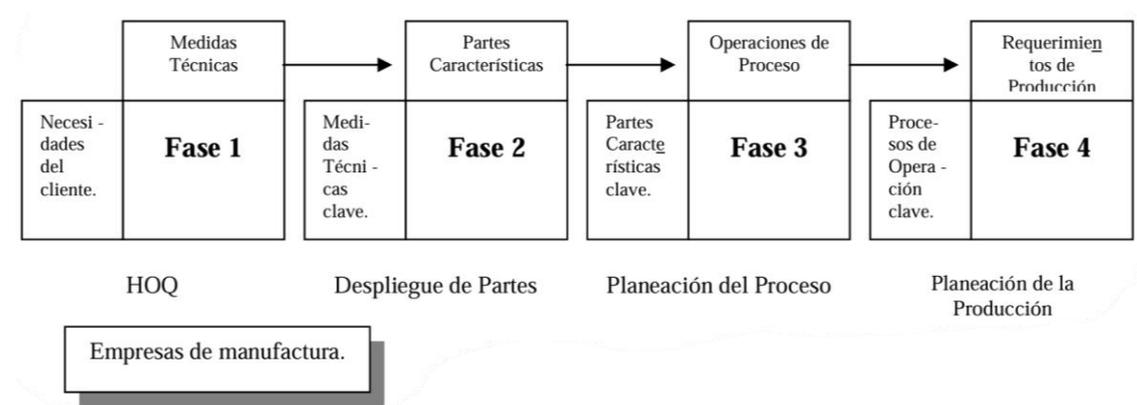


Figura 31: QFD para empresas de manufactura [16].

Para la elaboración de esta matriz, se utilizaron los componentes descritos en la segunda matriz del QFD, presentada en la sección 3.4. Definición de los componentes críticos (Figura 22). Como punto importante, a los componentes que resultaron críticos (Tabla 14) se les asignó una ponderación alta, mientras que a los componentes que serán adquiridos se les asignó un valor de 0, con el fin de mantener la numeración de los componentes sin alteraciones.

| Componentes del molino | | Prioridad | Procesos de manufactura | Fresado convencional | Fresado CNC | Taladrado de banco | Torneado convencional | Soldadura SMAW | Soldadura por puntos | Cizallado | Corte con plasma | Corte con sierra cinta | Corte con esmeril | Corte con metalizadora | Dobladora |
|---------------------------|-------------------------|-----------|-------------------------|----------------------|-------------|--------------------|-----------------------|----------------|----------------------|-----------|------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-----------|
| | | 1 | Chasis | 7 | | | | | | 9 | | | | | 1 |
| 2 | Tolva de Entrada | 6 | | | | | | | 9 | 3 | | | 3 | | 9 |
| 3 | Tolva de Salida | 5 | | | | | | | 9 | 3 | | | 3 | | 9 |
| 4 | Cubierta Chasis | 5 | | | | | | | 9 | 3 | | | 3 | | 9 |
| 5 | Guarda | 6 | | | | | | | 9 | 3 | | | 3 | | 9 |
| 6 | Llanta | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | Rin | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Eje Llantas | 5 | | | | 3 | 9 | | | | | | | | |
| 9 | Base de Motor | 5 | | | 9 | | | | | | 9 | | | | |
| 10 | Motor | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | Cuchilla | 9 | 9 | 9 | | | | 9 | | | 9 | | | | |
| 12 | Contracuchilla Inferior | 8 | 9 | 9 | | | | 9 | | | 9 | | 3 | | |
| 13 | Contracuchilla Superior | 8 | 9 | 9 | | | | 9 | | | 9 | | 3 | | |
| 14 | Eje de Cuchillas | 7 | | | | | 9 | | | | | 9 | | | |
| 15 | Disco de Cuchillas | 5 | | 9 | | 9 | | | | | | | 3 | | |
| 16 | Bisagra | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | Chumacera | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | Asas | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| EVALUACION DE IMPORTANCIA | ABSOLUTA | 1948 | 225 | 315 | 15 | 153 | 288 | 198 | 66 | 270 | 63 | 136 | 21 | 198 | |
| | RELATIVA (%) | | 12% | 16% | 1% | 8% | 15% | 10% | 3% | 14% | 3% | 7% | 1% | 10% | |

Figura 32: Tercera matriz QFD – Procesos de manufactura.

Para determinar los resultados obtenidos de la tercera matriz, se realizaron los cálculos descritos en la sección 3.3. Desarrollo de la primera matriz del QFD (Ec. 1, 2, 3 y 4).

Ejemplo, y tomando en cuenta que para la tercera matriz los “cómo” son los procesos de manufactura:

$$F_{11,1} = Prioridad_1 * Procesos de manufactura_{11,1}$$

$$F_{11,1} = 9 * 9$$

$$F_{11,1} = 81$$

Para la columna 1 (n = 1):

$$SF_n = 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 81 + 72 + 72 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0$$

$$SF_n = 225$$

Por lo tanto, la FA es:

$$FA = 225 + 315 + 15 + 153 + 288 + 198 + 66 + 270 + 63 + 136 + 21 + 198$$

$$FA = 1,948$$

Calculando para la primera columna ($n = 1$):

$$FR_1 = \frac{225}{1,948}$$

$$FR_1 = 0.119 \approx 12\%$$

Estos cálculos se repiten para obtener la frecuencia relativa y determinar los procesos de manufactura críticos.

Como resultado de la tercera matriz, se obtuvieron los procesos de manufactura que se presentan en la Tabla 15. Para cada uno de estos procesos, es necesario considerar variables clave como la velocidad de corte, la velocidad del husillo, la temperatura, el amperaje, el tipo de herramienta, el material de la herramienta, entre otras.

Tabla 15: Resultados de la tercera matriz QFD – Procesos de manufactura.

| Procesos de manufactura | Frecuencia relativa (%) |
|-------------------------|-------------------------|
| Fresado CNC | 16% |
| Soldadura SMAW | 15% |
| Corte con plasma | 14% |
| Fresado convencional | 12% |
| Soldadura por puntos | 11% |
| Dobladora | 10% |
| Torneado convencional | 8% |

3.7. IDENTIFICACIÓN DE FACTORES CLAVE

Para la identificación de los factores clave, es necesario comprender la manufactura en su sentido amplio, la cual se refiere al proceso de transformar materias primas en productos terminados. Además, incluye las actividades en las que los productos fabricados se emplean para la elaboración de otros productos [26].

En la realización de la cuarta matriz del QFD —Planeación de la producción—, se retomaron los procesos de manufactura y se analizaron los factores principales que pueden influir en la modificación de las piezas. Por lo tanto, se evaluaron los procesos en función de dichos factores (Figura 33).

| Procesos de manufactura | | Prioridad | Factores | | | | | | | |
|---------------------------|------------------------|-----------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-------------|----------------|----------------------|-------------------|
| | | | Velocidad de corte | Velocidad de avance | Velocidad de husillo | Amperaje de trabajo | Temperatura | Tipo de cordón | Procesos pre soldado | Ángulo de doblado |
| 1 | Fresado convencional | 7 | 3 | 9 | 3 | | | | | |
| 2 | Fresado CNC | 10 | 3 | 9 | 3 | | | | | |
| 3 | Taladrado de banco | 6 | 9 | 3 | 3 | | | | | |
| 4 | Torneado convencional | 6 | 9 | 3 | 3 | | | | | |
| 5 | Soldadura SMAW | 9 | | | | 9 | 3 | 3 | | |
| 6 | Soldadura por puntos | 8 | | | | 3 | 3 | | 9 | |
| 7 | Cizallado | 6 | | | | | | | | |
| 8 | Corte con plasma | 8 | 9 | 3 | | | 3 | | | |
| 9 | Corte con sierra cinta | 6 | 3 | 9 | | | | | | |
| 10 | Corte con esmeril | 7 | 9 | | | | | | | |
| | Corte con metalizadora | 6 | 9 | | | | | | | |
| 11 | Doblado | 6 | | | | | | | | 9 |
| EVALUACION DE IMPORTANCIA | ABSOLUTA | 1053 | 366 | 267 | 87 | 105 | 75 | 27 | 72 | 54 |
| | RELATIVA (%) | | 35% | 25% | 8% | 10% | 7% | 3% | 7% | 5% |

Figura 33: Cuarta matriz QFD – Planeación de la producción.

Como resultado de esta evaluación, se obtuvo una “Evaluación por importancia”, que se calculó de la misma manera que en la sección 3.3. Desarrollo de la primera matriz del QFD (Ec. 1, 2, 3 y 4).

Ejemplo, y tomando en cuenta que para la cuarta matriz los “cómo” son los factores:

$$F_{1,1} = Prioridad_1 * Factores_{1,1}$$

$$F_{1,1} = 7 * 3$$

$$F_{1,1} = 21$$

Para la columna 1 ($n = 1$):

$$SF_n = 21 + 30 + 54 + 54 + 0 + 0 + 0 + 72 + 18 + 63 + 54 + 0$$

$$SF_n = 366$$

Por lo tanto, la FA es:

$$FA = 366 + 267 + 87 + 105 + 75 + 27 + 72 + 54$$

$$FA = 1\ 053$$

Calculando para la primera columna ($n = 1$):

$$FR_1 = \frac{366}{1\ 053}$$

$$FR_1 = 0.347 \approx 35.00\%$$

Estos cálculos se repiten para obtener la frecuencia relativa y determinar los factores críticos.

A partir de los resultados obtenidos en la cuarta matriz del QFD (Figura 33), se definieron las variables clave de cada proceso, en función del material a utilizar. Se consideró que no en todas las operaciones es necesario alcanzar una rugosidad superficial fina. Como resultado, se presenta la Tabla 16.

Tabla 16: Factores clave.

| Procesos de manufactura | Factores clave |
|-------------------------|-----------------------|
| Fresado CNC | Velocidad de avance |
| Soldadura MIG | Amperaje de trabajo |
| Corte con plasma | Velocidad de corte |
| Fresa convencional | Velocidad de avance |
| Soldadura por puntos | Proceso pre – soldado |
| Torno convencional | Velocidad de corte |

Los parámetros de manufactura críticos (Tabla 16) para cada pieza, calculados en función de su geometría y del proceso asignado, se detallan en la Sección 3.8.5. Parámetros para la manufactura del molino. Estos valores garantizan la eficiencia del mecanizado y el cumplimiento de las especificaciones técnicas, además de asegurar la repetibilidad del proceso y la calidad dimensional de los componentes maquinados.

3.8. PLANEACIÓN DE LA MANUFACTURA DEL MOLINO

Para la manufactura del molino, fue necesario modelar las piezas mediante un software de diseño asistido por computadora (CAD) en 3D. En este caso, se utilizó *SolidWorks 2025* con licencia estudiantil. Las piezas modeladas fueron las siguientes (Tabla 17):

Tabla 17: Piezas del MC.

| N. De pieza | Código | Pieza | Material | Tipo de pieza |
|-------------|--------|-------------------------|---|---------------|
| 01 | CAS01 | Chasis | Perfil rectangular galvanizado cal. 16 2"x2" | Manufacturada |
| 02 | TLV02 | Tolva de entrada | Lámina galvanizada cal. 16 | Manufacturada |
| 03 | TLV03 | Tolva de salida | Lámina galvanizada cal. 16 | Manufacturada |
| 04 | CBI04 | Cubierta chasis | Lámina galvanizada cal. 16 | Manufacturada |
| 05 | GAR05 | Guarda | Lámina galvanizada cal. 16 | Manufacturada |
| 06 | LAN06 | Llanta | Caucho | Comprada |
| 07 | RN007 | Rin | - | Comprada |
| 08 | EE008 | Eje llantas | Barra de acero 1/2" | Manufacturada |
| 09 | BSE09 | Base de motor | Placa de acero 3/8" | Manufacturada |
| 10 | MTO10 | Motor | - | Comprada |
| 11 | CCH11 | Cuchilla | Placa de acero inoxidable 304 1/2" | Manufacturada |
| 12 | CNT12 | Contracuchilla inferior | Placa de acero inoxidable 304 3/4" | Manufacturada |
| 13 | CNT13 | Contracuchilla superior | Placa de acero inoxidable 304 3/4" | Manufacturada |
| 14 | EE014 | Eje de cuchillas | Barra de acero inoxidable 304 1 1/2" | Manufacturada |
| 15 | DSC15 | Disco de cuchillas | Placa de acero inoxidable 304 3/4" | Manufacturada |
| 16 | BSA16 | Bisagra | Acero al carbono | Comprada |
| 17 | CUM17 | Chumacera | - | Comprada |
| 18 | AAS18 | Asas | Perfil tubular de 1 1/4" Cal. 18 | Manufacturada |
| 19 | PLA19 | Polea de motor | Polea doble de 4" de aluminio | Manufacturada |
| 20 | PLA20 | Polea de eje | Polea doble de 4" de aluminio | Manufacturada |

Las piezas modeladas en 3D se desarrollaron conforme a los parámetros dimensionales establecidos en el diseño funcional, prestando especial atención a componentes críticos como el chasis, la tolva de entrada y las contracuchillas (Figura 34). El resto de los elementos se documentaron en el APÉNDICE E.

. Una vez finalizado el modelado individual, todas las piezas fueron integradas en un ensamblaje virtual, con el propósito de validar su compatibilidad geométrica mediante herramientas de verificación de interferencias, asegurando así el cumplimiento de los requisitos de montaje y funcionalidad.

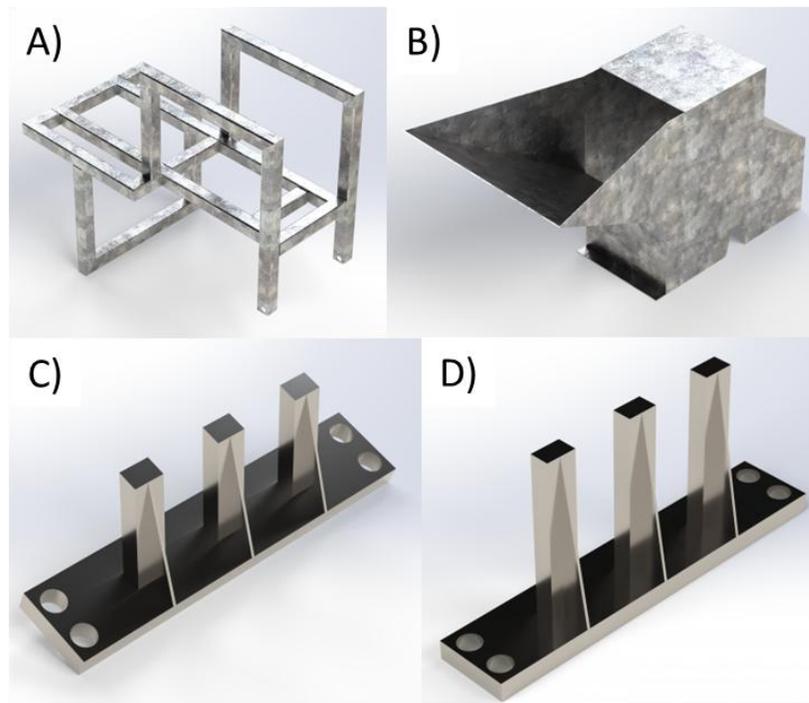


Figura 34: Piezas en 3D.

Nota. Modelado 3D de: A) Chasis, B) Tolva de entrada, C) Contracuchilla superior y d) Contracuchilla inferior.

