



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MECÁNICA**

**DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA  
AGITADORA DE BARRILES TIPO KEG DE ALMACENAMIENTO  
DE CERVEZA ARTESANAL PARA LA CARBONATACIÓN  
FORZADA MEDIANTE GAS CARBÓNICO (CO<sub>2</sub>).**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTORES:**

ROBERTO DAVID MINDA COSTA

PATRICIO GABRIEL RAMOS CONTENTO

Riobamba – Ecuador

2023



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MECÁNICA**

**DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA  
AGITADORA DE BARRILES TIPO KEG DE ALMACENAMIENTO  
DE CERVEZA ARTESANAL PARA LA CARBONATACIÓN  
FORZADA MEDIANTE GAS CARBÓNICO (CO<sub>2</sub>).**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTORES:** ROBERTO DAVID MINDA COSTA

PATRICIO GABRIEL RAMOS CONTENTO

**DIRECTOR:** Ing. SÓCRATES MIGUEL AQUINO ARROBA

Riobamba – Ecuador

2023

**© 2023, Roberto David Minda Costa, Patricio Gabriel Ramos Contenido**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Nosotros, Roberto David Minda Costa y Patricio Gabriel Ramos Contenido, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 04 de diciembre de 2023



**Roberto David Minda Costa**  
**180522177-5**

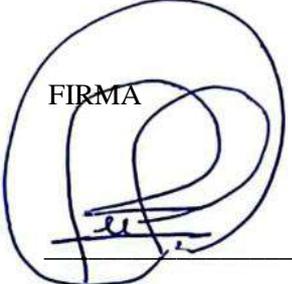


**Patricio Gabriel Ramos Contenido**  
**060474977-0**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MECÁNICA**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, **DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA AGITADORA DE BARRILES TIPO KEG DE ALMACENAMIENTO DE CERVEZA ARTESANAL PARA LA CARBONATACIÓN FORZADA MEDIANTE GAS CARBÓNICO (CO<sub>2</sub>)**, realizado por los señores: **ROBERTO DAVID MINDA COSTA** y **PATRICIO GABRIEL RAMOS CONTENUTO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

Ing. Marco Homero Almendariz Puente  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

FIRMA  


FECHA

2023-12-04

Ing. Sócrates Míguas Aquino Arroba  
**DIRECTOR DE TRABAJO DE  
INTEGRACIÓN CURRICULAR**



2023-12-04

Ing. Eduardo Harry Medina Quintero  
**ASESOR DEL TRABAJO DE  
INTEGRACIÓN CURRICULAR**



2023-12-04

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mi padre y a quienes ya no están.

David

Dedicado a mi amada madre, Olguita, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido fundamentales a lo largo de este viaje académico. A mis queridos hermanos, sobrinos y cuñados, quienes han compartido risas, consuelo y motivación en cada etapa. A todos ustedes, mi familia, les dedico este logro con gratitud y cariño.

Patricio

## **AGRADECIMIENTO**

Con gratitud en mi corazón, este logro se lo agradezco a Dios, cuya guía constante ha sido mi luz en este viaje académico. A mis padres, cuyo amor incondicional y sacrificios han sido la base de mi éxito. A mi familia, por su apoyo inquebrantable y alegría compartida. Y a mis amigos, quienes han sido mi fuente de inspiración y risas a lo largo de este increíble viaje. Gracias a todos por ser mi mayor motivación y celebrar este logro conmigo.

David

Quiero agradecer a mi querida familia por su apoyo incondicional y sacrificio que realizaron a lo largo de este proceso, a mis amigos, cuyas palabras alentadoras y consejos hicieron que este viaje sea una experiencia inolvidable.

De igual manera a la ESPOCH y a mis distinguidos profesores les expreso mi sincero agradecimiento por brindarme la educación y orientación que me ha permitido alcanzar este nuevo logro.

Patricio

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xvii
RESUMEN.....	xviii
SUMMARY .....	xix
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

<b>1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>2</b>
1.1. Antecedentes .....	2
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Justificación .....	3
1.3.1. <i>Justificación teórica</i> .....	3
1.3.2. <i>Justificación metodológica</i> .....	3
1.3.3. <i>Justificación económica</i> .....	3
1.4. Objetivos .....	3
1.4.1. <i>Objetivo general</i> .....	3
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	3

### CAPÍTULO II

<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
2.1. Cerveza artesanal .....	4
2.2. Proceso de producción .....	4
2.2.1. <i>Molienda</i> .....	5
2.2.2. <i>Maceración</i> .....	5

2.2.3. <i>Hervido</i> .....	6
2.2.4. <i>Enfriado</i> .....	7
2.2.5. <i>Fermentación</i> .....	8
2.2.6. <i>Maduración</i> .....	9
2.2.7. <i>Carbonatación</i> .....	9
2.2.8. <i>Envasado</i> .....	9
2.3. <b>Carbonatación de la cerveza</b> .....	10
2.3.1. <i>Carbonatación natural</i> .....	10
2.3.2. <i>Carbonatación forzada</i> .....	10
2.3.3. <i>Carbonatación con pastilla</i> .....	11
2.3.4. <i>Quick Carb a través de piedra difusora de carbonatación</i> .....	12
2.4. <b>Dióxido de carbono</b> .....	13
2.5. <b>Ley de Henry</b> .....	13
2.5.1. <i>Tabla de carbonatación de cerveza artesanal</i> .....	14
2.6. <b>Mecanismo y máquinas</b> .....	15
2.6.1. <i>Mecanismos cuatro barras</i> .....	16
2.7. <b>Método de elementos finitos</b> .....	16
2.8. <b>Análisis cinemático</b> .....	17

### CAPÍTULO III

3. <b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	19
3.1. <b>Tipo de estudio</b> .....	19
3.2. <b>Requerimientos de diseño</b> .....	19
3.3. <b>Diseño conceptual</b> .....	19
3.4. <b>Modelado CAD</b> .....	19
3.4.1. <i>Análisis funcional</i> .....	19
3.4.1.1. <i>Nivel 0</i> .....	20
3.4.1.2. <i>Nivel 1</i> .....	20

<b>3.4.2. Matriz morfológica</b> .....	20
3.4.2.1. <i>Alternativa 1</i> .....	21
3.4.2.2. <i>Alternativa 2</i> .....	21
3.4.2.3. <i>Alternativa 3</i> .....	21
<b>3.5. Diseño de materialización</b> .....	21
3.5.1. <i>Diseño 3D mediante software CAD</i> .....	22
3.5.2. <i>Procesos de manufactura</i> .....	22
<b>3.6. Diseño de detalle</b> .....	23
3.6.1. <i>Requerimientos iniciales</i> .....	23
3.6.2. <i>Diseño de mecanismo manivela-balancín</i> .....	23
3.6.2.1. <i>Análisis movilidad o grados de libertad</i> .....	23
3.6.2.2. <i>Comprobación en SAM</i> .....	29
3.6.2.3. <i>Análisis cinemático</i> .....	31
3.6.3. <i>Cálculo de potencia</i> .....	43
<b>3.7. Selección motorreductor</b> .....	47
<b>3.8. Diseño del eje</b> .....	47
<b>3.9. Diseño biela o conductor</b> .....	52
<b>3.10. Diseño de la manivela</b> .....	54
<b>3.11. Diseño de pasadores</b> .....	56
3.11.1. <i>Diseño del pasador del eslabón motriz</i> .....	57
3.11.2. <i>Diseño del pasador del oscilador</i> .....	59
<b>3.12. Selección de chumaceras</b> .....	62
3.12.1. <i>Carga dinámica equivalente</i> .....	62
3.12.2. <i>Rodamientos de bolas</i> .....	63
<b>3.13. Selección cabezas articulación</b> .....	64
<b>3.14. Validación de método de elementos finitos MEF</b> .....	65
3.14.1. <i>Análisis estructura fija</i> .....	65
3.14.1.1. <i>Análisis transitorio</i> .....	65

3.14.1.2.	<i>Modelado del elemento placa y mallado de la estructura fija</i> .....	68
3.14.1.3.	<i>Análisis transitorio vibracional de los puntos de anclaje</i> .....	70
3.14.2.	<i>Análisis estructura móvil</i> .....	72
3.14.3.	<i>Análisis eje</i> .....	74
3.14.4.	<i>Análisis elemento motriz o manivela</i> .....	75
3.14.5.	<i>Análisis elemento conductor o biela</i> .....	76
3.14.6.	<i>Análisis pasador del elemento motriz</i> .....	77
3.14.7.	<i>Análisis del pasador del elemento oscilador</i> .....	78
3.14.8.	<i>Métricas de calidad de malla</i> .....	79
3.15.	<b>Construcción y montaje de la máquina agitadora de barriles</b> .....	83
3.15.1.	<i>Maquinas herramientas utilizadas</i> .....	83
3.15.2.	<i>Materiales utilizados</i> .....	84
3.15.3.	<i>Equipos</i> .....	85
3.15.4.	<i>Construcción de la máquina agitadora de barriles</i> .....	85
3.16.	<b>Análisis de costos</b> .....	88
3.16.1.	<i>Costos directos</i> .....	88
3.16.2.	<i>Costos indirectos</i> .....	90
3.16.3.	<i>Costo total</i> .....	90

## CAPÍTULO IV

4.	<b>MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	91
4.1.	<b>Resultados de los análisis MEF de la estructura fija</b> .....	92
4.1.1.	<i>Deformaciones de la estructura fija</i> .....	92
4.1.2.	<i>Esfuerzos de la estructura fija</i> .....	93
4.1.3.	<i>Factor de seguridad de la estructura fija</i> .....	93
4.2.	<b>Resultados análisis MEF de la estructura móvil</b> .....	94
4.2.1.	<i>Esfuerzos de la estructura móvil</i> .....	94
4.2.2.	<i>Deformaciones de la estructura móvil</i> .....	95

4.2.3.	<i>Factor de seguridad de la estructura móvil</i> .....	95
4.3.	<b>Resultados análisis MEF del eje</b> .....	96
4.3.1.	<i>Esfuerzos del eje</i> .....	96
4.3.2.	<i>Deformaciones del eje</i> .....	96
4.3.3.	<i>Factor de seguridad del eje</i> .....	97
4.4.	<b>Resultados análisis MEF del elemento conductor o biela</b> .....	97
4.4.1.	<i>Deformaciones del elemento conductor o biela</i> .....	97
4.4.2.	<i>Esfuerzos del elemento conductor o biela</i> .....	98
4.4.3.	<i>Factor de seguridad del elemento conductor o biela</i> .....	98
4.5.	<b>Resultados análisis MEF del pasador del elemento motriz</b> .....	99
4.5.1.	<i>Deformaciones del pasador elemento motriz o manivela</i> .....	99
4.5.2.	<i>Esfuerzos del pasador del elemento motriz o manivela</i> .....	99
4.5.3.	<i>Factor de seguridad del pasador del elemento motriz o manivela</i> .....	100
4.6.	<b>Resultados análisis MEF del pasador del elemento oscilador</b> .....	100
4.6.1.	<i>Deformaciones del pasador del elemento oscilador o balancín</i> .....	100
4.6.2.	<i>Esfuerzos del pasador del elemento oscilador o balancín</i> .....	101
4.6.3.	<i>Factor de seguridad del pasador del elemento oscilador o balancín</i> .....	101
4.7.	<b>Pruebas de carbonatación</b> .....	102

## CAPÍTULO V

5.	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	110
5.1.	<b>Conclusiones</b> .....	110
5.2.	<b>Recomendaciones</b> .....	112

## BIBLIOGRAFÍA

## ANEXOS

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b> Valores máximos y mínimos de volúmenes de CO <sub>2</sub> .....	14
<b>Tabla 2-2:</b> Tabla de carbonatación en relación temperatura - volúmenes de CO <sub>2</sub> .....	15
<b>Tabla 3-1:</b> Tabla de carbonatación en relación temperatura - volúmenes de CO <sub>2</sub> .....	21
<b>Tabla 3-2:</b> Análisis de velocidad lineal del punto A.....	36
<b>Tabla 3-3:</b> Análisis de velocidad angular del punto B .....	37
<b>Tabla 3-4:</b> Análisis de velocidad angular del punto B .....	39
<b>Tabla 3-5:</b> Análisis de aceleración lineal del punto A .....	41
<b>Tabla 3-6:</b> Parámetros del motor para selección de catálogo.....	47
<b>Tabla 3-7:</b> Selección del motorreductor Sesame, 85 rpm, 0.5 HP .....	47
<b>Tabla 3-8:</b> Fuerzas y torque máximos y sus equivalentes aplicados en el pasador del eslabón. 58	
<b>Tabla 3-9:</b> Fuerzas y torque máximos y sus equivalentes aplicados en el pasador del eslabón. 61	
<b>Tabla 3-10:</b> Factor de carga fw. ....	63
<b>Tabla 3-11:</b> Correlación de la vida nominal básica del rodamiento,.....	63
<b>Tabla 3-12:</b> Fuerzas máximas y mínimas que actúan en el apoyo 1. ....	66
<b>Tabla 3-13:</b> Fuerzas máximas y mínimas que actúan en el apoyo 2. ....	67
<b>Tabla 3-14:</b> Torque que actúa en el apoyo 1.....	67
<b>Tabla 3-15:</b> Tipos de comprobaciones geométricas y controles para aceptación de calidad de 68	
<b>Tabla 3-16:</b> Métricas de calidad de malla para los elementos componentes. ....	80
<b>Tabla 3-17:</b> Procesos de construcción de la maquina agitadora de barriles.....	85
<b>Tabla 3-18:</b> Costos de materiales .....	88
<b>Tabla 3-19:</b> Costo de mano de obra. ....	89
<b>Tabla 3-20:</b> Costo de equipos y herramientas.....	89
<b>Tabla 3-21:</b> Costo de transporte.....	89
<b>Tabla 3-22:</b> Total, de costos directos. ....	90
<b>Tabla 3-23:</b> Costos indirectos .....	90
<b>Tabla 3-24:</b> Costo total de la máquina .....	90
<b>Tabla 4-1:</b> Deflexiones.....	91
<b>Tabla 4-2:</b> Selección de estilo de cerveza a carbonatar.....	102
<b>Tabla 4-3:</b> Selección de presión de inyección en relación con la temperatura - volúmenes de CO <sub>2</sub> .....	102
<b>Tabla 4-4:</b> Resultados obtenidos en las pruebas de carbonatación forzada. ....	104

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 2-1:</b> Cerveza artesanal .....	4
<b>Ilustración 2-2:</b> Molienda de granos.....	5
<b>Ilustración 2-3:</b> Maceración de cerveza.....	6
<b>Ilustración 2-4:</b> Hervido del mosto.....	7
<b>Ilustración 2-5:</b> Fermentadores cónicos .....	8
<b>Ilustración 2-6:</b> Inyección de dióxido de carbono .....	9
<b>Ilustración 2-7:</b> Carbonatación forzada .....	11
<b>Ilustración 2-8:</b> Tanque de CO <sub>2</sub> .....	13
<b>Ilustración 2-9:</b> Definición del cuadrilátero articulado. ....	16
<b>Ilustración 2-10:</b> Metodo de elementos finitos.....	17
<b>Ilustración 2-11:</b> Análisis cinemático.....	18
<b>Ilustración 3-1:</b> Análisis funcional nivel 0. ....	20
<b>Ilustración 3-2:</b> Análisis funcional nivel 1 .....	20
<b>Ilustración 3-3:</b> Modelado CAD de la máquina agitadora de barriles en SolidWorks. ....	22
<b>Ilustración 3-4:</b> Mecanismo cuatro barras con coordenadas lagrangianas y revolutas.....	24
<b>Ilustración 3-5:</b> Mecanismo cuatro barras con radio vectores posición. ....	24
<b>Ilustración 3-6:</b> Mecanismo cuatro barras manivela-biela-balancín.....	25
<b>Ilustración 3-7:</b> Mecanismo cuatro barras en sus dos posiciones extremas singulares. ....	26
<b>Ilustración 3-8:</b> Mecanismo cuatro barras en posición límite. ....	26
<b>Ilustración 3-9:</b> Mecanismo cuatro barras en posición punto muerto. ....	27
<b>Ilustración 3-10:</b> Validación en SAM del mecanismo cuatro barras en posición límite. ....	29
<b>Ilustración 3-11:</b> Validación en SAM del mecanismo cuatro barras en posición punto muerto. .....	30
<b>Ilustración 3-12:</b> Validación en SAM del mecanismo cuatro barras en posición punto muerto. .....	31
<b>Ilustración 3-13:</b> Análisis MBD del mecanismo cuatro barras en MSC Adams. ....	32
<b>Ilustración 3-14:</b> Análisis del desplazamiento angular de la base móvil mediante .....	33
<b>Ilustración 3-15:</b> Análisis del desplazamiento angular de la base móvil del punto.....	33
<b>Ilustración 3-16:</b> Análisis del desplazamiento angular de la base móvil del punto.....	34
<b>Ilustración 3-17:</b> Análisis de la velocidad angular del elemento motriz mediante MSC .....	34
<b>Ilustración 3-18:</b> Análisis de la velocidad lineal del punto A mediante MSC Adams. ....	36

<b>Ilustración 3-19:</b> Análisis de la velocidad máxima angular del elemento de salida.....	37
<b>Ilustración 3-20:</b> Análisis de la velocidad angular en el punto crítico del elemento de .....	38
<b>Ilustración 3-21:</b> Análisis de la velocidad angular en el punto muerto del elemento de .....	38
<b>Ilustración 3-22:</b> Análisis dinámico de la velocidad lineal máxima del punto B mediante MSC .....	39
<b>Ilustración 3-23:</b> Análisis dinámico de la velocidad lineal del punto B en el punto crítico .....	40
<b>Ilustración 3-24:</b> Análisis dinámico de la velocidad lineal del punto B en el punto muerto .....	40
<b>Ilustración 3-25:</b> Análisis dinámico de la velocidad lineal del punto B en el punto muerto .....	41
<b>Ilustración 3-26:</b> Análisis de aceleración angular $\alpha_4$ .....	43
<b>Ilustración 3-27:</b> Análisis de aceleración lineal del punto B.....	43
<b>Ilustración 3-28:</b> Análisis de la potencia requerida mediante SAM.....	44
<b>Ilustración 3-29:</b> Análisis de la potencia requerida mediante SAM.....	45
<b>Ilustración 3-30:</b> Análisis de la potencia requerida mediante MSC Adams.....	46
<b>Ilustración 3-31:</b> Análisis de la potencia requerida mediante MSC Adams.....	46
<b>Ilustración 3-32:</b> Diagrama cuerpo libre eje.....	48
<b>Ilustración 3-33:</b> Dimensionamiento y reacciones del eje.....	49
<b>Ilustración 3-34:</b> Diagrama de fuerza cortante. ....	50
<b>Ilustración 3-35:</b> Diagrama de momento flector. ....	51
<b>Ilustración 3-36:</b> Diagrama de flexión y torsión fluctuante.....	51
<b>Ilustración 3-37:</b> Diagramas de fuerza máxima y torque aplicado en el pasador del eslabón motriz.....	52
<b>Ilustración 3-38:</b> Fuerzas y momentos aplicados en la sección.....	53
<b>Ilustración 3-39:</b> Diagramas de fuerza máxima y torque aplicado en el pasador del eslabón motriz.....	54
<b>Ilustración 3-40:</b> Fuerza y momento aplicados en la.....	54
<b>Ilustración 3-41:</b> Fuerza y momento aplicados de la manivela. ....	55
<b>Ilustración 3-42:</b> Fuerzas y momentos aplicados en la sección.....	56
<b>Ilustración 3-43:</b> Diagramas de fuerza máxima y torque aplicado en el pasador del eslabón...	57
<b>Ilustración 3-44:</b> Diagramas de fuerza y torque máximo aplicado en el pasador del eslabón...	57
<b>Ilustración 3-45:</b> Fuerzas y momentos en la sección transversal del.....	58
<b>Ilustración 3-46:</b> Diagramas de fuerza máxima y torque aplicado en el pasador del eslabón...	60
<b>Ilustración 3-47:</b> Diagramas de fuerza y torque máximo aplicado en el pasador del eslabón...	60
<b>Ilustración 3-48:</b> Análisis de fuerzas y momentos en la sección.....	61
<b>Ilustración 3-49:</b> Análisis de fuerzas en SAM.....	65
<b>Ilustración 3-50:</b> Fuerzas que actúan en el apoyo 1. ....	65

<b>Ilustración 3-51:</b> Fuerzas que actúan en el apoyo 2. ....	66
<b>Ilustración 3-52:</b> Torque que actúa en el apoyo 1. ....	67
<b>Ilustración 3-53:</b> Asignación de elemento <i>shell</i> a la estructura fija.....	69
<b>Ilustración 3-54:</b> Mallado de la estructura fija .....	69
<b>Ilustración 3-55:</b> Fuerzas y apoyos aplicados en la estructura fija.....	70
<b>Ilustración 3-56:</b> Fuerzas transitorias remotas aplicadas en la estructura fija. ....	71
<b>Ilustración 3-57:</b> Fuerza transitoria aplicada en la estructura fija. ....	71
<b>Ilustración 3-58:</b> Momento torsor transitorio aplicado en la estructura fija. ....	72
<b>Ilustración 3-59:</b> Base móvil como elemento móvil en SpaceClaim. ....	73
<b>Ilustración 3-60:</b> Mallado y calidad de malla de la estructura móvil. ....	73
<b>Ilustración 3-61:</b> Fuerzas y apoyos aplicados en la estructura móvil. ....	74
<b>Ilustración 3-62:</b> Mallado y calidad de malla del eje. ....	74
<b>Ilustración 3-63:</b> Fuerzas y apoyos aplicados en el eje. ....	75
<b>Ilustración 3-64:</b> Mallado y calidad de malla del eslabón motriz. ....	75
<b>Ilustración 3-65:</b> Fuerzas y apoyos aplicados en el eje. ....	76
<b>Ilustración 3-66:</b> Mallado y calidad de malla del elemento conductor o biela.....	76
<b>Ilustración 3-67:</b> Fuerzas y apoyos aplicados al elemento conductor o biela. ....	77
<b>Ilustración 3-68:</b> Mallado y calidad de malla del pasador del elemento motriz.....	77
<b>Ilustración 3-69:</b> Fuerzas y apoyos aplicados en el pasador del elemento motriz.....	78
<b>Ilustración 3-70:</b> Mallado y calidad de malla del pasador del elemento oscilador.....	78
<b>Ilustración 3-71:</b> Fuerzas y apoyos aplicados en el pasador del elemento oscilador.....	79
<b>Ilustración 3-72:</b> Amoladora .....	83
<b>Ilustración 3-73:</b> Soldadora SMAW Century .....	84
<b>Ilustración 3-74:</b> Corte de tubo de tubo en tronzadora. ....	84
<b>Ilustración 3-75:</b> Tubo estructural cuadrado de acero negro. ....	84
<b>Ilustración 3-76:</b> Motorreductor Sesame G12H 400G – 20. ....	85
<b>Ilustración 4-1:</b> Análisis de deformaciones de la estructura fija .....	92
<b>Ilustración 4-2:</b> Análisis de esfuerzos de la estructura fija.....	93
<b>Ilustración 4-3:</b> Factor de seguridad de la estructura fija. ....	93
<b>Ilustración 4-4:</b> Esfuerzos en estructura móvil.....	94
<b>Ilustración 4-5:</b> Deformaciones en estructura móvil. ....	95
<b>Ilustración 4-6:</b> Factor de seguridad en estructura móvil. ....	95
<b>Ilustración 4-7:</b> Esfuerzos en el eje. ....	96
<b>Ilustración 4-8:</b> Análisis de deformaciones del eje.....	96
<b>Ilustración 4-9:</b> Análisis de factor de seguridad del eje. ....	97

<b>Ilustración 4-10:</b> Análisis de deformaciones del elemento conductor o biela.....	97
<b>Ilustración 4-11:</b> Análisis de esfuerzos equivalentes de Von Mises del elemento conductor ...	98
<b>Ilustración 4-12:</b> Análisis del factor de seguridad del elemento conductor o biela.....	98
<b>Ilustración 4-13:</b> Análisis de deformaciones del pasador del elemento motriz.....	99
<b>Ilustración 4-14:</b> Análisis de esfuerzos equivalentes de Von Mises del pasador del .....	99
<b>Ilustración 4-15:</b> Análisis de factor de seguridad del pasador del elemento motriz.....	100
<b>Ilustración 4-16:</b> Análisis de deformaciones del pasador del elemento oscilador.....	100
<b>Ilustración 4-17:</b> Análisis de esfuerzos equivalentes de Von Mises del pasador del .....	101
<b>Ilustración 4-18:</b> Análisis de factor de seguridad del pasador del elemento oscilador.....	101
<b>Ilustración 4-19:</b> Temperatura del barril.....	103
<b>Ilustración 4-20:</b> Inyección de CO <sub>2</sub> .....	103

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** SELECCIÓN MOTORREDUCTOR MONOFÁSICO 0,5HP, 85RPM

**ANEXO B:** SELECCIÓN DE PERFIL ESTRUCTURAL TUBO CUADRADO SAE J 304  
1008.

**ANEXO C:** SELECCIÓN DE CHUMACERAS

**ANEXO D:** CABEZAS DE ARTICULACIÓN

**ANEXO E:** FUERZAS Y TORQUE EN LOS PUNTOS DE APOYO DEL MECANISMOS  
PARA EL ANÁLISIS TRANSITORIO DE LA ESTRUCTURA FIJA.

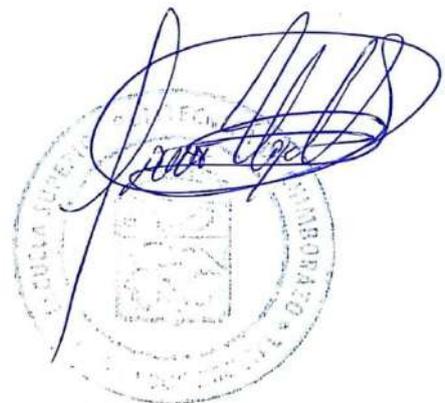
**ANEXO F:** MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA MÁQUINA  
AGITADORA DE BARRILES DE ALMACENAMIENTO DE CERVEZA  
ARTESANAL

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo diseñar, simular y construir un prototipo para el proceso de carbonatación forzada de cerveza artesanal a través de gas carbónico (CO<sub>2</sub>), con el propósito de optimizar tiempos y recursos. Después del análisis de alternativas mediante una matriz morfológica se determinó la mejor opción de diseño en base a los requerimientos solicitados por los productores de cerveza artesanal, obteniendo como resultado una máquina conformada por un mecanismo cuatro barras manivela-balancín, una estructura móvil conducida por un eje oscilatorio, accionado por un motorreductor monofásico. Para el diseño de detalle del eje oscilatorio principal, se aplicó la norma ASME B106.1M. Para los eslabones y pasadores utilizamos la teoría de la energía de distorsión (TED). En las estructuras fija y móvil se aplicó ingeniería asistida por computadora CAE mediante el software Ansys Workbench 2021 R2 para su diseño, posteriormente validando los resultados de resistencia y deformación de todos los elementos mecánicos. Luego de la simulación mediante se construyó una máquina agitadora de barriles tipo keg, con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento de este además de su resistencia y fiabilidad. Se evidenciaron variaciones en la carbonatación a diferentes tiempos y niveles de llenado del barril, determinando un mezclado efectivo a la capacidad máxima del barril en un tiempo de 30 minutos de agitación. Después de realizar el análisis de costos pertinente se identificó la posibilidad de incursionar en el mercado nacional, debido a la escases de máquinas agitadoras comerciales.

**Palabras clave:** <CERVEZA ARTESANAL> <CARBONATACIÓN> <GAS CARBÓNICO> <MÁQUINA AGITADORA> <MECANISMO MANIVELA-BALANCÍN> <MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS> <ANSYS WORKBENCH (SOFTWARE)>

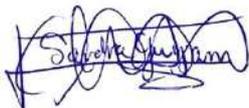
2280-DBRA-UPT-202



## SUMMARY

The objective of this research was to design, simulate, and build a prototype for the forced carbonation process of craft beer through carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) to optimize time and resources. After the analysis of alternatives using a morphological matrix, the best design option was determined based on the requirements requested by craft beer producers, resulting in a machine made up of a four-bar crank-rocker mechanism, a mobile structure driven by an oscillating axis driven by a single-phase gear motor. For the detailed design of the central oscillating axis, the ASME B106.1M standard was applied. We use distortion energy theory (DET) for the links and pins. CAE computer-aided engineering was applied to the fixed and mobile structures using the Ansys Workbench 2021 R2 software for their design, subsequently validating the mechanical elements' resistance and deformation results. After the simulation, a keg-type barrel shaking machine was built to verify its correct operation, resistance, and reliability. Variations in carbonation were evident at different times and filling levels of the barrel, determining adequate mixing at the barrel's maximum capacity in 30 minutes of stirring. After carrying out the pertinent cost analysis, the possibility of entering the national market was identified due to the shortage of commercial agitating machines.

**Keywords:** <CRAFT BEER> <CARBONATION> <CARBONIC GAS> <AGITATOR MACHINE> <CRANK-ROCKER MECHANISM> <FINITE ELEMENT METHOD> <ANSYS WORKBENCH (SOFTWARE)>



Lic. Sandra Leticia Guijarro Paguay

C.I.:0603366113

## INTRODUCCIÓN

La cerveza artesanal es una bebida que ha experimentado gran auge en los últimos años, ya que los consumidores buscan cervezas de alta calidad y sabor distintivo. Se elabora en pequeñas cantidades, utilizando técnicas de producción tradicionales y seleccionando cuidadosamente los ingredientes de alta calidad.

El proceso de elaboración de este tipo de cerveza es complejo y puede variar significativamente entre los cerveceros artesanales. Sin embargo, hay ciertos pasos comunes en el proceso, incluyendo la molienda, maceración, hervido, fermentación, carbonatación y su respectivo envasado.

Con la creciente demanda de cervezas artesanales, la atención se ha centrado en la calidad de los ingredientes, el proceso de elaboración, la reducción de costos, mejoras en las técnicas de producción, como por ejemplo en la carbonatación artificial.

El proceso de carbonatación es una parte fundamental del proceso de elaboración de cerveza artesanal, ya que afecta el sabor en boca y la retención de espuma de la cerveza. La carbonatación es un proceso complejo que se logra mediante la adición de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a la cerveza antes del embotellado o envasado. El objetivo de la carbonatación es producir una cerveza con una cantidad adecuada de  $\text{CO}_2$  disuelto en ella, lo que crea una sensación burbujeante y refrescante en el paladar.

El proceso de carbonatación tiene una influencia significativa en el sabor y la calidad de la cerveza. Si se añade demasiado  $\text{CO}_2$ , la cerveza puede tener un sabor amargo o picante, mientras que, si se agrega muy poco  $\text{CO}_2$ , la cerveza puede resultar insípida y sin cuerpo. El proceso de carbonatación también puede afectar la apariencia de la cerveza, ya que la cantidad de  $\text{CO}_2$  disuelto puede influir en la cantidad, tamaño y retención de la espuma.

Uno de los métodos más utilizados para la carbonatación de cerveza artesanal a gran escala, es el uso de un agitador mecánico. Este método es rápido y eficiente, lo que lo hace popular en la producción de cerveza artesanal. Además, el uso de estos agitadores mecánicos permite un control preciso sobre la cantidad de  $\text{CO}_2$  que se disuelve en la cerveza, lo que asegura la consistencia en su calidad.

De tal manera, el objetivo de esta tesis se enfoca en la optimización del proceso de carbonatación de cerveza artesanal, con el diseño y la implementación de un agitador mecánico, dejando a un lado el proceso manual, que afectaba en la eficacia y la calidad de la cerveza artesanal. Además, se pretende contribuir al conocimiento de la industria cervecera artesanal y proporcionar información valiosa para los cerveceros que buscan mejorar la calidad de sus productos.

# CAPÍTULO I

## 1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

### 1.1. Antecedentes

En el Ecuador durante la pandemia del 2020, los ingresos del sector de cerveza artesanal cayeron hasta un 80%, por las restricciones de movilidad y aforo. Los que mejoraron significativamente con la aceleración del proceso de vacunación y la reactivación económica, de modo que a la actualidad se producen en el país más de 250 marcas de cerveza artesanal, según la Asociación de Cervecerías Artesanales de Ecuador (Coba, 2021).

Según el Reglamento de la Ley de Fomento Productivo, (2018) aprobada por la Asamblea Nacional el 18 de diciembre de 2018, “El ámbito artesanal que establece la Ley de Régimen Tributario Interno y este Reglamento en lo referente a la determinación del Impuesto a los Consumos Especiales en alcohol, aguardiente y bebidas alcohólicas, será considerado como tal únicamente cuando cuente con la calificación de artesanal, y en el caso de cerveza artesanal cuando tenga la respectiva certificación previa emitida, en base a requisitos homólogos, por el organismo competente en materia de producción, y cuando se trate de cervezas de importación, por el Servicio Nacional de Aduanas del Ecuador. Las condiciones y requisitos para acceder a la certificación previa en el caso de la cerveza artesanal serán emitidas por el organismo competente en materia de producción, y por el Servicio Nacional de Aduanas del Ecuador cuando se trate de cervezas de importación.”

Siendo así la participación de productores artesanales dentro del mercado nacional ecuatoriano menor al 1% del consumo total nacional, con una producción total de 30730 Hl y generando un aproximado de 1243 empleos dentro de la producción artesanal de cerveza.

### 1.2. Planteamiento del problema

En Ecuador, los productores de cerveza artesanal, comúnmente conocidos como microcervecerías, emprendedores de la cerveza artesanal o elaboradores caseros de cerveza, producen volúmenes reducidos de cerveza en diversas variantes de sabor, niveles de alcohol y tonalidades de color, limitando su comercialización al ámbito local. Los emprendedores ecuatorianos enfrentan barreras que les impide el incremento de oferta de productos demandados por el público objetivo.

Los problemas que enfrentan los fabricantes de cerveza artesanal impiden que los clientes no tengan acceso a un producto cervecero de calidad, que es considerado por muchos como un producto premium. De manera que las limitantes de mercado y tecnología no permiten consolidar su posición estratégica y ofertar sus productos a un nicho de mercado que aprecia el sabor y las características en comparación a un producto industrial. Este es el caso de “VÉRTIGO

CERVECERÍA ARTESANAL” que hoy presenta obstáculos en el proceso de carbonatación forzada, lo cual derivó en el estudio del mecanismo más apto para el diseño, simulación y construcción de la máquina agitadora de barriles requerida para simplificar y mejorar la línea de producción de dicha empresa.

### **1.3. Justificación**

#### ***1.3.1. Justificación teórica***

El desarrollo del presente proyecto se fundamenta en el área del diseño de mecanismos junto con el área métodos de elementos finitos, ya que el diseño óptimo de la máquina de agitación dependerá mucho del mecanismo planteado para cumplir con el número de ciclos requeridos para el proceso de carbonatación.

#### ***1.3.2. Justificación metodológica***

Para el diseño del agitador de barriles se aplican conocimientos que se han adquirido a lo largo de la preparación académica en la carrera, como futuros ingenieros conocemos que las disciplinas que se desarrollan en este proyecto como son mecanismos, método de elemento finito, diseño de elementos de máquinas y resistencia de materiales, son temas y bases fundamentales inmersos en el perfil de un ingeniero mecánico.

#### ***1.3.3. Justificación económica***

En el plano económico se pretende que la microempresa Vértigo Cervecería Artesanal, agilite el proceso de carbonatación de la cerveza con la implementación de una máquina de agitación de barriles, que les permita optimizar tiempos y recursos con el fin de aumentar su producción y por ende sus utilidades.

### **1.4. Objetivos**

#### ***1.4.1. Objetivo general***

Diseñar, simular y construir una máquina agitadora de barriles tipo keg de almacenamiento de cerveza artesanal para la carbonatación forzada mediante gas carbónico (CO<sub>2</sub>)

#### ***1.4.2. Objetivos específicos***

- Determinar los requerimientos funcionales y parámetros de diseño.
- Realizar el diseño conceptual
- Diseñar la máquina agitadora de barriles de acuerdo con las especificaciones requeridas.
- Seleccionar los materiales adecuados para la construcción y ensamblaje de la máquina agitadora de barriles.
- Validar el diseño mediante el software Ansys.
- Construir y ensamblar la máquina agitadora de barriles
- Comprobar la funcionalidad y cumplimiento de los requerimientos solicitados.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Cerveza artesanal

La cerveza artesanal se refiere a una variedad de cerveza que se produce en lotes pequeños mediante la utilización de técnicas de elaboración artesanales y métodos tradicionales de producción. A diferencia de la cerveza comercial producida a gran escala, la cerveza artesanal se elabora en pequeñas cervecerías independientes, por lo general se utilizan ingredientes de alta calidad, como maltas, lúpulos y levaduras especializadas.



**Ilustración 2-1:** Cerveza artesanal

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Los cerveceros artesanales con frecuencia experimentan con diferentes ingredientes y estilos de cerveza para crear sabores únicos y variados, lo que resulta en una amplia gama de cervezas artesanales.

La cerveza artesanal se ha vuelto cada vez más popular en los últimos años, ya que los consumidores buscan una experiencia auténtica y de alta calidad. Las cervecerías artesanales o micro cervecerías son fábricas que producen un volumen limitado de cerveza, siempre son mucho más pequeñas que las fábricas corporativas de gran escala y en todos los casos sus dueños son independientes y trabajan a título personal, considerándose con frecuencia entre una aventura comercial y un entretenimiento (González, 2017, p. 6).

#### 2.2. Proceso de producción

El proceso de producción de cerveza artesanal es similar al proceso de producción de cerveza industrial, pero a una escala más pequeña y con mayor control y personalización en cada etapa. A continuación, se plantean los pasos principales del proceso de producción de cerveza artesanal:

### 2.2.1. Molienda

El proceso de molienda es uno de los primeros pasos en la producción de cerveza. Consiste en la trituration de los granos de cebada u otros cereales como trigo, centeno o avena, para obtener una mezcla de granos triturados conocida como *grist*.

El objetivo de la molienda es romper la cáscara de los granos y separar el endospermo del grano de la cáscara, para facilitar la extracción de los azúcares fermentables durante la maceración.

Existen varios tipos de molinos para la molienda de granos, aunque los más comunes en la producción de cerveza son los molinos de rodillo. Estos molinos constan de dos o más rodillos que giran en direcciones opuestas y que aplastan los granos entre ellos. El espacio entre los rodillos se puede ajustar para controlar el tamaño de los granos triturados.



**Ilustración 2-2:** Molienda de granos

Fuente: Elfo, G., 2020

El proceso de molienda es un paso importante en la producción de cerveza, ya que permite obtener los granos triturados necesarios para la maceración y la posterior producción del mosto. Un buen proceso de molienda es esencial para asegurar una buena extracción de los azúcares fermentables y obtener una cerveza de calidad y sin exceso de sedimento.

### 2.2.2. Maceración

El proceso de maceración es uno de los pasos clave en la producción de cerveza. La maceración se lleva a cabo después de la molienda y consiste en la mezcla del *grist* con agua caliente en un tanque de maceración. Durante la maceración, los azúcares fermentables se extraen de los granos triturados y se convierten en un líquido dulce conocido como mosto.

El objetivo de la maceración es liberar los azúcares fermentables del grano y transformarlos en una solución líquida que pueda ser fermentada por las levaduras. La temperatura y la duración de la maceración son factores críticos que influirán en la cantidad y calidad de los azúcares extraídos.

Existen diferentes métodos de maceración, aunque el más común es el método de infusión simple. En este método, se mezcla el *grist* con agua a una temperatura específica y se mantiene durante un período de tiempo determinado para que los azúcares se extraigan de los granos.



**Ilustración 2-3:** Maceración de cerveza

Fuente: Cuellar, L., 2017

Otro método de maceración es el método de cocción, que implica retirar una porción del mosto durante la maceración y hervirlo para caramelizar los azúcares y luego volver a añadirlo al mosto, lo que puede mejorar el perfil de sabor de la cerveza.

Después de la maceración, el mosto se separa de los sólidos restantes en una operación conocida como clarificación. El mosto clarificado se lleva a cocción con lúpulo para añadir sabor y aroma a la cerveza.

### **2.2.3. Hervido**

El proceso de hervido es una etapa crítica en la producción de cerveza, ya que es aquí donde se agregan los lúpulos, que aportan sabor, aroma y amargor a la cerveza, y donde se eliminan los compuestos no deseados del mosto. El proceso de hervido se puede dividir en varias etapas:

1. **Ebullición:** Después de la maceración y filtración, el mosto se calienta en una caldera de cocción hasta que alcance la temperatura de ebullición aproximadamente 100 °C. La ebullición se lleva a cabo durante un período de tiempo determinado, que puede variar según el estilo de cerveza que se esté produciendo.
2. **Adición de lúpulos:** Durante la ebullición, se agregan los lúpulos en diferentes momentos según se desee obtener más sabor, aroma o amargor. Los lúpulos amargos se agregan al inicio del hervido para extraer los alfa-ácidos, que son los compuestos que aportan amargor a la cerveza. Los lúpulos aromáticos y saborizantes se agregan en los últimos 10-15 minutos de hervido, o en la etapa de enfriamiento posterior a la ebullición, para conservar sus compuestos volátiles y aportar más sabor y aroma a la cerveza.

3. Clarificación: Durante la ebullición, se forman compuestos coagulados no deseados que se eliminan a través de la separación de sólidos mediante el uso de un dispositivo de filtración o decantación.

El proceso de hervido es una etapa crítica en la producción de cerveza. El tiempo de ebullición, la temperatura, la cantidad y el momento de la adición de lúpulos son factores clave que afectan al sabor, aroma y amargor de la cerveza. Un hervido adecuado ayuda a crear una cerveza equilibrada y de alta calidad.



**Ilustración 2-4:** Hervido del mosto

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

#### **2.2.4. Enfriado**

Después de la etapa de ebullición, el mosto debe enfriarse rápidamente para evitar la oxidación, contaminación microbiológica y para detener la acción de las enzimas y la fermentación.

El proceso de enfriamiento se puede dividir en dos etapas:

1. Enfriamiento rápido: La primera etapa de enfriamiento implica el enfriamiento rápido del mosto desde la temperatura de ebullición hasta alrededor de 26-27 °C. Este enfriamiento rápido puede hacerse mediante un intercambiador de calor, donde la temperatura del mosto caliente se intercambia con la temperatura del agua fría. El enfriamiento rápido es importante porque ayuda a prevenir la contaminación microbiológica y la formación de compuestos y colonias no deseadas.
2. Enfriamiento lento: Después del enfriamiento rápido, se lleva a cabo una segunda etapa de enfriamiento, donde el mosto se enfriará lentamente a la temperatura deseada para la fermentación. Este enfriamiento puede llevarse a cabo en un tanque de enfriamiento o en la misma cuba de fermentación. La temperatura del mosto debe mantenerse en el rango adecuado para el tipo de levadura que se va a utilizar, generalmente entre 18-24 °C.

Durante el proceso de enfriamiento, se puede añadir oxígeno al mosto para proporcionar las condiciones óptimas para la fermentación. Esto se puede hacer mediante la inyección de oxígeno en el mosto enfriado antes de la adición de la levadura.

El proceso de enfriamiento es crítico para la producción de una cerveza de alta calidad, ya que ayuda a prevenir la contaminación microbiana y la formación de compuestos y sabores no deseados. El enfriamiento rápido y controlado también ayuda a preservar las características del mosto y a crear las condiciones ideales para una fermentación saludable y completa.

### **2.2.5. Fermentación**

La fermentación es el proceso en la elaboración de la cerveza en el que el mosto se convierte en “cerveza verde”. Este proceso es catalizado por la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, generalmente una cultura pura de una cepa seleccionada, ocasionalmente una mezcla de dos o más cepas de levadura y, más raramente, una mezcla relativamente no caracterizada de levaduras y bacterias. El término fermentación proviene del latín *fevere*, que significa hervir, en referencia a la naturaleza efervescente visible del proceso debido a la formación de CO<sub>2</sub> gaseoso.



**Ilustración 2-5:** Fermentadores cónicos

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

Es importante destacar que la fermentación de la cerveza es la manifestación del crecimiento de la levadura. En este sentido, la “cerveza verde” es simplemente el medio de crecimiento gastado que queda después de que cesa el crecimiento de la levadura. El arte de la gestión de la fermentación es regular el crecimiento y metabolismo de la levadura para que el medio gastado o cerveza, tenga la composición deseada.

Durante la fermentación, la levadura crece en los nutrientes disponibles en el mosto, multiplicándose típicamente entre cuatro y seis veces. Como resultado de este crecimiento, aquellos azúcares que las células de levadura pueden asimilar se convierten en gran medida en etanol y CO<sub>2</sub> (Simonazzi, 2009).

### 2.2.6. *Maduración*

La maduración de la cerveza es una etapa concluyente, ya que permite que la cerveza alcance su sabor y aroma óptimos. Durante esta etapa, la cerveza se deja reposar a una temperatura baja y constante, generalmente entre 0°C y 4°C, durante varias semanas. La duración de la maduración depende del tipo de cerveza y de las preferencias del cervecero.

El producto recién fermentado, contiene productos químicos que alteran el sabor de la cerveza y que son eliminados por el anhídrido carbónico que desprenden algunas levaduras que todavía permanecen activas. Es decir, tiene lugar una lenta fermentación secundaria que hace madurar la cerveza (Fálder, 2006, p. 4).

### 2.2.7. *Carbonatación*

La carbonatación consiste en la adición de dióxido de carbono a la cerveza antes de su envasado. Esto crea burbujas y una espuma estable en la cerveza, lo que mejora su sabor y aroma. La carbonatación se puede lograr de forma natural mediante la fermentación en botella o barril, o mediante la inyección de dióxido de carbono en el líquido. El nivel de carbonatación deseado varía según el estilo de cerveza y es influenciado por factores como la temperatura y la presión.



**Ilustración 2-6:** Inyección de dióxido de carbono

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

### 2.2.8. *Envasado*

El proceso de envasado es la última etapa en la producción de cerveza y consiste en trasladar la cerveza desde los tanques de maduración o fermentación hacia su envase final. El proceso de envasado puede ser manual o automatizado.

La cerveza puede ser envasada en diferentes formatos, como botellas de vidrio, latas, barriles, o incluso en bolsas o *pouches*. El envasado se realiza en una línea de envasado que consta de diferentes máquinas y equipos, que varían según el formato de envasado elegido.

Es necesario que el envasado de la cerveza se realice de tal forma que sus características se conserven plenamente y durante un período prolongado de tiempo.

La cerveza es una bebida que se caracteriza por tener un elevado contenido de CO<sub>2</sub>, que debe mantenerse intacto hasta llegar al consumidor y, además, es vulnerable frente a microorganismos, por ello, las botellas deben ser lavadas con agentes sanitizantes y agua a altas temperaturas (Sancho, 2015, p. 101).

### **2.3. Carbonatación de la cerveza**

La carbonatación de la cerveza es la última parte del proceso estándar de elaboración de cerveza artesanal antes de su embotellado o dispensación directa, en donde, luego de pasar por su cocción, fermentación y maduración, se añade gas carbónico para su carbonatación.

Es un término usado para definir la disolución de este gas, en la mayoría de los casos CO<sub>2</sub>, en agua o un líquido usando presiones y temperaturas determinadas para llegar al volumen de CO<sub>2</sub> deseado según el estilo de cerveza. En la práctica, la adición de dióxido de carbono constituye una acción preservativa cuya efectividad se incrementa a medida que el nivel de carbonatación aumenta puesto que, este gas es capaz de destruir e inhibir el crecimiento de bacterias. (Ryan, 2013) Existen varios procesos de carbonatación de cerveza artesanal, entre los más comunes se encuentran:

#### **2.3.1. Carbonatación natural**

La carbonatación natural de la cerveza artesanal es un proceso en el que se permite que la cerveza se carbonata de forma natural durante la fermentación y maduración en la botella o en el barril. Durante el proceso de fermentación, las levaduras convierten los azúcares en alcohol y CO<sub>2</sub>, y parte de ese CO<sub>2</sub> se disuelve en la cerveza, lo que resulta en la carbonatación natural. En la carbonatación natural, la cerveza se embotella o se trasvasa al barril antes de que el proceso de fermentación se complete, lo que significa que quedan restos de azúcar sin fermentar en la cerveza. Con el tiempo, las levaduras residuales consumen este azúcar excedente, lo que produce una pequeña cantidad de CO<sub>2</sub> adicional y aumenta la carbonatación natural de la cerveza.

Este proceso puede tardar varios días o incluso semanas, dependiendo de la temperatura de almacenamiento y otros factores. La carbonatación natural tiende a producir una burbuja más suave y delicada que la carbonatación forzada, sin embargo, el tiempo y los costos de producción incrementan.

#### **2.3.2. Carbonatación forzada**

La carbonatación forzada en la cerveza artesanal es un proceso en el que se agrega dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de manera artificial de forma controlada a la cerveza. A diferencia de la carbonatación natural, en la que la cerveza se carbonata de forma natural durante la fermentación y maduración, la carbonatación forzada implica agregar CO<sub>2</sub> de forma controlada y precisa después de que la fermentación y maduración ha finalizado, para conseguir cierto valor de gas carbónico según el tipo y estilo de cerveza a trabajar.



**Ilustración 2-7:** Carbonatación forzada

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

El proceso de carbonatación forzada suele llevarse a cabo en un tanque de carbonatación o barril, donde se añade  $\text{CO}_2$  a la cerveza mediante un sistema de regulación de presión. La cantidad de  $\text{CO}_2$  agregado puede variar según el estilo de la cerveza, la temperatura y la preferencia personal del cervecero. La carbonatación forzada permite a los cerveceros artesanales controlar la cantidad de burbujas en la cerveza y crear una experiencia de degustación más consistente para el consumidor.

Es importante tener en cuenta que el proceso de carbonatación forzada debe realizarse con cuidado y precisión para evitar la sobrecarbonatación o la falta de carbonatación, lo que puede afectar negativamente el sabor y la calidad de la cerveza.

### **2.3.3. Carbonatación con pastilla**

La carbonatación con pastillas es un método para carbonatar cervezas, bebidas y refrescos de manera casera. Este método implica agregar una pastilla de carbonatación a la botella o al barril de la bebida para lograr una carbonatación controlada.

Las pastillas de carbonatación contienen ácido cítrico y bicarbonato de sodio, que reaccionan cuando entran en contacto con líquidos para producir dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Estas pastillas son especialmente útiles para carbonatar pequeñas cantidades de líquido en casa, como una sola botella o un barril pequeño.

Para carbonatar una botella de cerveza o una bebida con pastillas, se coloca una pastilla en la botella, se sella la tapa y se agita suavemente para mezclar la pastilla con el líquido. La botella debe dejarse reposar durante unos minutos para permitir que se produzca la reacción química y se forme el  $\text{CO}_2$ . Después de esperar el tiempo necesario, la bebida estará carbonatada y lista para ser disfrutada.

Es importante tener en cuenta que la carbonatación con pastillas no es tan precisa como otros métodos de carbonatación, como la carbonatación forzada, y puede producir una carbonatación

variable, también es importante seguir las instrucciones del fabricante y utilizar la cantidad correcta de pastillas para evitar una carbonatación excesiva que podría hacer que la botella explote o, por el contrario, una carbonatación insuficiente que no satisfaga el paladar.

#### **2.3.4. *Quick Carb a través de piedra difusora de carbonatación***

*Quick Carb* es un dispositivo utilizado para carbonatar cerveza de manera rápida y eficiente, que funciona mediante la aplicación de presión de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a través de una piedra difusora de carbonatación, que se coloca dentro del líquido a carbonatar. La piedra difusora de carbonatación es un dispositivo que permite dispersar el CO<sub>2</sub> en pequeñas burbujas en todo el líquido. Al utilizar una piedra difusora, el CO<sub>2</sub> se disuelve más fácilmente en el líquido, lo que acelera el proceso de carbonatación.

El *Quick Carb* utiliza una bomba de presión para suministrar CO<sub>2</sub> a través de la piedra difusora y dentro del líquido. Esto permite que la cerveza se carbonate en cuestión de horas en lugar de esperar varios días para que se consiga de forma natural. El uso del *Quick Carb* con una piedra difusora de carbonatación, es una forma popular y efectiva de carbonatar cerveza en casa para aquellos que desean evitar esperar varios días para obtener una cerveza carbonatada.

Aunque el *Quick Carb* y la piedra difusora de carbonatación son herramientas útiles para carbonatar cerveza de manera rápida y efectiva, pueden presentarse algunos problemas al utilizarlas. Algunos de los problemas comunes son los siguientes:

- Pérdida de presión: si hay una fuga de gas en el sistema, la presión disminuirá y el CO<sub>2</sub> no se disolverá adecuadamente en el líquido. Para evitar esto, es importante asegurarse de que todas las conexiones estén bien apretadas y de que no haya fugas.
- Ajuste inadecuado de la presión: si la presión es demasiado baja, el CO<sub>2</sub> no se disolverá adecuadamente en el líquido. Si la presión es demasiado alta, la cerveza puede carbonatarse demasiado rápido y generar una espuma excesiva. Es importante ajustar la presión de forma gradual y probar la cerveza con frecuencia para asegurarse de que la carbonatación esté en el nivel deseado.
- Contaminación de la piedra difusora: si la piedra difusora no se limpia adecuadamente después de cada uso, puede acumularse suciedad y bacterias, lo que puede afectar la calidad de la cerveza y la eficacia de la carbonatación. Es importante limpiar la piedra difusora con agua caliente y solución de limpieza después de cada uso.
- Dificultad para manejar la temperatura: la temperatura del líquido puede afectar la velocidad de carbonatación y la calidad del producto final. Es importante mantener el líquido a una temperatura constante y adecuada para lograr los mejores resultados.

En general, el uso del *Quick Carb* y la piedra difusora de carbonatación pueden presentar algunos desafíos, pero con el cuidado y la atención adecuados, pueden ser herramientas muy útiles para carbonatar cerveza de manera rápida y efectiva.

#### **2.4. Dióxido de carbono**

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro, conocido como CO<sub>2</sub> o gas carbónico, compuesto por dos moléculas de oxígeno y una de carbono.

En la industria cervecera es indispensable mantener un ambiente controlado de CO<sub>2</sub> durante el proceso de embotellado y embarrilado de la cerveza para evitar *off flavors* o también conocidos como sabores indeseables, en especial el sabor a acetaldehído que se caracteriza por presentar un típico sabor y aroma a manzana verde, llegando incluso a tener sabores similares a cidra, esta alteración aparece comúnmente en el proceso de fermentación, por alterar el tiempo y proceso de fermentación (fermentación incompleta) o también puede deberse a la oxidación durante el proceso de carbonatación, donde hay un nivel elevado de O<sub>2</sub> en la cerveza envasada o embarrilada, pudiendo convertir esos etanoles en acetaldehído.



**Ilustración 2-8:** Tanque de CO<sub>2</sub>

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

#### **2.5. Ley de Henry**

Según la Ley de Henry, a una temperatura constante, la proporción del gas disuelto en un líquido cambia en relación directa con la presión parcial del gas presente en el líquido. La solubilidad de los gases se ve afectada por la temperatura de manera inversa, ya que un aumento en la temperatura del líquido hace que el gas disuelto se vuelva insoluble y tienda a escapar hacia la fase gaseosa. Por lo tanto, la absorción de un gas por un líquido es más eficiente a temperaturas bajas.

La ley de Henry es una buena descripción de la solubilidad de los gases en líquidos cuando están sometidos a bajas presiones y cuando el gas es poco soluble en el líquido. Sin embargo, esta ley

no se aplica a soluciones ideales, en las que el soluto y el solvente interactúan químicamente o en disociaciones electrolíticas (Sander et al. 2021, p. 9).

### 2.5.1. *Tabla de carbonatación de cerveza artesanal*

La tabla de carbonatación de cerveza es una herramienta para determinar la cantidad de dióxido de carbono que se debe agregar a la cerveza para lograr la concentración de CO<sub>2</sub> deseada. Se utiliza conociendo la temperatura de la cerveza y el nivel de carbonatación esperado para determinar la presión de CO<sub>2</sub> a suministrar.

**Tabla 2-1:** Valores máximos y mínimos de volúmenes de CO<sub>2</sub> recomendados según el estilo de cerveza artesanal

Estilo de Cerveza	Volumen CO <sub>2</sub>		Estilo de Cerveza	Volumen CO <sub>2</sub>	
	Min	Max		Min	Max
American Amber Ale	2,20	2,80	English Dark Mild	1,30	2,00
American Brown	1,50	2,50	English Light Mild	1,30	2,00
American Dark Lager	2,50	2,70	English Old/StrongAle	1,50	2,30
American Lager	2,60	2,70	English Ordinary Bitter	0,75	1,30
American Light Lager	2,60	2,60	English Pale Ale	1,50	2,30
American Pale Ale	2,20	2,80	English Strong (ESB) Bitter	0,75	1,30
American Pilsener	2,60	2,70	Flanders Brown	1,90	2,50
American Premium Lager	2,60	2,70	Foreign-Style Stout	2,30	2,60
American Wheat	2,30	2,60	German Pilsener	2,50	2,50
Bamberg Rauchbier	2,20	2,60	Helles Bock	2,20	2,70
Barley Wine	1,30	2,30	Imperial Stout	1,50	2,30
Belgian Dubbel	1,90	2,40	India Pale Ale	1,50	2,30
Belgian Fruit Lambic	2,60	4,50	Irish Dry Stout	1,60	2,00
Belgian Gueuze Lambic	3,00	4,50	Kolsch	2,40	2,70
Belgian Lambic	3,00	4,50	Maibock	2,20	2,70
Belgian Pale Ale	1,90	2,50	Marzen/Oktoberfest	2,60	2,70
Belgian Strong Ale	1,90	2,40	Mi.inchner Helles	2,30	2,70
Belgian Tripel	1,90	2,40	Munich Dunkel	2,20	2,70
Belgian White (Wit)	2,10	2,60	North German Altbier	2,20	3,10
BerlinerWeisse	3,50	3,50	Oatmeal Stout	2,00	2,40
Bock	2,20	2,70	Oud Bruin	1,90	2,50
Bohemian Pilsener	2,30	2,50	Robust Porter	1,80	2,50
Brown Porter	1,70	2,50	Schwarzbier	2,20	2,60
California Common	2,40	2,80	Scottish Export Ale	0,75	1,30
Cream Ale	2,60	2,70	Scottish Heavy Ale	0,75	1,30
Doppelbock	2,30	2,60	Scottish Light Ale	0,75	1,30
Dortmunder/European Export	2,60	2,60	Strong Scotch Ale	1,50	2,30
Dunkelweizen	3,60	4,50	Sweet Stout	2,00	2,40
DusseldorfAltbier	2,20	3,10	Traditional Bock	2,20	2,70
Eisbock	2,40	2,40	Vienna	2,40	2,60
English Best (Special) Bitter	0,75	1,30	Weizen/Weissbier	3,60	4,50
English Brown	1,50	2,30	Weizenbock	3,70	4,70

Fuente: Rincón del Cervecer, 2018

Teniendo en cuenta que para cada estilo de cerveza hay una carbonatación recomendada, la tabla presentada muestra los valores máximos y mínimos a los que se sujeta cada estilo para llegar a una carbonatación ideal, la mayoría de los valores están de acuerdo con lo establecido por la Guía de Estilos de Cerveza por el Programa de Certificación de Jueces de Cerveza (BJCP).

**Tabla 2-2:** Tabla de carbonatación en relación temperatura - volúmenes de CO<sub>2</sub>

		Temperatura °C															
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Carbonatación Volúmenes CO <sub>2</sub>	1.5			0.08	0.16	0.25	0.34	0.43	0.53	0.62	0.72	0.82	0.92	1.03	1.13	1.24	1.35
	1.6		0.06	0.15	0.24	0.34	0.43	0.52	0.62	0.72	0.82	0.93	1.04	1.14	1.26	1.37	1.48
	1.7	0.04	0.13	0.22	0.32	0.42	0.51	0.61	0.72	0.82	0.92	1.04	1.15	1.26	1.38	1.49	1.61
	1.8	0.11	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.71	0.81	0.92	1.03	1.15	1.26	1.38	1.50	1.62	1.74
	1.9	0.17	0.27	0.37	0.48	0.58	0.69	0.80	0.91	1.02	1.14	1.26	1.38	1.50	1.62	1.75	1.87
	2.0	0.24	0.34	0.45	0.56	0.66	0.78	0.89	1.01	1.12	1.24	1.36	1.49	1.61	1.74	1.87	2.00
	2.1	0.31	0.41	0.52	0.63	0.75	0.86	0.98	1.10	1.22	1.35	1.47	1.60	1.73	1.86	2.00	2.13
	2.2	0.37	0.48	0.60	0.71	0.83	0.95	1.07	1.20	1.32	1.45	1.58	1.71	1.85	1.99	2.12	2.26
	2.3	0.44	0.55	0.67	0.79	0.91	1.04	1.16	1.29	1.42	1.56	1.69	1.83	1.97	2.11	2.25	2.39
	2.4	0.50	0.62	0.74	0.87	1.00	1.12	1.25	1.39	1.52	1.66	1.80	1.94	2.08	2.23	2.38	2.52
	2.5	0.57	0.69	0.82	0.95	1.08	1.21	1.35	1.48	1.62	1.76	1.91	2.05	2.20	2.35	2.50	2.65
	2.6	0.63	0.76	0.89	1.02	1.16	1.30	1.44	1.58	1.72	1.87	2.01	2.16	2.32	2.47	2.63	2.78
	2.7	0.70	0.83	0.97	1.10	1.24	1.38	1.53	1.67	1.82	1.97	2.12	2.28	2.43	2.59	2.75	2.91
	2.8	0.76	0.90	1.04	1.18	1.32	1.47	1.62	1.77	1.92	2.07	2.23	2.39	2.55	2.71	2.88	3.04
	2.9	0.83	0.97	1.11	1.26	1.41	1.56	1.71	1.86	2.02	2.18	2.34	2.50	2.67	2.83	3.00	3.17
3.0	0.89	1.04	1.19	1.34	1.49	1.64	1.80	1.96	2.12	2.28	2.45	2.61	2.78	2.95	3.13	3.30	

Presiones en bares

Fuente: Henselbier, 2016

La tabla mostrada representa la temperatura de la cerveza a la hora de carbonatar la cerveza frente a los volúmenes deseados de CO<sub>2</sub> escogidos previamente según el estilo de cerveza a trabajar, sujetándose a los valores recomendados por la Tabla 2-1.

## 2.6. Mecanismo y máquinas

Un mecanismo es un instrumento que convierte el movimiento en un patrón deseado y típicamente produce fuerzas mínimas y transmite una cantidad limitada de energía.

Hunt (1978, p. 1) define a un mecanismo como un medio de transmisión, control o restricción del movimiento relativo.

En términos generales, una máquina contiene una serie de mecanismos diseñados para generar y transmitir fuerzas significativas. Algunos ejemplos de mecanismos comunes incluyen un sacapuntas, un obturador de cámara fotográfica, un reloj analógico, una silla plegable, una lámpara de escritorio ajustable y un paraguas. Mientras que los ejemplos de máquinas incluyen un procesador de alimentos, la puerta de la bóveda de un banco, la transmisión de un automóvil, una niveladora, un robot y un juego mecánico de un parque de diversiones, entre otros. Aunque no hay una distinción clara entre mecanismos y máquinas, se considera una máquina si las fuerzas o niveles de energía son significativos, mientras que se considera un mecanismo si no lo son. Una definición útil del trabajo de un mecanismo es un sistema de elementos diseñados para transmitir el movimiento de una forma predeterminada. Si se agrega la palabra energía después de la palabra movimiento, entonces se puede convertir esta definición en una definición de una máquina (Norton, 2009, p. 4).

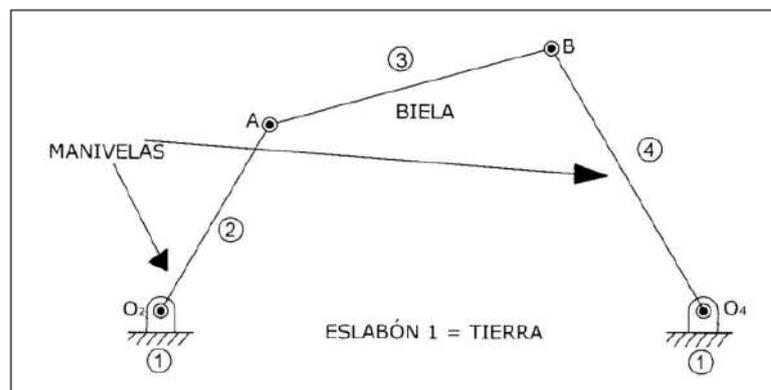
En algunos casos, los mecanismos se pueden tratar como dispositivos cinemáticos si se cargan en exceso y funcionan a bajas velocidades, lo que significa que se pueden analizar sin tener en cuenta

las fuerzas. Sin embargo, las máquinas deben tratarse primero como mecanismos, analizando sus velocidades y aceleraciones cinemáticamente y, posteriormente, como sistemas dinámicos, analizando las fuerzas estáticas y dinámicas producidas por esas aceleraciones mediante principios de cinética. La primera parte del texto se enfoca en la cinemática de mecanismos, mientras que la segunda parte se enfoca en la dinámica de la maquinaria. Las técnicas de síntesis de mecanismos presentadas en la primera parte son aplicables tanto al diseño de mecanismos como al diseño de máquinas, ya que en cada caso se debe crear algún conjunto de miembros móviles para generar y controlar los movimientos y la geometría deseados (Norton, 2009, p. 4).

### 2.6.1. Mecanismos cuatro barras

Se ha determinado que un mecanismo de cuatro eslabones articulados, con uno de ellos siendo la base, posee un grado de libertad de 1 GDL. Este tipo de mecanismo es comúnmente llamado "cuadrilátero articulado", y se caracteriza por tener dos eslabones contiguos a la base que funcionan como manivelas de entrada y salida, mientras que el eslabón intermedio se conoce como "biela". Al tener un GDL de 1, este mecanismo puede transformar un movimiento de rotación en un movimiento más complejo de traslación y rotación en la biela o en otro movimiento de rotación con características diferentes en la manivela de salida (García et al., 2014: p. 15-18).

Se han identificado dos tipos de movimiento de las manivelas en los cuadriláteros articulados: uno de giro completo (conocido como movimiento de manivela) y otro de giro parcial o vaivén (llamado movimiento de balancín). Estos movimientos pueden ser observados al estudiar el comportamiento de los cuadriláteros articulados (García et al., 2014: p. 15-18).



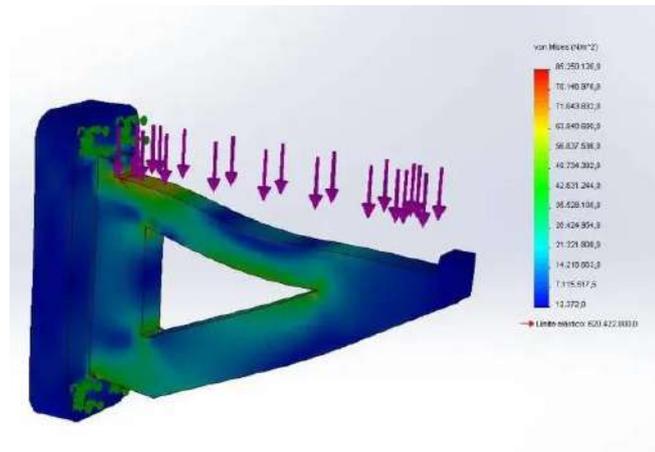
**Ilustración 2-9:** Definición del cuadrilátero articulado.

Fuente: García et al., 2014

## 2.7. Método de elementos finitos

Debido a la complejidad de las ecuaciones de gobierno de las estructuras continuas y, en general, de la mayoría de las estructuras se hace imprescindible la utilización del método de los elementos finitos o MEF. Este método determina el comportamiento de una estructura ante las cargas sustituyendo la solución continua, exacta y en la mayoría de los casos imposible del sistema de

ecuaciones diferenciales que conforman el problema elástico por una solución discontinua o discreta y, por tanto, aproximada (Vázquez y López 2001, p. 31).



**Ilustración 2-10:** Método de elementos finitos

**Fuente:** GRUPO CARMAN, 2014

En esta técnica, el análisis se divide en un número finito de elementos y se aproxima a una solución continua. Cada elemento se representa por medio de un conjunto de ecuaciones algebraicas que se resuelven para obtener las variables de interés, como las tensiones, deformaciones, esfuerzos, entre otras.