De las piezas modeladas, únicamente se elaboraron planos para aquellos componentes que serían manufacturados, ya que también se incluyeron piezas comerciales con el propósito de desarrollar el modelo de ensamble y el despiece explosivo. Estos modelos facilitarían posteriormente el proceso de montaje.

3.8.1. Generación de planos de manufactura

Para la elaboración de los planos técnicos, se consideraron las especificaciones propuestas por Jensen, Helsel y Short [49], quienes destacan la importancia del uso de recursos gráficos estandarizados. El conjunto de planos resultante incluye vistas ortogonales, cortes seccionales, acotación normalizada conforme a la norma ISO 129-1, notas técnicas sobre materiales y especificaciones de acabado superficial. Adicionalmente, se incorporaron tolerancias geométricas basadas en la norma ASME Y14.5-2018. Estos documentos servirán como base para la posterior manufactura de los componentes (ejemplo de planos en la Figura 35).

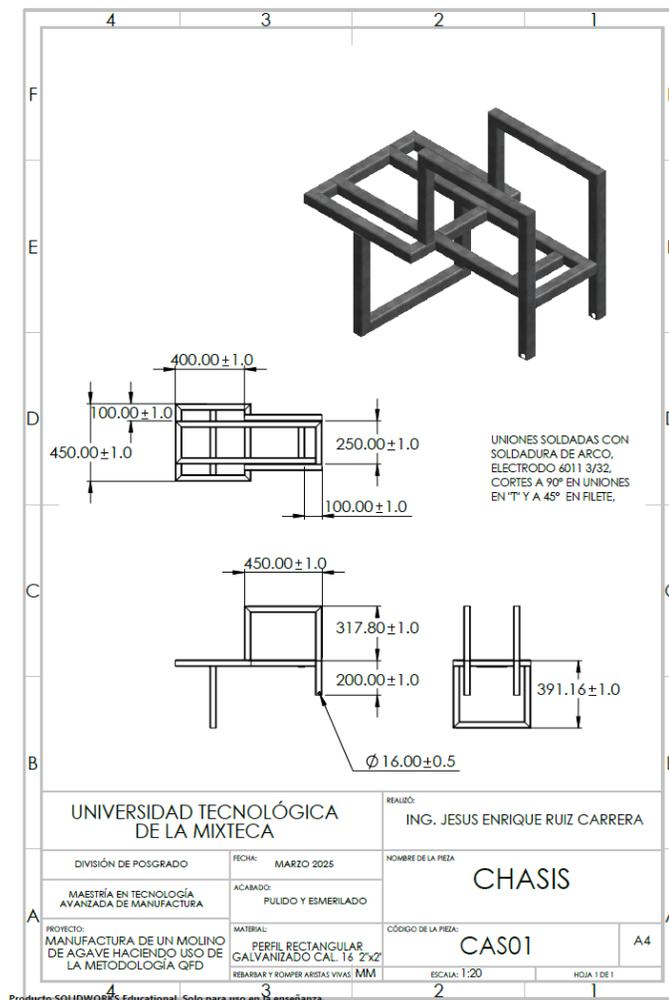


Figura 35: Plano del chasis.

Los planos restantes se presentan en el APÉNDICE F.

3.8.2. Generación de despieces explosionados

Para lograr una mejor visualización de la forma en que las piezas están ensambladas, se generaron los despieces explosivos correspondientes al molino completo y al subensamblé S1 (Figura 36 y Figura 38), así como una vista a detalle del ensamble (Figura 37).

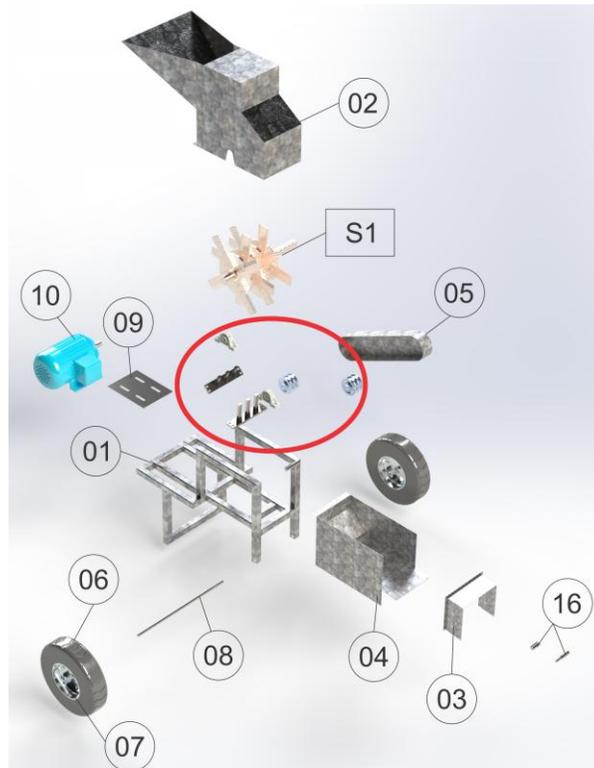


Figura 36: Despiece explosionado de MC.

Nota. las piezas están numeradas conforme al número de pieza de la tabla.

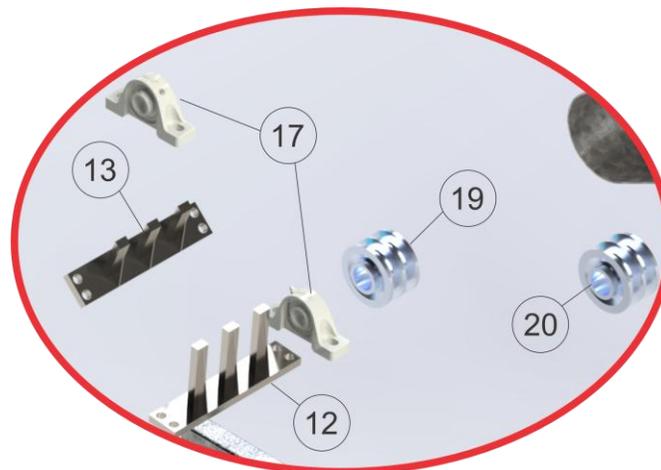


Figura 37: Vista a detalle.

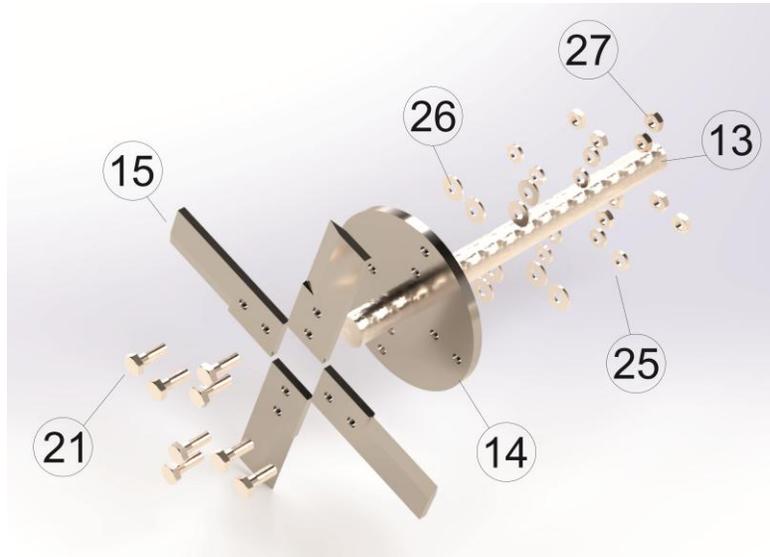


Figura 38: Explosivo del subensamble S1.

3.8.3. Diagramas de operaciones

En la Figura 39 se presenta el diagrama de operaciones para la fabricación del molino de cuchillas, el cual incluye todas las piezas del molino y una representación simplificada de su ensamblaje. Posteriormente, se muestra el diagrama de ensamble, en el cual se detalla el orden de ensamblaje de cada componente, acompañado de una breve descripción del procedimiento a seguir.

Las piezas mostradas corresponden tanto a componentes manufacturados como a piezas compradas, ya que en el diagrama también se indica en qué partes deben ensamblarse unas con otras.

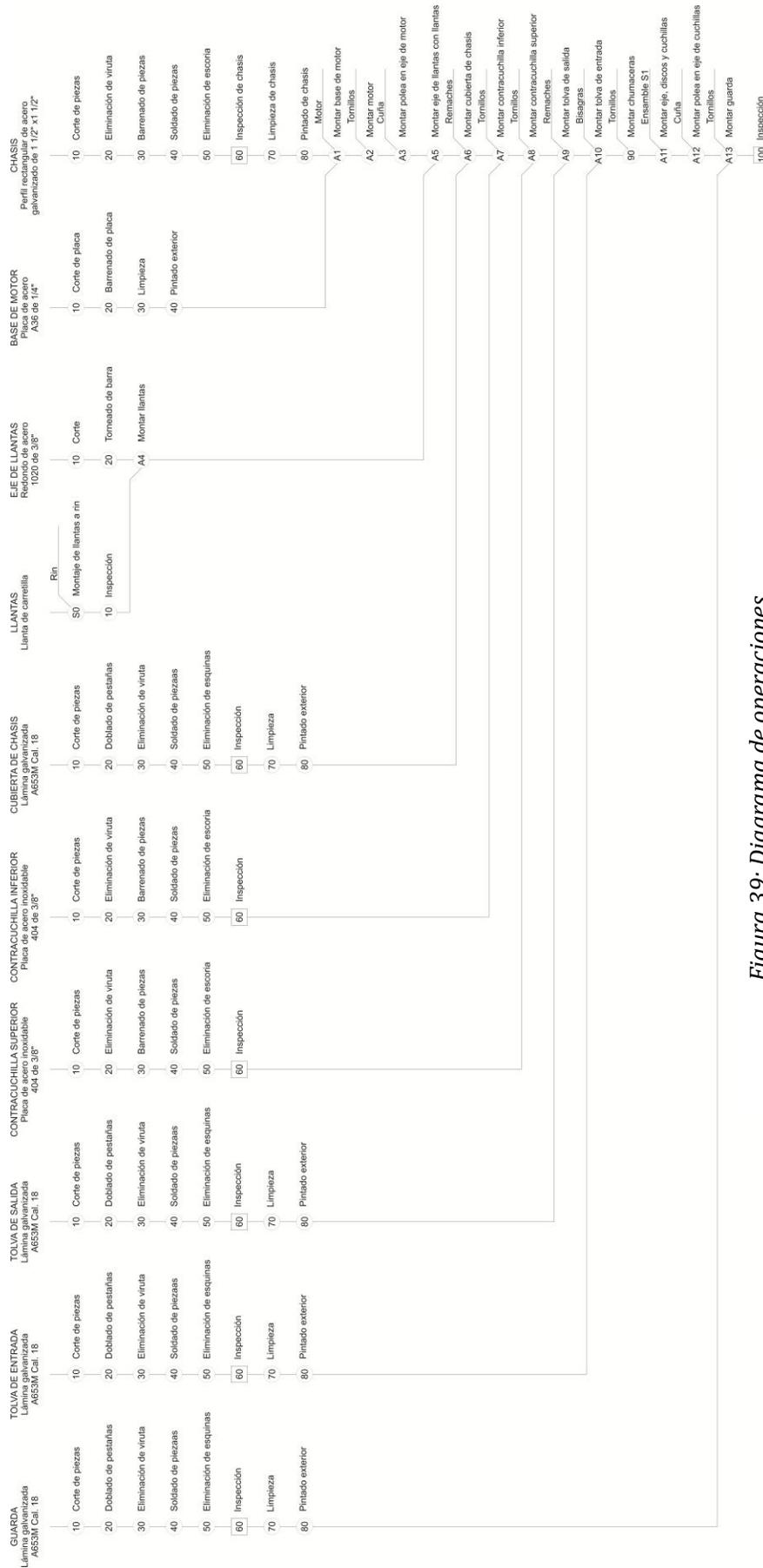


Figura 39: Diagrama de operaciones.

3.8.4. Diagrama de ensamble

Para el correcto ensamble del MC se planteó el diagrama de ensamble que se muestra en la Figura 40, donde se muestra el ensamble base y en la Figura 41 los subsensambles correspondientes.

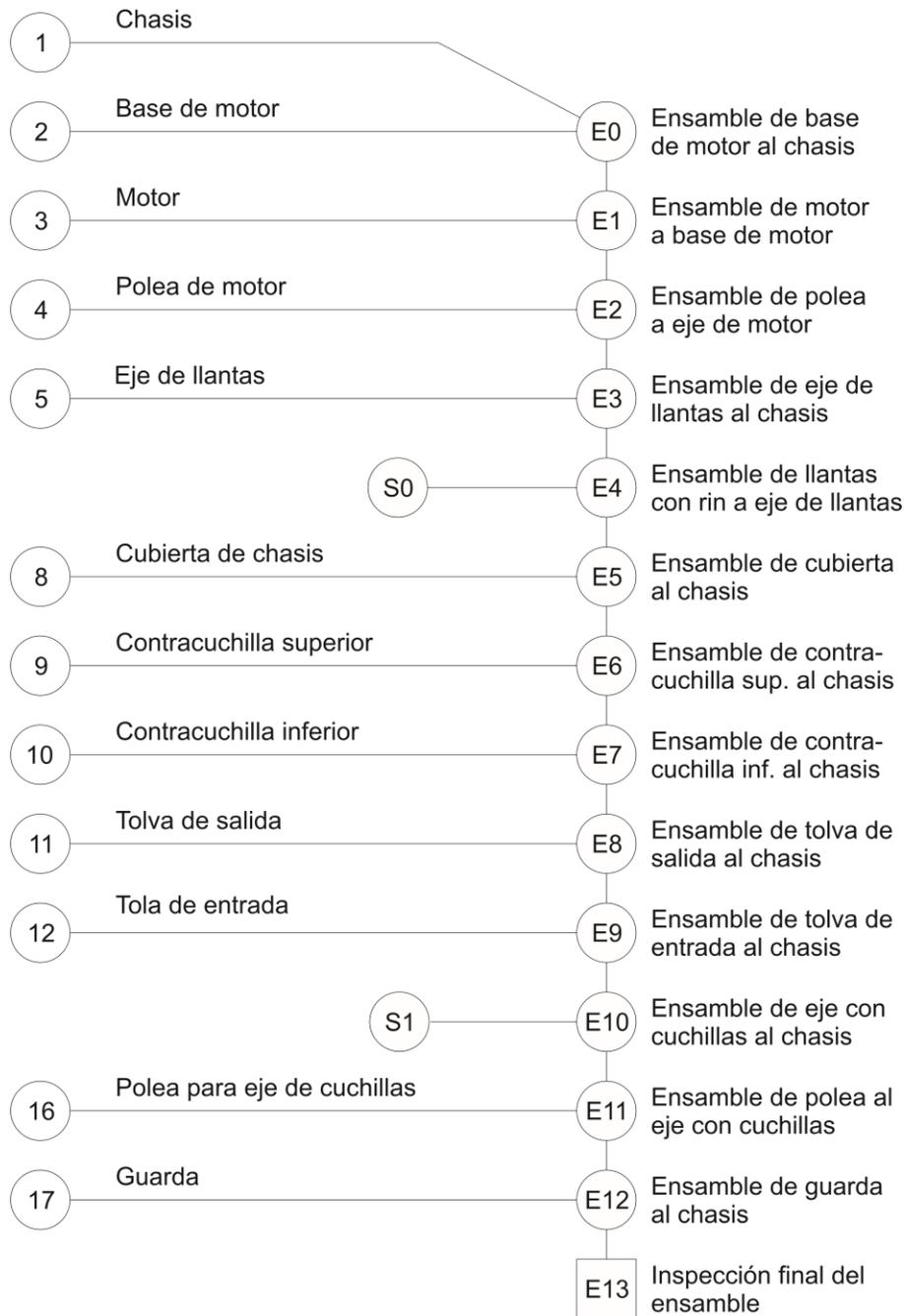


Figura 40: Diagrama de ensamble.



Figura 41: Diagrama de ensamble – Subensamble.

Nota. E# – Ensamble y S# – Subensamble

3.8.5. Parámetros para la manufactura del molino

Para la manufactura del molino, se realizaron los cálculos pertinentes de los parámetros a considerar en las diferentes máquinas y equipos empleados, con el fin de evitar modificaciones, alteraciones o un uso inadecuado de los mismos.

En el apartado 3.7. Identificación de factores clave, se determinaron los factores de mayor relevancia en los procesos, los cuales se resumen en la Tabla 16. Por tanto, en esta sección se presentan los cálculos realizados para la manufactura, agrupados según el tipo de maquinaria utilizada. Las fórmulas empleadas en estos cálculos se extrajeron de los libros Fundamentos de manufactura moderna de Groover y Manufactura, ingeniería y tecnología de Kalpakjian y Schmid.

➤ Fórmulas para fresado convencional y CNC:

Para ambos tipos de fresado se emplearon los mismos parámetros, salvo en la velocidad de avance en la fresadora convencional, la cual fue descartada debido a que no es posible configurar este parámetro como en la fresadora CNC; en su lugar, se utilizó la escala preestablecida de la máquina.

Los principales parámetros se tomaron de los capítulos 22 (sección 22.3.2, página 525) de Groover y 24 (sección 24.4, página 727) de Kalpakjian y Schmid, y se resumen en la Tabla 18.

Tabla 18: Fórmulas para cálculo de parámetros para fresado.

| Parámetro | Fórmula | Descripción |
|---|--|--|
| Velocidad del husillo (n) [rpm] | $n = \frac{1\ 000 * V_c}{\pi * D}$ Ec. 5 | Relación entre velocidad de corte, diámetro de la herramienta y velocidad del husillo. |
| Avance de la herramienta (Vf) [mm/min] | $V_f = f_z * z * n$ Ec. 6 | Avance lineal de la herramienta en función del avance por diente, dientes y rpm. |
| Volumen de material removido (Q) [mm ³ /min] | $Q = a_p * a_e * V_f$ Ec. 7 | Volumen de material removido por unidad de tiempo. |
| Velocidad de corte (Vc) [m/min] | $V_c = \frac{\pi * D * n}{1\ 000}$ Ec. 8 | Se puede despejar desde la fórmula de velocidad del husillo. |
| Tiempo de maquinado (t) [min] | $t = \frac{L}{V_f}$ Ec. 9 | Tiempo de mecanizado para una longitud de corte L. |
| Volumen total removido | $V_t = a_p * a_e * L$ Ec. 10 | Volumen total removido si se conoce la longitud total de corte. |

➤ Fórmulas para soldadura por arco

Para la operación de soldadura por arco se analizaron dos tipos de electrodos, E308L-16 y E309L-16, comparándose las características principales de cada uno (Tabla 19):

Tabla 19: Electrodo para soldar acero 304.

| Tipo de electrodo | Clasificación AWS | Aplicación en acero 304 | Observaciones |
|-------------------|----------------------|---|--|
| E308L-16 | AWS A5.4 E308L-16 | Acero inoxidable 304 y 304L | Baja emisión de carbono, excelente fluidez |
| E309L-16 | AWS A5.4 E309L-16 | Para unir acero 304 con aceros al carbono | También aplicable para juntas heterogéneas |

Dado que todas las soldaduras se realizarán en el mismo tipo de acero, se seleccionó el electrodo E308L-16, empleando dos diámetros diferentes: uno para relleno (3/32") y otro para refuerzo (1/8"). Con el electrodo definido, se procedió a realizar los cálculos principales para la soldadura, utilizando las fórmulas descritas en los capítulos 31 (sección

31.1.1, página 707) de Groover y 30 (sección 30.4) de Kalpakjian y Schmid, las cuales se resumen en la Tabla 20.

Tabla 20: Fórmulas para cálculo de parámetros para soldadura.

| Parámetro | Fórmula | Descripción |
|---------------------------|---------------------------|---|
| Potencia térmica (Q) | $Q = \eta * V * I$ Ec. 11 | Energía total suministrada por segundo por el arco de soldadura [J/s o W]. |
| Energía por mm (E) | $E = Q / v_s$ Ec. 12 | Energía aplicada por cada milímetro de avance del cordón [J/mm]. |
| Volumen fundido (V_m) | $v_m = A * v_s$ Ec. 13 | Volumen de metal fundido por minuto, calculado como el área del cordón por la velocidad de avance [mm ³ /min]. |

➤ Fórmulas para corte por plasma

Para realizar el corte por plasma, se deben considerar aspectos específicos del material de la pieza, su geometría y las especificaciones de la maquinaria disponible. Aunque no existe una sección específica dedicada a este proceso en las fuentes consultadas, las fórmulas utilizadas se encuentran mencionadas dentro de las secciones relativas a los métodos de corte no convencionales (Tabla 21).

Tabla 21: Fórmulas para cálculo de parámetros para corte por plasma.

| Parámetro | Fórmula | Descripción |
|-----------------------|----------------------------|---|
| Potencia del arco (Q) | $Q = n * V * I$ Ec. 14 | Energía efectiva del arco [W]. |
| Energía por mm (E) | $E = \frac{Q}{v_s}$ Ec. 15 | Energía por milímetro de corte [J/mm]. |
| Volumen fundido (V) | $V = A * v_s * t_c$ Ec. 16 | Volumen de material cortado por unidad de tiempo. |

➤ Fórmulas para torneado convencional

Para el cálculo de los parámetros de torneado, se utilizaron las fórmulas mencionadas en los capítulos 22 (sección 22.1.1, página 509) de Groover y 23 (sección 23.3, página 680) de Kalpakjian y Schmid, las cuales se resumen en la Tabla 22.

Tabla 22: Fórmulas para cálculo de parámetros para torneado.

| Parámetro | Fórmula | Descripción |
|----------------------|---|--|
| Velocidad angular | $n = \frac{1\ 000 * V_c}{\pi * D}$ Ec. 17 | Velocidad del husillo en RPM |
| Avance de corte | $V_f = f * n$ Ec. 18 | Avance lineal de la herramienta [mm/min] |
| Remoción de material | $MRR = \frac{\pi * D * a_p * V_f}{1\ 000}$ Ec. 19 | Volumen de material removido [cm ³ /min] |

3.9. ADQUISICIÓN DE MATERIALES

Uno de los factores señalados por la cooperativa fue el económico, ya que se busca manufacturar un molino empleando materiales duraderos y de grado alimenticio, que permitan mantener una adecuada relación costo-calidad.

Para evaluar este aspecto, se realizará una comparación entre los equipos mencionados en la sección 2.1.2. Maquinaria similar (Tabla 23) y el costo de los materiales previstos para la fabricación del MC (Tabla 24).

En este análisis no se consideran los costos asociados al proceso de manufactura, ya que estos serían superiores al fabricar un único equipo en comparación con los equipos adquiridos en el mercado. Del mismo modo, no se incluyen los costos de los consumibles, debido a que, al adquirirse en su mayoría por unidad, resultan significativamente más elevados.

Tabla 23: Costos de maquinaria similar.

| Maquinaria similar | Costo |
|--|-------------|
| Deshebradora de agave mod. HA 2500 (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) [21] | \$59,100.00 |
| Trituradora para nopal agave forrajes motor Kohler 6.5 HP (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) [22] | \$33,900.00 |
| Picadora De Forraje Grande Con Motor Kohler (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) [23] | \$30,500.00 |
| Molino Martillos Azteca N.6 Motor Kohler Ukura Criba (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) [24] | \$27,500.00 |
| Picadora De Forraje 1800 6.5 HP Motor (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) [25] | \$10,864.00 |

| | |
|----------|-------------|
| Promedio | \$32,372.80 |
|----------|-------------|

Tabla 24: Costos de materiales.

| Materiales | Material utilizado | Costo unitario (m ² o Pz) | Costo total |
|--|----------------------|--------------------------------------|--------------|
| Arandela de acero inoxidable de seguridad de 1/2" | 40 Pz | \$ 8.30 | \$ 332.00 |
| Arandela de seguridad de 5/16" | 8 Pz | \$ 5.35 | \$ 42.80 |
| Barra de acero A36 1 1/2" | 2 m | \$ 76.00 | \$ 152.00 |
| Barra de acero inoxidable 304 1 1/4" | 0.5 m | \$ 858.83 | \$ 429.41 |
| Bisagras de sobreponer 2" | 2 Pz | \$ 15.00 | \$ 30.00 |
| Lámina galvanizada Cal. 16 | 1 m ² | \$ 663.77 | \$ 663.77 |
| Llanta de carretilla | 2 Pz | \$ 200.00 | \$ 400.00 |
| Motor 8 HP | 1 Pz | \$ 13,540.00 | \$ 13,540.00 |
| Perfil tubular galvanizado Cal. 16 2"x2" | 3 Pz | \$ 540.00 | \$ 1,620.00 |
| Placa de acero A36 1/8" | 0.075 m ² | \$ 1,600.00 | \$ 120.00 |
| Placa de acero inoxidable 304 1/2" | 1 m ² | \$ 8,199.00 | \$ 8,199.00 |
| Placa de acero inoxidable 304 3/4" | 0.3 m ² | \$ 12,298.00 | \$ 3,689.40 |
| Rin de carretilla | 2 Pz | \$ 200.00 | \$ 400.00 |
| Tornillo cabeza hexagonal 1/4" x 1" G4 | 4 Pz | \$ 10.60 | \$ 42.40 |
| Tornillo de acero inoxidable 1/2" x 1 1/2" cabeza hexagonal 13 h/pulg G8 | 32 Pz | \$ 19.30 | \$ 617.60 |
| Tornillo de acero inoxidable 1/2" x 3" cabeza hexagonal 13 h/pulg G4 | 8 Pz | \$ 33.25 | \$ 266.00 |
| Tornillo 5/16" x 1 1/2" cabeza hexagonal 18 h/pulg G4 | 4 Pz | \$ 15.30 | \$ 61.20 |
| Tuerca de acero inoxidable de 1/2" con inserto de nylon 13 h/pulg | 40 Pz | \$ 9.75 | \$ 390.00 |
| Tuerca 5/16" con inserto de nylon 18 h/pulg | 4 Pz | \$ 7.85 | \$ 31.40 |
| Total | | | \$ 31,026.98 |

Con los resultados obtenidos del promedio de maquinaria similar (\$32,372.80) y una cotización para los materiales requeridos en la fabricación (\$31,026.98) se identifica que la manufactura de un molino que cumpla con las especificaciones de la cooperativa presenta un costo comparable, e incluso ligeramente inferior, al de modificar una trituradora/deshebradora comercial.

CAPÍTULO

IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

El presente capítulo expone de forma estructurada el análisis por elementos finitos aplicado al subensamble S1, en el cual se detallan las condiciones de carga, restricciones y propiedades de los materiales considerados, así como la interpretación técnica de los resultados. Asimismo, se integran los hallazgos obtenidos a partir de las operaciones descritas en el apartado 3.8.5. Parámetros para la manufactura del molino, donde se precisan las especificaciones y criterios técnicos que orientaron su construcción. Finalmente, se presenta la manufactura general del MC, abarcando desde la planificación y selección de materiales hasta la ejecución de los procesos de fabricación. De este modo, el capítulo concentra los análisis y resultados que sustentan la evaluación técnica y la viabilidad del diseño, sirviendo como puente hacia la discusión e interpretación global del proyecto.

4.1. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS: “ANSYS”

El procedimiento general para la formulación de un análisis por elementos finitos, que permite resolver un problema físico mediante software especializado, es común a diversos tipos de estudio que requieren discretización, como los análisis estructurales, de transferencia de calor o de flujo de fluidos. En el presente proyecto se optó por emplear el software ANSYS, debido a que ofrece una mayor precisión y un enfoque más adecuado en comparación con otros programas disponibles. Asimismo, se decidió realizar únicamente análisis estáticos, considerando las limitaciones en recursos computacionales y las restricciones impuestas por la licencia educativa, las cuales dificultan la ejecución de análisis dinámicos. Este procedimiento consta de tres etapas: preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento [41]. Por lo tanto, las actividades realizadas en cada etapa para este trabajo se dividieron en:

➤ Preprocesamiento

En esta primera etapa se deben llevar a cabo diversas actividades, tales como la selección de materiales, la definición de la geometría, la ubicación de las fuerzas, así como la determinación del tipo de análisis a realizar (métodos, mallado, posiciones, entre otros).

○ Materiales

El material de las piezas empleadas en el ensamble S1 corresponde a acero inoxidable 304, grado alimenticio, cuyas propiedades son las siguientes (Figura 42):

| Physical Properties | Metric | English | Comments |
|--|----------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Density | 8.00 g/cc | 0.289 lb/in ³ | |
| Mechanical Properties | Metric | English | Comments |
| Hardness, Brinell | 123 | 123 | Converted from Rockwell B hardness. |
| Hardness, Knoop | 138 | 138 | Converted from Rockwell B hardness. |
| Hardness, Rockwell B | 70 | 70 | |
| Hardness, Vickers | 129 | 129 | Converted from Rockwell B hardness. |
| Tensile Strength, Ultimate | 505 MPa | 73200 psi | |
| Tensile Strength, Yield | 215 MPa | 31200 psi | |
| | @Strain 0.2 % | @Strain 0.2 % | |
| Elongation at Break | 70 % | 70 % | in 50 mm |
| Modulus of Elasticity | 193 GPa | 28000 ksi | |
| Poissons Ratio | 0.29 | 0.29 | |
| Shear Modulus | 77.0 GPa | 11200 ksi | |
| Izod Impact  | 150 J | 111 ft-lb | V-Notch |
| | @Temperature -195 °C | @Temperature -319 °F | |
| | 150 J | 111 ft-lb | V-Notch |
| | @Temperature 21.0 °C | @Temperature 69.8 °F | |
| Charpy Impact | 325 J | 240 ft-lb | |
| Electrical Properties | Metric | English | Comments |
| Electrical Resistivity  | 0.0000720 ohm-cm | 0.0000720 ohm-cm | |
| | @Temperature 20.0 °C | @Temperature 68.0 °F | |
| | 0.000116 ohm-cm | 0.000116 ohm-cm | |
| | @Temperature 650 °C | @Temperature 1200 °F | |

Figura 42: Propiedades del acero 304 [50].

Para el análisis de tiempo de vida útil también fue necesario indicar la $S-N$ curve (también conocida como curva de Wöhler) la cual es una gráfica utilizada para mostrar la fatiga de los materiales.