Los elementos finitos se utilizan en diversas aplicaciones, desde el diseño de estructuras y maquinarias hasta la simulación de fenómenos físicos, como el análisis de fluidos y la transferencia de calor. También se utilizan en la optimización de diseños y en el análisis de fallos. Una de las ventajas de los elementos finitos es su capacidad para manejar geometrías complejas y cargas variables, lo que permite simular situaciones reales de manera precisa y eficiente.

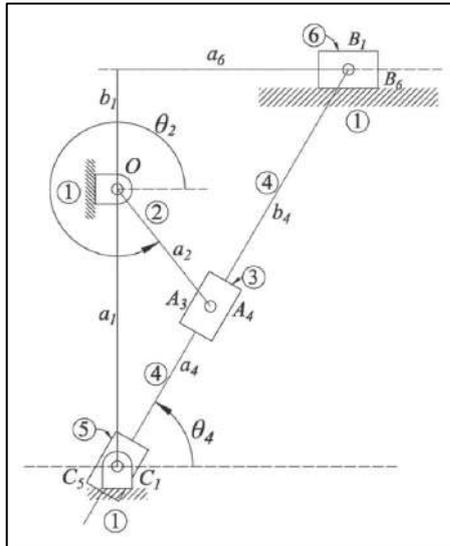
La técnica de elementos finitos se ha convertido en una herramienta estándar en la industria y la investigación, y existen numerosos softwares comerciales y de código abierto que implementan esta técnica.

## **2.8. Análisis cinemático**

El análisis cinemático es una herramienta fundamental en la ingeniería mecánica, especialmente en el diseño y análisis de mecanismos. El análisis se basa en la descripción matemática del movimiento, que se realiza mediante el uso de ecuaciones y diagramas vectoriales.

El análisis cinemático implica la determinación de posición, desplazamiento, rotación, rapidez, velocidad y aceleración de un mecanismo (Myszka 2012, p. 2).

Para llevar a cabo el análisis, se utiliza un modelo matemático que describe la cinemática del mecanismo en términos de posiciones, velocidades y aceleraciones.



**Ilustración 2-11:** Análisis cinemático

**Fuente:** López et al. 2012

El análisis cinemático en mecanismos es fundamental para el diseño y la optimización de sistemas mecánicos, ya que permite determinar las velocidades y las aceleraciones máximas, los puntos de inflexión y los movimientos críticos. Además, también es útil para la simulación y el control de sistemas mecánicos, como robots y maquinarias.

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Tipo de estudio

El diseño de un equipo de carbonatación forzada para cerveza es un proyecto de tipo técnico. El trabajo se desarrolló mediante la investigación exploratoria de la carbonatación y los fenómenos fisicoquímicos presentes en el proceso, la validación de resultados analíticos a través de los análisis de métodos de elementos finitos (MEF) y dinámica multicuerpo y análisis de movimiento (MBD), y finalmente el método experimental para validar la funcionalidad del equipo.

#### 3.2. Requerimientos de diseño

El diseño de la máquina agitadora de barriles de almacenamiento de cerveza artesanal debe tener facilidad de uso para minimizar los tiempos de carbonatación, para lo cual debe cumplir con lo siguiente:

- La máquina deberá ser de fácil operación.
- La máquina deberá tener un económico mantenimiento.
- Deberá ser compacto y estable.

#### 3.3. Diseño conceptual

Para el diseño del análisis conceptual tomamos en cuenta el análisis funcional de la máquina, una matriz morfológica para hallar las posibles alternativas en base a las funciones que realizará la máquina para lograr el proceso de carbonatación, esto ayudará al diseño, desarrollo, mantenimiento y mejoras de la máquina, identificando cada componente y subsistemas que trabajaran juntos para cumplir con su propósito.

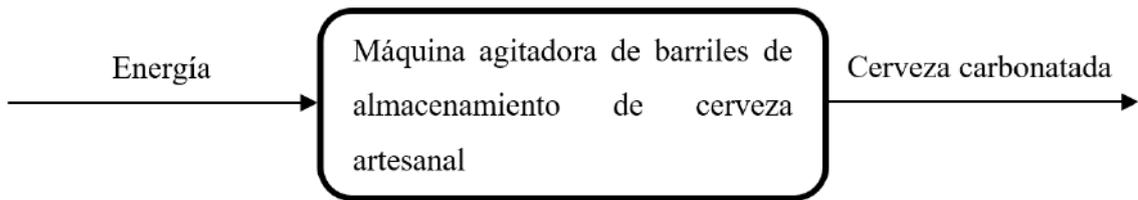
#### 3.4. Modelado CAD

El modelado se realizó como un prediseño y prototipado para evaluar las condiciones geométricas y verificación de espacio y montaje de posibles elementos a utilizar, añadiendo las propiedades físicas de cada material en uso, dando como resultado el prototipo mostrado en la ilustración 3-3 como la mejor propuesta de diseño.

##### 3.4.1. Análisis funcional

Para el análisis funcional de la máquina agitadora de barriles de almacenamiento de cerveza artesanal se requirió de un proceso sistemático que consiste en descomponer y comprender las diferentes funciones que realiza la máquina para cumplir con su objetivo, además analizar las interacciones entre componentes, es decir, la comunicación que existe entre los elementos, también la evaluación del rendimiento y eficiencia de esta, dando paso a futuras mejoras y optimizaciones.

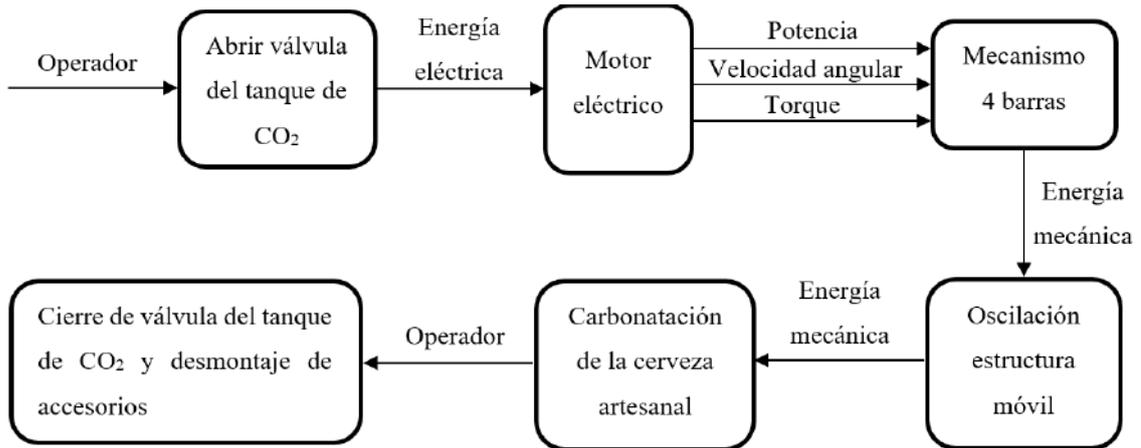
### 3.4.1.1. Nivel 0



**Ilustración 3-1:** Análisis funcional nivel 0.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

### 3.4.1.2. Nivel 1



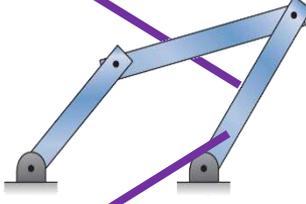
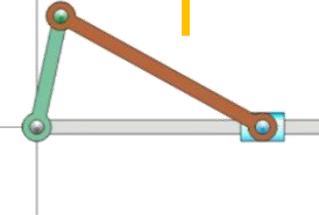
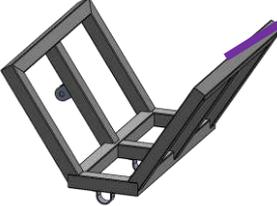
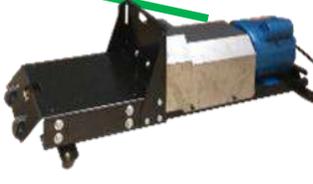
**Ilustración 3-2:** Análisis funcional nivel 1

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

### 3.4.2. Matriz morfológica

El uso de la matriz morfológica o matriz morfológica de diseño se utilizó como herramienta durante el proceso de diseño y resolución de problemas creativos, para explorar las posibles combinaciones de elementos y subsistemas mecánicos para generar nuevas ideas y soluciones, hallando múltiples variables presentadas a continuación.

**Tabla 3-1:** Tabla de carbonatación en relación temperatura - volúmenes de CO<sub>2</sub>

Función	Componentes		
Fuente de energía			
	Motorreductor monofásico	Compresor de aire	Motor trifásico con variador de frecuencia
Mecanismo o actuador			
	Pistón neumático	Mecanismos manivela balancin	Mecanismo manivela corredera
Estructura de movimiento			
	Estructura móvil oscilatoria	Base con resortes	Base móvil plana
<b>Alternativas</b>	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	<b>Alternativa 3</b>

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

#### 3.4.2.1. Alternativa 1

Agitador eléctrico con motorreductor monofásico 0.5 HP, relación 20:1 y salida de 85 rpm, mecanismo 4 barras manivela-balancín y estructura móvil.

#### 3.4.2.2. Alternativa 2

Agitador neumático, compresor de aire eléctrico de 1 galón, 0.5 HP y 90 PSI, actuador con pistón neumático y base de desplazamiento horizontal.

#### 3.4.2.3. Alternativa 3

Agitador eléctrico con motor trifásico con variador de frecuencia, mecanismo manivela-corredera y base con resortes.

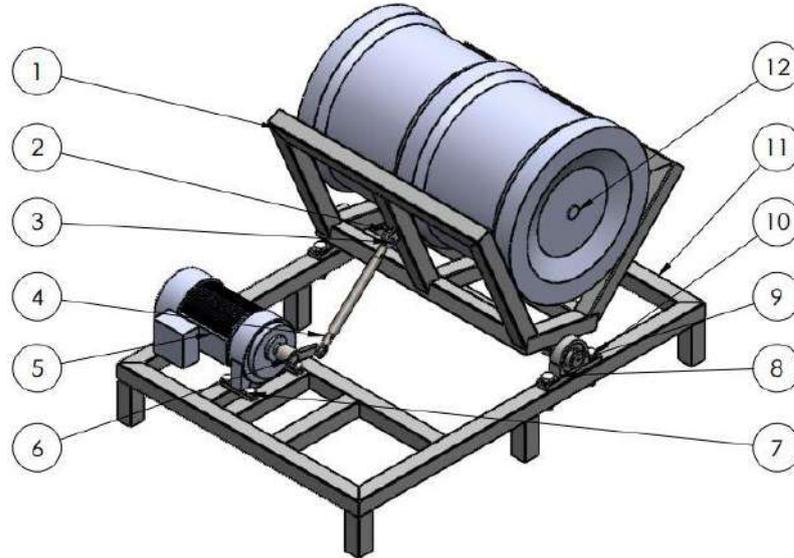
### 3.5. Diseño de materialización

En esta fase del proceso de diseño, se lleva a cabo la creación del modelo tridimensional mediante software CAD, con el propósito de lograr un diseño virtual. Este modelo proporciona una representación cercana de la apariencia final de la máquina una vez construida, y también detalla los procedimientos de manufactura para cada una de sus piezas constituyentes. La

implementación de este sistema asegura la calidad del producto y el cumplimiento de los parámetros posteriormente establecidos.

### 3.5.1. *Diseño 3D mediante software CAD*

Mediante la alternativa seleccionada se realizó el modelado 3D en el software SolidWorks 2022.



**Ilustración 3-3:** Modelado CAD de la máquina agitadora de barriles en SolidWorks.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

A continuación, se enumera cada elemento perteneciente al modelado 3D CAD del sistema de carbonatación:

1. Estructura móvil
2. Sujetador
3. Pasador
4. Cabeza de articulación
5. Motorreductor
6. Eslabón motriz
7. Perno M12
8. Chumacera UPC 206
9. Eje
10. Perno M14
11. Estructura fija
12. Barril tipo keg

### 3.5.2. *Procesos de manufactura*

- Corte y soldadura de perfilaría: el primer paso del proceso de construcción corresponde a la elaboración de la estructura fija y móvil, mediante soldadura de perfiles cuadrados de acero estructural SAE J 403 1008.
- Mecanizado del eje: el eje del agitador se construyó mediante el torneado y fresado del eje, el material utilizado fue acero AISI 1018.

- Mecanizado de los pasadores: el eje de los pasadores se construyó mediante el torneado del eje, el material utilizado fue acero AISI 4340.
- Mecanizado del mecanismo 4 barras: el eje del eslabón correspondiente a la biela fue torneado, mientras que, el eslabón manivela fue sometido a corte y rectificación, el material correspondiente a la biela fue acero AISI 4043 y la manivela de acero AISI 1018.
- Ensamble y montaje: los elementos antes mecanizados, más los componentes seleccionados se unen a través del ensamble y montaje del sistema.
- Pintado: corresponde al último paso del proceso de manufactura en donde se recubre, la superficie de los elementos para protegerla y mejorar su aspecto estético.

### **3.6. Diseño de detalle**

#### **3.6.1. Requerimientos iniciales**

Para el diseño del sistema en estudio tomamos en cuenta el número de oscilaciones por minuto que se requiere para el proceso de carbonatación forzada de cerveza artesanal, esta es de entre 80-90 revoluciones por minuto en base a la experiencia de los productores. Dentro del mercado local existen motorreductores con velocidad angular de salida de 85rpm, estando dentro del requerimiento y cumpliendo con el proceso solicitado, además, se conoce que la masa del barril lleno es de 63kg, contando el peso propio del barril y del líquido contenido, de manera que tenemos los siguientes datos iniciales para el diseño:

Datos iniciales:

$$\omega = 85 \frac{\text{rev}}{\text{min}} = 8,901 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$m_{\text{barril}} = 63 \text{ kg}$$

Donde:

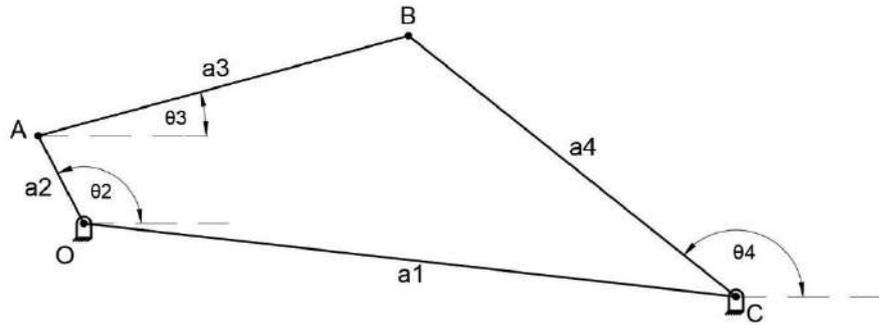
$\omega$  = velocidad angular

$m_{\text{barril}}$  = masa del barril

#### **3.6.2. Diseño de mecanismo manivela-balancín**

##### **3.6.2.1. Análisis movilidad o grados de libertad**

Para el análisis de movilidad del mecanismo en estudio, utilizamos el criterio de Paul o de eslabonamiento mediante ecuaciones de clausura, este se basa en el número de variables necesarias para determinar la posición del eslabonamiento, así como las ecuaciones que restringen estas variables, teniendo la siguiente ilustración de referencia para el cálculo.



**Ilustración 3-4:** Mecanismo cuatro barras con coordenadas lagrangianas y revolutas.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Donde:

$a_1$  = tierra o bancada

$a_2$  = eslabon de entrada o manivela

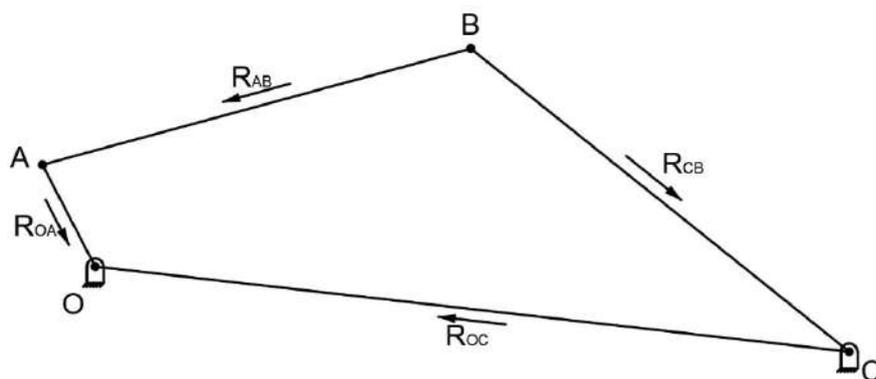
$a_3$  = eslabon acoplador o biela

$a_4$  = eslabon de salida o balancín

Determinamos el número de coordenadas lagrangianas, estas son las coordenadas linealmente dependientes o generalizadas que requieren la descripción del eslabonamiento, en este caso son los ángulos formados por los eslabones  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  y  $a_4$ , obteniendo tres coordenadas lagrangianas.

Coordenadas lagrangianas:  $\theta_2, \theta_3, \theta_4$

Determinamos el número de ecuaciones escalares independientes, que se obtienen a través de la simplificación de la ecuación generalizada de los vectores posición que rigen el mecanismo, obteniendo dos ecuaciones escalares independientes.



**Ilustración 3-5:** Mecanismo cuatro barras con radio vectores posición.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-5 se muestra el mecanismo cuatro barras con sus vectores posición, mediante estos vectores se logró calcular número de grados de libertad y los posteriores análisis cinemáticos.

$$\begin{aligned} \overrightarrow{R_{OA}} + \overrightarrow{R_{AB}} &= \overrightarrow{R_{OC}} + \overrightarrow{R_{CB}} \\ OAe^{j\theta_2} + AB e^{j\theta_3} &= OCe^{i\theta_f} + CB\theta^{j\theta_4} \\ OA \cos \theta_2 + AB \cos \theta_3 &= OC \cos \theta_f + CB \cos \theta_4 \quad (1) \\ OA \sin \theta_2 + AB \sin \theta_3 &= OC \sin \theta_f + CB \sin \theta_4 \quad (2) \end{aligned}$$

Para determinar el número de grados de libertad del mecanismo a través del criterio de Paul, restamos el número de coordenadas lagrangianas con el número de ecuaciones escalares independientes.

$$F = C - E$$

$$F = 3 - 2$$

$$F = 1 \rightarrow \text{Un grado de libertad}$$

Donde:

$C$ : Coordenadas lagrangianas

$E$ : Numero de ecuaciones de lazo

$F$ : Grados de libertad

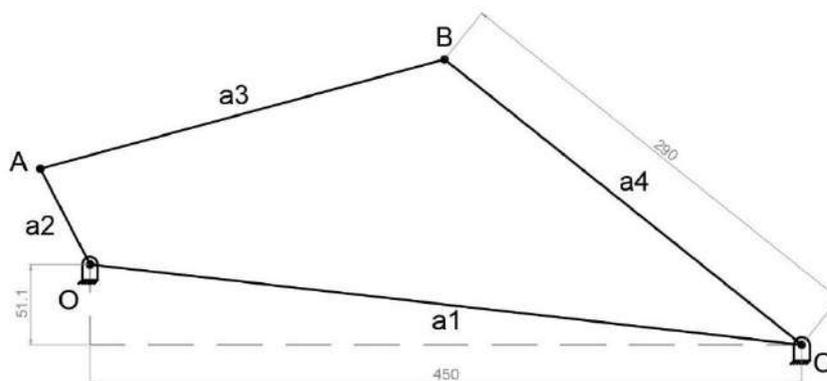
$\overrightarrow{R_{OA}}$ : Vector posición del punto A respecto al punto O

$\overrightarrow{R_{AB}}$ : Vector posición del punto B respecto al punto A

$\overrightarrow{R_{OC}}$ : Vector posición del punto C respecto al punto O

$\overrightarrow{R_{CB}}$ : Vector posición del punto B respecto al punto C

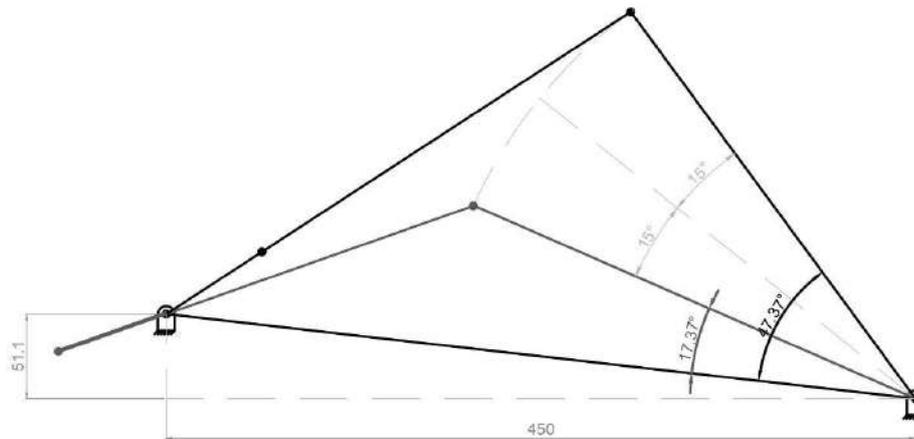
La ilustración 3-6 muestra al mecanismo cuatro barras manivela-balancín con las acotaciones iniciales de requerimiento en base a las dimensiones solicitadas y consideraciones de ensamble y montaje del equipo.



**Ilustración 3-6:** Mecanismo cuatro barras manivela-biela-balancín

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

La ilustración 3-7 representa el mecanismo cuatro barras manivela-balancín que utilizamos para el desarrollo analítico del diseño, en donde se muestran las acotaciones iniciales de distancia entre puntos de apoyo y altura del punto de apoyo en referencia a la horizontal.

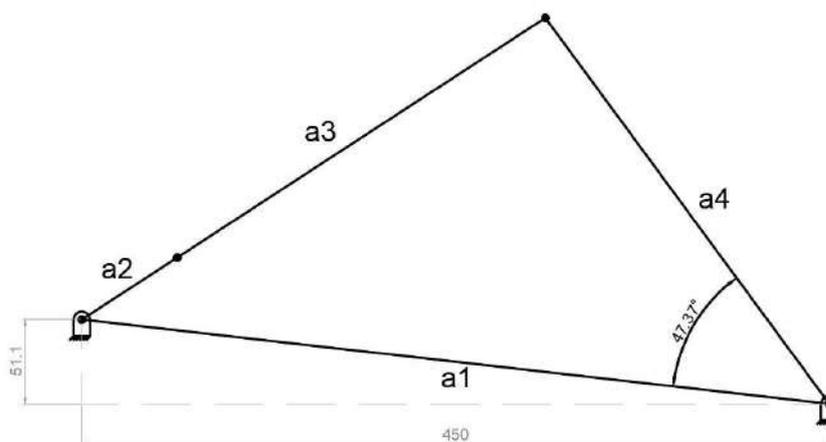


**Ilustración 3-7:** Mecanismo cuatro barras en sus dos posiciones extremas singulares.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

El mecanismo diseñado es uno de los más comunes cuadriláteros articulados, en donde el movimiento de oscilación del balancín estará acotado por dos posiciones extremas singulares, y estas son:

Posición límite: ocurre cuando el ángulo formado entre los eslabones acoplador ( $a_2$ ) y de entrada ( $a_3$ ) es de  $180^\circ$  o  $360^\circ$ , es decir cuando las revolutas A, B y C están alineadas, extendiendo al mecanismo a su punto máximo y generando la acción de la fuerza conductora en dirección al eslabón de salida ( $a_4$ ).



**Ilustración 3-8:** Mecanismo cuatro barras en posición límite.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

- Pitágoras

Para hallar el valor de  $a_1$ , realizamos el cálculo del teorema de Pitágoras al triángulo formado entre la horizontal de los dos puntos de apoyo del sistema y la altura de desfase perteneciente al eje de salida del actuador.

$$a_1 = \sqrt{51,1^2 + 450^2}$$

$$a_1 = 452,892 \text{ mm}$$

- Ley de cosenos

Utilizamos la ley de cosenos para encontrar una igualdad en donde posteriormente se pudo despejar el valor del eslabón  $a_2$  y  $a_3$ .

$$(a_2 + a_3)^2 = a_1^2 + a_4^2 - 2a_1a_4 \cos \theta$$

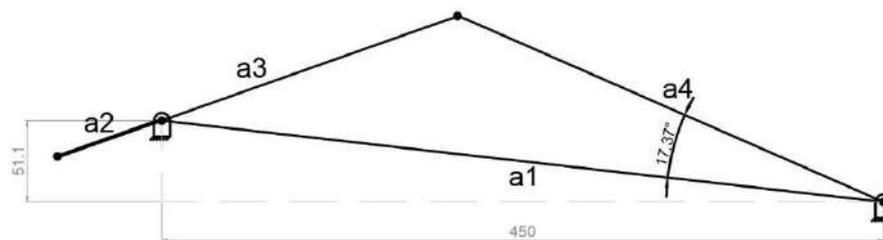
$$(a_2 + a_3)^2 = (452,892)^2 + (290)^2 - 2(452,892)(290) \cos(47,37)$$

$$\sqrt{(a_2 + a_3)^2} = \sqrt{111309,954}$$

$$a_2 + a_3 = 333,631 \quad (1)$$

- Punto muerto

La posición punto muerto ocurre cuando el ángulo formado entre los eslabones acoplador ( $a_2$ ) y de salida ( $a_4$ ) es de  $0^\circ$ , es decir las revolutas A, B y C están alineadas, y generando la acción de la fuerza conductora en dirección al eslabón de entrada ( $a_2$ ).



**Ilustración 3-9:** Mecanismo cuatro barras en posición punto muerto.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

- Ley de cosenos

Aplicamos ley de cosenos para encontrar el valor de  $a_3$  mediante el valor previamente obtenido de  $a_1$ .

$$(a_3 - a_2)^2 = a_1^2 + a_4^2 - 2a_1a_4 \cos \theta$$

$$(a_3 - a_2)^2 = (452,892)^2 + (290)^2 - 2(452,892)(290) \cos(17,37)$$

$$\sqrt{(a_3 - a_2)^2} = \sqrt{38512,738}$$

$$a_3 - a_2 = 196,247 \quad (2)$$

$$a_3 = 196,247 + a_2 \quad (3)$$

Resolvemos la ecuación por el método de sustitución, en donde reemplazamos la ecuación (3) en (1) para obtener el valor de  $a_2$ .

$$a_2 + 196,247 + a_2 = 333,631$$

$$a_2 = \frac{333,631 - 196,247}{2}$$

$$a_2 = 68,692 \text{ mm}$$

Resolvemos el  $a_2$  en (3)

$$a_3 = 196,247 + 68,692$$

$$a_3 = 264,939 \text{ mm}$$

Resultados de longitudes de los eslabones:

$$a_1 = 452,892 \text{ mm}$$

$$a_2 = 68,692 \text{ mm}$$

$$a_3 = 264,939 \text{ mm}$$

$$a_4 = 290 \text{ mm}$$

$$\Delta\theta = 30^\circ$$

- Primeras condiciones
  - Eslabón de entrada

$$a_1 + a_2 \leq a_3 + a_4$$

$$452,892 + 68,692 \leq 264,939 + 290$$

$$521,584 \leq 554,939 \rightarrow \text{Cumple}$$

Al cumplir con la igualdad se determinó que el eslabón  $a_2$  o eslabón de entrada puede realizar movimiento sin ningún inconveniente, además que  $\theta_2$  puede tomar la posición de  $180^\circ$ .

- Eslabón de salida

$$a_1 + a_4 \leq a_2 + a_3$$

$$452,892 + 290 \leq 68,692 + 264,939$$

$$742,892 \leq 333,631 \rightarrow \text{No Cumple}$$

Al no cumplir con la igualdad se determinó que el eslabón  $a_4$  o eslabón de salida no puede realizar movimientos rotatorios con libertad absoluta, es decir el eslabón de salida corresponde a un oscilador, además  $\theta_4$  no puede tomar la posición de  $0^\circ$

Por lo tanto, se deduce que el mecanismo corresponde a un rotatorio-oscilatorio.

- Segundas Condiciones
  - Eslabón de entrada

$$a_1 > a_2$$

$$452,892 > 68,692$$

$$|a_2 - a_1| \geq |a_4 - a_3|$$

$$|68,692 - 452,892| \geq |290 - 264,939|$$

$$384,2 \geq 25,061 \rightarrow \text{Cumple}$$

Esta condición valida el movimiento del sistema en general, de no cumplirse el mecanismo tiene limitación en el movimiento y el mecanismo estaría inhabilitado.

- Eslabón de salida

$$a_1 > a_4$$

$$452,892 > 290$$

$$a_3 - a_2 \leq a_1 - a_4$$

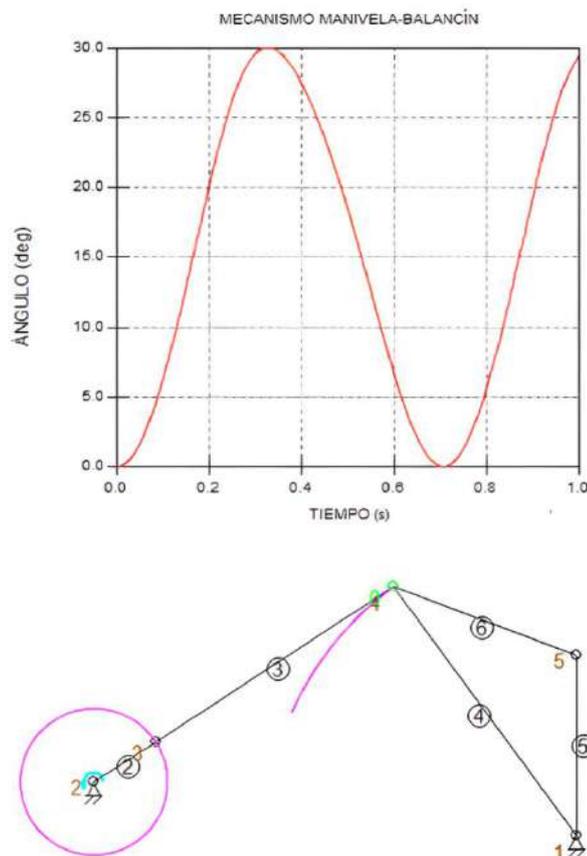
$$264,939 - 68,692 \leq 452,892 - 290$$

$$196,247 \leq 162,892 \rightarrow \text{No Cumple}$$

Esta igualdad demostró que el sistema propuesto presenta posiciones extremas singulares, en particular la posición límite, donde el eslabón de entrada se alineará con el eslabón acoplador.

### 3.6.2.2. Comprobación en SAM

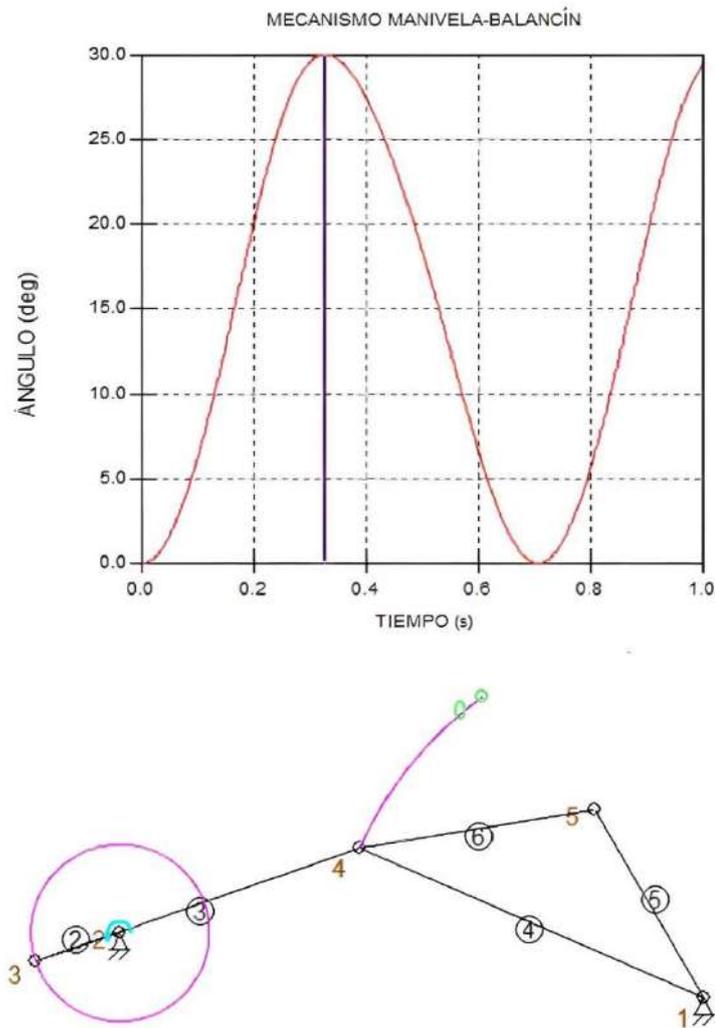
La ilustración 3-10 indica la validación y funcionalidad del mecanismo cuatro barras rotatorio-oscilatorio, en la parte superior de la ilustración se obtuvo un desplazamiento de 30° a través del control del oscilador o balancín en su posición límite, en donde el eslabón 2 y 3 están alineados, como se evidencia en la parte superior de la ilustración.



**Ilustración 3-10:** Validación en SAM del mecanismo cuatro barras en posición límite.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

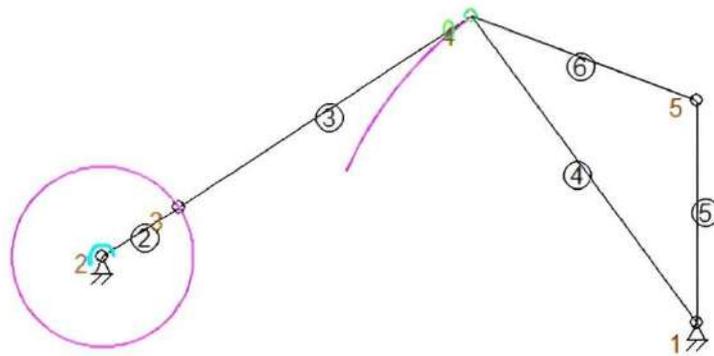
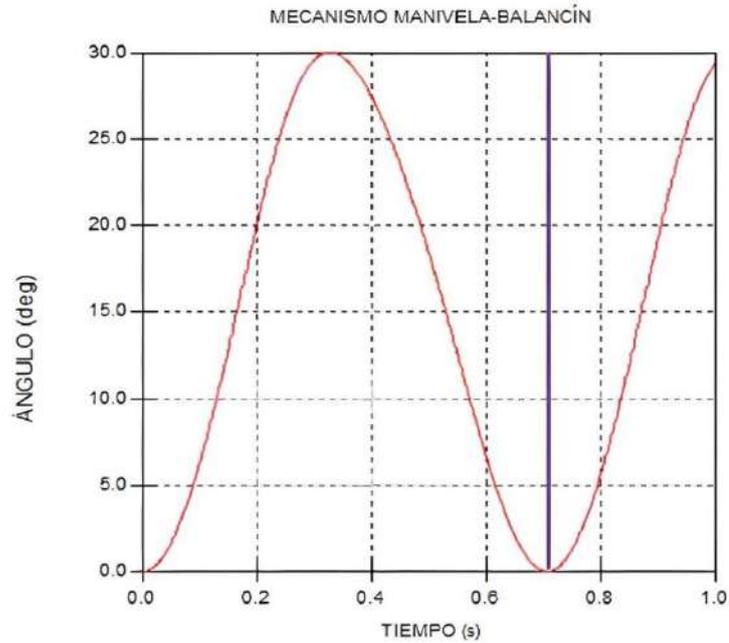
La siguiente ilustración indica la validación y funcionalidad del mecanismo cuatro barras rotatorio-oscilatorio en donde se obtuvo un desplazamiento de 30° a través del control del oscilador o balancín, como se verifica en la parte superior de la ilustración, mientras que en la parte inferior se evidencia la posición de punto muerto, en donde el eslabón 2 y 3 se encuentran sobrepuestos o sobre la misma línea de acción.