Tabla 25: Curva $S-N$ [51].

| Ciclos a la falla | Esfuerzo alternante (MPa) |
|-------------------|---------------------------|
| 10 | 3234.40 |
| 20 | 2574.29 |
| 50 | 1896.75 |
| 100 | 1505.45 |
| 200 | 1194.88 |
| 2000 | 554.61 |
| 10000 | 324.34 |
| 20000 | 257.43 |
| 100000 | 150.55 |
| 200000 | 119.49 |
| 1000000 | 69.88 |

○ Geometría

El tipo de análisis seleccionado fue de tipo viga, debido a que las cargas y la velocidad de giro son constantes. Por esta razón, se concluyó que el análisis se realizaría sobre el eje de cuchillas, presentándose de la siguiente manera (Figura 43):

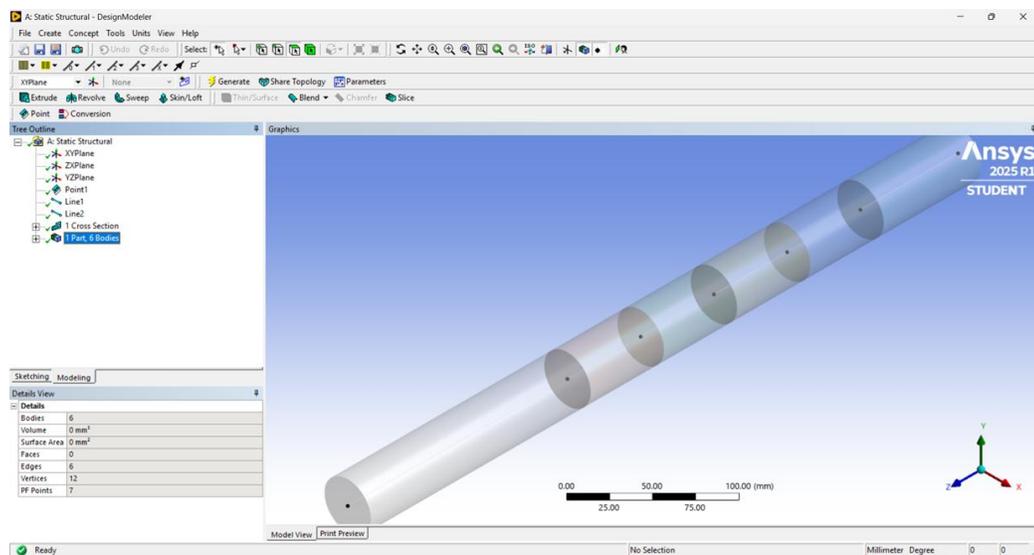


Figura 43: Geometría en el modelador (Design Modeler).

- Condiciones de frontera

Para definir las condiciones de frontera, se colocaron puntos en el centro del eje, considerando que el eje es completamente liso para evitar la acumulación de fibras. Los puntos se ubicaron entre los discos, con el fin de no generar desviaciones en las cargas aplicadas (Figura 44).

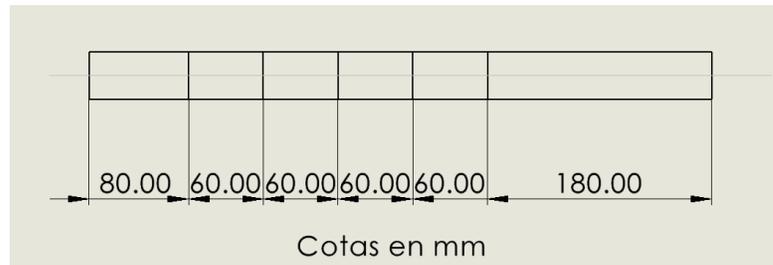


Figura 44: Posición de puntos para el análisis.

Por lo tanto, en el software se insertaron puntos que posteriormente fueron unidos para conformar la geometría del eje (Figura 45):

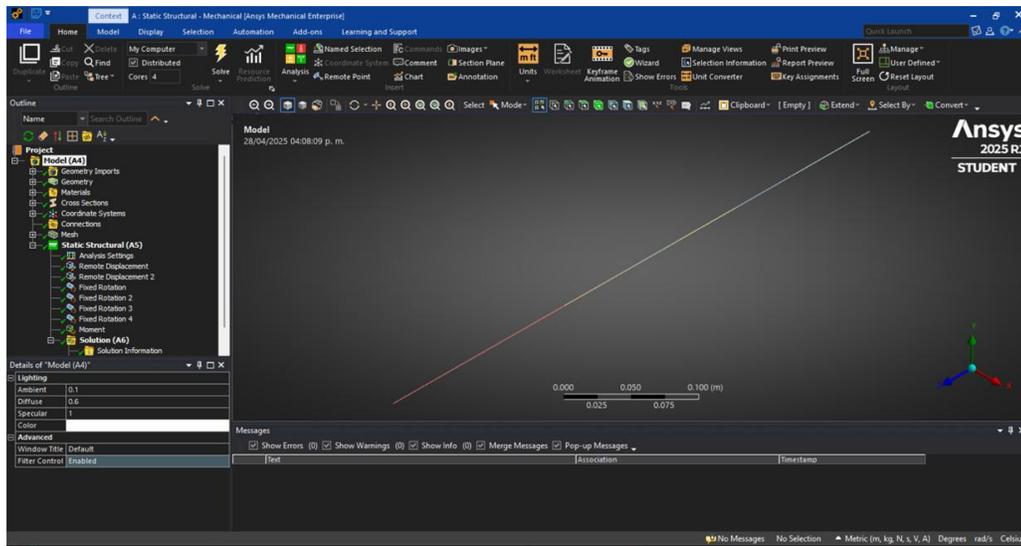


Figura 45: Condiciones de frontera (Mechanical).

- Variables de interés (fuerzas y sujeciones)

Para el inicio del análisis se consideraron diversos factores, entre los cuales destacan:

- Motor: se seleccionó un motor de 6 HP, con una velocidad máxima de 1800 RPM.
- Variador de frecuencia: se utilizó un variador de frecuencia de 7.5 HP, con un rango de operación de 150 a 2300 RPM.
- Torque: el torque se calculó en función del motor seleccionado, resultando en:

$$\tau = \frac{P * 0.746 * 9\ 550}{RPM} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde P se refiere a la potencia del motor, y RPM a las revoluciones por minuto a las que se desea calcular. En este caso, las RPM mínimas a utilizar serán 400 RPM, según el conocimiento empírico proporcionado por la cooperativa.

Quedando:

$$\tau = \frac{6HP * 0.746 * 9\ 550}{400\ RPM}$$

$$\tau = 106.86\ Nm$$

- Torque exigido por cuchilla: asumiendo 210.00 N de fuerza de corte por cuchilla. Cada cuchilla está aproximadamente a 6.00 cm del centro (por radio del disco).

$$\tau_{cuchilla} = F * R \quad \text{Ec. 21}$$

Donde F es la fuerza de la cuchilla y R es el radio donde empieza el filo de la cuchilla, quedando:

$$\tau_{cuchilla} = 210.00\ N * 0.20\ m$$

$$\tau_{cuchilla} = 42.00\ Nm$$

Al ser 4 discos y 4 cuchillas, y considerando que 2 están funcionando activamente se tiene:

$$\tau_{Total} = 2 * \tau_{cuchilla} \quad \text{Ec. 22}$$

$$\tau_{Total} = 84.00\ Nm$$

Comparando el torque que el motor puede entregar (106.86 NM) con el torque que se requiere para la molienda (84.00 Nm).

$$\frac{\tau_{Total\ entregado}}{\tau_{Disponible}} = \frac{84.00}{106.86} \quad \text{Ec. 23}$$

$$\frac{\tau_{Total\ entregado}}{\tau_{Disponible}} = 0.78$$

Es viable, el margen de seguridad es de aproximadamente 22.86 Nm, lo que permite que el sistema trabaje con una mayor capacidad de corte.

- Fuerzas: Para el cálculo de las fuerzas, y considerando lo anteriormente expuesto, se estableció el siguiente ordenamiento (Tabla 26):

Tabla 26: Ordenamiento de fuerzas en el eje.

| Ángulo | Fx (N) | Fy (N) | Fz (N) |
|--------|---------|---------|--------|
| 0° | -210.00 | 0.00 | 0.00 |
| 90° | 0.00 | -210.00 | 0.00 |
| 180° | 210.00 | 0.00 | 0.00 |
| 270° | 0.00 | 210.00 | 0.00 |
| 45° | -148.50 | -148.50 | 0.00 |
| 135° | 148.50 | -148.50 | 0.00 |
| 225° | 148.50 | 148.50 | 0.00 |
| 315° | -148.50 | 148.50 | 0.00 |

- Mallado

Para el mallado, se empleó una división de 30 elementos por segmento (Figura 46):

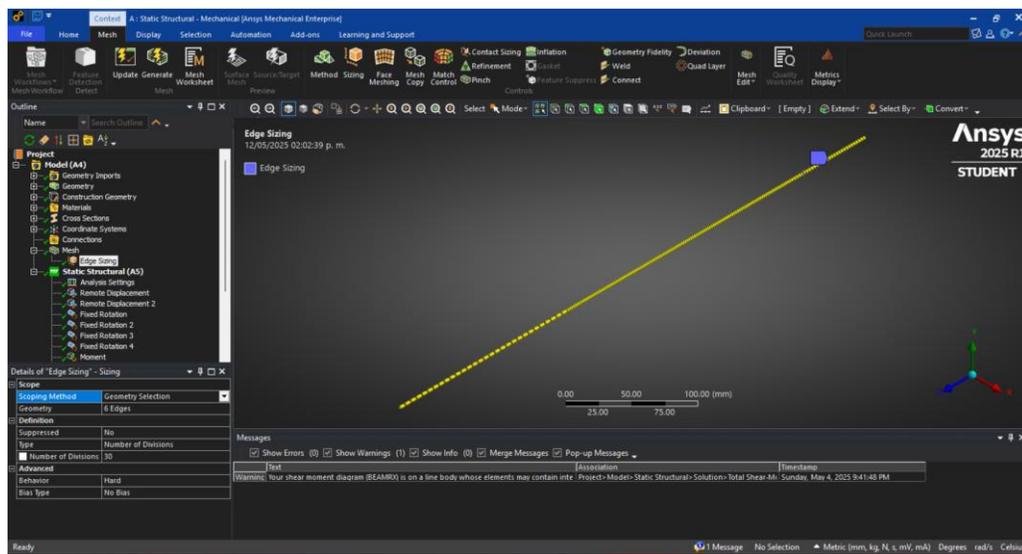


Figura 46: Mallado de eje.

➤ Procesamiento

En la etapa de procesamiento se realiza la resolución de la simulación mediante el software, ya que en este apartado se evalúa si el eje posee la robustez suficiente para desempeñar su función sin inconvenientes.

○ Solución de la simulación

La solución de la simulación muestra una deformación máxima de 0.0048817 mm (Figura 47), lo que indica una deformación mínima en el eje bajo las condiciones de uso planteadas. Por lo tanto, se puede concluir que existe un buen margen de seguridad ante posibles sobreesfuerzos durante el tiempo de operación.

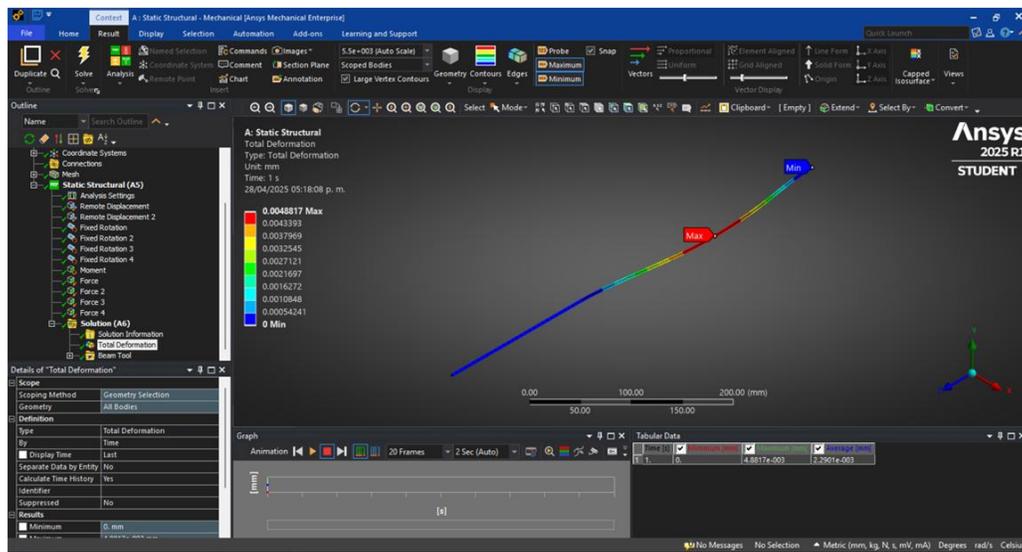


Figura 47: Solución del análisis.

➤ Posprocesamiento

Una vez obtenida la solución, se elaboran los diagramas de momento para identificar las zonas con mayor deformación, sobre las cuales se realizará un análisis detallado en 3D.

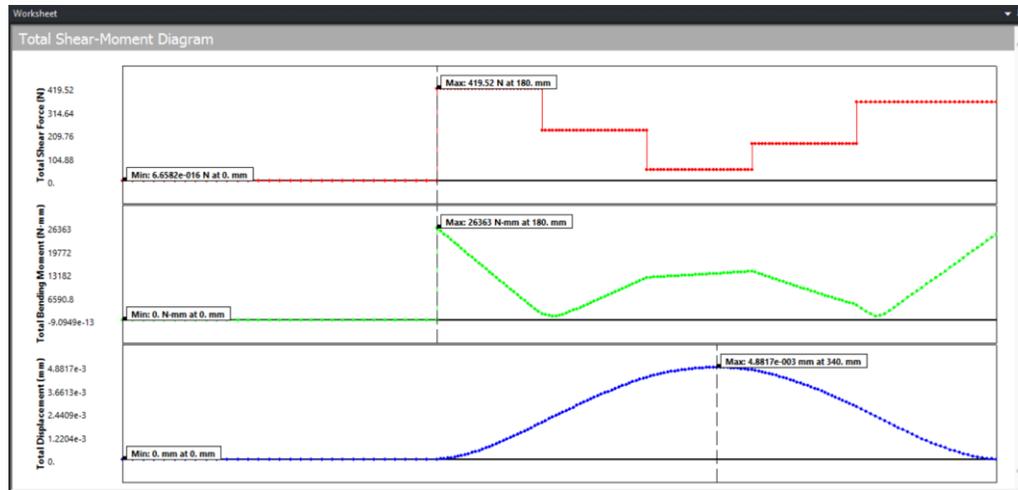


Figura 48: Diagrama de momento.

Como se aprecia, la máxima deformación está concentrada en los puntos de 180 a 500 mm, por lo tanto, allí se realizó un segundo análisis (análisis en 3D).

- Visualización

Se modeló en 3D en el software, la parte de mayor deformación (Figura 49):

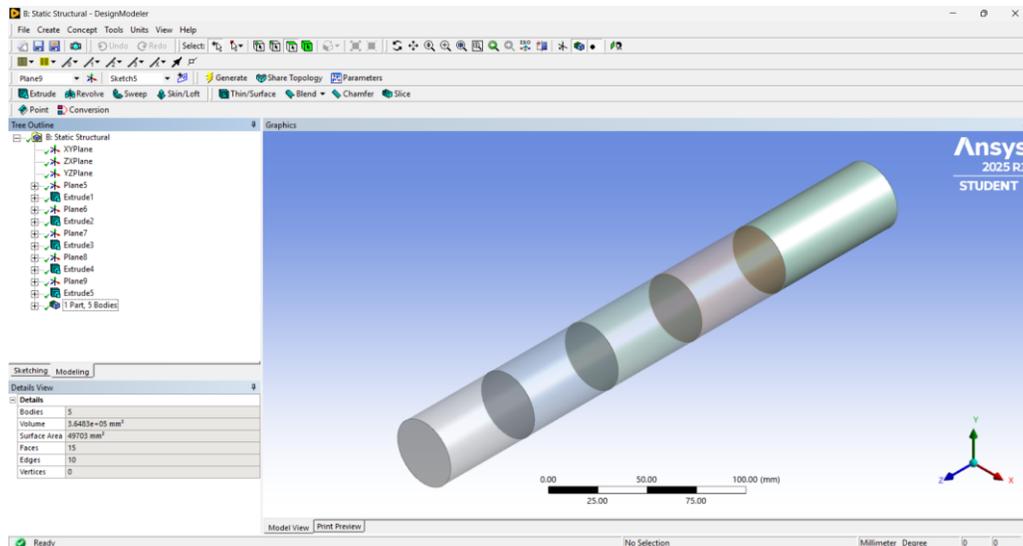


Figura 49: Geometría en 3D (Design Modeler).

- Análisis e interpretación

Como parte del análisis realizado, se abordaron tres parámetros fundamentales para evaluar el comportamiento del acero inoxidable AISI 304 bajo las condiciones de operación: deformación, tiempo de vida y factor de seguridad.

En primer lugar, se llevó a cabo el estudio de deformación, empleando los parámetros previamente definidos en la simulación por elementos finitos. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 50, donde se observa una deformación máxima de 9.1406×10^{-6} mm. Este valor resulta prácticamente despreciable, lo cual evidencia que el material experimenta una respuesta elástica mínima, garantizando estabilidad estructural durante el servicio.

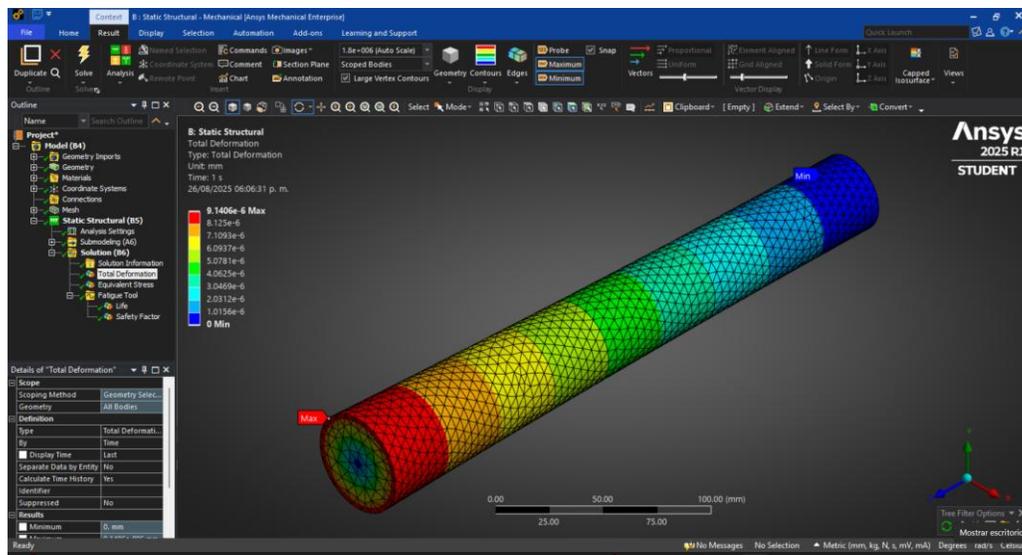


Figura 50: Solución del análisis 3D – Deformación.

Posteriormente, se analizó la vida a fatiga del material (Figura 51). El resultado obtenido fue del orden de 1×10^6 ciclos. Al contrastar este valor con la curva S-N correspondiente al acero inoxidable 304 (Figura 19), se confirma que el componente puede considerarse de vida infinita, dado que la deformación registrada se encuentra muy por debajo de los límites críticos para el inicio de daño por fatiga. Esto implica que, bajo las cargas consideradas, el material no presenta riesgo de falla cíclica.

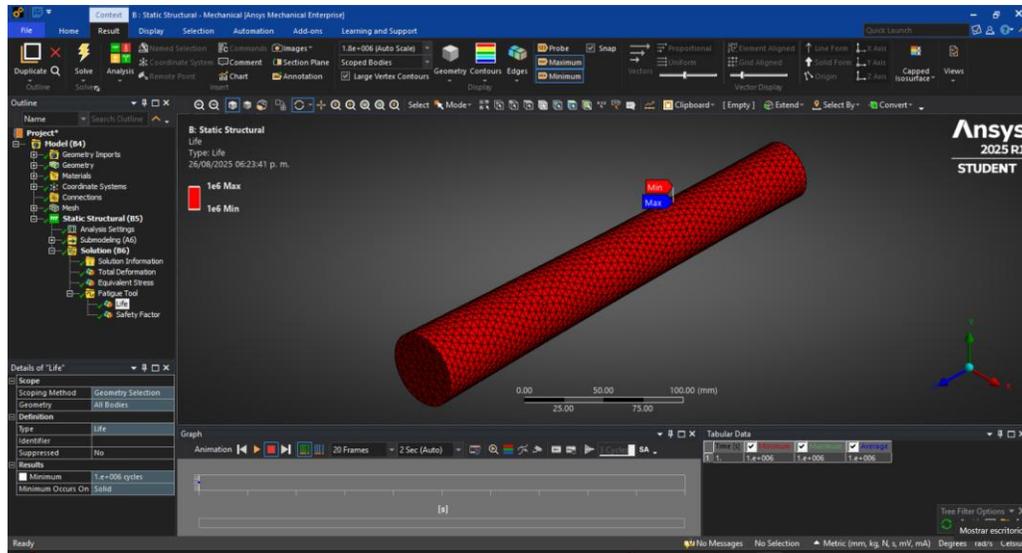


Figura 51: Solución del análisis 3D – Vida del material.

Finalmente, se evaluó el FoS, cuyo valor obtenido fue de 15 (Figura 52). Este resultado supera ampliamente los valores comúnmente referidos en la literatura para aplicaciones industriales (FoS entre 2 y 5, sección 2.6. Factor de seguridad). Un margen de seguridad de tal magnitud indica que el diseño no solo es funcional, sino también robusto frente a variaciones en las condiciones de operación, incertidumbres en el modelo o posibles imperfecciones en el material.

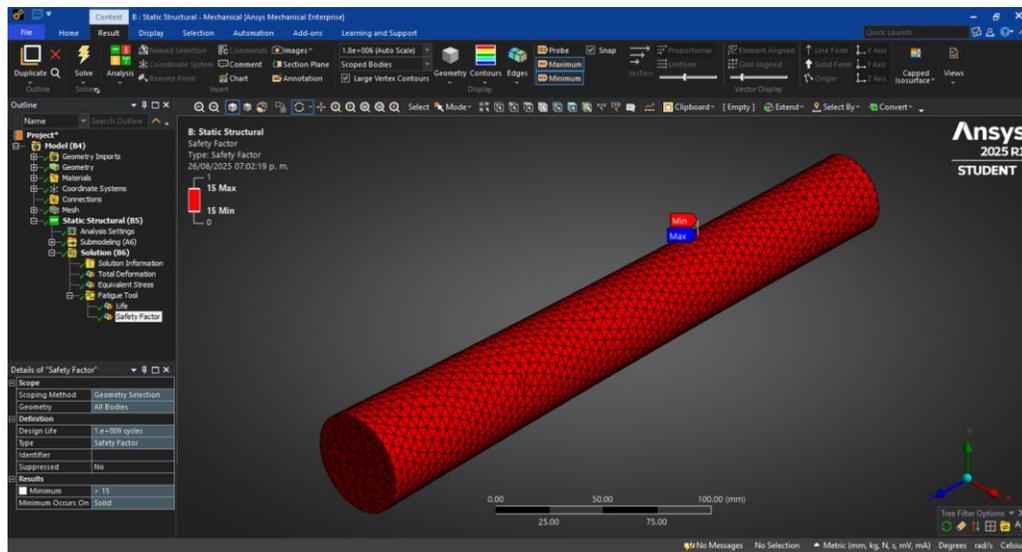


Figura 52: Solución del análisis 3D – Factor de seguridad.

En conjunto, los tres parámetros analizados permiten establecer que el acero 304 bajo las condiciones simuladas presenta un comportamiento altamente confiable: la deformación es mínima, la vida a fatiga es prácticamente ilimitada y el factor de seguridad excede ampliamente lo requerido, asegurando un desempeño satisfactorio en el contexto de aplicación.

4.2. RESULTADOS DE PARÁMETROS DE MANUFACTURA

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al ejecutar las operaciones correspondientes, descritas previamente en la sección 3.8.5. Parámetros para la manufactura del molino.

➤ Cálculo para fresado convencional y CNC:

Al realizar las operaciones correspondientes (Ec. 5 - 10), se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 27):

Tabla 27: Parámetros de fresado.

| Espesor placa | 3/4 in | 3/4 in | 1/2 in | 1/2 in |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Fresa | 1/2 in | 3/4 in | 1/2 in | 3/4 in |
| D [mm] | 12.70 | 19.05 | 12.70 | 19.05 |
| a_p [mm] | 2.50 | 2.50 | 2.00 | 2.00 |
| a_e [mm] | 6.00 | 9.00 | 5.00 | 7.00 |
| n [rpm] | 2 005.00 | 1 337.00 | 2 005.00 | 1 337.00 |
| V_f [mm/min] | 321.00 | 214.00 | 321.00 | 214.00 |
| Q [mm ³ /min] | 4 812.00 | 4 812.00 | 3 208.00 | 2 994.00 |

➤ Cálculo para soldadura por arco

A partir de los cálculos realizados (Ec. 11-13), se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 28:

Tabla 28: Parámetros de soldadura.

| Diámetro | 3/32" | 1/8" |
|---------------------------|--------|--------|
| Corriente [A] | 80.00 | 110.00 |
| Voltaje [V] | 25.00 | 27.00 |
| Eficiencia [η] | 0.75 | 0.75 |
| Velocidad avance [mm/min] | 100.00 | 120.00 |

| | | |
|---------------------------------------|----------|----------|
| Área cordón [mm ²] | 8.00 | 12.00 |
| Q [W] | 1 500.00 | 2 227.50 |
| E [J/mm] | 15.00 | 18.56 |
| V _m [mm ³ /min] | 800.00 | 1 440.00 |

En el caso de la soldadura por puntos, los parámetros principales se presentan en la Tabla 29:

Tabla 29: Parámetros de soldado por puntos.

| Parámetro | Valor aproximado |
|---------------------------------------|--|
| Espesor de lámina (t) | 1.5 mm (Cal. 16) |
| Diámetro del punto (d) | $d = 5 * \sqrt{t} \approx 6.12 \text{ mm}$ |
| Corriente de soldadura (I) | 10 000.00 – 15 000.00 A |
| Tiempo de soldadura (t _s) | 0.10 – 0.20 s |
| Presión del electrodo (P) | 300.00 – 500.00 N |
| Eficiencia térmica (η) | 0.85 |
| Resistencia total (R) | 200.00 μΩ (0.0002 Ω) (valor típico) |

Estos parámetros se extrajeron directamente de tablas encontradas en los libros revisados.

➤ Cálculo para corte por plasma

Se obtuvieron los siguientes resultados al realizar las operaciones correspondientes (Ec. 14–16) para las placas de ½" y ¾" (Tabla 30):

Tabla 30: Parámetros de corte por plasma.

| Parámetro | Placa 1/2" | Placa 3/4" |
|-----------------------------|------------|------------|
| Corriente [A] | 80.00 | 100.00 |
| Voltaje del arco [V] | 140.00 | 150.00 |
| Eficiencia térmica | 0.70 | 0.70 |
| Velocidad de corte [mm/min] | 500.00 | 250.00 |
| Q [W] | 7 840.00 | 10 500.00 |
| E [J/mm] | 15.68 | 42.00 |

➤ Cálculo para torneado convencional

Dado que muchos de los parámetros ya se encuentran estipulados en tablas, se presentan aquellos extraídos de los libros previamente citados (Tabla 31).

Tabla 31: Parámetros de libros de referencia.

| Parámetro | Símbolo / Unidad | Valor sugerido |
|-------------------------|------------------|---------------------------------|
| Diámetro de pieza | D [mm] | 38.10 |
| Velocidad de corte | V_c [m/min] | 30–45 (acero inoxidable 304) |
| Avance por revolución | f [mm/rev] | 0.2 (desbaste) |
| Profundidad de corte | a_p [mm] | 2 (desbaste) |
| Material de herramienta | — | HSS (<i>High Speed Steel</i>) |

Por lo tanto, los parámetros faltantes calculados (Ec. 17–19) fueron (Tabla 32):

Tabla 32: Parámetros de torneado.

| Parámetro | Valor |
|----------------------------|--------|
| n [RPM] | 334.00 |
| V_f [mm/min] | 66.80 |
| MRR [cm ³ /min] | 15.97 |

4.3. MANUFACTURA

Tomando en cuenta los parámetros calculados y las máquinas disponibles en la universidad, se procedió a la manufactura de las partes descritas en la Tabla 17: Piezas del MC. Para ello, se contó con el apoyo del técnico responsable del Laboratorio de Manufactura Avanzada (LabTAM), el C. Rodolfo Palma Guzmán.

Además, se siguió el orden establecido en la Figura 40, con el fin de organizar de manera óptima la fabricación de las piezas.

En esta sección se presenta un resumen del proceso de manufactura, así como los procedimientos utilizados con mayor frecuencia.

La primera pieza fabricada fue el chasis, para lo cual se cortó el PTR en la máquina metalizadora, se eliminaron las rebabas utilizando un esmeril de 4", y posteriormente se ensamblaron las piezas para formar la estructura completa (Figura 53).



Figura 53: Manufactura del chasis.

Aunque las poleas fueron adquiridas como piezas comerciales, fue necesario ajustarlas al eje utilizando el torno convencional. Asimismo, se mecanizó el cuñero correspondiente para asegurar adecuadamente la fijación de la polea al eje (Figura 54).



Figura 54: Manufactura de poleas.

Las contracuchillas, por su parte, fueron cortadas mediante el proceso de corte por plasma. Posteriormente, se rectificaron en la fresadora convencional para preparar sus superficies antes del proceso de soldadura, quedando como se muestra en la Figura 55.



Figura 55: Manufactura de contracuchillas.

Para la realización del subensamble S1, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Las cuchillas se cortaron utilizando una cortadora por plasma, se eliminaron las rebabas con un esmeril de 4", se rectificaron y posteriormente se afilaron empleando la fresadora convencional (Figura 56).
- Los discos fueron cortados inicialmente en forma hexagonal con ayuda del esmeril de 4". Posteriormente, se fueron eliminando las esquinas hasta obtener una forma circular aproximada, para luego perforar el centro y las posiciones correspondientes a las cuchillas.
- En el eje se mecanizó el cuñero para la polea y se realizó una ligera rectificación con el torno convencional.



Figura 56: Rectificado de cuchillas en fresa convencional.

Con las piezas preparadas, se unieron el eje y los discos mediante soldadura. Posteriormente, se rectificaron en el torno convencional para obtener la geometría final requerida en los discos (Figura 57).



Figura 57: Manufactura de eje y discos.

Para finalizar, se realizó el montaje de las cuchillas en los discos, como se muestra en la Figura 58.