**Ilustración 3-11:** Validación en SAM del mecanismo cuatro barras en posición punto muerto.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

El análisis en SAM del desplazamiento angular del mecanismo, en las posiciones extremas singulares cumplieron los 30° solicitados en base al requerimiento de agitación y seguridad ante un posible vuelco del barril.

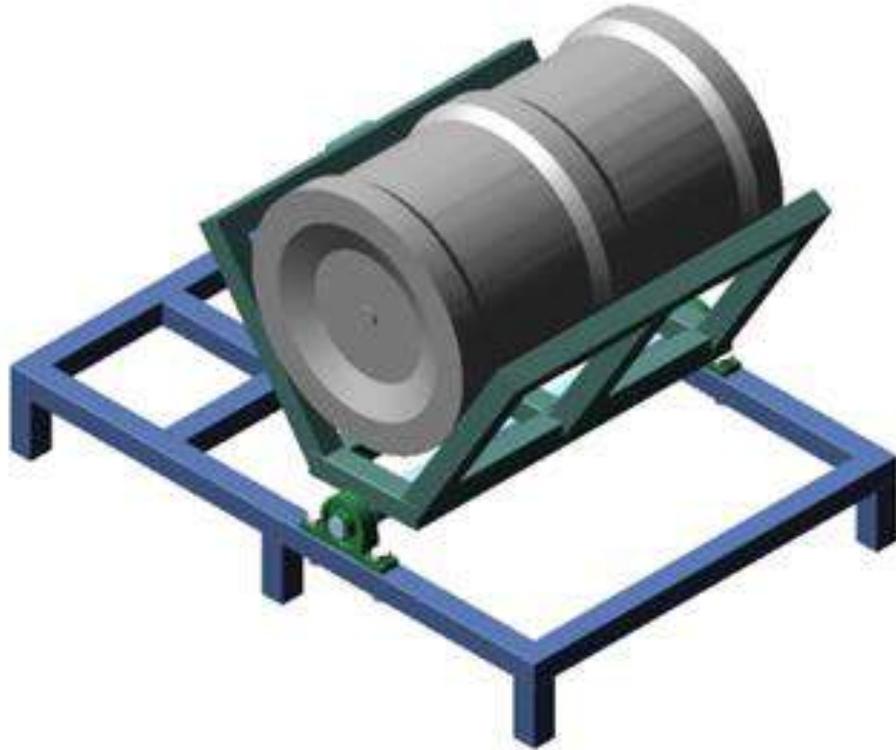


**Ilustración 3-12:** Validación en SAM del mecanismo cuatro barras en posición punto muerto.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

### 3.6.2.3. Análisis cinemático

El análisis cinemático de mecanismos se refiere al estudio del movimiento de los componentes de un mecanismo y las relaciones entre ellos. El análisis cinemático se basa en principios fundamentales de la cinemática, que es la rama de la mecánica que se ocupa del estudio del movimiento sin tener en cuenta las fuerzas que lo causan. Al realizar un análisis cinemático de un mecanismo, se busca determinar posiciones, trayectorias, velocidades y aceleraciones.



**Ilustración 3-13:** Análisis MBD del mecanismo cuatro barras en MSC Adams.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

Los datos por utilizar para el análisis MBD en MSC Adams son los anteriormente calculados en la sección 3.6.2.1, en donde tenemos:

$$a_1 = 452,892 \text{ mm}$$

$$a_2 = 68,692 \text{ mm}$$

$$a_3 = 264,939 \text{ mm}$$

$$a_4 = 290 \text{ mm}$$

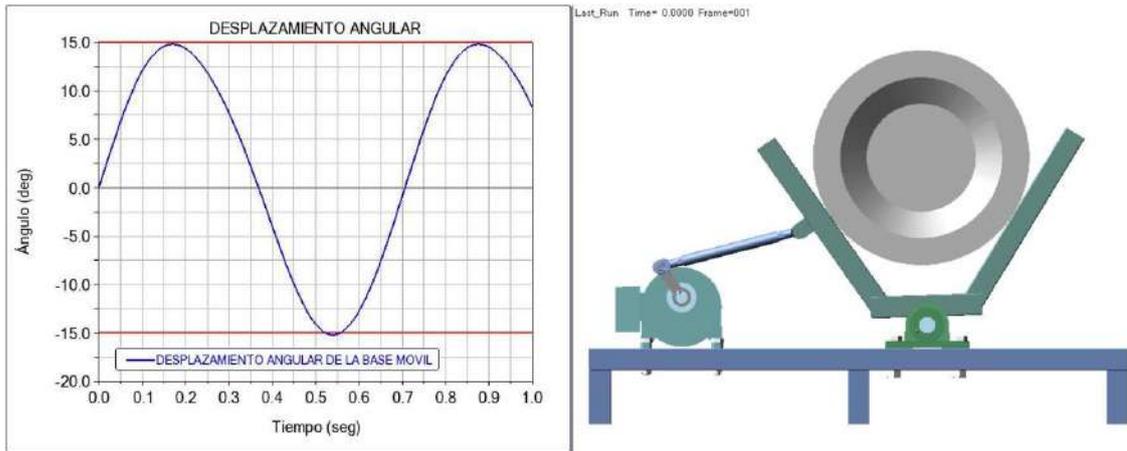
$$\theta_2 = 117,25^\circ$$

$$\theta_3 = 15,26^\circ$$

$$\theta_4 = 141,15^\circ$$

El análisis dinámico del desplazamiento angular se refiere al estudio de la variación de la posición angular de un objeto en función del tiempo bajo la influencia de fuerzas y momentos externos, en este caso la variación de la posición de la estructura móvil por la acción del actuador.

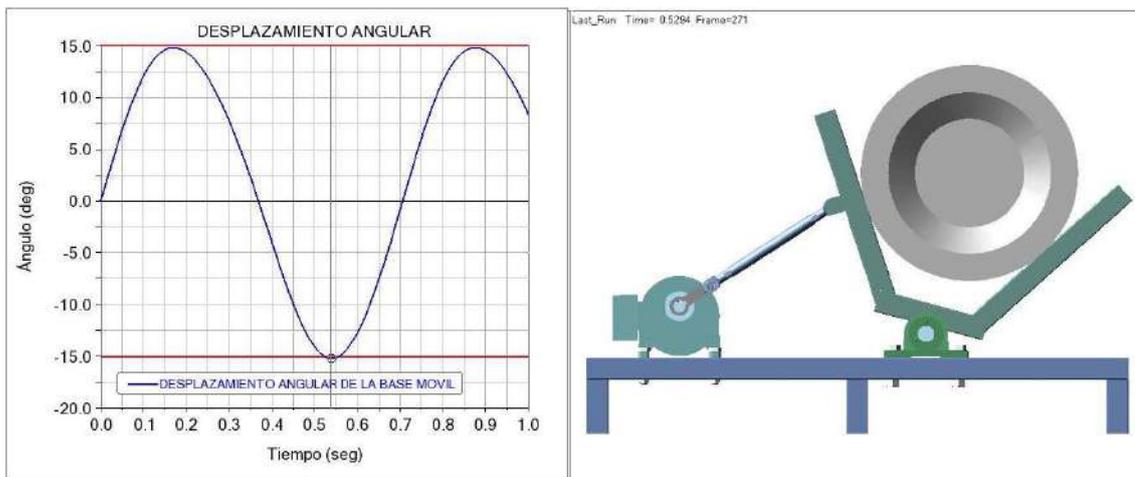
En la ilustración 3-14 se evidencia el desplazamiento angular de la estructura móvil que corresponde a  $30^\circ$  en total, perteneciente al ciclo completo de trabajo de oscilación del sistema.



**Ilustración 3-14:** Análisis del desplazamiento angular de la base móvil mediante MSC Adams.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

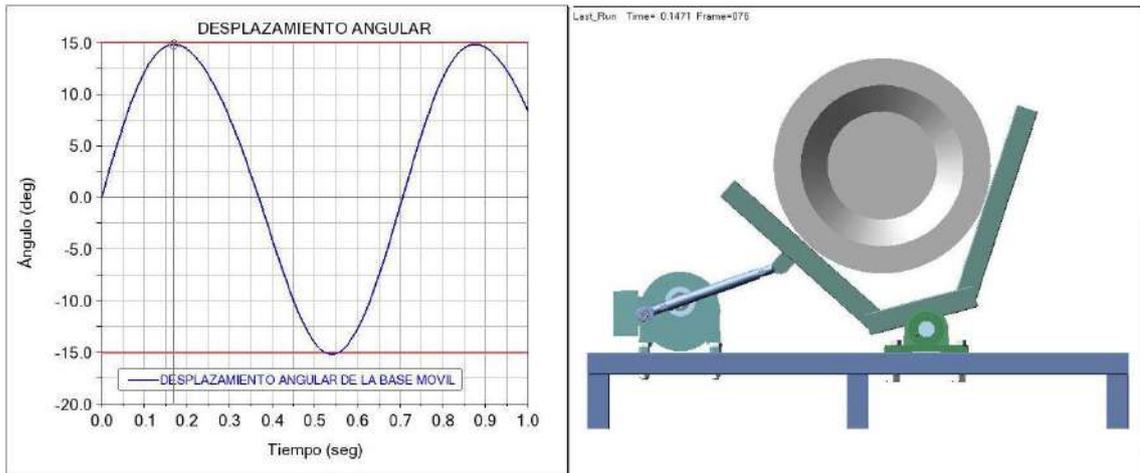
En la ilustración 3-15 se evidencia si la estructura se encuentra en la posición extrema singular de punto límite, el módulo de desplazamiento mostrado es de  $15^\circ$ , correspondiente al retorno del barril.



**Ilustración 3-15:** Análisis del desplazamiento angular de la base móvil del punto crítico mediante MSC Adams.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-16 se evidencia que, si la estructura se encuentra en la posición extrema singular de punto muerto, el módulo de desplazamiento mostrado es de  $15^\circ$ , correspondiente a la ida del barril.



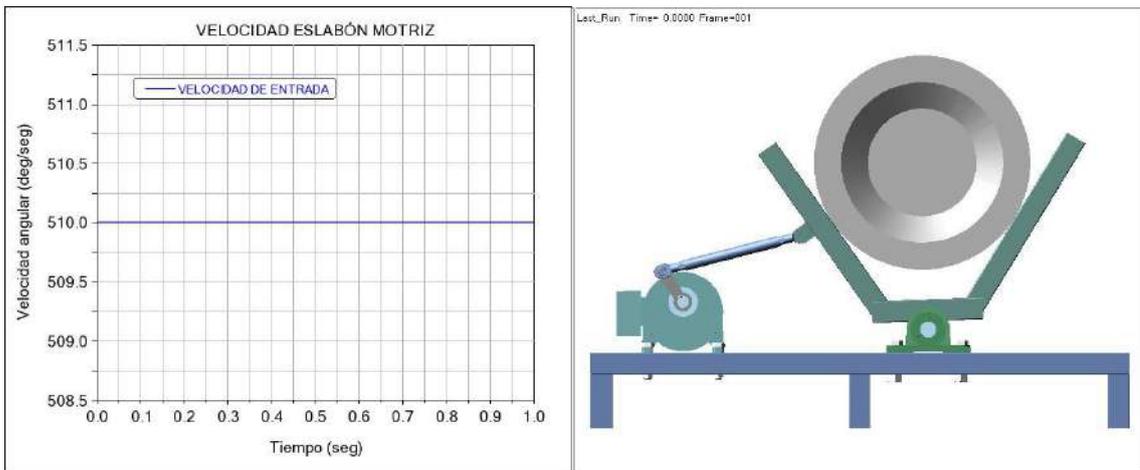
**Ilustración 3-16:** Análisis del desplazamiento angular de la base móvil del punto muerto mediante MSC Adams.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

Conociendo como dato inicial el valor de la velocidad angular del eslabón de entrada, podemos evaluar la velocidad del eslabón motriz.

$$\omega_2 = 85 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \cdot \frac{2\pi \text{ rad}}{\text{rev}} \cdot \frac{\text{min}}{60\text{s}}$$

$$\omega_2 = 8,901 \text{ rad/s}$$



**Ilustración 3-17:** Análisis de la velocidad angular del elemento motriz mediante MSC Adams.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

El análisis dinámico de la velocidad angular es un estudio de cómo la velocidad angular de un objeto cambia en función del tiempo bajo la influencia de fuerzas y momentos externos, en el caso del eslabón motriz, se evidencia que la velocidad angular es de  $510 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ .

*Posiciones*

Se estudia la posición de los componentes del mecanismo en diferentes momentos durante el ciclo de operación. Esto implica determinar las coordenadas de posición de los puntos importantes en el mecanismo, como los centros de rotación, puntos de enlace, puntos de contacto, etc.

$$\vec{R}_{AO} = (68,692 \cos(117,25) i + 68,692 \sin(117,25) j)$$

$$\vec{R}_{AO} = (-31,452 i + 61,068 j) \text{ mm}$$

$$\vec{R}_{BA} = (264,939 \cos(15,26) i + 264,939 \sin(15,26) j)$$

$$\vec{R}_{BA} = (255,598 i + 69,732 j) \text{ mm}$$

$$\vec{R}_{CB} = (290 \cos(141,15) i + 290 \sin(141,15) j)$$

$$\vec{R}_{CB} = (-225,849 i + 181,912 j) \text{ mm}$$

Donde:

$\vec{R}_{AO}$  : Vector posición del punto O respecto al punto A

$\vec{R}_{BA}$  : Vector posición del punto A respecto al punto B

$\vec{R}_{CB}$  : Vector posición del punto B respecto al punto C

*Velocidades*

Se analiza la velocidad de los componentes del mecanismo en diferentes puntos durante el movimiento. Esto implica determinar las velocidades lineales y angulares de los diferentes puntos del mecanismo y las relaciones de velocidad entre ellos.

$$\vec{V}_A = \vec{V}_O + \vec{V}_{AO}$$

$$\vec{V}_A = \vec{V}_O + \vec{\omega}_2 \times \vec{R}_{AO}$$

$$\vec{V}_A = \vec{\omega}_2 \times \vec{R}_{AO}$$

$$\vec{V}_A = 8,901 k \times (-31,452 i + 61,068 j)$$

$$\vec{V}_A = -543,566 i - 279,954 j$$

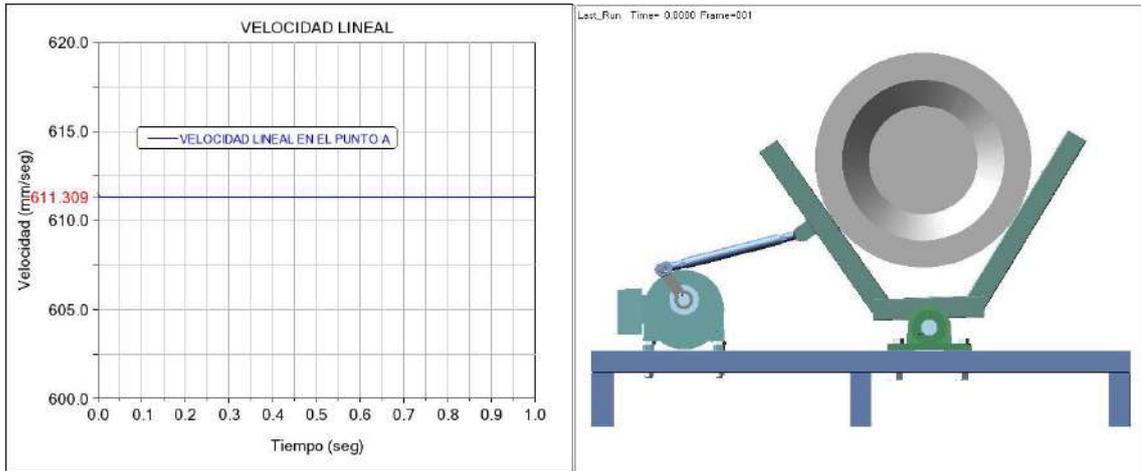
$$V_A = 611,423 \text{ mm/s}$$

Donde:

$\vec{V}_A$  : Vector velocidad A

$\vec{\omega}_2$  : Velocidad angular del eslabón 2

En la ilustración 3-18 se observa el análisis dinámico de la velocidad lineal del punto A, correspondiente a la unión del eslabón motriz y la salida del actuador, datando una magnitud de  $611,423 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ , esta velocidad se mantiene constante durante todo el trabajo.



**Ilustración 3-18:** Análisis de la velocidad lineal del punto A mediante MSC Adams.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

En base a los datos obtenidos mediante el método analítico y el método dinámico de sistemas multicuerpo para la velocidad lineal del punto A, se comprobó que los resultados obtenidos son correctos, presentando una ligera variación en el orden de las décimas, difiriendo en razón de 0,114mm/s, de forma que se valida el análisis realizado.

**Tabla 3-2:** Análisis de velocidad lineal del punto A

Velocidad lineal del punto A		
	Método analítico	Método MBD
Valor $V_A$	611,423 mm/s	611,309 mm/s

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

Para encontrar las coordenadas cartesianas del vector velocidad del punto B, con sus componentes unitarias, se realizó la suma del vector velocidad del punto A con el producto vectorial de la velocidad angular del punto 3 y el vector posición de A respecto a B.

$$\begin{aligned}\vec{V}_B &= \vec{V}_A + \vec{\omega}_3 \times \vec{R}_{BA} \\ \vec{V}_B &= (-543,566 i - 279,954 j) + \omega_3 k \times (255,598 i + 69,732 j) \\ \vec{V}_B &= (-543,566 - 69,732\omega_3)i + (-279,954 + 255,598\omega_3)j\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\vec{V}_B &= \vec{V}_C + \vec{V}_{BC} \\ \vec{V}_B &= \vec{V}_C + \vec{\omega}_4 \times \vec{R}_{BC} \\ \vec{V}_B &= \omega_4 k \times (-225,849 i + 181,912 j) \\ \vec{V}_B &= -181,912\omega_4 i - 225,849\omega_4 j\end{aligned}\quad (2)$$

Donde:

$\vec{V}_B$  : Vector velocidad lineal B

$\vec{\omega}_3$  : Velocidad angular del eslabón 3

$\vec{\omega}_4$  : Velocidad angular del eslabón 4

Para obtener la magnitud de la velocidad lineal del punto 4 resolvemos el sistema de ecuaciones de (1) y (2) antes propuestas, estableciendo ecuaciones individuales para la velocidad lineal de B en sus dos componentes, como se muestra a continuación:

$V_{Bx} \rightarrow i$

$$-543,566 - 69,732\omega_3 = -181,912\omega_4$$

$$-69,732\omega_3 + 181,912\omega_4 = 543,566$$

$V_{By} \rightarrow j$

$$-279,954 + 255,598\omega_3 = -225,849\omega_4$$

$$255,598\omega_3 + 225,849\omega_4 = 279,954$$

$$\omega_3 = -1.154 \text{ rad/s}$$

$$\omega_4 = 2,545 \text{ rad/s}$$

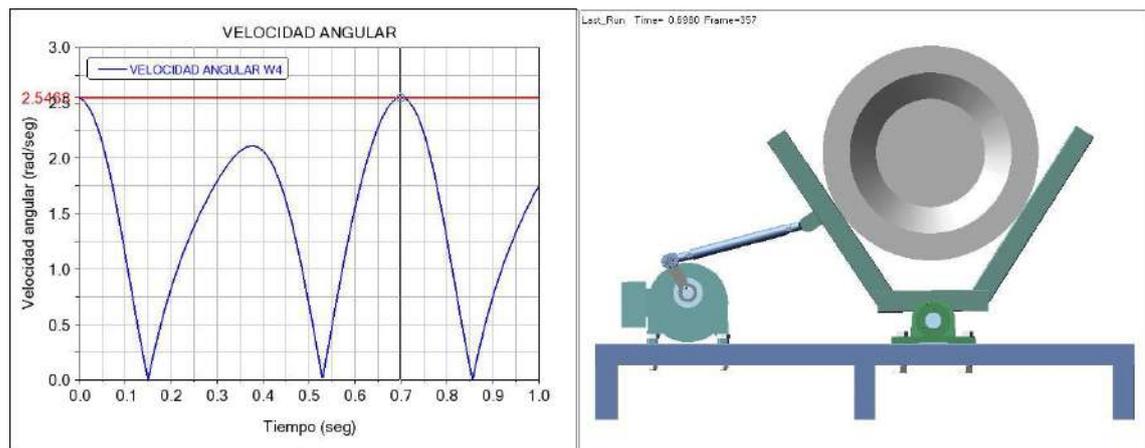
En la tabla 3-3 se evidencia la variación de magnitudes en los análisis realizados, datando valores máximos en la posición crítica producida en el segundo 0,7 del primer ciclo de trabajo, difiriendo en razón de 0,0042 mm/s, siendo válidos los valores obtenidos por ambos métodos.

**Tabla 3-3:** Análisis de velocidad angular del punto B

Velocidad lineal del punto B		
	Método analítico	Método MBD
<b>Valor <math>V_B</math></b>	2,545 rad/s	2,5468 rad/s

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

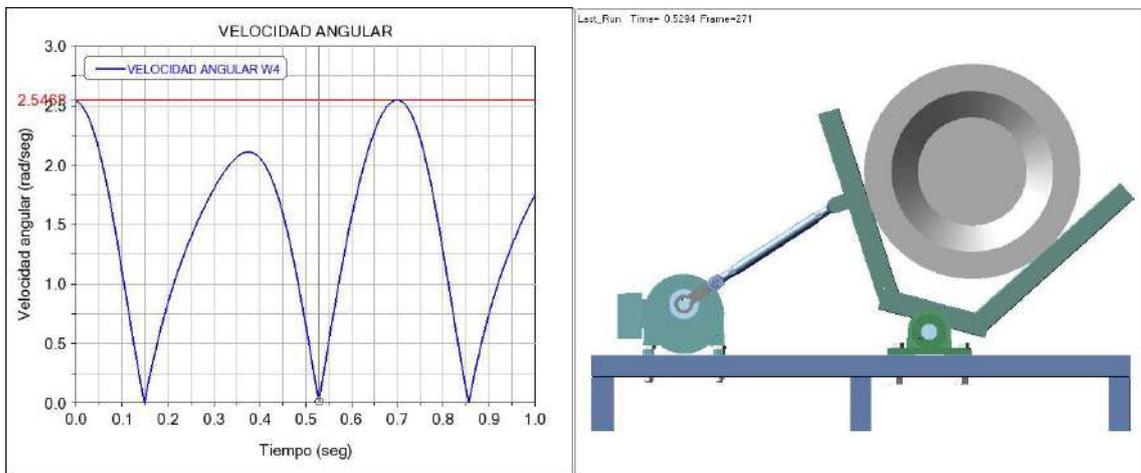
En la ilustración 3-19 se verifica que la curva del análisis dinámico de sistemas multicuerpo de velocidad angular perteneciente a la unión del eslabón 4 u oscilador y el eslabón conductor o biela, coincide con el método analítico calculado.



**Ilustración 3-19:** Análisis de la velocidad máxima angular del elemento de salida mediante MSC Adams.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

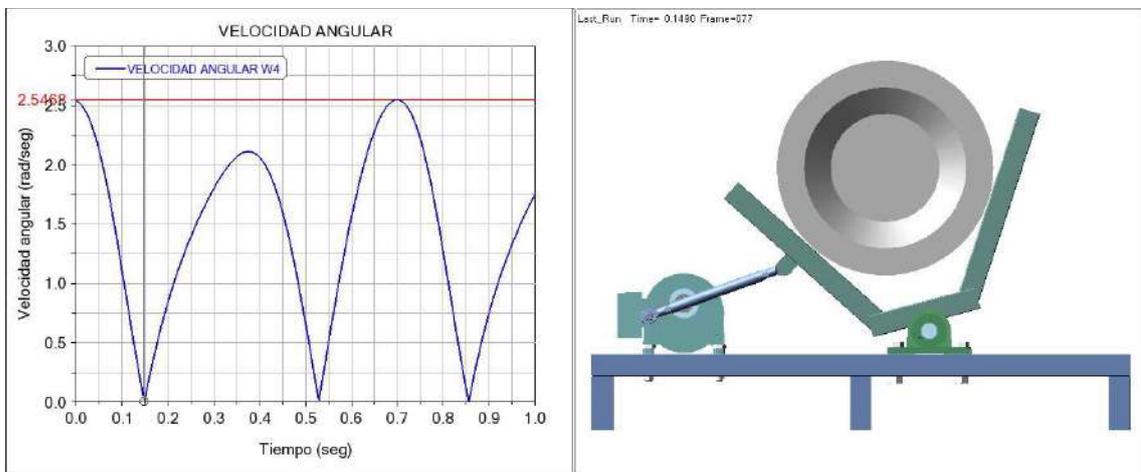
En la ilustración 3-20 se verifica la curva del análisis dinámico de velocidad angular perteneciente al eslabón 4 u oscilador en la posición extrema singular de punto límite, que tiene una velocidad de 0 rad/s producida en el segundo 0,54 del primer ciclo de trabajo analizado en el software.



**Ilustración 3-20:** Análisis de la velocidad angular en el punto crítico del elemento de salida mediante MSC Adams.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-21 se verifica la curva del análisis dinámico de velocidad angular perteneciente al eslabón 4 u oscilador en la posición extrema singular de punto muerto, que tiene una velocidad de 0 rad/s producida en el segundo 0,16 del primer ciclo de trabajo analizado en el software.



**Ilustración 3-21:** Análisis de la velocidad angular en el punto muerto del elemento de salida mediante MSC Adams.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

Para obtener la magnitud de la velocidad lineal del punto B resolvemos la ecuación (2) antes propuesta, mediante el método de sustitución, reemplazando el valor de  $w_4$  ya obtenido, como se muestra a continuación:

$$\vec{V}_B = -181,912\omega_4 i - 225,849\omega_4 j$$

$$\vec{V}_B = -181,912(2,545)i - 225,849(2,545)j$$

$$\vec{V}_B = (-462,966i - 574,786j) \text{ mm/s}$$

$$V_B = 738,049 \text{ mm/s}$$

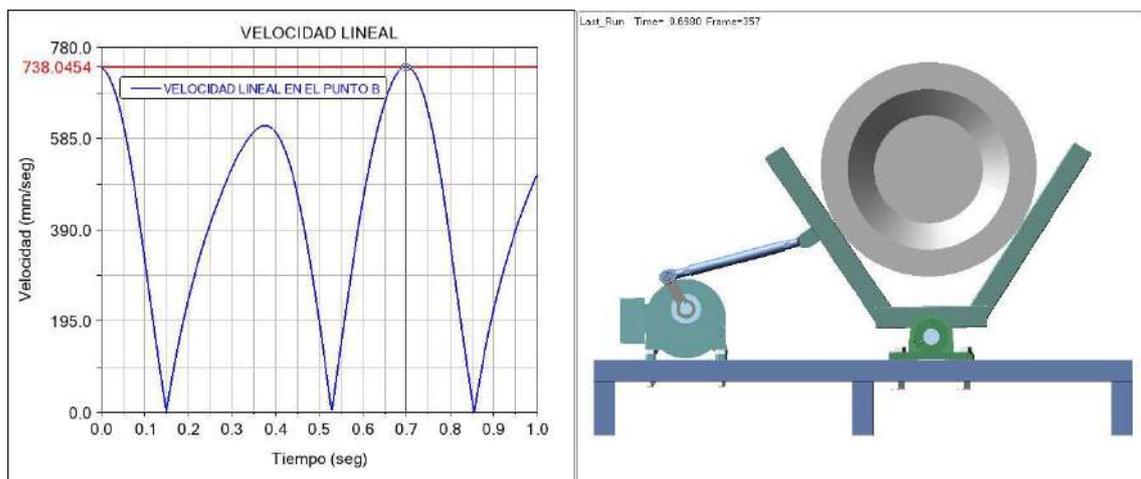
En la tabla 3-4 se evidencia la variación de magnitudes en los análisis realizados, datando valores máximos en la posición crítica producida en el segundo 0,7 del primer ciclo de trabajo, difiriendo en razón de 0,0036 mm/s, siendo válidos los valores obtenidos por ambos métodos.

**Tabla 3-4:** Análisis de velocidad angular del punto B

Velocidad lineal del punto B		
	Método analítico	Método MBD
Valor $V_B$	738,049 mm/s	738,0454 rad/s

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

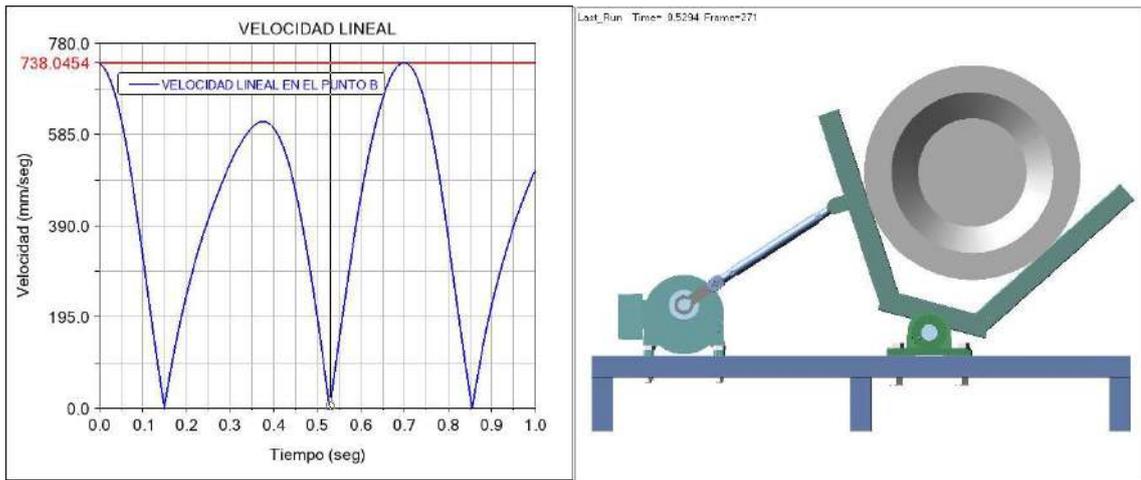
En la ilustración 3-22 se verifica que la curva del análisis dinámico de sistemas multicuerpo de velocidad angular perteneciente a la unión del eslabón 4 u oscilador y el eslabón conductor o biela, coincide con el método analítico calculado.



**Ilustración 3-22:** Análisis dinámico de la velocidad lineal máxima del punto B mediante MSC Adams.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

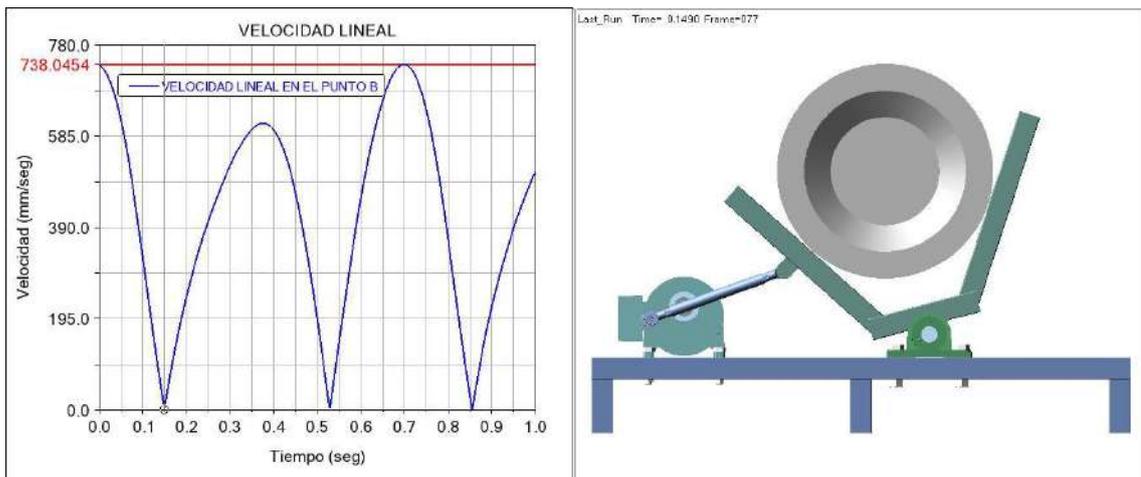
En la ilustración 3-23 se verifica la curva del análisis dinámico de velocidad lineal perteneciente al punto B que involucra la conexión del eslabón conductor y el oscilador, en la posición extrema singular de punto límite, que tiene una velocidad de 0 mm/s producida en el segundo 0,54 del primer ciclo de trabajo analizado en el software.



**Ilustración 3-23:** Análisis dinámico de la velocidad lineal del punto B en el punto crítico mediante MSC Adams.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-24 se verifica la curva del análisis dinámico de velocidad lineal perteneciente al punto B que involucra la conexión del eslabón conductor y el oscilador, en la posición extrema singular de punto muerto, que tiene una velocidad de 0 mm/s producida en el segundo 0,16 del primer ciclo de trabajo analizado en el software.