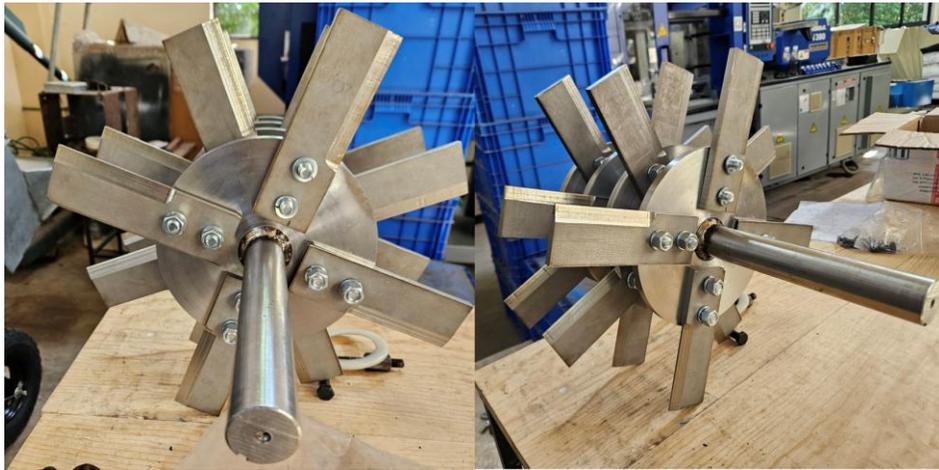


Figura 58: Montaje de subensamble S1.

Con las piezas de mayor relevancia ya fabricadas, se procedió al ensamble del MC para realizar los ajustes finales pertinentes al modelo (Figura 59).



Figura 59: Molino de cuchillas manufacturado.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

En el sector mezcalero, los molinos desempeñan un papel fundamental en los costos asociados a la producción de esta bebida ancestral, ya que la molienda es uno de los procesos más tardados y con mayores pérdidas de materia prima. Por ello, la necesidad de manufacturar un molino que satisfaga los requerimientos de pequeñas productoras de mezcal constituye un tema de gran relevancia técnica y socioeconómica. En este contexto, el presente proyecto se centró en el diseño y manufactura de un molino de cuchillas adaptado a las necesidades de una cooperativa. Con el apoyo de la metodología QFD, la voz del cliente se transformó en requerimientos técnicos que guiaron el proceso de diseño. Asimismo, el análisis integral que abarcó diseño, manufactura y validación por elementos finitos permitió caracterizar el comportamiento mecánico del prototipo bajo condiciones de operación reales. Los resultados obtenidos en términos de deformación, vida a fatiga y factor de seguridad proporcionan una visión clara de la confiabilidad estructural del equipo y constituyen la base para las conclusiones que consolidan la pertinencia y viabilidad del proyecto.

5.1. DISCUSIONES

El desarrollo del molino de cuchillas permitió reflexionar sobre diversos aspectos técnicos y metodológicos que influyeron en el resultado final. En primer lugar, el análisis de los molinos comerciales evidenció que, si bien existen equipos robustos en el mercado, la mayoría presenta desventajas en términos de costo, movilidad y mantenimiento. Esto confirma la pertinencia de diseñar un equipo adaptado a las necesidades específicas de los productores de mezcal, quienes requieren soluciones compactas y de fácil operación.

La aplicación de la metodología QFD constituyó un elemento clave en la estructuración del proyecto. Si bien la priorización de necesidades permitió traducir de manera ordenada los requerimientos del cliente en especificaciones técnicas, también se observó que este enfoque depende en gran medida de la claridad con la que los usuarios expresan sus demandas. En este sentido, la precisión de los resultados obtenidos está directamente vinculada a la calidad de la información recolectada durante las entrevistas y cuestionarios aplicados a la cooperativa.

Respecto a los procesos de manufactura, la definición de parámetros críticos como cortes, soldaduras y ensambles generó un marco de referencia confiable; sin embargo, se identificaron limitaciones asociadas a la disponibilidad de maquinaria y a la variabilidad en la calidad de insumos, lo cual sugiere la necesidad de estandarizar proveedores y controles de calidad más estrictos en futuras etapas de producción.

La validación del diseño mediante análisis de elementos finitos proporcionó evidencia cuantitativa sobre la resistencia y funcionalidad del molino. No obstante, es importante señalar que este tipo de validaciones simulan condiciones ideales, y que la operación en campo puede generar cargas dinámicas adicionales, desgaste prematuro de cuchillas o vibraciones no modeladas en el software. Por lo tanto, se recomienda complementar estas simulaciones con pruebas experimentales prolongadas en condiciones reales de molienda.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran un equilibrio entre la teoría y la práctica, destacando la importancia de metodologías sistemáticas de diseño, pero también evidenciando la necesidad de ajustes en función de las condiciones reales de operación y los recursos disponibles en el sector artesanal.

5.2. CONCLUSIONES

El presente proyecto permitió integrar herramientas de manufactura y análisis por elementos finitos en el diseño del molino de cuchillas para agave, logrando una evaluación integral de su comportamiento estructural y mecánico. La aplicación conjunta de simulación numérica y criterios de ingeniería facilitó la validación del molino de cuchillas, confirmando que cumple con los requerimientos de resistencia, confiabilidad y funcionalidad para su implementación en la industria mezcalera.

En relación con la hipótesis planteada, se acepta dado que la aplicación de la metodología QFD permitió traducir de manera efectiva las necesidades expresadas por los productores en especificaciones técnicas de diseño. Como resultado, se logró el desarrollo de un molino de cuchillas equipado con un motor de 8 HP, alineado con los requerimientos de funcionalidad, resistencia y facilidad de operación. Este enfoque confirmó que el uso de la metodología QFD constituye en una herramienta idónea para vincular la voz del usuario con el proceso de manufactura avanzada, asegurando que el prototipo responda de forma directa a las demandas del sector mezcalero.

En primera instancia, la investigación de molinos comerciales permitió identificar ventajas y desventajas de los molinos existentes (Tabla 3), lo cual sirvió de referencia para evitar limitaciones presentes en equipos convencionales y potenciar las características diferenciadoras del diseño propuesto.

Posteriormente, el desarrollo de la primera matriz HoQ (Figura 21) hizo posible priorizar de manera estructurada las necesidades del cliente, transformándolas en requerimientos técnicos concretos que guiaron la toma de decisiones durante todo el proceso de diseño.

Asimismo, la identificación de los componentes principales del molino de cuchillas permitió definir valores objetivo que garantizaron un diseño robusto y funcional. Con base en ello, se establecieron los procesos críticos de manufactura (Tabla 15), definiendo parámetros de corte, soldadura y ensamble que aseguraron la calidad estructural y la precisión dimensional del equipo.

La etapa de manufactura se concretó con la construcción de un molino de cuchillas en acero inoxidable 304, equipado con un motor de 8 HP, el cual cumplió con los

requerimientos de resistencia, seguridad, facilidad de limpieza y movilidad solicitados por la cooperativa (sección 4.3. Manufactura).

Finalmente, la validación de la funcionalidad mediante herramientas de análisis de elementos finitos confirmo que (sección 4.1. Análisis de elementos finitos: "ANSYS):

- ✚ Desempeño estructural confiable, el estudio de deformación demostró valores mínimos (9.14×10^{-6}), lo que confirma que el material opera dentro de la región elástica y garantiza estabilidad estructural en condiciones de operación.

- ✚ Comportamiento frente a fatiga, el análisis de vida a fatiga, en comparación con la curva S-N del acero AISI 304, indico un comportamiento de vida infinita, lo que asegura que el componente (Eje de cuchillas, soporte de subensamble S1) no está expuesto a fallas por cargas cíclicas, dentro de los rangos de esfuerzo evaluados.

- ✚ Alto margen de seguridad, el factor de seguridad calculado (FoS = 15) supera ampliamente los valores de referencia en la literatura (2-5), evidenciando un diseño robusto frente a variaciones de carga, condiciones imprevistas y tolerancias de manufactura.

En conclusión, el proyecto demuestra que la integración de herramientas de manufactura avanzada, el análisis por elementos finitos y la metodología QFD constituye una estrategia efectiva para optimizar el diseño de maquinaria agroindustrial. Los resultados obtenidos validan que el molino de cuchillas propuesto es técnica y económicamente viable, y que su implementación puede contribuir de manera significativa al fortalecimiento y la eficiencia de los procesos productivos en el sector mezcalero.

REFERENCIAS

- [1] M. Caballero Caballero, J. L. Montes Bernabé y M. E. Silva Rivera, «Innovación de un molino de agave cocido para la producción de mezcal,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 22, pp. 45-49, 2013.
- [2] Diario Oficial de la Federación, *NOM-070-SCFI-2016*, México: Gobierno Federal de México, 2016.
- [3] H. M. Durán-García y J. L. Pulido-Delgado, «Análisis de la Molienda en el Proceso de Elaboración de Mezcal,» *Información Tecnológica*, vol. 18, n° 1, pp. 47-52, 2007.
- [4] CIATEJ, Manual para la estandarización de los procesos de producción del mezcal guerrerense, Jalisco: CONACYT, 2014.
- [5] H. M. Durán-García, J. L. Pulido-Delgado, L. Vladimirovna-Krasotina y C. Michel-Cuello, «Estudio técnico de la molienda tradicional en la producción de mezcal artesanal,» *Temas de Ciencia y Tecnología*, vol. 22, n° 66, pp. 35-39, 2018.
- [6] L. Nogales, «3 Diferencias entre el mezcal artesanal y el mezcal ancestral,» *Mezcología*, 18 julio 2017. [En línea]. Available: <https://mezcologia.mx/mezcal-ancestral/>.
- [7] El Mero Mero Mezcal, «El mero mero mezcal,» 20178. [En línea]. Available: <http://elmeromeromezcal.com/el-mero-mero---elaboracion.html>.
- [8] F. Gutarra Meza, *Introducción a la Ingeniería Industrial*, Huancayo: Universidad Continental, 2015.

-
- [9] Diario Oficial de la Federación, *NOM-251-SSA1-2009*, México: Gobierno Federal de México, 2009.
- [10] R. Hernández, C. Fernández y P. Baptista, *Metodología de la investigación*, vol. 6, Mc Graw Hill, 2014.
- [11] M. Bounge, *En busca de la filosofía en las ciencias sociales*, Siglo XXI, 2008.
- [12] R. Sierra, *Técnicas de investigación social. Teoría y ejercicios*, vol. 15, Madrid: Thompson, 2008.
- [13] R. Rojas, *Guía para realizar investigaciones sociales*, Plaza Valdés, 2012.
- [14] D. Maritan, *Practical Manual of Quality Function Deployment*, Springer Cham, 2015.
- [15] V. Yepes, «Despliegue de la función de calidad y metodología seis sigma en la gestión de la construcción,» Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile, 2013.
- [16] E. Yacuzzi y F. Matrán, «QFD: conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos,» *UCEMA*, 2003.
- [17] E. S. Olaya Escobar, C. J. Cortés Rodríguez y O. G. Duarte Velasco, «Despliegue de la función calidad (QFD): beneficios y limitaciones detectados en su aplicación al diseño de prótesis mioeléctrica de mano,» *Revista Ingeniería e Investigación*, vol. 57, n° 1, p. 30–38, abril 2005.
- [18] Dirección Ejecutiva de Análisis Sectorial, «Monografía del Mezcal,» Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial, México, 2011.
- [19] E. Pérez Hernandez, M. d. C. Chávez Parga y J. C. JGonzález Hernández, «Revisión del agave y el mezcal,» *Revista Colombiana de Biotecnología*, vol. 18, n° 1, pp. 148-164, 2016.
- [20] Rosaluna, «Qué es un Tahona? Mezcal Rosaluna: Mezcal es mágico,» [En línea]. Available: <https://mezcalrosaluna.com/article/tahona/>.

-
- [21] BOMERI, «Mod. HA2500 (HEBRADORA DE AGAVE),» BOMERI, 2020. [En línea]. Available: <https://www.bomeri.com/hebradoras-agave>.
- [22] DIMASUR, «Trituradora Gasolina,» DIMASUR, 2022. [En línea]. Available: https://ads.dimasur.mx/equipo-agricola?gad_source=1.
- [23] Maquinaria agricola de Puebla, «Picadora De Forraje Grande Con Motor Kolher 14 HP,» Mercado Libre, 2023. [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-2254871164-picadora-de-forraje-grande-con-motor-kolher-14-hp-_JM#polycard_client=search-nordic&position=12&search_layout=grid&type=item&tracking_id=820bfe30-29d8-4def-b184-22ac00511553.
- [24] Azteca, «Molino Martillos Azteca N.6 Motor Kohler Ukura Criba,» Mercado Libre, 2024. [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-585646439-molino-martillos-azteca-n6-motor-kohler-ukura-criba-_JM#polycard_client=search-nordic&position=50&search_layout=grid&type=item&tracking_id=820bfe30-29d8-4def-b184-22ac00511553.
- [25] Maquinaria Puebla, «Picadora De Forraje 1800 6.5 HP Motor,» Mercado Libre, [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-2018184885-picadora-de-forraje-1800-65-hp-motor-_JM#polycard_client=search-nordic&position=32&search_layout=grid&type=item&tracking_id=820bfe30-29d8-4def-b184-22ac00511553.
- [26] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [27] M. P. Groover, Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas, México: Mc. Graw Hill, 2007.

-
- [28] Maquituls, «La soldadura por puntos,» Principales características, 2025. [En línea]. Available: <https://www.maquituls.es/noticias/la-soldadura-por-puntos-principales-caracteristicas/>.
- [29] V. Kallewaard Echeverri, L. V. Vanegas-Useche y J. C. Burbano-Jaramillo, «Diseño para manufactura y ensamble,» *Informador Técnico*, vol. 68, pp. 36-43, 2004.
- [30] Y. Akao, *Despliegue de la función calidad: integración de las necesidades del usuario en el diseño del producto*, Japón, 1990.
- [31] J. Hauser y D. Clausing, «The house of quality,» *Harvard Business Review*, vol. 66, n° 3, pp. 63-73, 1988.
- [32] C. Gover, «What and how about quality function deployment (QFD),» *International Journal of Production Economics*, Vols. %1 de %246-47, pp. 575-585, 1996.
- [33] J. A. Carnevalli y P. C. Miguel, «Review, analysis and classification of the literature on QFD—Types of research, difficulties and benefits,» *International Journal of Production Economics*, vol. 114, n° 2, pp. 737-754, 2008.
- [34] L. Cuatrecasas, *Gestión Integral de la Calidad*, España: PROFIT, 2010.
- [35] S. Montesinos, *Propuesta de mejora de un programa de posgrado basado en el QFD*, Oaxaca: Universidad Autónoma Benito Juárez, 2020.
- [36] C. Govers, «QFD not just a tool but a way of quality management,» *International journal production economics*, vol. 69, pp. 151-159, 2010.
- [37] A. Pastor, «Aplicación de las técnicas despliegue de la función de calidad (QFD) y proceso analítico jerárquico (AHP) a la mejora de la calidad de la formación de posgrado,» *TCyE*, vol. 5, pp. 11-36, 2016.
- [38] H. Raharjo, M. Xie y A. Brombacher, «Prioritizing quality characteristics in dynamic quality function deployment,» *International Journal of Production Research*, vol. 44, pp. 5005-5018, 2007.