**Ilustración 3-24:** Análisis dinámico de la velocidad lineal del punto B en el punto muerto mediante MSC Adams.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

### *Aceleraciones*

Se estudia la aceleración de los componentes del mecanismo en diferentes puntos durante el movimiento. Esto implica determinar las aceleraciones lineales y angulares de los diferentes puntos del mecanismo y las relaciones de aceleración entre ellos.

$$\vec{a}_A = \vec{a}_O + \vec{a}_{AO}$$

$$\vec{a}_A = \vec{a}_O + \alpha_2 \times \vec{R}_A - \omega_2^2 \cdot \vec{R}_A$$

$$\begin{aligned}\vec{a}_A &= -(8,901)^2(-31,452i + 61,068j) \\ \vec{a}_A &= -79,228 * (-31,452i + 61,068j) \\ \vec{a}_A &= (2491,873i - 4838,283j) \text{ mm/s}^2 \\ a_A &= 5442,280 \text{ mm/s}^2\end{aligned}$$

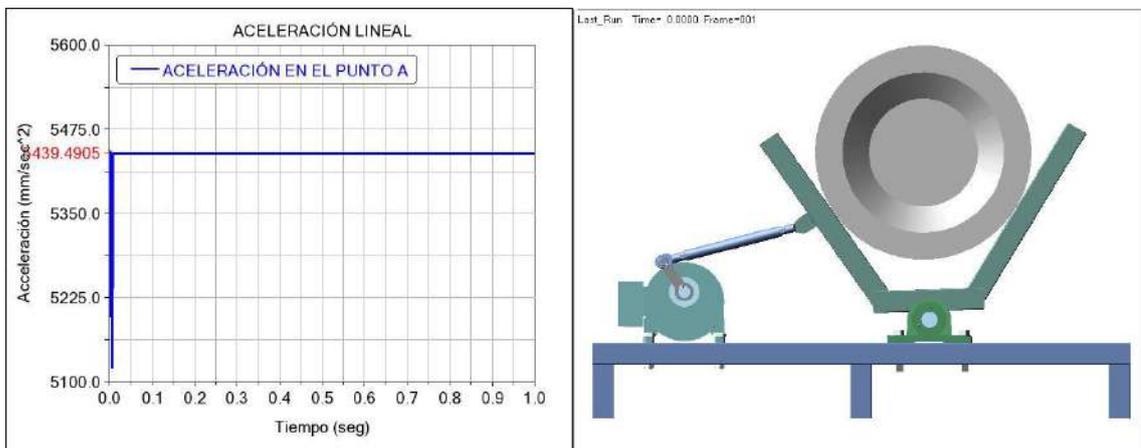
Donde:

$\vec{a}_A$  : Vector aceleración lineal del punto A

$\vec{a}_O$  : Vector aceleración lineal del punto O

$\vec{a}_{AO}$  : Vector aceleración lineal del punto O respecto al punto A

En la ilustración 3-25 se verifica la curva del análisis dinámico de aceleración lineal perteneciente al punto A que involucra la conexión del eslabón motriz y el actuador, que tiene una velocidad máxima de 5439.4905 mm/s<sup>2</sup> producida en el segundo 0.01 del primer ciclo de trabajo analizado en el software, mientras que mediante el cálculo analítico tenemos un valor de 5442.280 mm/s<sup>2</sup>, siendo válidos los valores obtenidos por ambos métodos.



**Ilustración 3-25:** Análisis dinámico de la velocidad lineal del punto B en el punto muerto mediante MSC Adams.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

**Tabla 3-5:** Análisis de aceleración lineal del punto A

Aceleración lineal del punto A		
	Método analítico	Método MBD
Valor $a_A$	5442,28 mm/s <sup>2</sup>	5439,491 mm/s <sup>2</sup>

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-25 se verifica que la curva del análisis dinámico de sistemas multicuerpo de aceleración lineal perteneciente a la unión del eslabón 2 o motriz y el eslabón conductor o biela, coincide con el método analítico calculado.

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{BA}$$

Se analiza la aceleración de los componentes del mecanismo en diferentes puntos durante el movimiento. Esto implica determinar las aceleraciones lineales y angulares de los diferentes puntos del mecanismo y las relaciones de aceleración entre ellos.

$$\begin{aligned}\vec{a}_B &= \vec{a}_A + \alpha_3 \times \vec{R}_{BA} - \omega_3^2 \vec{R}_{BA} \\ \vec{a}_B &= (2491,873i - 4838,283j) + \alpha_3 k \times (255,598i + 69,732j) - (-1.154)^2(255,598i \\ &\quad + 69,732j) \\ \vec{a}_B &= (2491,873i - 4838,283j) + (-69,732\alpha_3 i + 255,598\alpha_3 j) + (-340,384i - 92,863j) \\ \vec{a}_B &= (2151,489 - 69,732\alpha_3)i + (-4931,146 + 255,598\alpha_3)j \quad (1)\end{aligned}$$

Se encontró la primera ecuación de la aceleración lineal en el punto B, en función a la aceleración angular del eslabón 3 o biela.

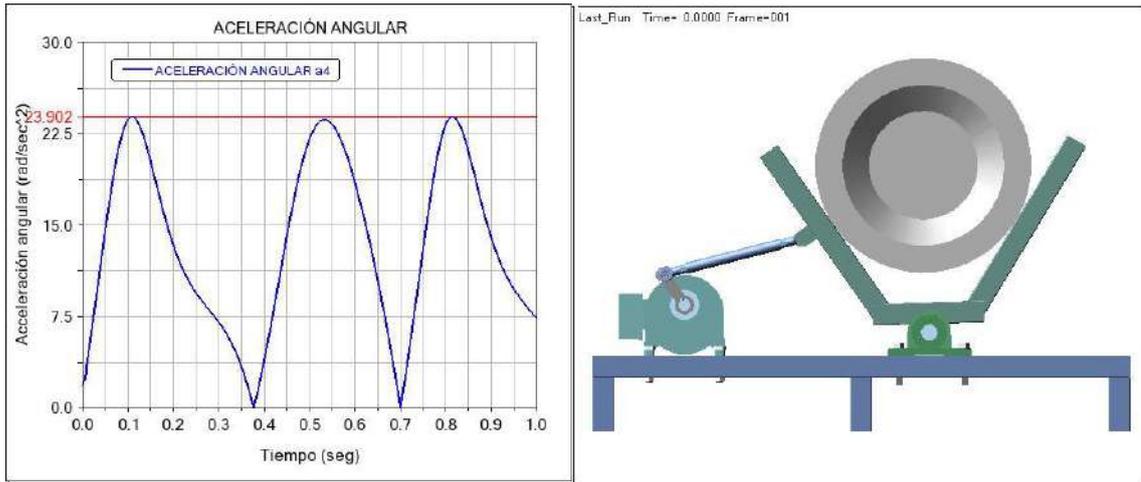
$$\begin{aligned}\vec{a}_B &= \vec{a}_C + \vec{a}_{BC}; & \vec{a}_B &= \vec{a}_{BC} \\ \vec{a}_B &= \alpha_4 \times \vec{R}_{BC} - \omega_4^2 \vec{R}_{BC} \\ \vec{a}_B &= \alpha_4 k \times (-225,849i + 181,912j) - (2,545)^2(-225,849i + 181,912j) \\ \vec{a}_B &= (-181,912\alpha_4 i - 225,849\alpha_4 j) + (1462,829i - 1178,248j) \\ \vec{a}_B &= (-181,912\alpha_4 + 1462,829)i + (-225,849\alpha_4 - 1178,248)j \quad (2)\end{aligned}$$

Se encontró la segunda ecuación de la aceleración lineal en el punto B, en función a la aceleración angular del eslabón 4 u oscilador.

Se despejó las ecuaciones (1) y (2) para dejarlas en función de las aceleraciones angulares, para que posteriormente con un método de igualación se pueda encontrar los valores de estas aceleraciones.

$$\begin{aligned}a_{Bx} \\ 2151,489 - 69,732\alpha_3 &= -181,912\alpha_4 + 1462,829 \\ -69,732\alpha_3 + 181,912\alpha_4 &= -688,66 \\ a_{By} \\ -4931,146 + 255,598\alpha_3 &= -225,849\alpha_4 - 1178,248 \\ 255,598\alpha_3 + 225,849\alpha_4 &= 3752,898 \\ \alpha_3 &= -17,785 \frac{rad}{s^2} \\ \alpha_4 &= -23,894 \frac{rad}{s^2}\end{aligned}$$

En la ilustración 3-26 se evidencia el análisis de aceleración angular del eslabón 4 u oscilador, resultando un valor de  $23,902 \frac{rad}{s^2}$  aproximándose al valor obtenido analíticamente.



**Ilustración 3-26:** Análisis de aceleración angular  $\alpha_4$ .

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

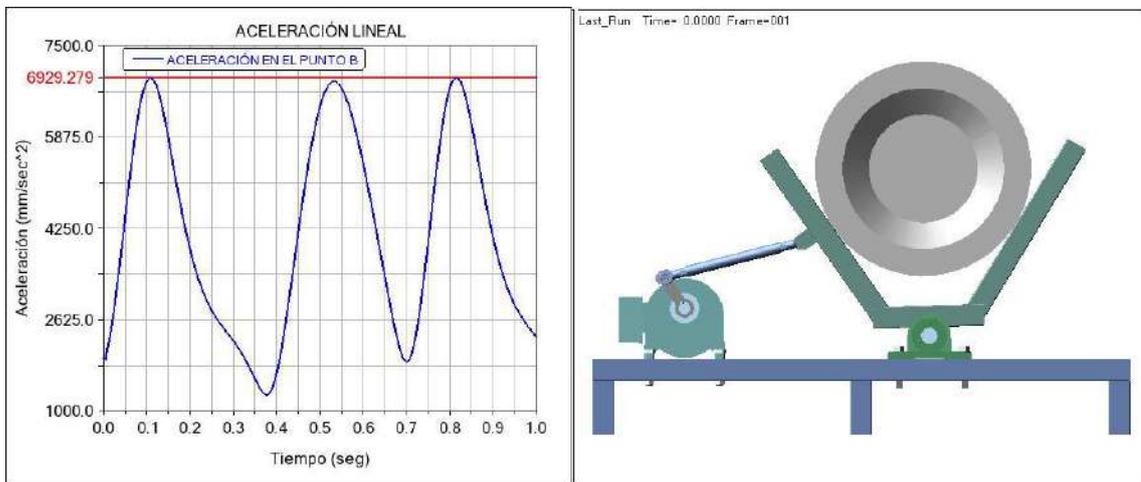
A través de la ecuación (2), se reemplazaron los valores obtenidos de las aceleraciones angulares para tener como resultado la magnitud de la aceleración lineal del punto B.

$$\vec{a}_B = (-181,912\alpha_4 + 1462,829)i + (-225,849\alpha_4 - 1178,248)j$$

$$\vec{a}_B = 5779,434i + 3822,581j$$

$$a_B = 6929,211 \frac{mm}{s^2}$$

En la ilustración 3-27 se evidencia el análisis de aceleración lineal del punto B, resultando un valor de  $6929,279 \frac{rad}{s^2}$  aproximándose al valor obtenido analíticamente.



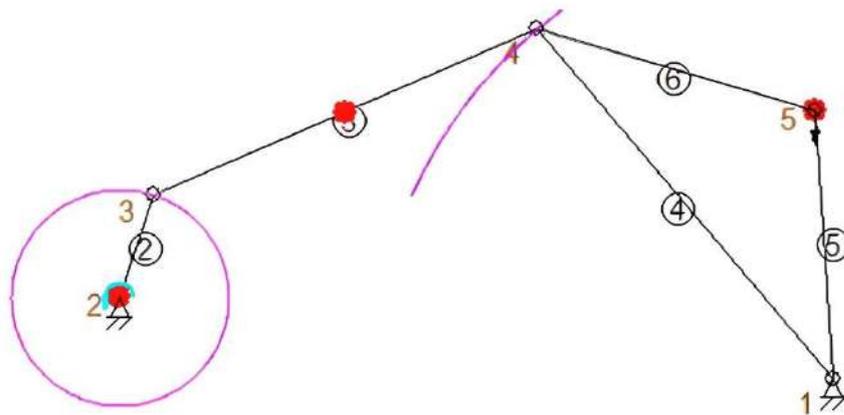
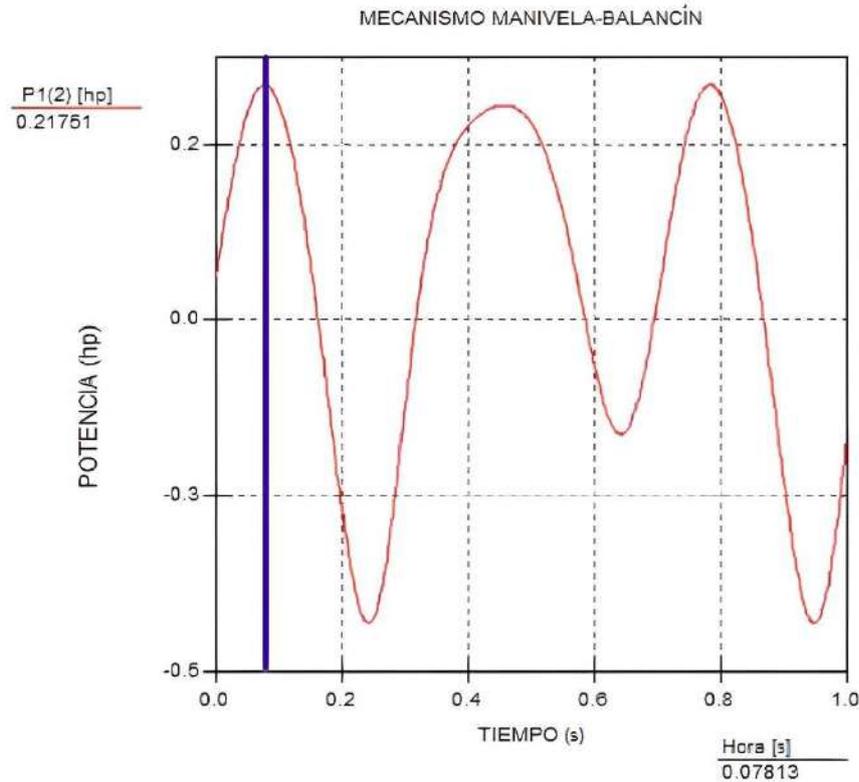
**Ilustración 3-27:** Análisis de aceleración lineal del punto B.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

### 3.6.3. Cálculo de potencia

Para el cálculo de la potencia realizamos el análisis y validación mediante Artas SAM 6.1 y MSC Adams, en donde se verificó una potencia máxima de 0.21751 hp como se evidencia en la parte

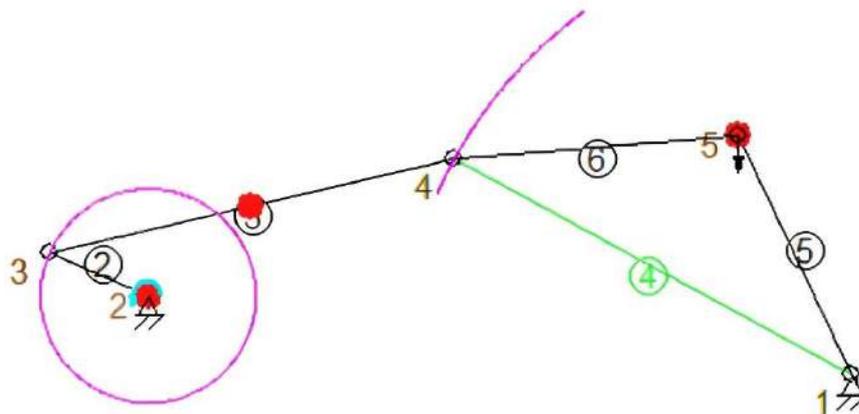
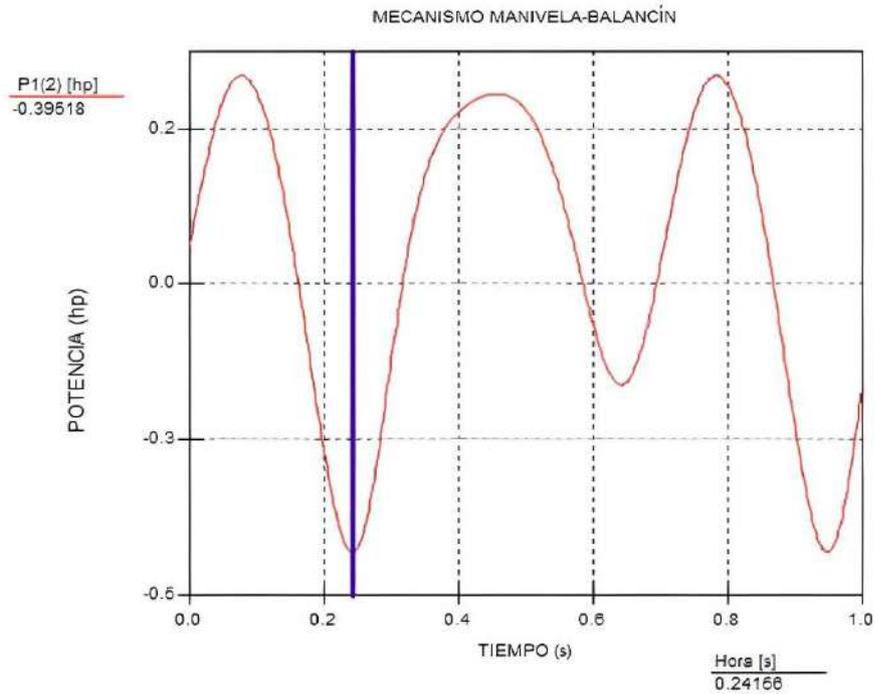
superior de la siguiente ilustración, esta magnitud se evalúa en el retorno del ciclo de movimiento del barril, como se observa en la parte inferior de la ilustración.



**Ilustración 3-28:** Análisis de la potencia requerida mediante SAM.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

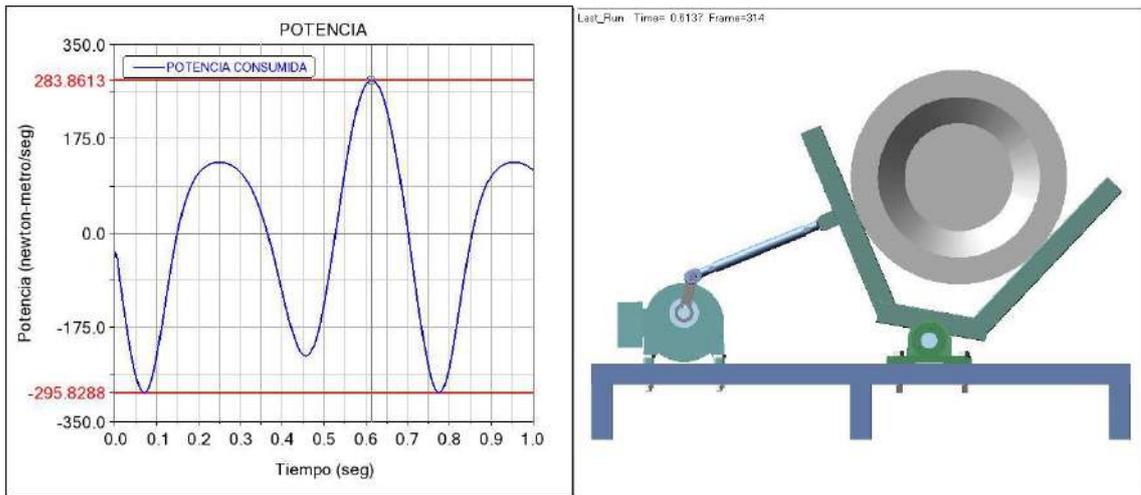
En la ilustración 3-29 se verifica el análisis de potencia máxima de 0.39581 hp que se observa en la parte superior de la ilustración, mientras que en la parte inferior se muestra que durante la ida del ciclo de movimiento del barril se genera la mayor demanda de potencia, acercándose a la posición de punto muerto, de esta forma siendo esta última potencia, la mayor y la requerida para el funcionamiento del sistema.



**Ilustración 3-29:** Análisis de la potencia requerida mediante SAM.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

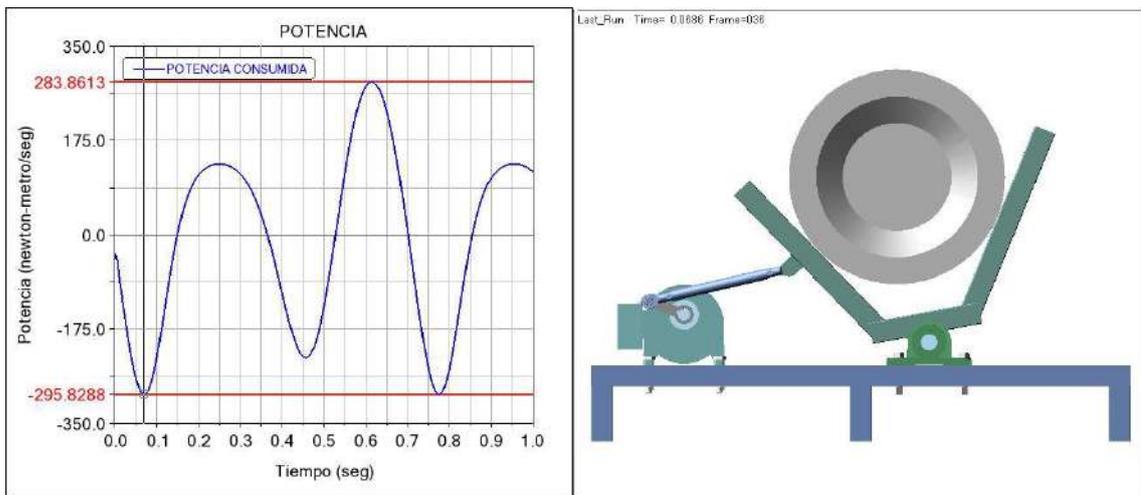
En la ilustración 3-30 se verifica el análisis de potencia máxima de 283.8613 watts, equivalente a 0.3806 hp en el retorno del ciclo de movimiento del barril, de esta forma siendo esta última la requerida para el funcionamiento del sistema.



**Ilustración 3-30:** Análisis de la potencia requerida mediante MSC Adams.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-31 se verifica el análisis de potencia máxima de 295.8288 watts, equivalente a 0.39671 hp en el retorno del ciclo de movimiento del barril, de esta forma siendo esta última la requerida para el funcionamiento del sistema. De esta forma validamos que la potencia encontrada a través de SAM y Adams varía 1 unidad dentro del orden de las centésimas, siendo aceptables los resultados obtenidos en ambos métodos.



**Ilustración 3-31:** Análisis de la potencia requerida mediante MSC Adams.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

De esta forma la potencia final requerida es de 0,39671 hp, teniendo mayor acción de trabajo la ida del ciclo, permitiendo seleccionar un motor comercial de ½ de hp considerando pérdidas mecánicas de funcionamiento.

### 3.7. Selección motorreductor

**Tabla 3-6:** Parámetros del motor para selección de catálogo

<b>Potencia</b>	0,397 HP
<b>Revoluciones por minuto</b>	85 rpm

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

A través de los parámetros de trabajo establecidos del motor, se seleccionó la opción más adecuada en función a las especificaciones del fabricante y los equipos disponibles en el mercado local, teniendo en cuenta que se aproximen a los requerimientos de consumo y rendimiento solicitados. De esta forma se seleccionó el siguiente motor, que se observa en el catálogo de *Sesame Motor Corp.* mostrado en el anexo A:

**Tabla 3-7:** Selección del motorreductor Sesame, 85 rpm, 0.5 HP

	
<b>Marca</b>	Sesame
<b>Velocidad</b>	85 rpm
<b>Voltaje</b>	110 V
<b>Capacitancia</b>	20 $\mu$ F/300V
<b>Frecuencia</b>	60 Hz
<b>Amperaje</b>	5,36 A
<b>Potencia</b>	0.03 HP
<b>Material</b>	Hierro fundido gris
<b>Nivel de ruido</b>	0.03 dB
<b>Modelo</b>	G1 2H
<b>Tamaño del eje</b>	40 x 22 mm
<b>Tamaño total</b>	324 x 147 mm

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

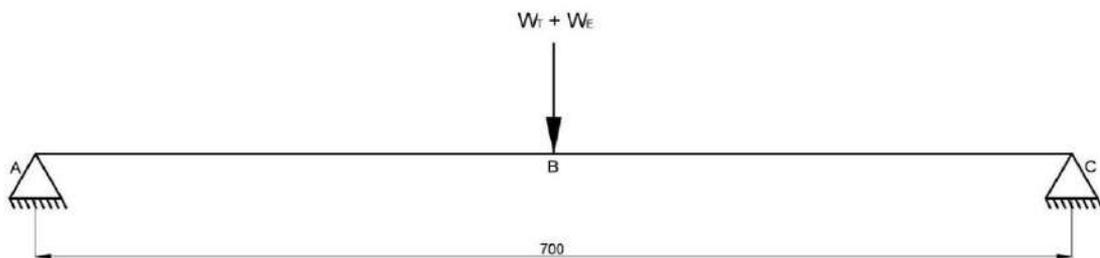
### 3.8. Diseño del eje

Para el diseño del eje consideramos los datos de masa de la estructura y del tanque lleno, así como los demás parámetros a utilizar que se mencionan a continuación:

- Masa estructura =  $M_E = 8 \text{ kg}$
- Masa tanque lleno =  $M_T = 63 \text{ Kg}$

- Potencia =  $P = 0,5hp \approx 372,85 \text{ watt}$ :
- Velocidad angular =  $n = 85rpm = \frac{17}{6}\pi \text{ rad/s}$
- Factor de seguridad =  $n = 1,5$
- Coeficiente de Marin =  $k = 0,6$
- Resistencia a la fluencia =  $Sy = 235 \text{ MPa}$
- Esfuerzo último a la tracción =  $Sut = 460 \text{ MPa}$
- Factor de concentración de esfuerzos a flexión =  $kf = 1,6$
- Factor de concentración de esfuerzos a torsión =  $kfs = 1,4$

En la ilustración 3-32 se observa el diagrama de cuerpo libre del eje, el mismo se encuentra sometido a dos fuerzas en su centro de masa, estas fuerzas corresponden a las ejercidas por el tanque lleno y la estructura móvil, además se muestran los puntos de apoyo correspondientes a la sujeción con las chumaceras extremas al eje.



**Ilustración 3-32:** Diagrama cuerpo libre eje.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

- **Pesos → Fuerzas**

$$\begin{aligned}
 W_E &= (8)(9,81) \\
 W_E &= 78,48 \text{ N} \\
 W_T &= (63)(9,81) \\
 W_T &= 618,03 \text{ N} \\
 W &= W_E + W_T \\
 W &= 78,48 + 618,03 \\
 W &= 696,51 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Donde:

$W_E$  = peso de la estructura

$W_T$  = peso del tanque lleno

$W$  = peso total

- **Torque**

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{P}{n} = \frac{372,85}{\frac{17}{6}\pi} \\
 T &= 41,888 \text{ Nm} \\
 T &= 41,888 \text{ kNmm}
 \end{aligned}$$

El torque es una magnitud física que describe la tendencia de una fuerza para hacer rotar un objeto alrededor de un eje específico, esta magnitud la obtenemos mediante la diferencia de la potencia y la velocidad angular, obteniendo un torque de 41,888kNmm.

Donde:

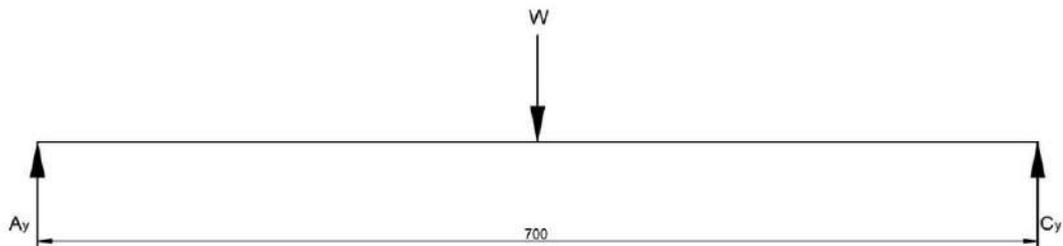
$T =$  torque

$P =$  potencia

$n =$  velocidad angular

- **Reacciones**

Las reacciones se evidencian en los puntos de montaje del eje y las chumaceras, las cuales actúan en el sistema como puntos de apoyo móvil, dando como resultantes las reacciones  $A_y$  y  $C_y$ , de esta manera tendría el sistema la capacidad de moverse o ajustarse a cambios en la carga, fuerzas o condiciones. Estos apoyos móviles podrían permitir que la estructura o el sistema respondan de manera dinámica a variaciones en la carga o en el entorno.



**Ilustración 3-33:** Dimensionamiento y reacciones del eje.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

- **Sumatoria de momentos en A**

La suma algebraica de los momentos o torques aplicados al eje alrededor de un punto específico, en este caso el punto A, conocido como punto de referencia o punto de giro, permite analizar y determinar el equilibrio o la resultante de las fuerzas en términos de su efecto rotatorio.

$$\begin{aligned} \sum M_A &= 0 \\ -W(350) + C_y(700) &= 0 \\ -696,51(350) + C_y(700) &= 0 \\ C_y &= 348,255 \text{ N} \end{aligned}$$

Donde:

$M_A =$  Momento respecto al punto A

$C_y =$  Reacción en el punto C

- **Sumatoria de fuerzas en Y**

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y - W + C_y = 0$$

$$A_y - 696,51 + 348,255 = 0$$

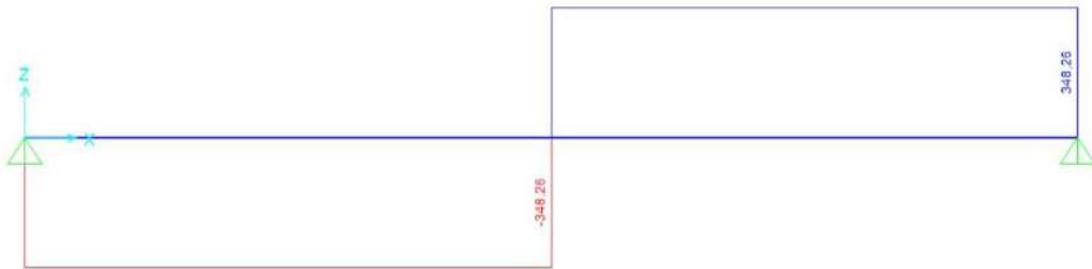
$$A_y = 348,255 \text{ N}$$

$F_y$  = Fuerza respecto al eje Y

$A_y$  = Fuerza en el punto A

- **Diagrama de fuerza cortante**

El diagrama de fuerza cortante también conocido como diagrama de corte o diagrama de cortante, es una representación gráfica que muestra cómo varía la fuerza cortante en una estructura o elemento a lo largo de su longitud. La fuerza cortante es una fuerza que actúa perpendicularmente a la longitud de un objeto, como una viga o un elemento estructural. Esta fuerza tiende a cortar o separar el objeto en dos partes a lo largo de una sección transversal, de forma que en el sistema en estudio evidenciamos una fuerza cortante de 348,26 N positiva y negativa con un salto en la línea de acción de la carga puntual W.

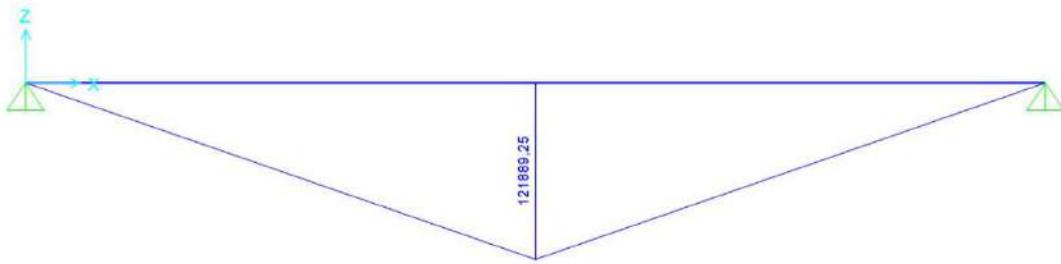


**Ilustración 3-34:** Diagrama de fuerza cortante.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

- **Diagrama de momento flector**

Un diagrama de momento flector, también conocido como diagrama de flexión o diagrama M, es una representación gráfica que muestra cómo varía el momento flector en una estructura o elemento a lo largo de su longitud. El momento flector es una medida de la tendencia de una fuerza aplicada a un objeto para provocar una flexión o curvatura en ese objeto alrededor de un eje, de forma que en el sistema en estudio evidenciamos una fuerza de momento flector máximo de 121889,25 Nmm con un quiebre de cambio de dirección en la línea de acción de la carga puntual W.

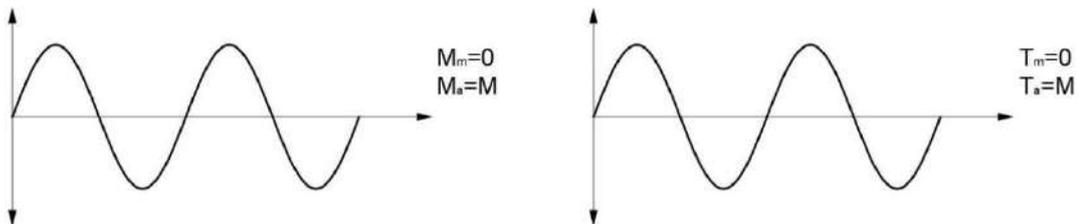


**Ilustración 3-35:** Diagrama de momento flector.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

- **Punto crítico B**

En la ilustración 3-36 se analizó el diagrama de flexión y torsión fluctuante del eje, evidenciando un momento flector en el punto B de 121,889 kNmm y un momento torsor en el punto B de 41,888kNmm.



**Ilustración 3-36:** Diagrama de flexión y torsión fluctuante.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

$$M_B = 121,889 \text{ kNmm}$$

$$T_B = 41,888 \text{ kNmm}$$

Donde:

$M_B$  = Momento flector en el punto B

$T_B$  = Momento torsor en el punto B

- **Límite de fatiga**

El límite de fatiga determina el nivel de esfuerzos alternantes por debajo del cual la fatiga no ocurre en condiciones normales, como se plantea a continuación:

$$Se = kSe' = k(0,5)Sut$$

$$Se = 0,6(0,5)(460)$$

$$Se = 138 \text{ MPa}$$

Donde:

$Se$  = Límite de fatiga

$k$  = Coeficiente de Marin

$Se'$  = Resistencia del material sometido a cargas dinámicas

$S_{ut}$  = Resistencia mínima a la tensión

- **ASME B106.1 M**

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left[ 4 \left( \frac{K_f M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left( \frac{K_{fs} T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left( \frac{K_f M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left( \frac{K_{fs} T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$d = \left\{ \frac{16(1,5)}{\pi} \left[ 4 \left( \frac{1,6(121,889 \times 10^3)}{138} \right)^2 + 3 \left( \frac{1,4(41,888 \times 10^3)}{138} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$d = 28,152 \text{ mm} \approx 1 \frac{1}{4} \text{ pulgadas}$$

Donde:

$d$  = Diámetro del eje

$M_a$  = flexión amplitud

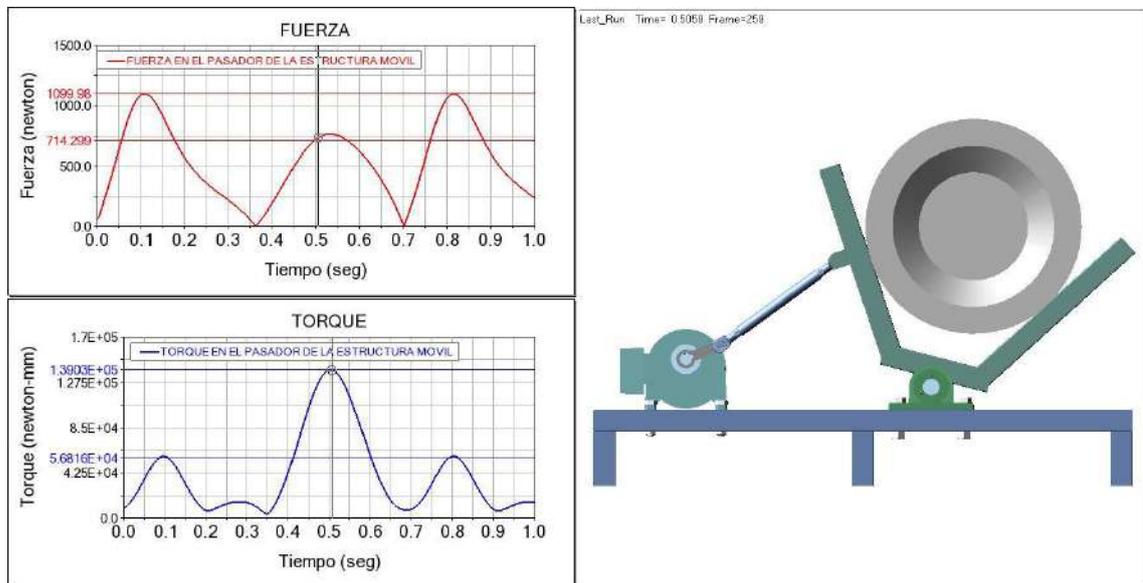
$M_m$  = flexión media

$T_a$  = torsión amplitud

$T_m$  = torsión media

### 3.9. Diseño biela o conductor

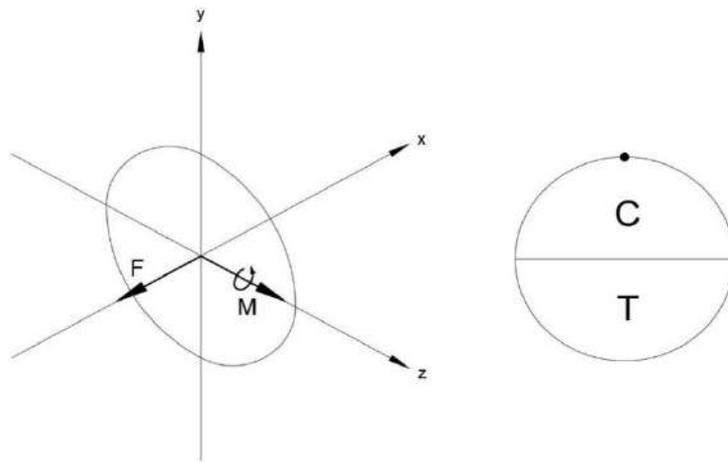
Para el diseño del eje consideramos los datos de masa de la estructura y del tanque lleno, así como los demás parámetros a utilizar que se mencionan a continuación:



**Ilustración 3-37:** Diagramas de fuerza máxima y torque aplicado en el pasador del eslabón motriz

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Mediante la ilustración anterior obtenemos el torque y la fuerza que actúan en el eslabón conductor o biela, dando como resultado que la sección transversal del eslabón se encuentra bajo esfuerzos de compresión en el plano YZ.



**Ilustración 3-38:** Fuerzas y momentos aplicados en la sección transversal del eslabón.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Para determinar el diámetro del eslabón conductor o biela, se empezó analizando la acción de las fuerzas del sistema en donde:

La fuerza F produce compresión

$$\sigma_c = \frac{4F}{\pi d^2}$$

$$\sigma_c = \frac{4(714,299)}{\pi d^2}$$

El momento M produce flexión

$$\sigma_f = \frac{32M}{\pi d^3}$$

$$\sigma_f = \frac{32(1,3903 \times 10^4)}{\pi d^3}$$

El esfuerzo normal total es

$$\sigma = \sigma_c + \sigma_f$$

$$\sigma = \frac{4(714,299)}{\pi d^2} + \frac{32(1,3903 \times 10^5)}{\pi d^3}$$

Aplicando Von Mises y sin tener en cuenta esfuerzos cortantes ni torsores tenemos:

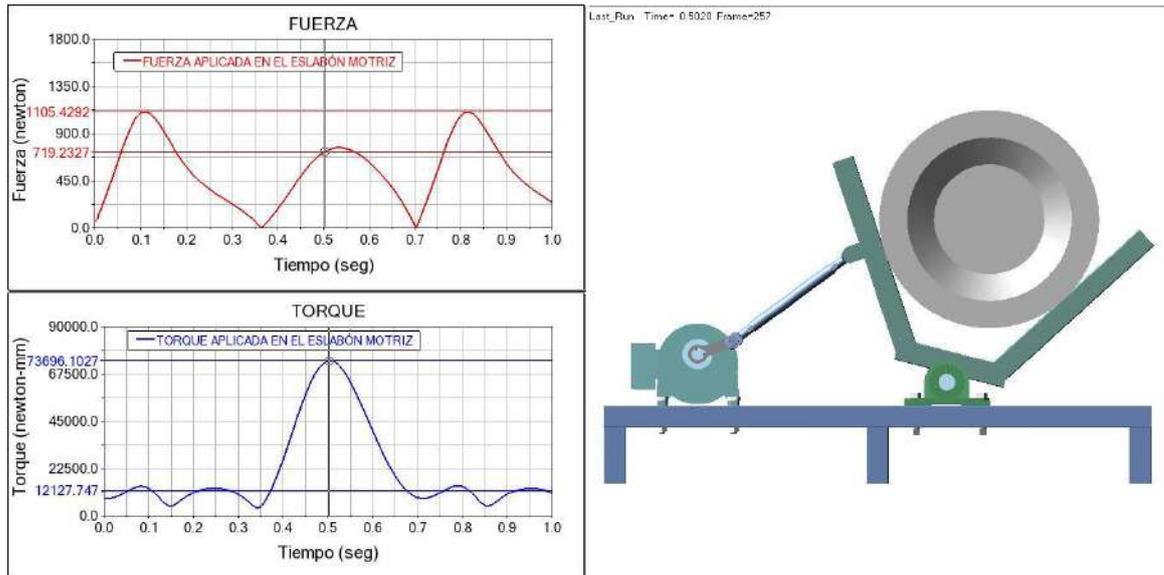
$$\sigma = \frac{S_y}{n}$$

$$\frac{4(714,299)}{\pi d^2} + \frac{32(1,3903 \times 10^5)}{\pi d^3} = \frac{710}{1,5}$$

$$d = 14,45 \text{ mm} \approx 16 \text{ mm}$$

### 3.10. Diseño de la manivela

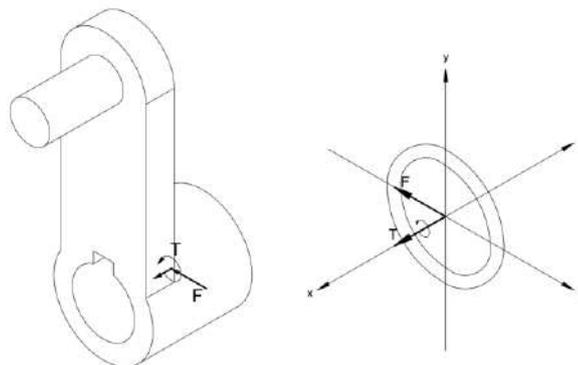
Para el diseño de la manivela o eslabón motriz, se tomaron en cuenta los elementos y consideraciones involucradas en el análisis, estas son la acción del eje transmisión frente a la sección circular, la acción del pasador motriz frente a la manivela y sus elementos componentes. En la ilustración 3-39 se verifica la curva de fuerza máxima y su torque equivalente aplicado en el eslabón motriz en el segundo 0,51, aquí se provoca la mayor fuerza durante el primer ciclo de trabajo analizado, aproximándose a la posición extrema singular de punto muerto.



**Ilustración 3-39:** Diagramas de fuerza máxima y torque aplicado en el pasador del eslabón motriz

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

Para el diseño de la sección tubular, se tomó como base lo obtenido mediante el software, se encontró la distancia de aplicación de fuerzas del eslabón motriz, consiguiendo los siguientes datos:



**Ilustración 3-40:** Fuerza y momento aplicados en la sección tubular de la manivela.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

Para determinar el diámetro del eslabón motriz o manivela, se empezó analizando la acción de las fuerzas del sistema en la sección tubular en donde, la fuerza  $F$  produce corte y el momento produce torsión, con los valores que se describen a continuación:

$$F = 719,2327 \text{ N}$$

$$T = 73696,1027 \text{ Nmm}$$

$$\tau_t = \frac{16TD}{\pi(D^4 - d^4)} = \frac{16(73696,1027)D}{\pi(D^4 - 22^4)} = \frac{37533 - 1,162, D}{D^4 - 134256}$$

Aplicando Von Mises y considerando un factor de seguridad de 1,5, siendo este factor el mínimo a considerar dentro del análisis de diseño teoría de falla mecánicas, tenemos:

$$n = 1,5$$

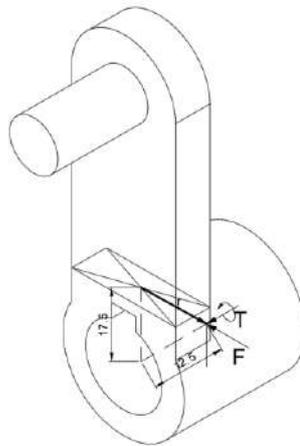
$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \frac{S_y}{n}$$

$$\sqrt{3} \left( \frac{375331,169D}{D^4 - 234256} \right) = \frac{235}{1,5}$$

$$D = 24,04 \text{ mm}$$

Considerando al eje de transmisión con una chaveta de 7mm, aumentamos el diámetro de la sección tubular del elemento motriz a un diámetro exterior de 35 mm.

Para el diseño de la sección rectangular, se tomó como base lo obtenido mediante el software, se encontró la distancia de aplicación de fuerzas del eslabón motriz, consiguiendo los siguientes datos:



**Ilustración 3-41:** Fuerza y momento aplicados de la manivela.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

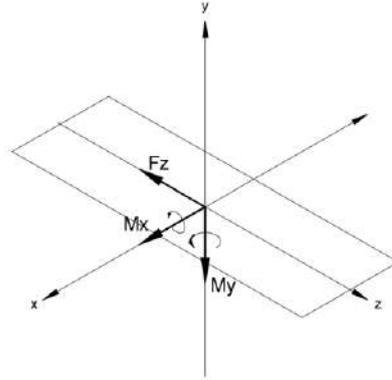
$$r = (-12,5i - 17,5j) \text{ mm}$$

$$F = (-719,2327k) \text{ N}$$

$$T = 73696,1027i \text{ Nmm}$$

$$r \times F = (12586,572i - 8990,408j) \text{ N}$$

$$M = (86282,674i - 8990,408j +) \text{ N} \rightarrow \text{Se suman los torques}$$



**Ilustración 3-42:** Fuerzas y momentos aplicados en la sección rectangular de la manivela.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Considerando la relación de lados  $\frac{a}{b} = 3$ ;  $a = 3b$ ;  $\alpha = 0,267$  y  $\gamma = 0,753$

$$\tau_c = \frac{v}{a \cdot b} = \frac{719,2327}{(3b)b} = \frac{719,2327}{3b^2} = \frac{239,744}{b^2}$$

$$\tau_t = \frac{T}{a \cdot a \cdot b^2} = \frac{8990,408}{0,267(3b)(b^2)} = \frac{11223,98}{b^3}$$

$$\tau'_t = \gamma \cdot \tau_t = 0,753 \left( \frac{11223,98}{b^3} \right) = \frac{8451,657}{b^3}$$

$$\sigma_f = \frac{Mc}{I} = \frac{86282,674 \left( \frac{a}{2} \right)}{\frac{9}{4}b^4} = \frac{86282,674 \left( \frac{3b}{2} \right)}{\frac{9}{4}b^4} = \frac{57521,783}{b^3}$$

$$I = \frac{1}{12}a^3b = \frac{1}{12}(3b)^3b = \frac{27}{12}b^4 = \frac{9}{4}b^4$$

Aplicando Von Mises:

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \frac{Sy}{n}$$

$$\sqrt{\left( \frac{57521,783}{b^3} \right)^2 + 3 \left[ \left( \frac{239,744}{b^2} \right)^2 + \left( \frac{8451,657}{b^3} \right)^2 \right]} = \frac{235}{1,5}$$

$$b = 9,864 \text{ mm} \simeq b = 10 \text{ mm}$$

$$a = 30 \text{ mm}$$

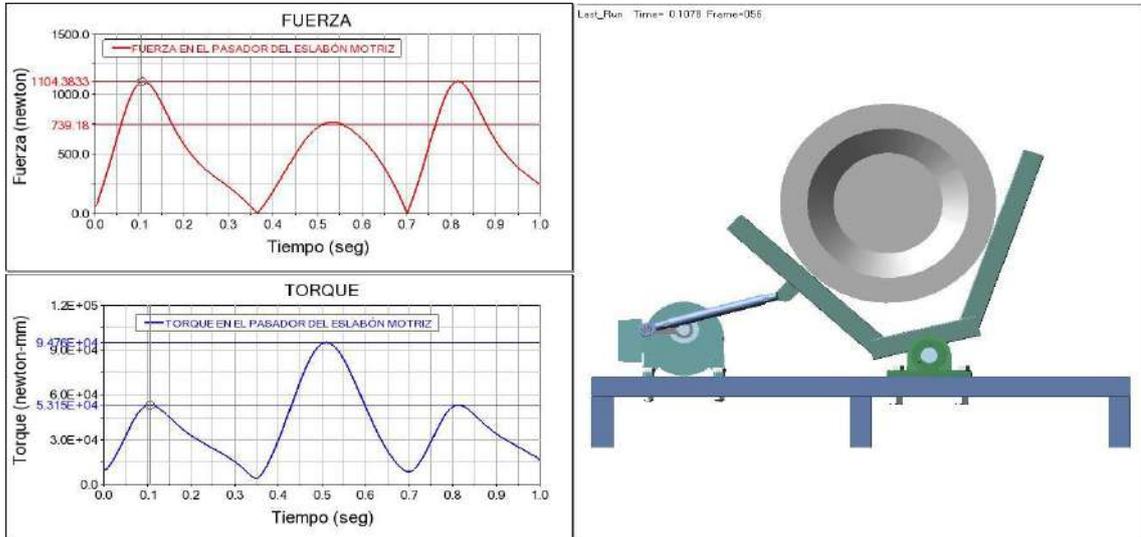
### 3.11. Diseño de pasadores

Un pasador mecánico, también conocido simplemente como pasador, es un componente de mecánico utilizado para fijar o unir dos o más partes mecánicas de manera segura. Los pasadores son elementos de conexión que se insertan en orificios preperforados en las piezas que se desean unir. Proporcionan una forma simple y efectiva de asegurar la alineación y la unión de componentes en una variedad de aplicaciones.

### 3.11.1. Diseño del pasador del eslabón motriz

Para el diseño del pasador del eslabón motriz, se tomó en cuenta los elementos involucrados en el análisis, estos son el elemento motriz o manivela y el elemento conductor o biela.

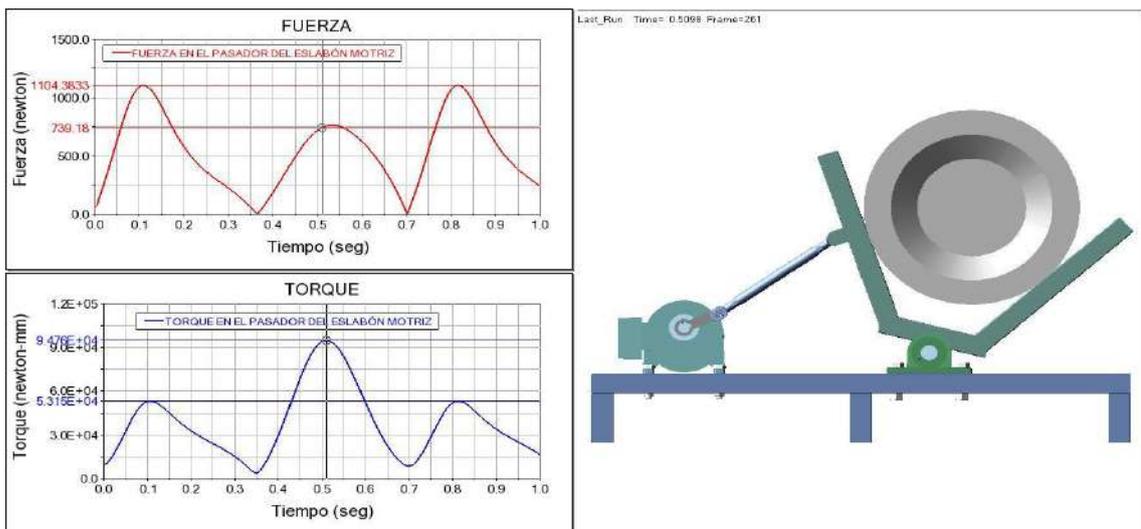
En la ilustración 3-43 se verifica la curva de fuerza máxima y su torque equivalente aplicado en el pasador del eslabón motriz en el segundo 0,11, aquí se provoca la mayor fuerza durante el primer ciclo de trabajo analizado, aproximándose a la posición extrema singular de punto muerto.



**Ilustración 3-43:** Diagramas de fuerza máxima y torque aplicado en el pasador del eslabón motriz

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-44 se verifica la curva de torque máximo y su fuerza equivalente aplicado en el pasador del eslabón motriz en el segundo 0,51, aquí se provoca el mayor torque durante el primer ciclo de trabajo analizado, aproximándose a la posición extrema singular de punto límite.



**Ilustración 3-44:** Diagramas de fuerza y torque máximo aplicado en el pasador del eslabón motriz.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

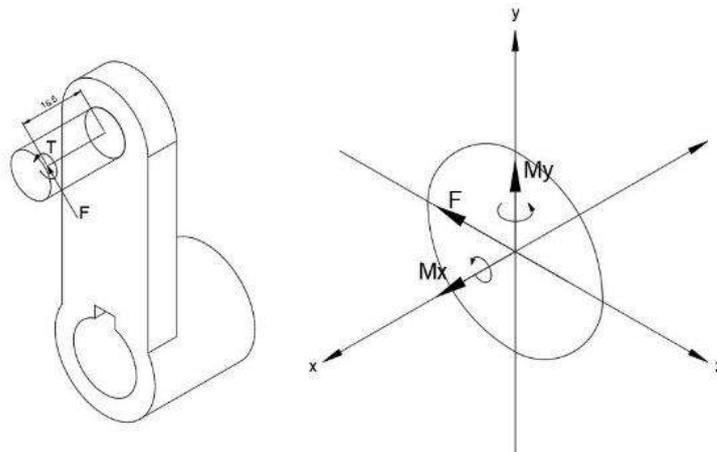
En la tabla 3-8 se muestran las fuerzas y torques máximos y sus valores equivalentes respectivamente del pasador del eslabón oscilador, en las posiciones críticas de mayor carga aplicada, estos son en los segundos 0,11 y 0,51, como se observa:

**Tabla 3-8:** Fuerzas y torque máximos y sus equivalentes aplicados en el pasador del eslabón motriz.

<b>Fuerzas y torque en el pasador del eslabón motriz</b>		
	<b>Fuerza (F)</b>	<b>Torque (T)</b>
<b>Segundo 0,11</b>	1104,383 N (máximo)	5,315e4 Nmm (equivalente)
<b>Segundo 0,51</b>	739,18 N (equivalente)	9,476e4 (máximo)

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

En base a lo obtenido mediante el software, se encontró la distancia de aplicación de fuerzas del pasador del eslabón motriz, consiguiendo los siguientes datos:



**Ilustración 3-45:** Fuerzas y momentos en la sección transversal del pasador de la manivela eslabón.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

$$r = (16,5 i) \text{ mm}$$

$$F = (-739,18k)N$$

$$T = (9,476 \times 10^4 i) \text{ mm}$$

$$M_f = r \times F = 16,5i \times (-739,18 k) = 12196,470j \text{ Nmm}$$

$$M = (9,476 \times 10^4 i + 12196,47j) \text{ Nmm}$$

Donde:

$r$  = Vector posición de la fuerza aplicada al pasador

$F$  = Fuerza obtenida del análisis MBD

$T$  = Torque obtenido del análisis MBD

$M_f$  = Momento flector

$M$  = Vector de momentos

Se determina el tipo de acción efectuado sobre el pasador, a través de los cálculos previos, siendo:

$$M_x \rightarrow \text{Torsión}$$

$$M_y \rightarrow \text{Flexión}$$

$$F \rightarrow \text{Corte}$$

Se calcularon los esfuerzos flectores, torsores y cortante, dejando en función del diámetro del pasador:

$$\sigma_f = \frac{32\pi}{\pi d^3} = \frac{32(12196,47)}{\pi d^3} = \frac{124232,223}{d^3}$$

$$\tau_t = \frac{16\pi}{\pi d^3} = \frac{16(9,476 \times 10^4)}{\pi d^3} = \frac{482608,717}{d^3}$$

$$\tau_c = \frac{4V}{\pi d^2} = \frac{4(739,18)}{\pi d^2} = \frac{941,153}{d^2}$$

Donde:

$\sigma_f$  = Esfuerzo de flexión

$\tau_t$  = Esfuerzo de torsión

$\tau_c$  = Esfuerzo de cortante

$d$  = Diámetro del pasador

Para el cálculo del diámetro del pasador se utilizó la teoría de la energía de distorsión o TED, en donde la teoría postula que, en un material dúctil, el inicio de la deformación plástica ocurre en un punto cuando la tensión de Von Mises alcanza el valor del límite de resistencia. En la mayoría de las situaciones, se considera el límite elástico como el valor límite de la tensión.

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \frac{S_y}{n}$$

$$\sqrt{\left(\frac{124232,223}{d^3}\right)^2 + 3\left[\left(\frac{482608,717}{d^3}\right)^2 + \left(\frac{941,153}{d^2}\right)^2\right]} = \frac{710}{1,5}$$

$$d = 12,132 \text{ mm} \approx d = 14 \text{ mm}$$

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo normal

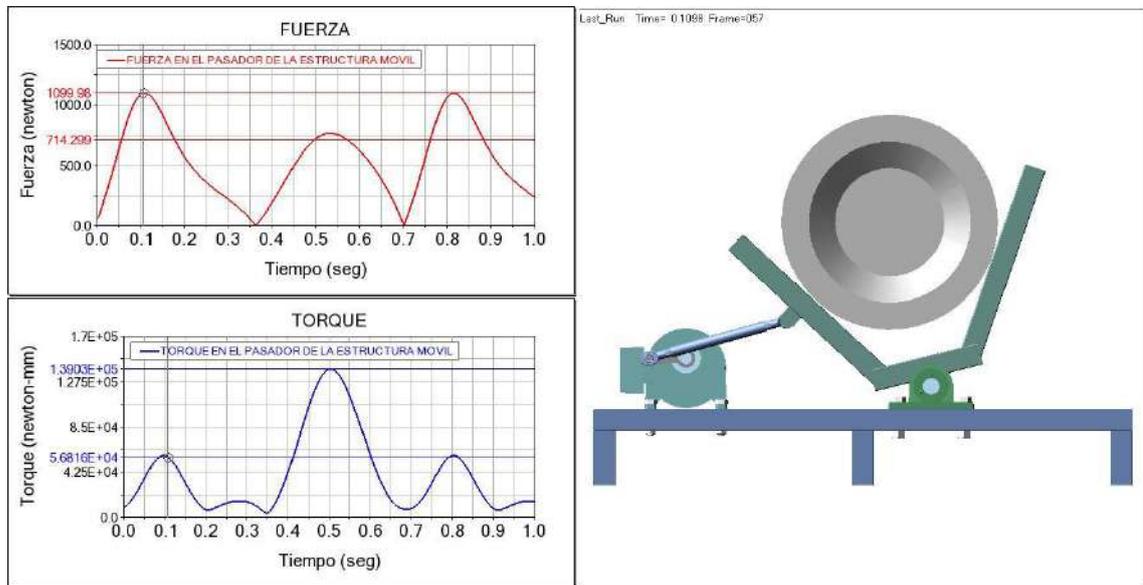
$\tau$  = Esfuerzo cortante

$n$  = Factor de seguridad

### 3.11.2. Diseño del pasador del oscilador

Para el diseño del pasador del eslabón oscilador, se tomó en cuenta los elementos involucrados en el análisis, estos son el elemento oscilador o balancín y el elemento conductor o biela.

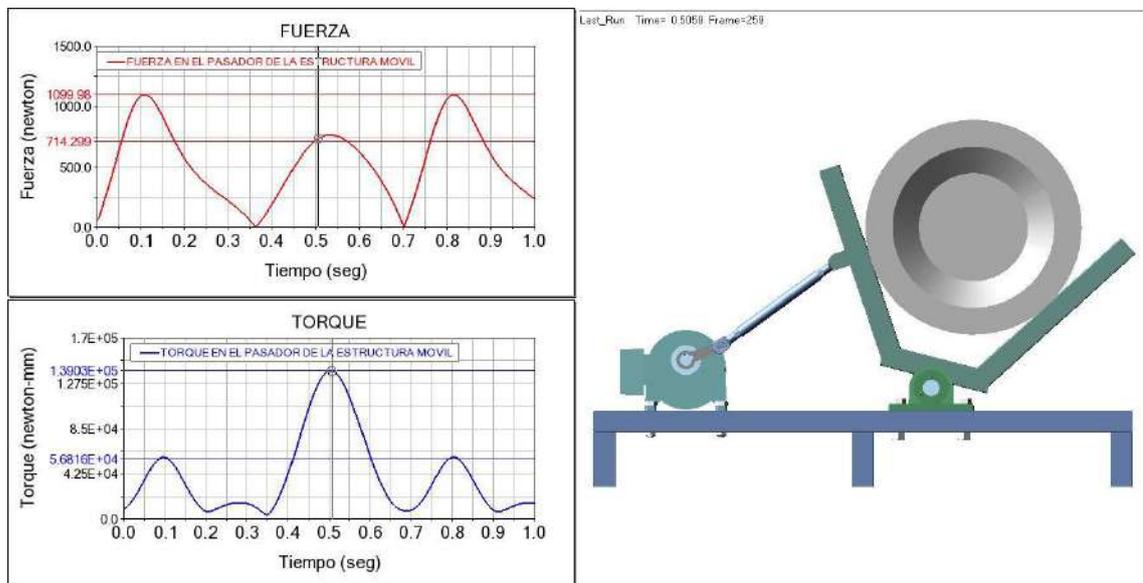
En la ilustración 3-16 se verifica la curva de fuerza máxima y su torque equivalente aplicado en el pasador del eslabón oscilador en el segundo 0,11, aquí se provoca la mayor fuerza durante el primer ciclo de trabajo analizado, aproximándose a la posición extrema singular de punto muerto.



**Ilustración 3-46:** Diagramas de fuerza máxima y torque aplicado en el pasador del eslabón motriz

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-47 se verifica la curva de torque máximo y su fuerza equivalente aplicado en el pasador del eslabón oscilador en el segundo 0,51, aquí se provoca el mayor torque durante el primer ciclo de trabajo analizado, aproximándose a la posición extrema singular de punto límite.



**Ilustración 3-47:** Diagramas de fuerza y torque máximo aplicado en el pasador del eslabón motriz

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

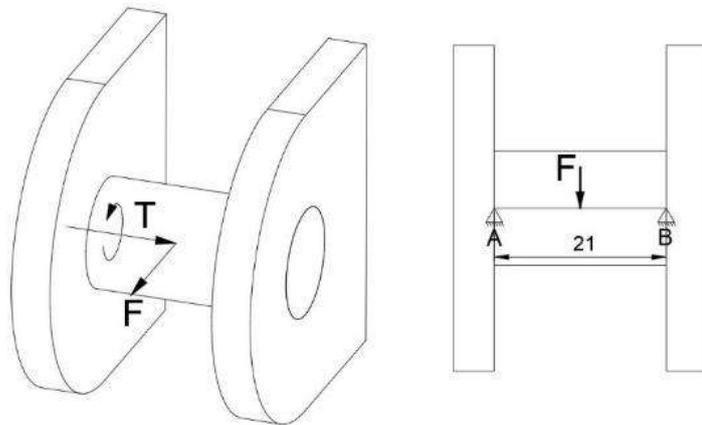
En la tabla 3-9 se muestran las fuerzas y torques máximos y sus valores equivalentes respectivamente del pasador del eslabón oscilador, en las posiciones críticas de mayor carga aplicada, estos son en los segundos 0,11 y 0,51, como se observa:

**Tabla 3-9:** Fuerzas y torque máximos y sus equivalentes aplicados en el pasador del eslabón oscilador.

<b>Fuerzas y torque en el pasador del eslabón oscilador</b>		
	<b>Fuerza (F)</b>	<b>Torque (T)</b>
<b>Segundo 0,11</b>	1099,98 N (máximo)	5,6816e4 Nmm (equivalente)
<b>Segundo 0,51</b>	714,299 N (equivalente)	1,3903e5 Nmm (máximo)

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

En base a lo obtenido mediante el software, se encontró la distancia de aplicación de fuerzas del pasador del eslabón motriz, consiguiendo los siguientes datos:



**Ilustración 3-48:** Análisis de fuerzas y momentos en la sección transversal del pasador del oscilador.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

$$T = 1,3903 \times 10^5 \text{ Nmm}$$

$$F = 714,299 \text{ N}$$

$$\Sigma M_A = 0$$

$$-F(10,5) + By(21) = 0$$

$$-714,299(10,5) + By(21) = 0$$

$$By = 357,15 \text{ N}$$

$$A_y = 357,15 \text{ N}$$

$$M_f = 357,15(10,5)$$

$$M_f = 3750,075 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_f = \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{32(3750,075)}{\pi d^3}$$

$$\tau_t = \frac{16T}{\pi d^3} = \frac{16(1,3903 \times 10^5)}{\pi d^3}$$

Donde:

$B_y$  = Reacción en la componente Y del punto B

$A_y$  = Reacción en la componente Y del punto A

Para el cálculo del diámetro del pasador del eslabón oscilador se utilizó la teoría de la energía de distorsión o TED - Von Mises:

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \frac{S_y}{n}$$

$$\sqrt{\left(\frac{82(3750,075)}{\pi d^3}\right)^2 + 3\left(\frac{16(1,3903 \times 10^3)}{\pi d^3}\right)^2} = \frac{710}{1,5}$$

$$d = 13,73 \text{ m} = d = 14 \text{ mm}$$

### 3.12. Selección de chumaceras

En la selección e instalación de las chumaceras se debe tener en cuenta las fuerzas aplicadas, su grado y dirección, además de la disponibilidad en el mercado, en este caso seleccionamos la marca SKF por su calidad y garantía, además hay que tomar en cuenta el rendimiento y condiciones de funcionamiento.

Datos

$$L_{10} = 5000 \text{ horas}$$

$$n = 90 \text{ rpm}$$

$$F_r = 358,065 \text{ N}$$

$$d = 30 \text{ mm}$$

Donde:

$L_{10}$  = vida nominal básica  $10^6$  rev

$F_r$  = carga radial aplicada

$d$  = diámetro

#### 3.12.1. Carga dinámica equivalente

Para el cálculo de la carga dinámica equivalente se tuvo en cuenta el factor de carga  $f_w$ , el cual tiene en cuenta las consecuencias de los impactos y las vibraciones en la duración de vida, ya que aportan cargas adicionales a los puntos de contacto entre la bola y el recorrido, por esto se seleccionó el facto de 1.2 que corresponde a la aplicación de una máquina eléctrica con una magnitud de choque con muy pocas cargas de impacto o vibración.

**Tabla 3-10:** Factor de carga  $f_w$ .

Magnitud de choque	$f_w$	Aplicación
Muy poco o nada de choque	1.0~1.2	Máquinas eléctricas, máquinas herramientas, instrumentos de medición.
Choque ligero	1.2~1.5	Vehículos ferroviarios, automóviles, molinos de rodillos, máquinas para trabajar metales, máquinas para fabricar papel, máquinas impresoras, aeronaves, máquinas para textiles, máquinas eléctricas, máquinas de oficina.
Choque pesado	1.5~3.0	Trituradores, equipo agrícola, equipo de construcción, grúas.