-
- [39] J. B. ReVelle, J. W. Moran y C. A. Cox, *The QFD Handbook*, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [40] O. C. Zienkiewicz y R. L. Taylor, *The Finite Element Method*, 5th ed., Vols. %1 de %21-3, Butterworth–Heinemann, 2000.
- [41] J. G. Molina P., *Fundamentos del Método de Elementos Finitos*, U.M.S.A., 2010.
- [42] R. L. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*, México: Pearson Educación, 2006.
- [43] S. Suresh, *Fatigue of materials*, Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [44] J. E. Shigley, C. R. Mischke y R. G. Budynas, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, México: McGraw-Hill, 2011.
- [45] J. Maximov y G. Duncheva, «Effects of cryogenic- and cool-assisted burnishing on the surface integrity and operating behavior of metal components: a review and perspectives,» *Machines*, vol. 5, nº 12, abril 2024.
- [46] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 10 th ed., New York: McGraw-Hill, 2015.
- [47] G. Castro Bernal, «Diseño del Producto,» de *Diseño de Sistemas Productivos y Logísticos*, España, Academica Espanola, 2018.
- [48] K. T. Ulrich y S. D. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*, 5th ed., México: McGraw Hill, 2013.
- [49] C. Jensen, J. D. Hesel y D. R. Short, *Dibujo y diseño en ingeniería*, México: McGraw Hill, 2004.
- [50] MatWeb, «Hoja de datos del material,» Hoja de datos del material, [En línea]. Available:
<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da&ckck=1>. [Último acceso: 18 04 2025].

- [51] S. Huzni, J. Rahmaddireja, S. Fonna y M. Ridha, «S-N Curve Estimation of AISI 304 in Air and Corrosive Environment Using Finite Element Method,» *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII*, pp. 1197-1200, 2013.

APÉNDICE

A

ENTREVISTA

Introducción

Saludo y agradecimiento por participar en la entrevista.

Breve explicación del propósito de la entrevista y su importancia para la mejora de la producción de mezcal.

Preguntas generales

¿Qué le gusta de los molinos que ya se encuentran en el mercado?

¿Qué le disgusta de los molinos que ya se encuentran en el mercado?

¿Cuáles son los principales problemas que considera usted cuando compra el molino?

¿Qué mejoras haría al producto?

Inversión

¿Cuál sería su rango de inversión inicial ideal para adquirir un molino de agave para la producción de mezcal? ¿Tiene un presupuesto específico en mente?

Requerimientos

¿Qué características considera esenciales en un molino de agave para la producción de mezcal? ¿Podría mencionar las más importantes para usted?

Ligereza

¿Preferiría un molino de agave que sea ligero para facilitar su manipulación? ¿O considera que la robustez es más importante que la ligereza?

Espacio físico

¿Cuánto espacio está disponible en su área de producción para instalar el molino de agave? ¿Tiene restricciones de espacio que deban considerarse?

Estructura rígida

¿Es importante para usted que el molino de agave tenga una estructura rígida para garantizar su estabilidad y evitar vibraciones durante la operación? ¿Ha tenido experiencias previas con molinos que no tenían una estructura sólida?

Potencia del motor

¿Qué nivel de potencia del motor preferiría para el molino de agave? ¿Ha tenido alguna experiencia previa con motores de diferentes de potencias en molinos similares?

Movilidad

¿Considera importante que el molino de agave sea fácilmente móvil para su transporte o reubicación? ¿En qué situaciones cree que sería beneficioso tener esta característica?

Motor

¿Preferiría que el molino de agave tenga un motor eléctrico? ¿Existen razones específicas para esta preferencia?

Compacto

¿Es importante para usted que el molino de agave sea compacto para ocupar menos espacio en su área de producción? ¿Tiene limitaciones de espacio que deban tenerse en cuenta?

Materiales resistentes

¿Qué tipo de materiales resistentes considera esenciales para la construcción del molino de agave? ¿Tiene preferencia por materiales como el acero inoxidable o el hierro fundido?

Cuchillas resistentes

¿Considera crucial que las cuchillas del molino de agave sean resistentes para manejar eficientemente el proceso de molienda? ¿Qué tipo de materiales cree que son los más adecuados para estas cuchillas?

Pinturas no tóxicas

¿Es importante para usted que las pinturas utilizadas en el molino de agave sean no tóxicas para garantizar la seguridad alimentaria? ¿Ha tenido experiencias previas con pinturas que no cumplían con este requisito?

Facilidad de limpieza

¿Prefiere un molino de agave que sea fácil de limpiar para mantener altos estándares de higiene en la producción de mezcal? ¿Qué características específicas de limpieza considera más importantes?

Cuchillas de acero inoxidable

¿Preferiría que las cuchillas del molino de agave sean de acero inoxidable por su resistencia y durabilidad? ¿Ha tenido problemas previos con cuchillas que se desgastan rápidamente?

Seguridad

¿Considera esencial que el molino de agave cuente con características de seguridad para prevenir accidentes durante su uso? ¿Podría mencionar algunas de estas características que le gustaría ver en el molino?

Facilidad de anclaje

¿Es importante para usted que el molino de agave sea fácil de anclar o fijar a una superficie para garantizar su estabilidad durante la operación? ¿Ha tenido problemas previos con molinos que no estaban bien anclados?

Facilidad de ensamble/desensamble para transportación

¿Preferiría que el molino de agave sea fácil de ensamblar y desensamblar para facilitar su transportación o almacenamiento? ¿Ha tenido experiencias previas con equipos que eran difíciles de transportar debido a su complejidad de ensamble?

Preguntas de cierre y con conclusiones

¿Tiene alguna sugerencia para el desarrollo de un molino de acuerdo con los puntos de vista anteriormente postulados?

¿Estaría de acuerdo en invertir más dinero por un molino con mejores características? ¿Por qué?

¿Cree usted que las mejoras planteadas sean de utilidad en su proceso de producción?

Cierre y agradecimiento

Agradecimiento por participar en la entrevista.

Oportunidad para agregar cualquier comentario adicional o sugerencia sobre el tema.

APÉNDICE ENCUESTA

B

Inversión inicial:

¿Cuál sería su rango de inversión inicial ideal para adquirir un molino de agave para la producción de mezcal?

- a) Menos de \$50,000.00
- b) \$50,000.00 – \$90,000.00
- c) Más de \$90,000.00

Requerimientos:

¿Qué características considera esenciales en un molino de agave para la producción de mezcal? (Seleccione todas las que correspondan)

- a) Eficiencia en la molienda
- b) Durabilidad
- c) Facilidad de uso
- d) Bajo mantenimiento
- e) Otras (especificar)

Ligereza:

¿Preferiría un molino de agave que sea ligero para facilitar su manipulación?

- a) Sí
- b) No

- c) No estoy seguro

Espacio físico:

¿Cuánto espacio está disponible en su área de producción para instalar el molino de agave?

- a) Menos de 5 metros cuadrados
b) 5.00–7.00 metros cuadrados
c) Más de 7.00 metros cuadrados

Materiales resistentes:

¿Qué tipo de materiales resistentes considera esenciales para la construcción del molino de agave? (Seleccione todas las que correspondan)

- a) Acero inoxidable
b) Hierro fundido
c) Otros (especificar)

Potencia del motor:

¿Qué nivel de potencia del motor preferiría para el molino de agave?

- a) Menos de 2 HP
b) 2–4 HP
c) Más de 3 HP

Movilidad:

¿Considera importante que el molino de agave sea fácilmente móvil para su transporte o reubicación?

- a) Sí
b) No

c) No estoy seguro

Motor eléctrico a 220 V:

¿Preferiría que el molino de agave tenga un motor eléctrico que funcione a 220 V?

a) Sí

b) No

c) No estoy seguro

Compacto:

¿Es importante para usted que el molino de agave sea compacto para ocupar menos espacio?

a) Sí

b) No

c) No estoy seguro

Estructura rígida:

¿Es importante para usted que el molino de agave tenga una estructura rígida para garantizar su estabilidad durante la operación?

a) Sí

b) No

c) No estoy seguro

Cuchillas de acero inoxidable:

¿Preferiría que las cuchillas del molino de agave sean de acero inoxidable por su resistencia y durabilidad?

a) Sí

b) No

c) No estoy seguro

Pinturas no tóxicas:

¿Es importante para usted que las pinturas utilizadas en el molino de agave sean no tóxicas para garantizar la seguridad alimentaria?

- a) Sí
- b) No
- c) No estoy seguro

Facilidad de limpieza:

¿Prefiere un molino de agave que sea fácil de limpiar para mantener altos estándares de higiene en la producción de mezcal?

- a) Sí
- b) No
- c) No estoy seguro

Seguridad:

¿Considera esencial que el molino de agave cuente con características de seguridad para prevenir accidentes durante su uso?

- a) Sí
- b) No
- c) No estoy seguro

Cuchillas resistentes:

¿Considera crucial que las cuchillas del molino de agave sean resistentes para manejar eficientemente el proceso de molienda?

- a) Sí
- b) No
- c) No estoy seguro

Facilidad de anclaje:

¿Es importante para usted que el molino de agave sea fácil de anclar o fijar a una superficie para garantizar su estabilidad durante la operación?

- a) Sí
- b) No
- c) No estoy seguro

Facilidad de ensamble/desensamble para transportación:

¿Preferiría que el molino de agave sea fácil de ensamblar y desensamblar para facilitar su transportación o almacenamiento?

- a) Sí
- b) No
- c) No estoy seguro

APÉNDICE

Para el análisis de las encuestas, fue necesario implementar una plantilla para destacar los requerimientos que se solicitan con mayor frecuencia, es por ello por lo que se elaboró una plantilla (Tabla A 1).

Tabla A 1: Plantilla para datos sin procesar.

| Cliente: | | Tipo de molino que usa: |
|----------------------------|--|-------------------------|
| ¿Dispuesto a otra llamada? | | Tipo de usuario: |
| Fecha: | | |
| Categoría | Enunciado del cliente | Necesidad interpretada |
| Inversión | (Inversión) | |
| Funcionalidad | (Preferencias, utilidad y sugerencias) | |
| | (Compacto y espacio físico) | |
| | (Movilidad y ligereza) | |
| | (Sugerencias y requerimientos) | |
| Diseño | (ensamble/desensamble) | |
| | (Facilidad de limpieza) | |
| | (Fijación) | |
| Motor | (Potencia) | |
| | (Tipo) | |
| Cuchillas | (Tipos de cuchillas) | |
| | (Material) | |
| Principales problemas | | |
| Mejoras sugeridas | | |

APÉNDICE D

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las encuestas realizadas a los participantes de la cooperativa involucrados en el proceso de molienda, así como a personas externas que comprenden el proceso de molienda en la producción de mezcal (Figura A 1 y Figura A 2).

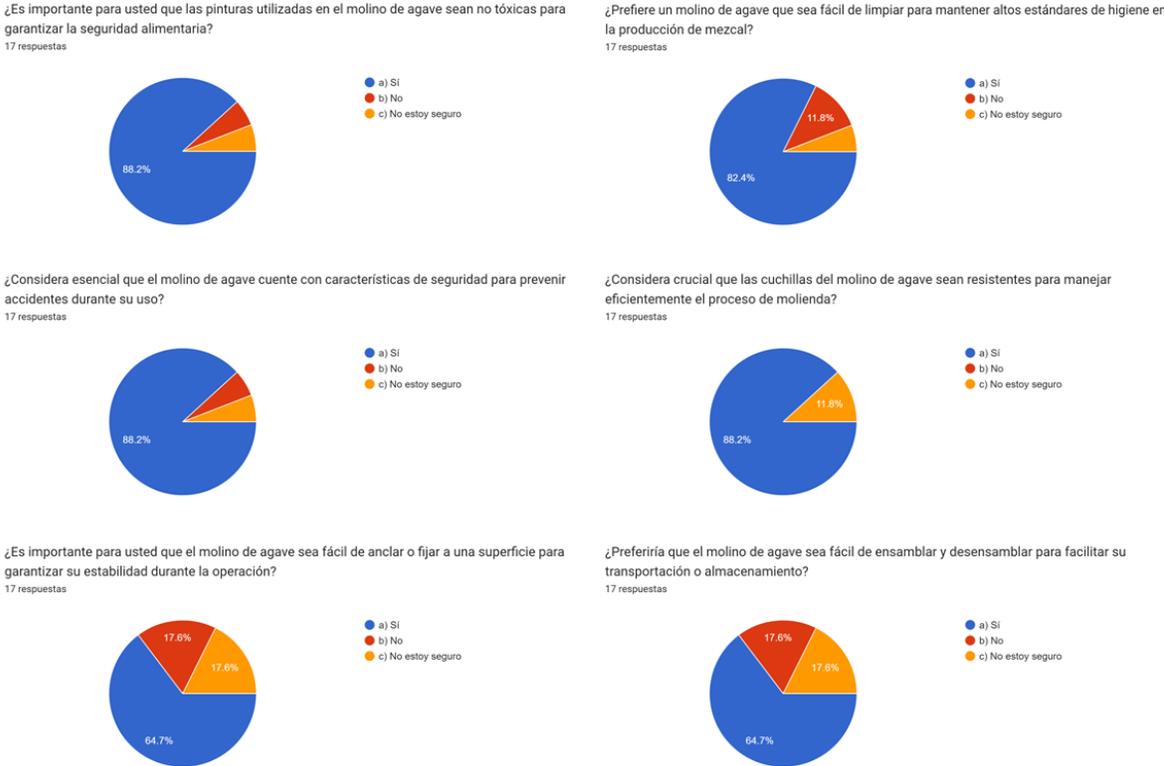
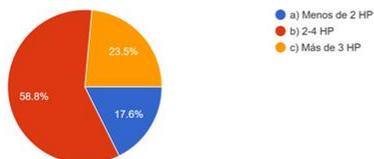


Figura A 1: Resultados de las encuestas.

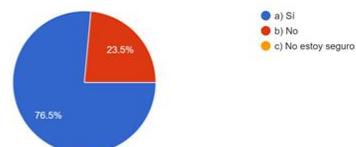
¿Qué nivel de potencia del motor preferiría para el molino de agave?

17 respuestas



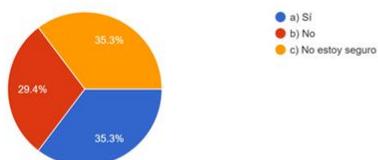
¿Considera importante que el molino de agave sea fácilmente móvil para su transporte o reubicación?

17 respuestas



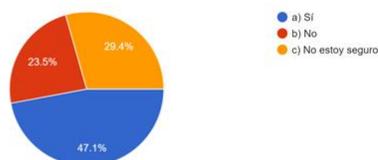
¿Preferiría que el molino de agave tenga un motor eléctrico que funcione a 220 V?

17 respuestas



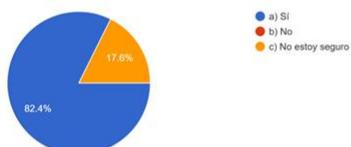
¿Es importante para usted que el molino de agave sea compacto para ocupar menos espacio?

17 respuestas



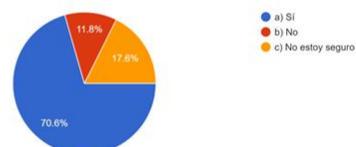
¿Es importante para usted que el molino de agave tenga una estructura rígida para garantizar su estabilidad durante la operación?

17 respuestas



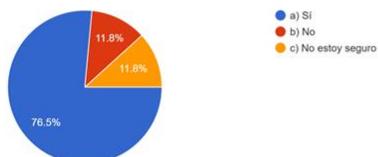
¿Preferiría que las cuchillas del molino de agave sean de acero inoxidable por su resistencia y durabilidad?