Fuente: NTN Corporation, 2023

$$P = F_r \cdot f_w$$

$$P = (358,065)(1,2)$$

$$P = 429,678 \text{ N}$$

Donde:

$P$  = carga dinamica equivalente

$f_w$  = factor de carga

### 3.12.2. Rodamientos de bolas

La vida nominal básica se fundamenta en un modelo estadístico al 90%. Este modelo se representa como el total de revoluciones que el 90% de los rodamientos en un conjunto idéntico, bajo las mismas condiciones de operación, lograrán o excederán antes de que se presente el desgaste por fatiga del metal. En el caso de los rodamientos que operan a una velocidad constante, la vida esperada estándar (con un 90% de confiabilidad) se expone en términos del total de horas de funcionamiento. NTN CORPORATION, 2023

**Tabla 3-11:** Correlación de la vida nominal básica del rodamiento, factor de vida y factor de velocidad.

Clasificación	Rodamientos de bolas	Rodamientos de rodillos
Vida nominal básica $L_{10h}$ h	$\frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^3 = 500 f_h^3$	$\frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^{10/3} = 500 f_h^{10/3}$
Factor de vida $f_h$	$f_h \frac{C}{P}$	$f_h \frac{C}{P}$
Factor de velocidad $f_n$	$\left(\frac{33.3}{n}\right)^{1/3}$	$\left(\frac{33.3}{n}\right)^{3/10}$

Fuente: NTN Corporation, 2023

- **Factor de vida**

El factor de vida es un ajuste que se aplica en la fórmula de vida útil del rodamiento para tener en cuenta las condiciones específicas de operación y las influencias externas que pueden afectar la durabilidad y el rendimiento del rodamiento en ciertas condiciones de operación específicas.

$$f_h = \left(\frac{L_{10}}{500}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$f_n = \left(\frac{5000}{500}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$f_n = 2,154$$

- **Factor de velocidad**

Este factor tiene en cuenta la velocidad de rotación del rodamiento y su influencia en la vida útil y el rendimiento del mismo, el factor de velocidad se refiere a un ajuste en la fórmula que relaciona la carga y la velocidad para estimar la vida útil nominal del rodamiento. En la ecuación básica de la vida útil, el factor de velocidad modifica la velocidad de rotación y su influencia en la fatiga del material y otros factores. En otras palabras, se tiene en cuenta cómo la velocidad afecta la vida útil del rodamiento.

$$f_n = \left(\frac{33,3}{n}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$f_n = \left(\frac{33,3}{90}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$f_n = 0,718$$

- **Capacidad básica de carga dinámica**

Se requiere una chumacera donde el rodamiento tenga una capacidad básica de carga dinámica mayor a la calculada, además se debe considerar el ancho de la base de la chumacera, debido a que esta irá empernada sobre el tubo cuadrado de la estructura fija.

$$C = \frac{f_h}{f_n} \cdot P$$

$$C = \frac{2,154}{0,718} \cdot (429,678)$$

$$C = 1,289\text{kN}$$

### 3.13. Selección cabezas articulación

Para la selección de las cabezas de articulación se tomó en cuenta los valores obtenidos en el apartado 3.11.1 de diseño de pasadores, en donde la selección depende del diámetro del eslabón oscilador, ya que este posee el diámetro mayor entre el eslabón motriz y oscilador. La diferencia

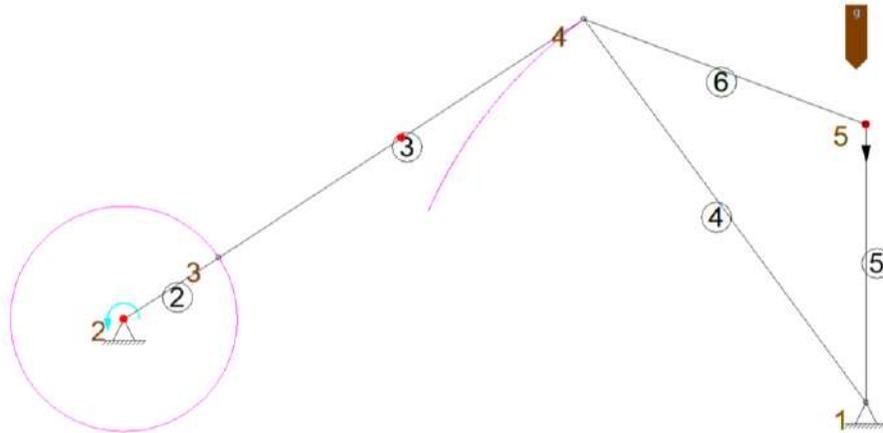
de diámetros difiere en 1mm de manera que el valor de selección es de 14mm de diámetro interior de cabeza de articulación. Las cabezas seleccionadas se muestran en el anexo D.

### 3.14. Validación de método de elementos finitos MEF

#### 3.14.1. Análisis estructura fija

##### 3.14.1.1. Análisis transitorio

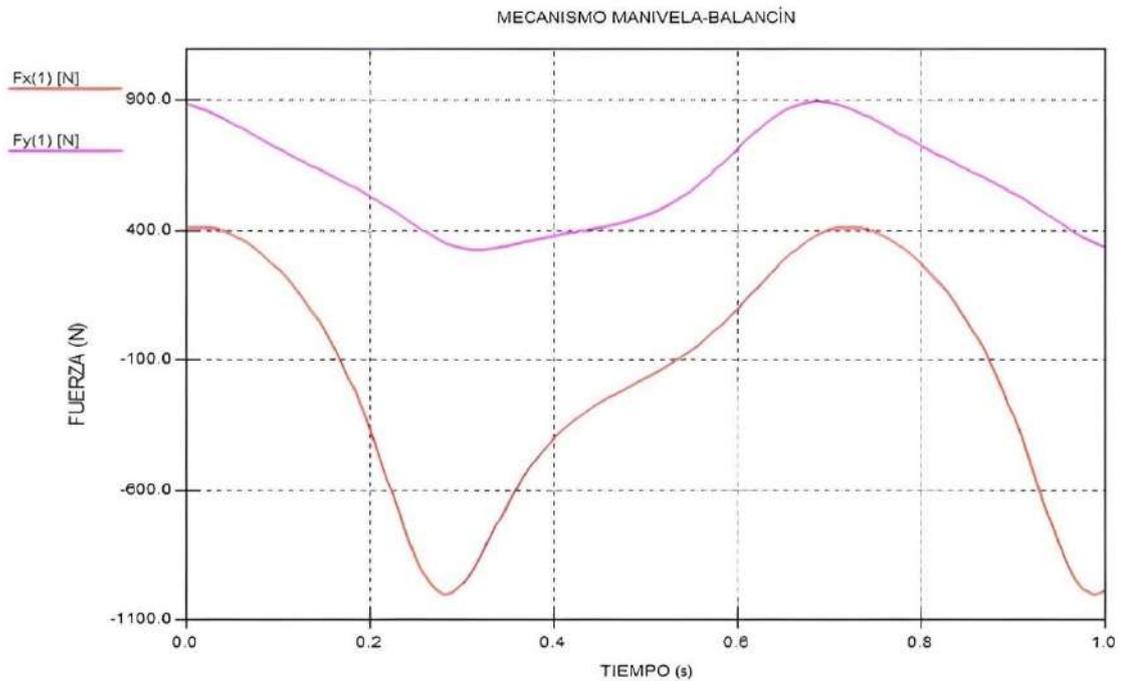
Para el estudio transitorio vibracional del sistema mecánico presentado, se consideró el comportamiento de la estructura fija frente a excitaciones transitorias que son provocadas por el par motor que permite el movimiento del mecanismo mostrado en la ilustración 3-49.



**Ilustración 3-49:** Análisis de fuerzas en SAM.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-50 se observó el comportamiento de las fuerzas en el punto de apoyo 1, que corresponde a la sujeción del eje con la chumacera.



**Ilustración 3-50:** Fuerzas que actúan en el apoyo 1.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

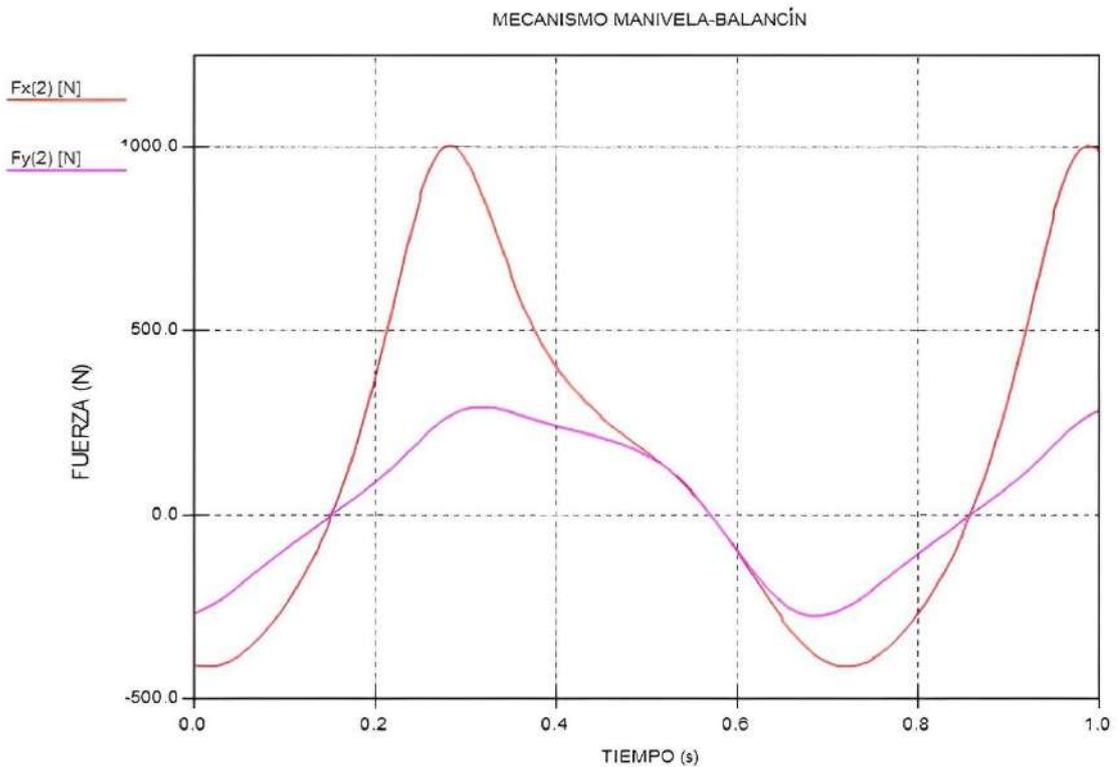
En la ilustración se verifica la curva representada por las fuerzas aplicadas en el punto 1 durante 1 segundo, que es el tiempo en donde cumple el trayecto completo de movimiento del sistema. Teniendo los siguientes valores resultantes:

**Tabla 3-12:** Fuerzas máximas y mínimas que actúan en el apoyo 1.

Análisis vibracional transitorio punto 1		
	Máximo	Mínimo
Fuerza x	413,05 N	-1001,47 N
Fuerza y	893,06 N	325,19 N

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Con los valores obtenidos se evidenció mayor esfuerzo en el punto 1 durante el retorno del barril durante la agitación.



**Ilustración 3-51:** Fuerzas que actúan en el apoyo 2.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-51, se observó el comportamiento de las fuerzas en el punto de apoyo 2, que corresponde a la unión de la salida del eje del motorreductor y la manivela, durante 1 segundo, que es el tiempo en donde cumple el trayecto completo de movimiento del sistema. Teniendo los siguientes valores resultantes:

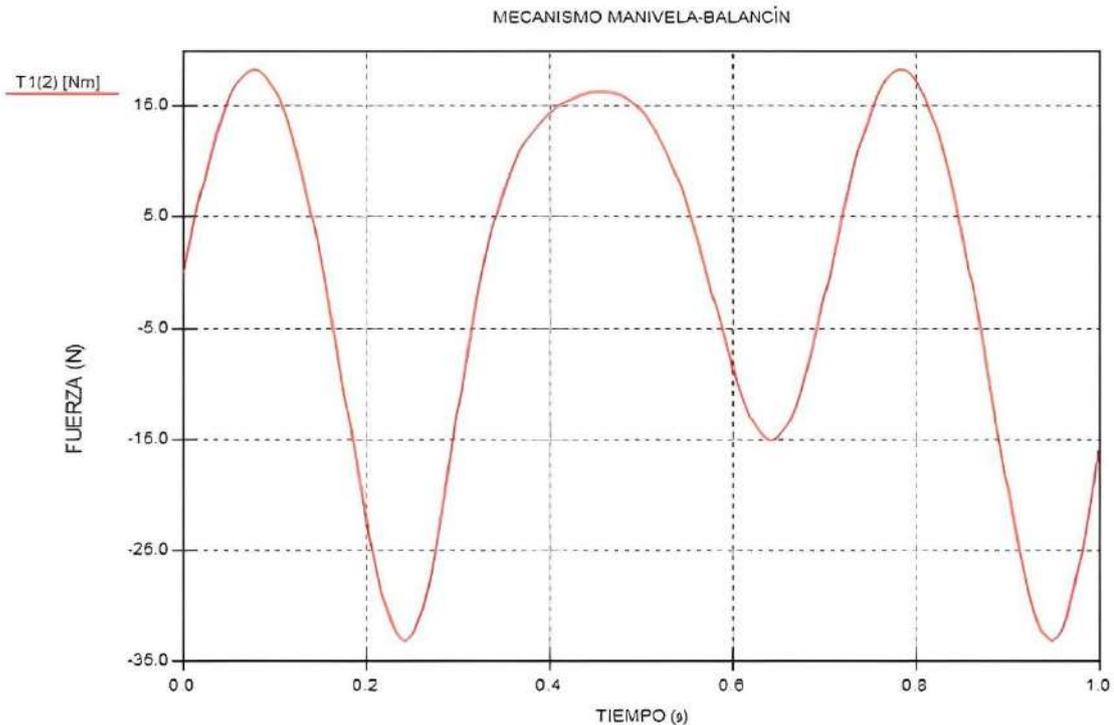
En donde se reflejaron los siguientes valores:

**Tabla 3-13:** Fuerzas máximas y mínimas que actúan en el apoyo 2.

<b>Análisis vibracional transitorio punto 2</b>		
	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
<b>Fuerza x</b>	1001,48 N	-413,07 N
<b>Fuerza y</b>	292,94 N	-275,09 N

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Con los valores obtenidos se evidenció mayor esfuerzo en el punto 2 durante el retorno del barril durante la agitación, coincidiendo con la posición crítica del punto 1.



**Ilustración 3-52:** Torque que actúa en el apoyo 1.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-52, se observó el comportamiento del momento de fuerza en el punto de apoyo 4, que corresponde a la unión de la salida del eje del motorreductor y la manivela. En donde se reflejaron los siguientes valores:

**Tabla 3-14:** Torque que actúa en el apoyo 1.

<b>Análisis vibracional transitorio punto 1</b>		
	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
<b>Torque</b>	18,22 Nm	-33,11 Nm

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Con los valores obtenidos se evidenció mayor momento de fuerza en el sistema durante el trayecto de retorno del barril durante la agitación.

### 3.14.1.2. Modelado del elemento placa y mallado de la estructura fija

La solución de una simulación mediante el método de elementos finitos se ve fuertemente influenciada por la calidad de la malla utilizada y el correcto uso de condiciones de modelado de las piezas o estructuras a analizar. Para obtener resultados precisos, los usuarios deben buscar un equilibrio entre la calidad de la malla y el tiempo necesario para generarla y resolverla.

Cuando evaluamos un correcto mallado, la simetría y la uniformidad son de vital importancia. Se consideran elementos de alta calidad aquellos que exhiben simetría y lados uniformes.

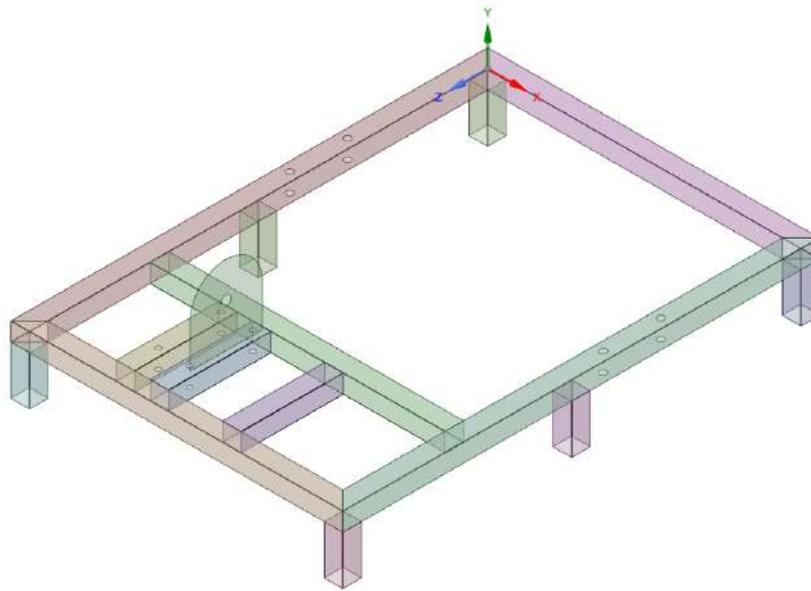
La calidad de una celda de malla puede cuantificarse de varias formas, ANSYS lleva a cabo una serie de comprobaciones geométricas en los elementos de la malla para determinar su calidad, estas comprobaciones o métricas se detallan en la siguiente ilustración con sus rangos máximos y mínimos de aceptabilidad:

**Tabla 3-15:** Tipos de comprobaciones geométricas y controles para aceptación de calidad de malla.

	MINIMU M	MAXIMU M	AVERAGE	STANDARD DEVIATION	CORRECT
Element Quality	-4.58E-4	0.999	0.7570	0.2025	1
Aspect Ratio	1	94.942	2.3903	2.1655	1
Jacobian Ratio	1	38.141	1.0829	0.3531	1
Warping Factor	0	0.42	1.1475	0.01389	0
Parallel Deviation	0	135.56	2.4901	7.66	0
Maximum Corner Angle	62.228°	178.71°	94.101°	9.4292°	90-cuadrilateral
Skewness	1.30E-10	0.999	4.82E-2	0.11	0 - 0.25

Fuente: Aquino M., 2023

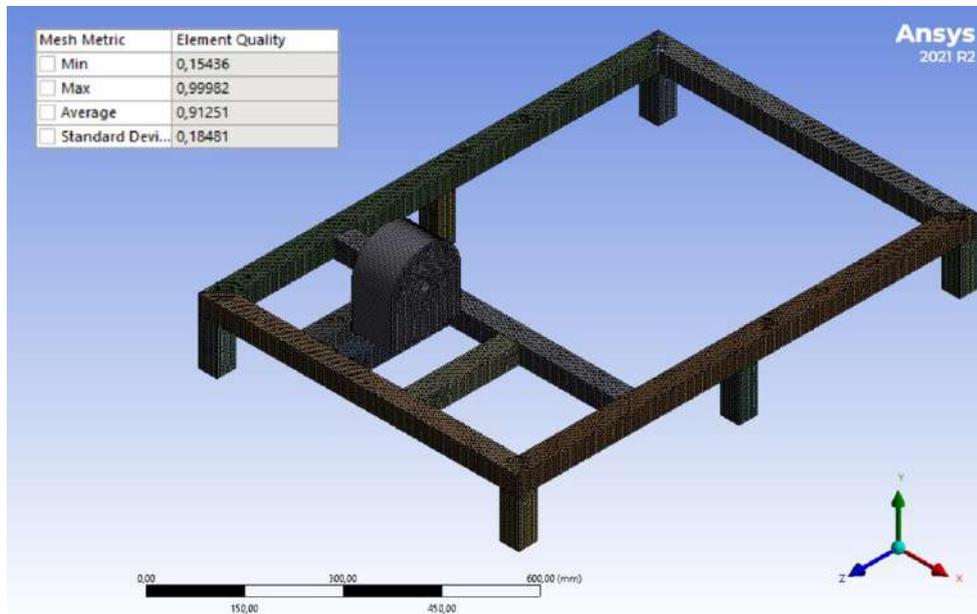
En la ilustración 3-53 se observa a la estructura fija en elemento placa o *shell* para el análisis MEF correspondiente.



**Ilustración 3-53:** Asignación de elemento *shell* a la estructura fija.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Para evaluar la estructura fija del sistema, debemos utilizar la opción de elemento *shell* o placa ya que utilizaremos un tubo cuadrado para la perfilaría de toda la estructura móvil y fija, de modo que para facilidad y mayor exactitud de resultados MEF creamos el elemento placa a través del *SpaceClaim* que permite el modelado paramétrico para posteriormente realizar las iteraciones de elementos finitos solicitadas.

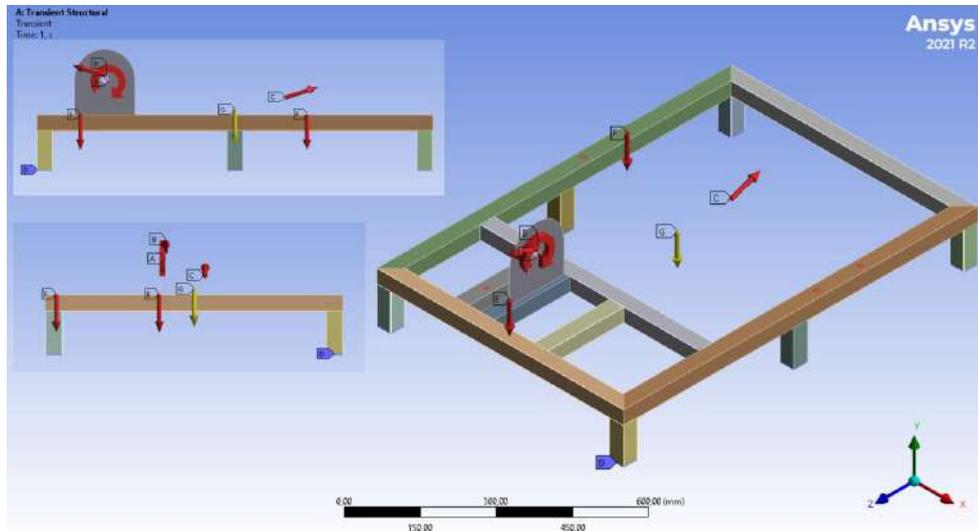


**Ilustración 3-54:** Mallado de la estructura fija

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Durante el proceso de mallado se realizó un afinamiento de malla a través de un *body sizing* y un *face sizing* de 4 mm, arrojando como resultado que la calidad de malla este dentro de los

parámetros establecidos y aceptables en función al control de malla métrica, teniendo en cuenta que usamos elemento tipo placa o *shell* para el *Element Quality* en donde nos sugieren trabajar con un valor promedio mayor al 0.7570, en el caso del mallado del eje obtuvimos una calidad de malla promedio de 0.91251 como se evidencia en la anterior ilustración.



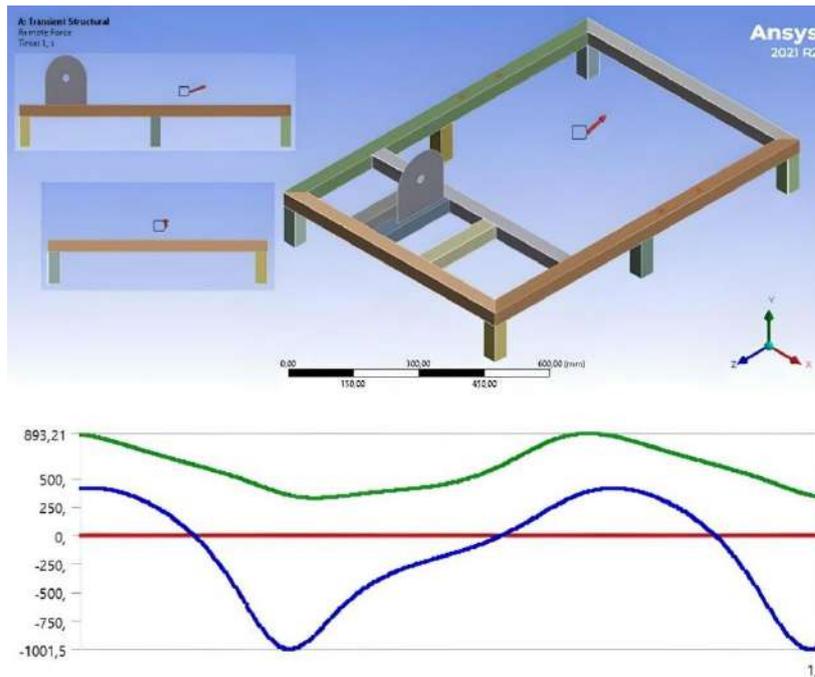
**Ilustración 3-55:** Fuerzas y apoyos aplicados en la estructura fija

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración anterior se presentan las fuerzas que actúan sobre la estructura fija en análisis, en donde se evidencia el anclaje de las bases de la estructura mostradas con viñeta azul y letra B, se muestra el momento producido en el eje de salida del actuador etiquetado con viñeta roja y letra A, se muestra la fuerza producida por el ensamble de los elementos en la salida del actuador etiquetada con viñeta roja y letra E, se muestra una fuerza remota perteneciente a todos los elementos extras que actúan bajo la gravedad, es decir, la estructura móvil, el barril y demás accesorios que irán conectados para el proceso de carbonatación, esta etiqueta se muestra en color transparente y con la letra C, y por último se muestra la fuerza de gravedad etiquetada con viñeta amarilla y letra D.

### 3.14.1.3. *Análisis transitorio vibracional de los puntos de anclaje*

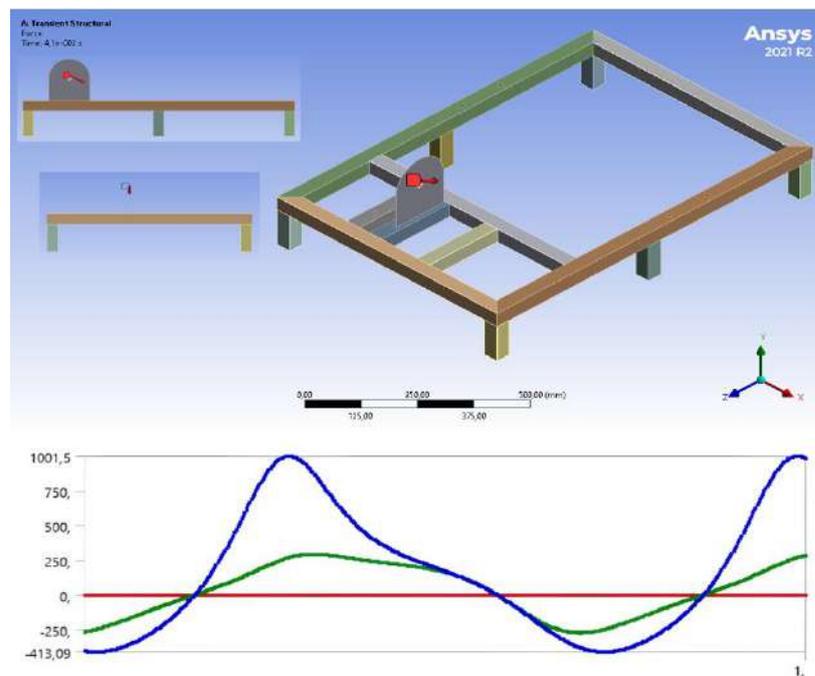
Luego de evaluar los puntos de anclaje 1, 2 y 4 en SAM, extraemos los valores en cada uno de los pasos o puntos durante 1 segundo que es el tiempo en donde el sistema completa un ciclo completo de trabajo, es decir para generar un recorrido de 510 puntos, cumpliendo una revolución y media por segundo. Los datos de fuerza y momento extraídos los importamos en una hoja de cálculo que se evidencia en el anexo 1 para posteriormente llevarlos a Ansys y generar las siguientes curvas de fuerzas y momento que se observan en la parte inferior de la ilustración.



**Ilustración 3-56:** Fuerzas transitorias remotas aplicadas en la estructura fija.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

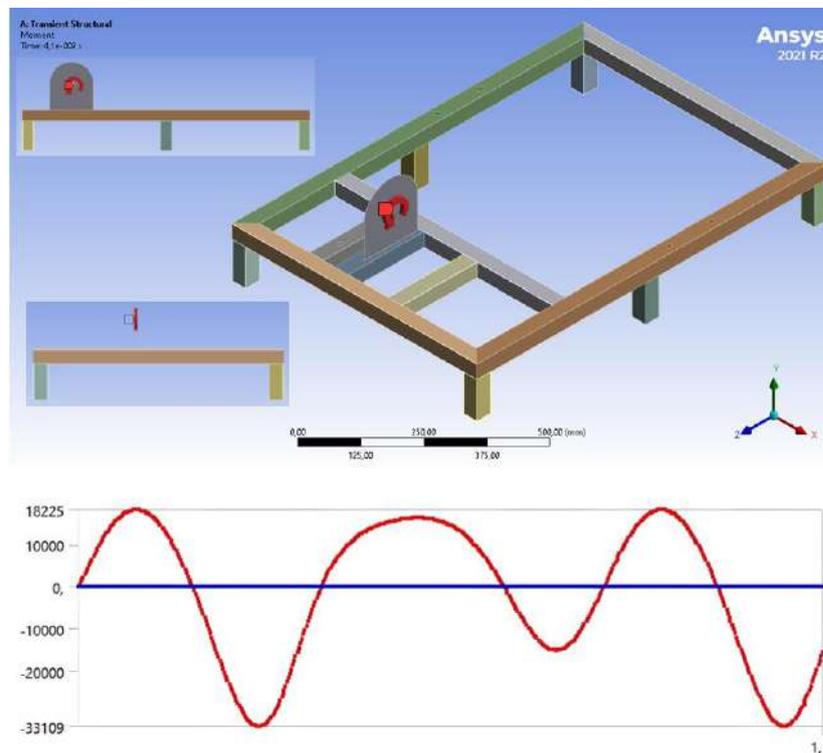
En la ilustración 3-56 se verifican las curvas representadas por las fuerzas aplicadas en el punto 1 en los 3 ejes de coordenadas que se observan en la parte inferior de la ilustración, datos que se obtuvieron del análisis previo en SAM, verificando que las curvas de fuerza de la presente ilustración coinciden con las de la ilustración 3-50, además de los datos reflejados en la parte inferior izquierda de la ilustración 3-56 se aproximan con la tabla 3-12.



**Ilustración 3-57:** Fuerza transitoria aplicada en la estructura fija.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-57 se verifican las curvas representadas por las fuerzas aplicadas en el punto 2 en los 3 ejes de coordenadas que se observan en la parte inferior de la ilustración, el punto 2 corresponde al punto de anclaje de la salida del actuador y la manivela. Los datos se obtuvieron del análisis previo en SAM, verificando que las curvas de fuerza de la presente ilustración coinciden con las de la ilustración 3-51, además de los datos reflejados en la parte inferior izquierda de la ilustración 3-56 se aproximan con la tabla 3-13.



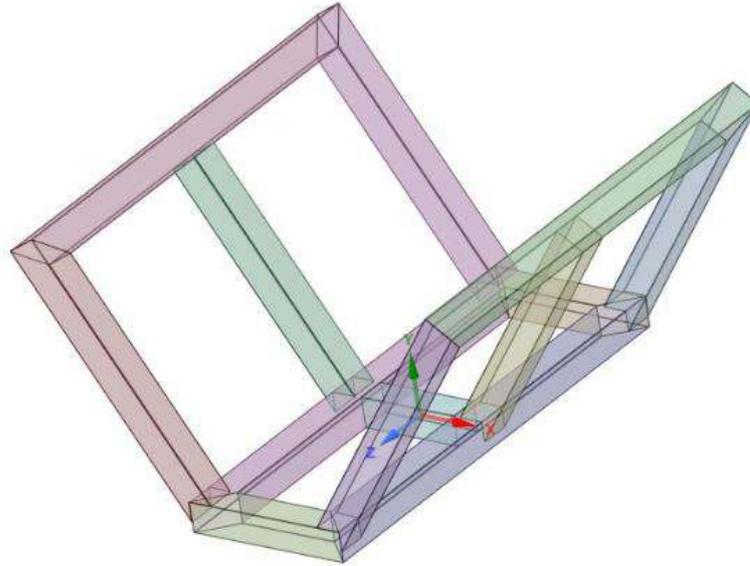
**Ilustración 3-58:** Momento torsor transitorio aplicado en la estructura fija.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-58 se verifican las curvas representadas por el momento torsor aplicado en el punto 2, datos que se obtuvieron del análisis previo en SAM, verificando que las curvas de momento torsor de la presente ilustración coinciden con las de la ilustración 3-52, además de los datos reflejados en la parte inferior izquierda de la ilustración 3-58 se aproximan con la tabla 3-14.

### 3.14.2. Análisis estructura móvil

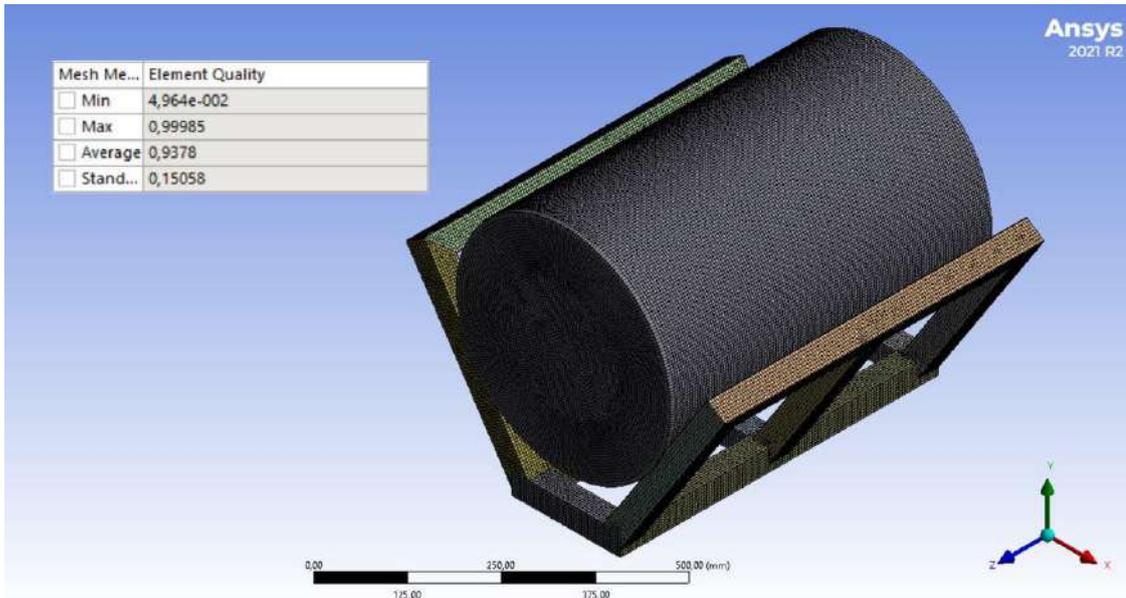
El modelado importado en formato STEP o estándar para el intercambio de datos de productos, fue modificado para trabajarlo como elemento tipo *shell* o superficie dentro del editor de modelos SpaceClaim.