17 respuestas



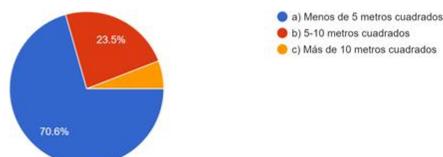
¿Preferiría un molino de agave que sea ligero para facilitar su manipulación?

17 respuestas



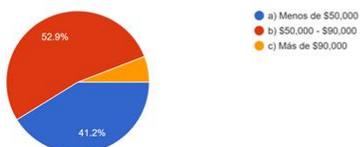
¿Cuánto espacio está disponible en su área de producción para instalar el molino de agave?

17 respuestas



¿Cuál sería su rango de inversión inicial ideal para adquirir un molino de agave para la producción de mezcal?

17 respuestas



¿Qué tipo de materiales resistentes considera esenciales para la construcción del molino de agave? (Seleccione todas las que correspondan)

17 respuestas

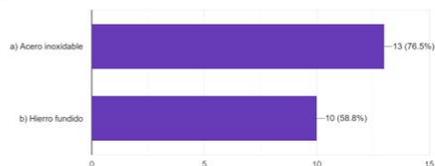


Figura A 2: Resultados de las encuestas (continuación).

APÉNDICE

E

Los modelos CAD 3D de las piezas del molino permiten un análisis integral de su estructura geométrica, facilitando la identificación de características críticas tolerancias, interfaces de montaje y zonas de esfuerzo mecánico. Estas representaciones digitales cumplen tres funciones clave:

- ✓ Validación del diseño
- ✓ Documentación técnica
- ✓ Manufactura avanzada

A continuación, se presentan los demás componentes del MC.

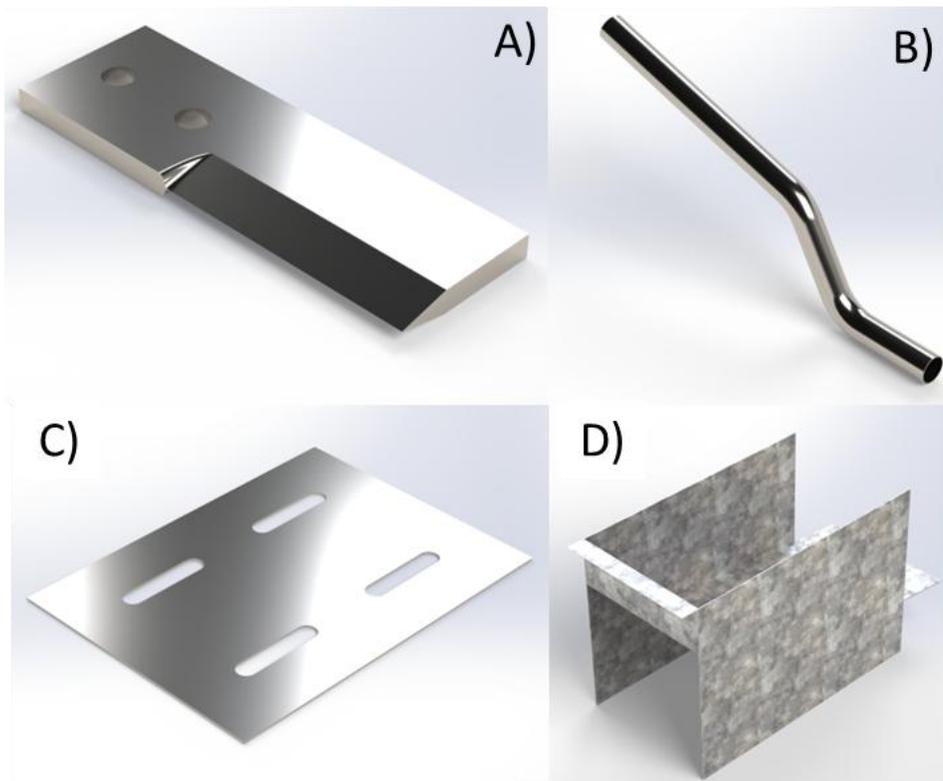


Figura A 3: Piezas en 3D (2)

Nota. Modelado 3D de: A) Cuchilla, B) Asas, C) Base de motor y D) Cubierta chasis.

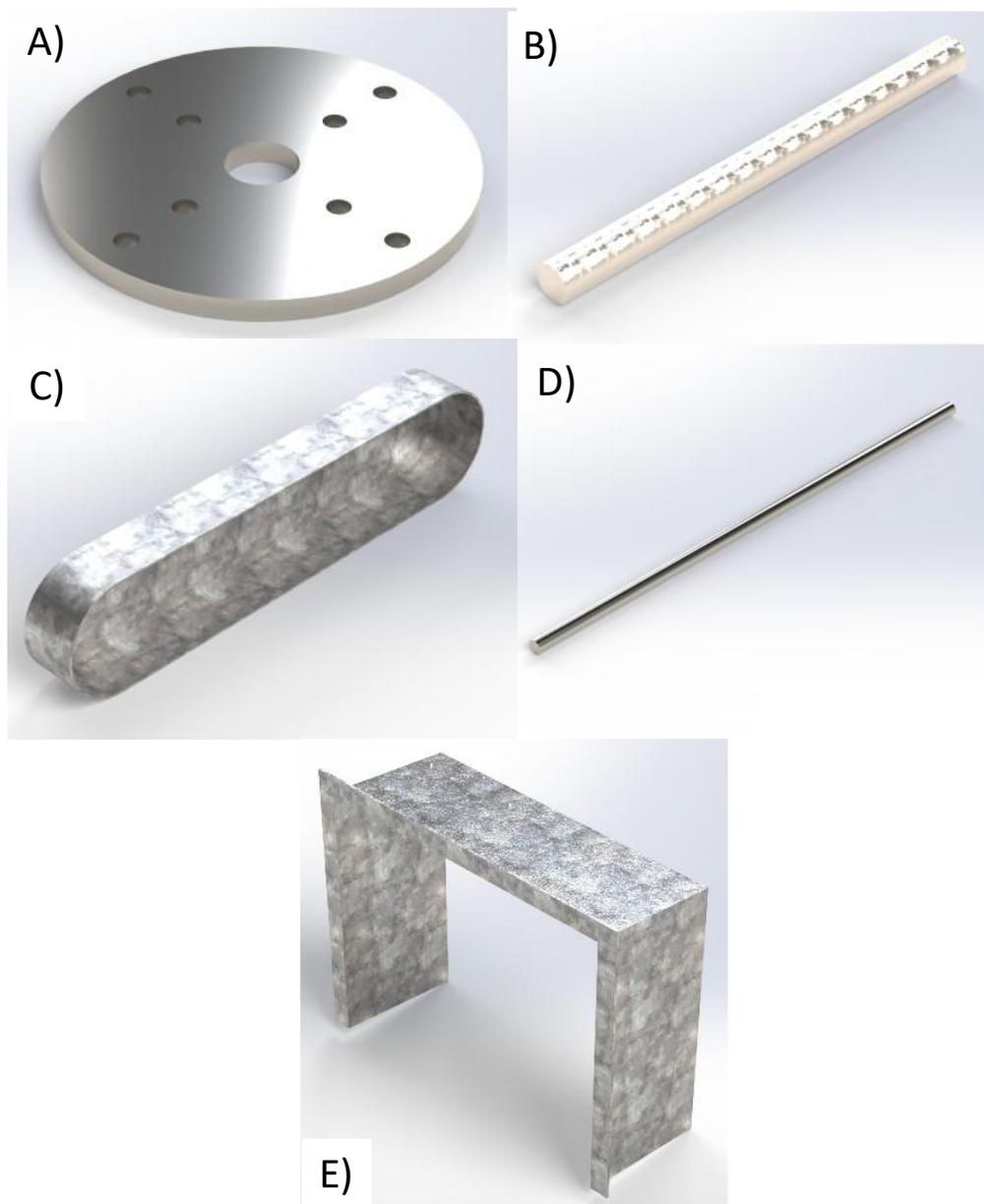


Figura A 4: Piezas en 3D (3).

Nota. Modelado 3D de: A) Disco de cuchillas, B) Eje de cuchillas, C) Guarda, D) Eje llantas y E) Tolva de salida.

APÉNDICE F

La generación de planos 2D se realizó mediante herramientas de extracción automática del CAD 3D (*SolidWorks Drawing*), asegurando consistencia entre modelos y documentación. Cada plano fue validado en tres etapas:

- Revisión geométrica (coherencia entre vistas).
- Verificación de cotas (mediante software de análisis PMI).
- Aprobación del fabricante (para confirmar viabilidad de procesos).

A continuación, se presentan los planos de las figuras, estos solo son representativos.

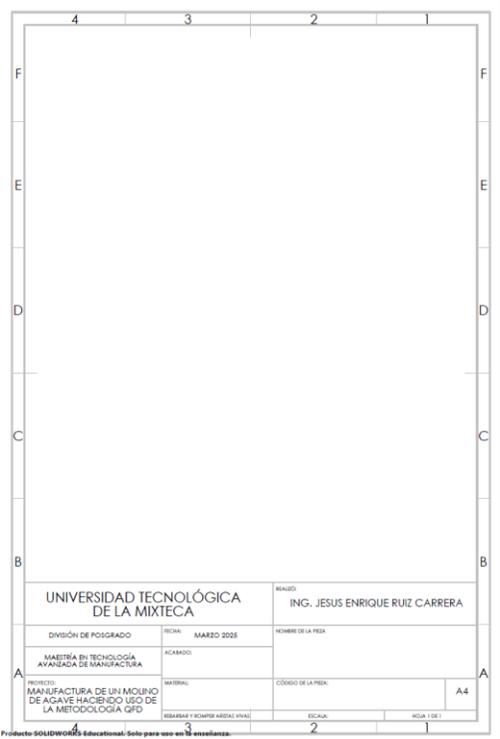


Figura A 5: Layout de planos.

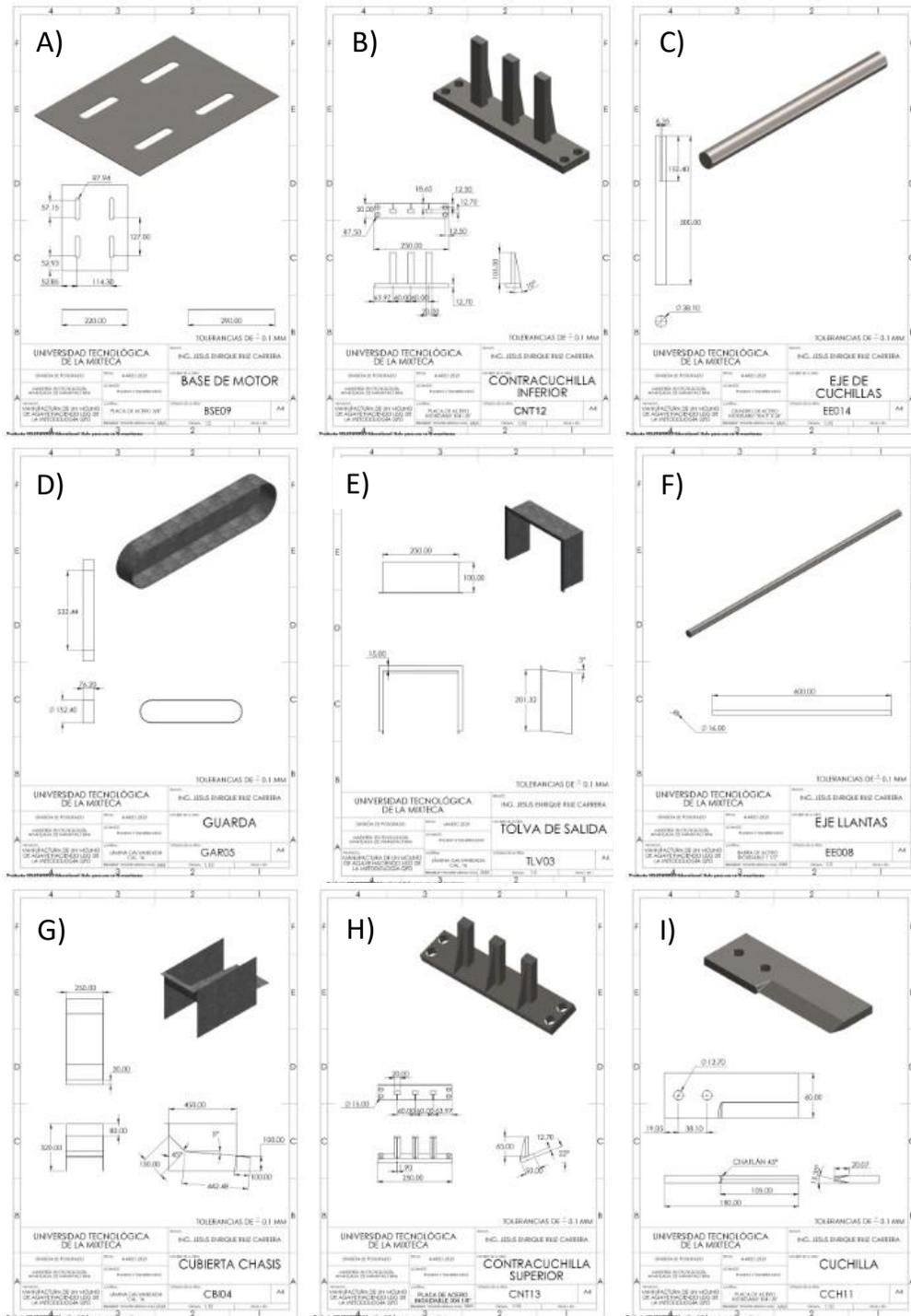


Figura A 6: Planos de piezas del MC.

Nota. Planos 2D de: A) Base de motor, B) Contracuchilla inferior, C) Eje de cuchillas, D) Guarda, E) Tolva de salida, F) Eje llantas, G) Cubierta chasis, H) Contracuchilla superior e I) Cuchilla.

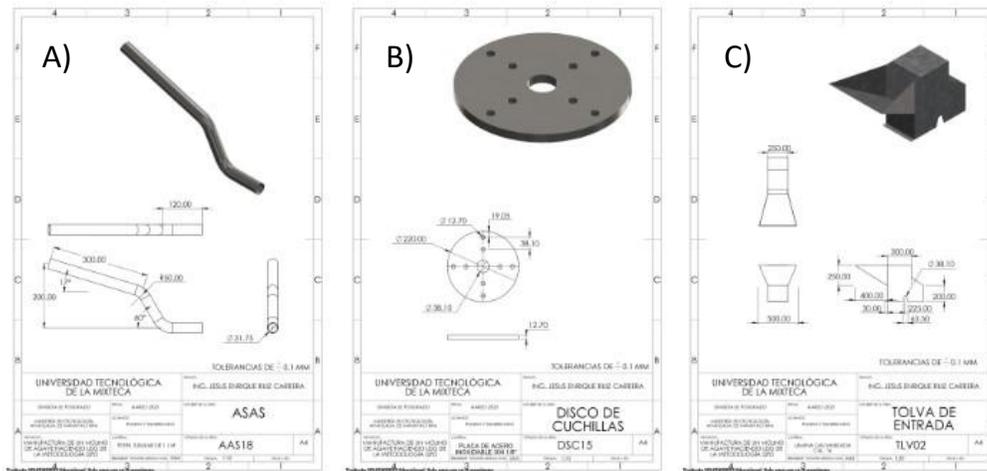


Figura A 7: Planos de piezas del MC (continuación).
 Nota. Planos 2D de: A) Asas, B) Disco de cuchillas y C) Tolva de entrada.