**Ilustración 3-59:** Base móvil como elemento móvil en SpaceClaim.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

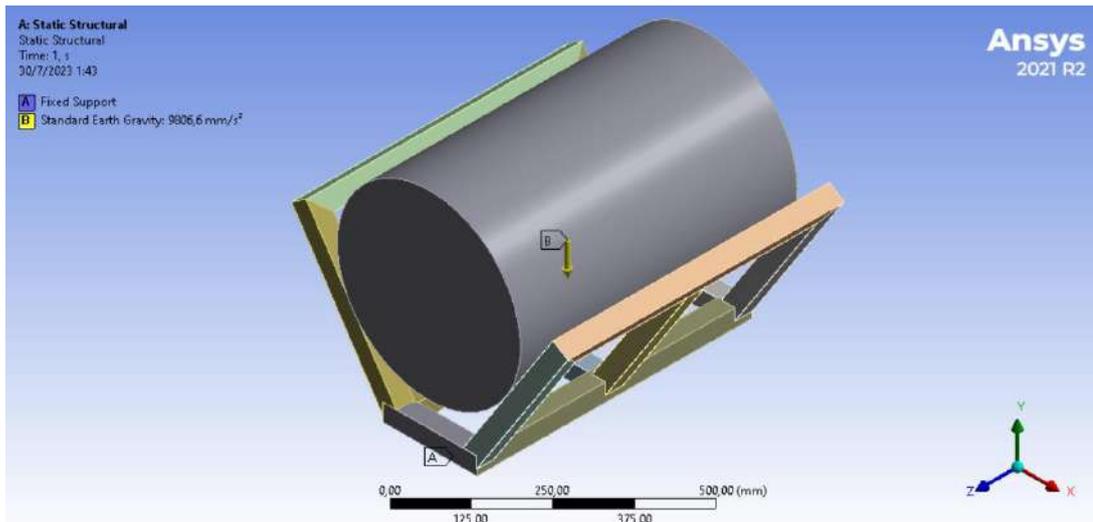
En el caso del mallado de la estructura móvil obtuvimos una calidad de malla promedio de 0.9378 como se evidencia en la ilustración 3-60, esto fue gracias al uso de elemento *shell* y el control de tamaño de malla global o *sizing* de 4,5mm.



**Ilustración 3-60:** Mallado y calidad de malla de la estructura móvil.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Para el análisis se consideró solo el peso del tanque de 63 kg por la acción de la gravedad frente a la estructura móvil y un anclaje o apoyo en las tres caras de la base de la estructura.

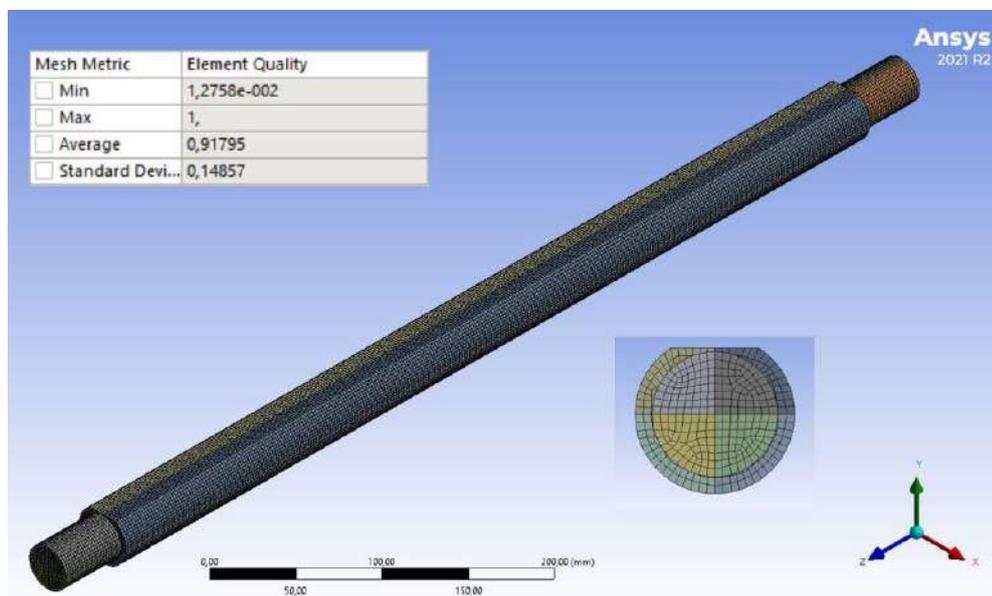


**Ilustración 3-61:** Fuerzas y apoyos aplicados en la estructura móvil.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

### 3.14.3. Análisis eje

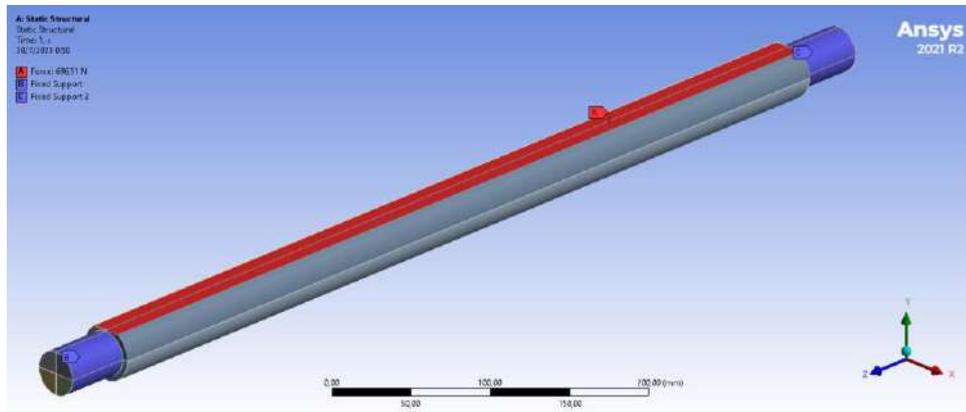
Se comprobó que la calidad de malla este dentro de los parámetros establecidos y aceptables en función al control de malla métrica *Element Quality* en donde nos sugieren trabajar con un valor promedio mayor al 0.7570, en el caso del mallado del eje obtuvimos una calidad de malla promedio de 0.91795 como se evidencia en la ilustración. Para el mallado se aplicó un afinamiento de malla a través del *hex dominant method* y *body sizing* de 2 mm además se dividió el eje en segmentos para mejorar la malla.



**Ilustración 3-62:** Mallado y calidad de malla del eje.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

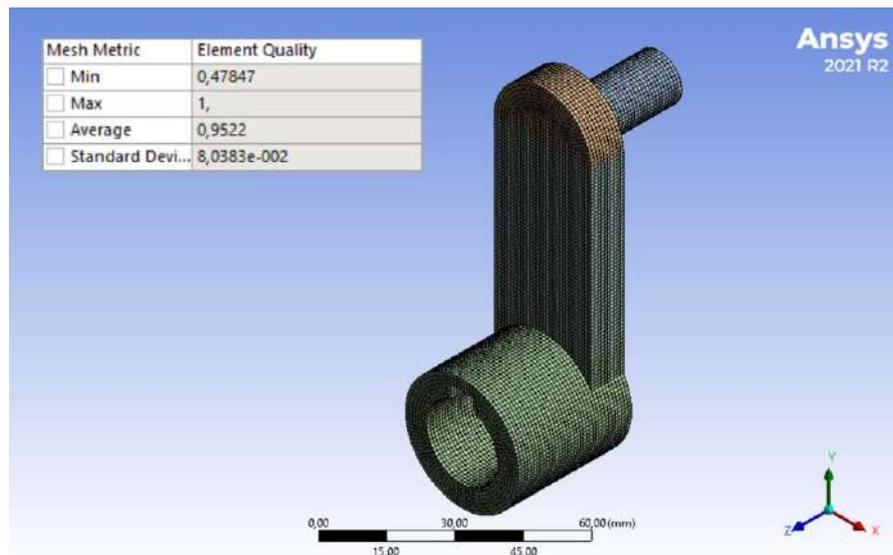
En la ilustración 3-63 se presentan las fuerzas que actúan sobre el eje en análisis, en donde se evidencia el anclaje de los extremos del eje con color azul y letras B y C, además la fuerza aplicada por acción del barril y peso de la estructura móvil, mostrado en color rojo y letra A.



**Ilustración 3-63:** Fuerzas y apoyos aplicados en el eje.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

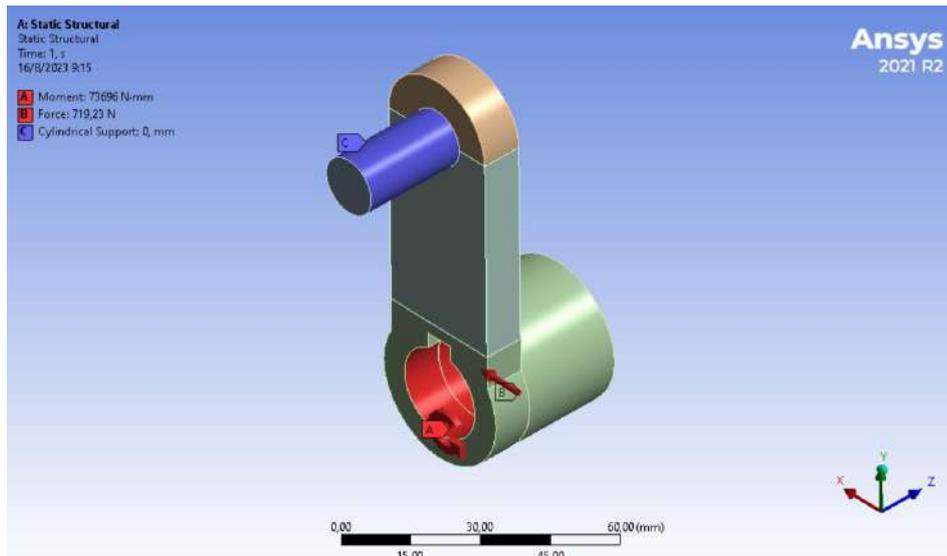
#### 3.14.4. Análisis elemento motriz o manivela



**Ilustración 3-64:** Mallado y calidad de malla del eslabón motriz.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Se verificó que la calidad de la malla estuviera dentro de los rangos establecidos y aceptables, siguiendo el control de calidad métrica de los elementos de la malla. Se recomienda mantener un valor promedio superior a 0.7570. En el caso del mallado del eje eslabón manivela, logramos una calidad de malla promedio de 0.9522, como se muestra en la figura. Para mejorar la malla, se aplicó un refinamiento mediante un ajuste de tamaño de cuerpo de 2 mm, además de dividir el eje en dos segmentos. Para el mallado se aplicó un afinamiento de malla a través del *body sizing* de 2 mm además se dividió el eje en dos segmentos para mejorar la malla.



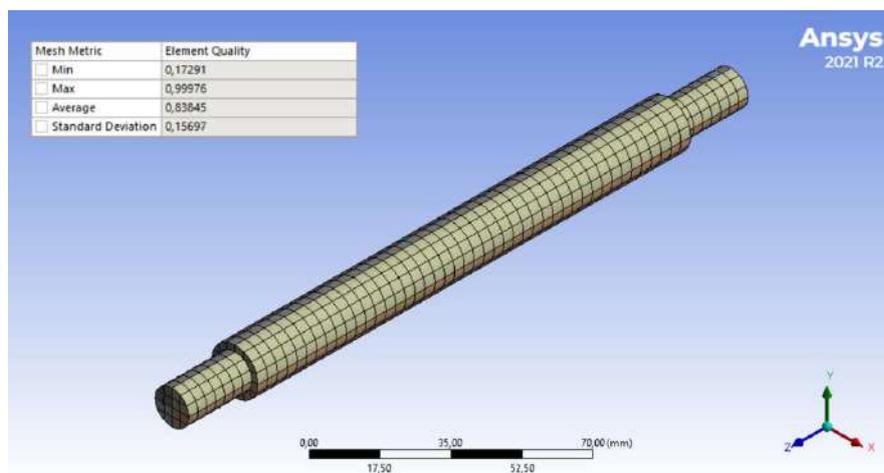
**Ilustración 3-65:** Fuerzas y apoyos aplicados en el eje.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-65 se presentan las fuerzas que actúan sobre el elemento motriz o manivela en análisis, en donde se evidencia el apoyo del elemento sobre el pasador motriz, este se muestra con color azul y letra C, además la fuerza y momento aplicados por acción del eje de salida del motorreductor se muestra en color rojo y letra A y B, respectivamente.

### 3.14.5. Análisis elemento conductor o biela

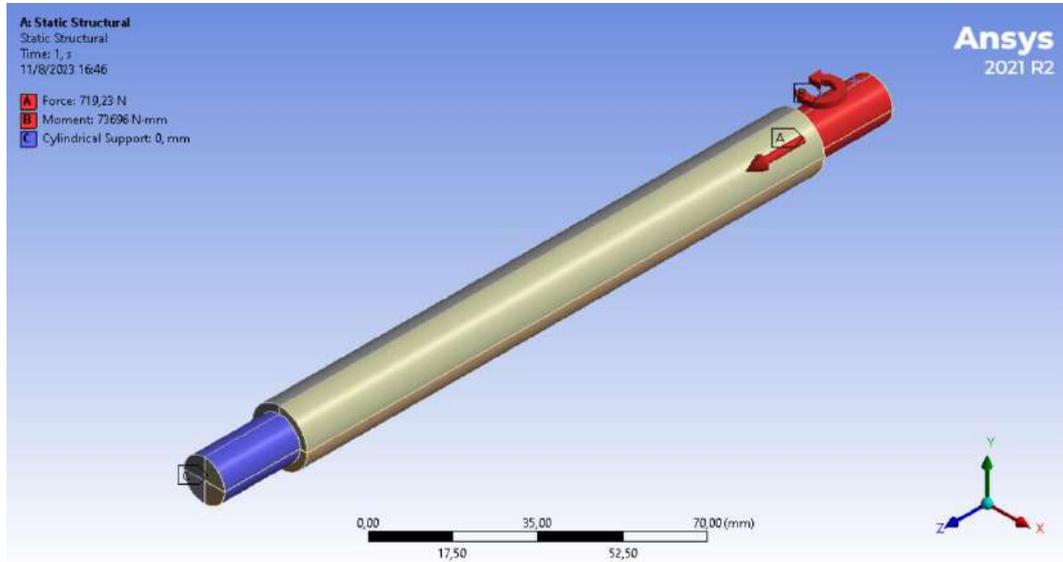
Se comprobó que la calidad de malla este dentro de los parámetros establecidos y aceptables en función al control de malla métrica *Element Quality* en donde nos sugieren trabajar con un valor promedio mayor al 0.7570, en el caso del mallado del eje obtuvimos una calidad de malla promedio de 0.83845 como se evidencia en la ilustración. Para el mallado se aplicó un afinamiento de malla a través del *body sizing* de 2 mm además se dividió el eje en dos segmentos para mejorar la malla.



**Ilustración 3-66:** Mallado y calidad de malla del elemento conductor o biela.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-67 se presentan las fuerzas que actúan sobre el elemento conductor o biela en análisis, en donde se evidencia el anclaje del extremo del elemento, el apoyo se muestra con color azul y letra C, además la fuerza y momento aplicados por acción la cabeza de articulación se muestra en color rojo y letra A y B, respectivamente.

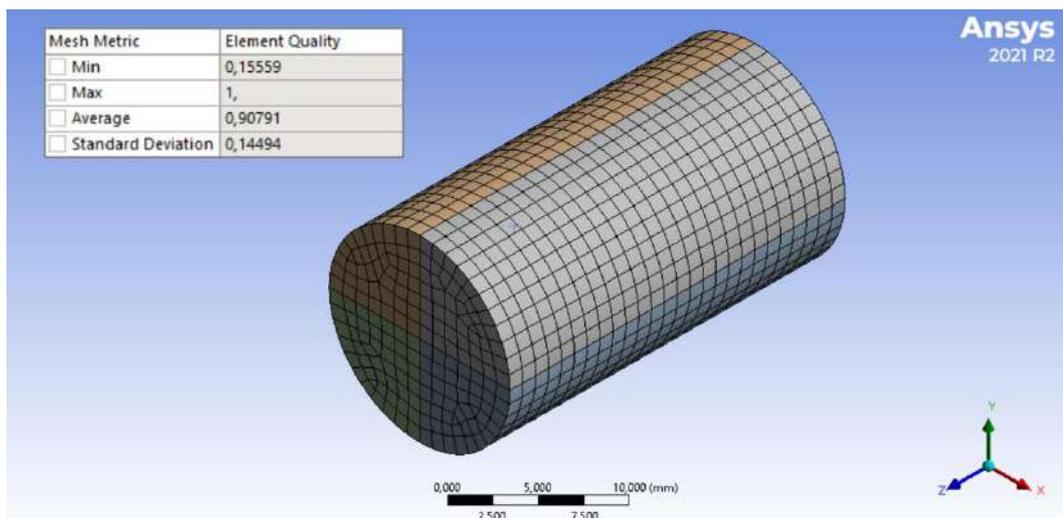


**Ilustración 3-67:** Fuerzas y apoyos aplicados al elemento conductor o biela.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

### 3.14.6. Análisis pasador del elemento motriz

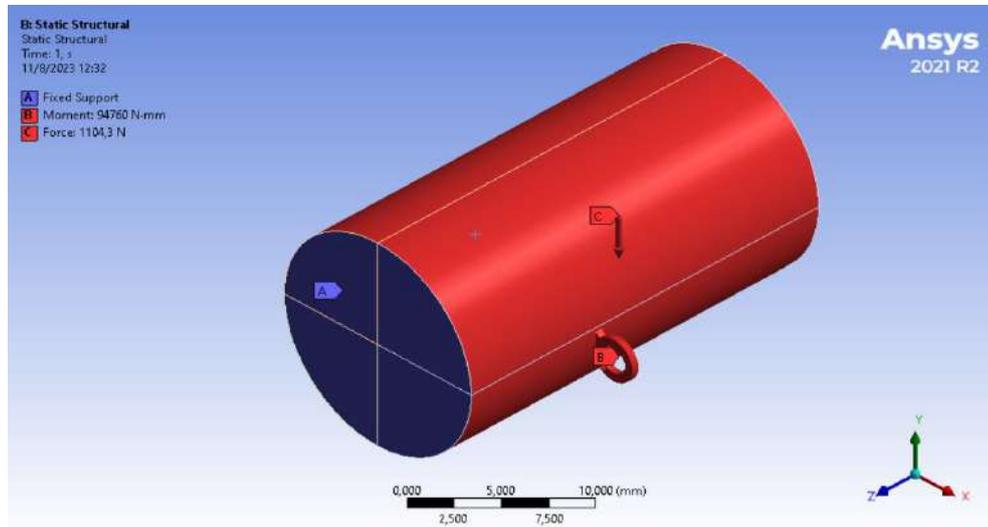
Para el análisis del pasador del elemento motriz o manivela comprobó que la calidad de malla este dentro de los parámetros establecidos y aceptables en función al control de malla métrica *Element Quality* en donde nos sugieren trabajar con un valor promedio mayor al 0.7570, en el caso del mallado del eje obtuvimos una calidad de malla promedio de 0,90791 como se evidencia en la ilustración.



**Ilustración 3-68:** Mallado y calidad de malla del pasador del elemento motriz.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-69 se presentan las fuerzas que actúan sobre el pasador en análisis, en donde se evidencia el anclaje de los extremos del pasador con color azul y letra A, además la fuerza y el torque aplicados por acción de la cabeza de articulación se muestran en color rojo y letras C y B respectivamente.

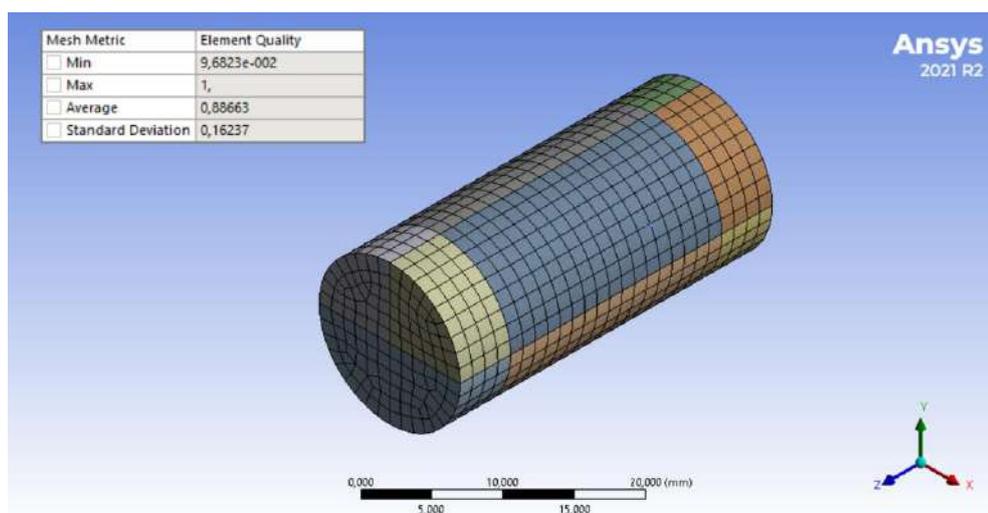


**Ilustración 3-69:** Fuerzas y apoyos aplicados en el pasador del elemento motriz.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

### 3.14.7. Análisis del pasador del elemento oscilador

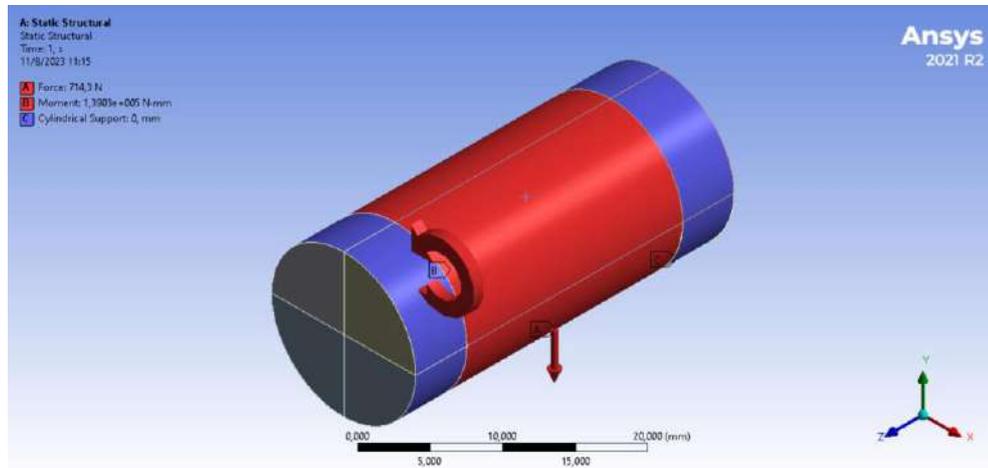
Para el análisis del pasador del elemento oscilador o balancín comprobó que la calidad de malla este dentro de los parámetros establecidos y aceptables en función al control de malla métrica *Element Quality* en donde nos sugieren trabajar con un valor promedio mayor al 0.7570, en el caso del mallado del eje obtuvimos una calidad de malla promedio de 0,88663 como se evidencia en la ilustración.



**Ilustración 3-70:** Mallado y calidad de malla del pasador del elemento oscilador.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

En la ilustración 3-71 se presentan las fuerzas que actúan sobre el pasador en análisis, en donde se evidencia el anclaje de los extremos del pasador con color azul y letra C, además la fuerza y el torque aplicados por acción de la cabeza de articulación se muestran en color rojo y letras C y A respectivamente.



**Ilustración 3-71:** Fuerzas y apoyos aplicados en el pasador del elemento oscilador.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

### 3.14.8. Métricas de calidad de malla

Existen diversas formas de medir la excelencia de una celda en una estructura de malla, y Ansys lleva a cabo varias evaluaciones geométricas en los componentes de la malla para establecer su excelencia. Estas evaluaciones, también conocidas como métricas, incluyen:

- Calidad del elemento
- Cálculo de la relación de aspecto para triángulos
- Cálculo de la relación de aspecto para cuadriláteros
- Proporción jacobiana
- Factor de deformación
- Desviación paralela
- Ángulo máximo de esquina
- Oblicuidad
- Calidad ortogonal

En este caso de estudio utilizaremos la métrica de calidad de malla de *element quality*, la evaluación de la calidad del elemento se deriva de la proporción entre el volumen y la suma de los valores cuadrados de las longitudes de los bordes, en el caso de elementos 2D de tipo cuadrilátero/triángulo. Para elementos 3D, se basa en la raíz cúbica de la suma de los valores cuadrados de las longitudes de los bordes.

El *element quality* representa una métrica compuesta de excelencia y varía dentro de un rango de 0 a 1, en donde 0 representa una métrica poco aceptable y 1 una métrica muy aceptable.

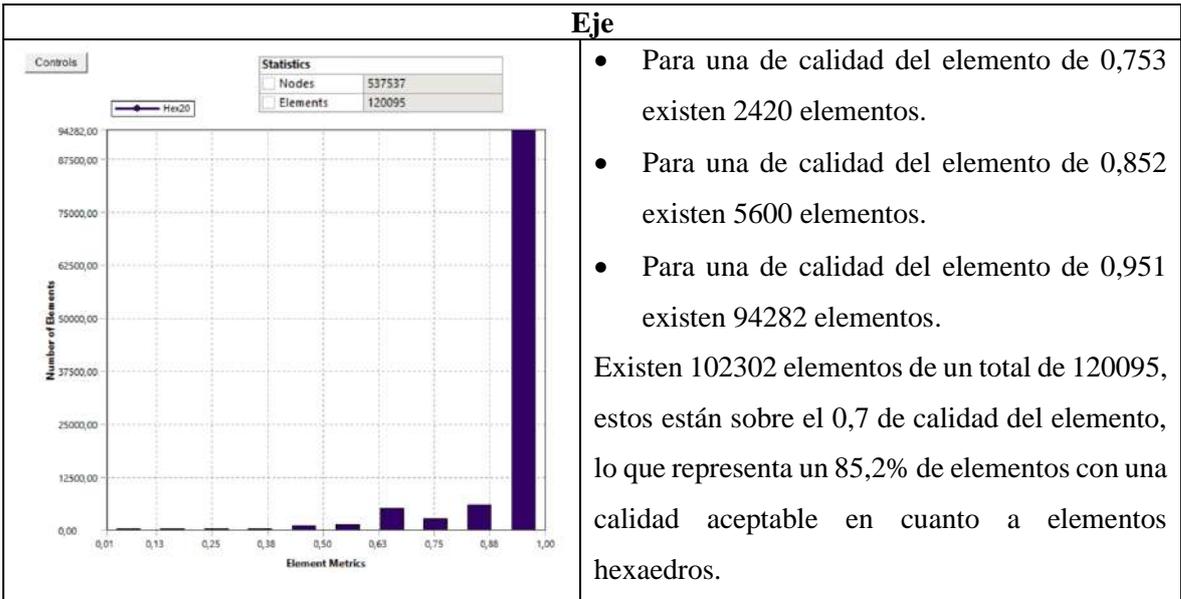
En la siguiente tabla se observan las métricas de calidad de malla para cada elemento que compone el sistema de agitación, presentando el valor total de nodos evaluados, asimismo el número de

nodos que superan los parámetros mínimos de aceptación, es decir 0,7 en cuanto a métrica de calidad de malla corresponde.

**Tabla 3-16:** Métricas de calidad de malla para los elementos componentes.

Gráfico de tipo de elementos	Interpretación
<b>Estructura fija</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para una de calidad del elemento de 0,704 existen 457 elementos.</li> <li>• Para una de calidad del elemento de 0,788 existen 607 elementos.</li> <li>• Para una de calidad del elemento de 0,873 existen 1720 elementos.</li> <li>• Para una de calidad del elemento de 0,958 existen 44110 elementos.</li> </ul> <p>Existen 46894 elementos de un total de 52778, estos están sobre el 0,7 de calidad del elemento, lo que representa un 88,8% de elementos con una calidad aceptable en cuanto a elementos cuadriláteros.</p>
<b>Estructura móvil</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para una de calidad del elemento de 0,762 existen 1820 elementos.</li> <li>• Para una de calidad del elemento de 0,857 existen 4680 elementos.</li> <li>• Para una de calidad del elemento de 0,952 existen 77216 elementos.</li> </ul> <p>Existen 83716 elementos de un total de 90057, estos están sobre el 0,7 de calidad del elemento, lo que representa un 92,9% de elementos con una calidad aceptable en cuanto a elementos cuadriláteros.</p>

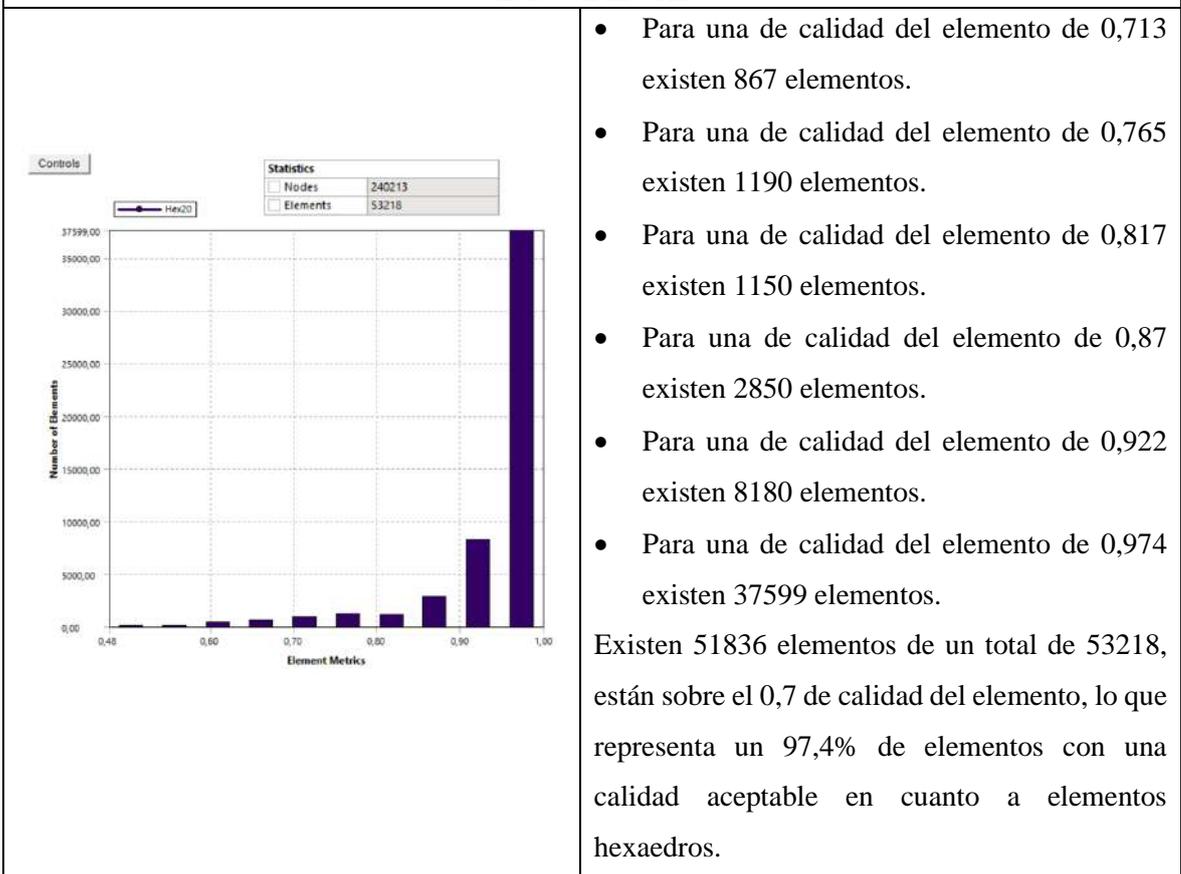
### Eje



- Para una de calidad del elemento de 0,753 existen 2420 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,852 existen 5600 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,951 existen 94282 elementos.

Existen 102302 elementos de un total de 120095, estos están sobre el 0,7 de calidad del elemento, lo que representa un 85,2% de elementos con una calidad aceptable en cuanto a elementos hexaedros.

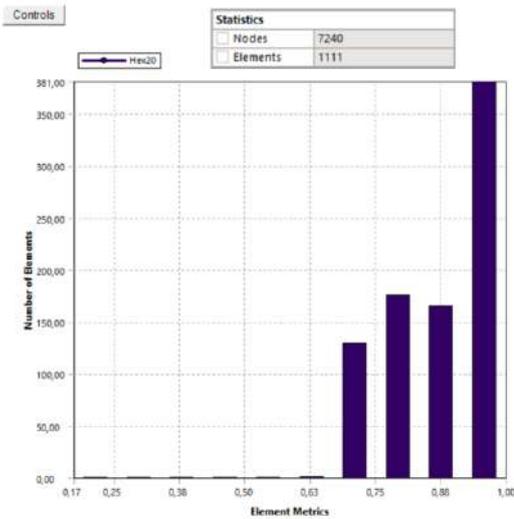
### Eslabón motriz



- Para una de calidad del elemento de 0,713 existen 867 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,765 existen 1190 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,817 existen 1150 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,87 existen 2850 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,922 existen 8180 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,974 existen 37599 elementos.

Existen 51836 elementos de un total de 53218, están sobre el 0,7 de calidad del elemento, lo que representa un 97,4% de elementos con una calidad aceptable en cuanto a elementos hexaedros.

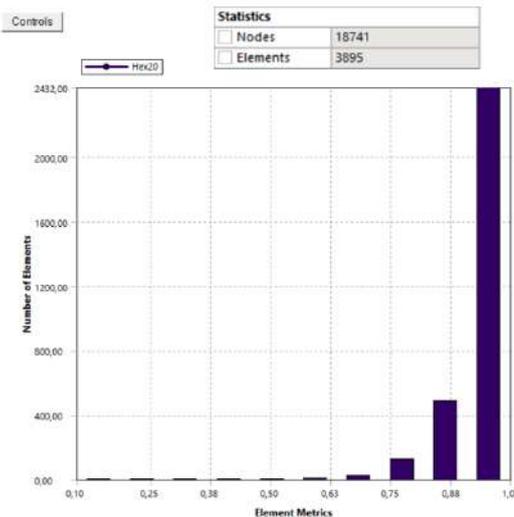
### Eslabón conector



- Para una de calidad del elemento de 0,71 existen 129 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,793 existen 175 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,876 existen 165 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,958 existen 381 elementos.

Existen 850 elementos de un total de 1111, estos están sobre el 0,7 de calidad del elemento, lo que representa un 76,5% de elementos con una calidad aceptable en cuanto a elementos hexaedros.

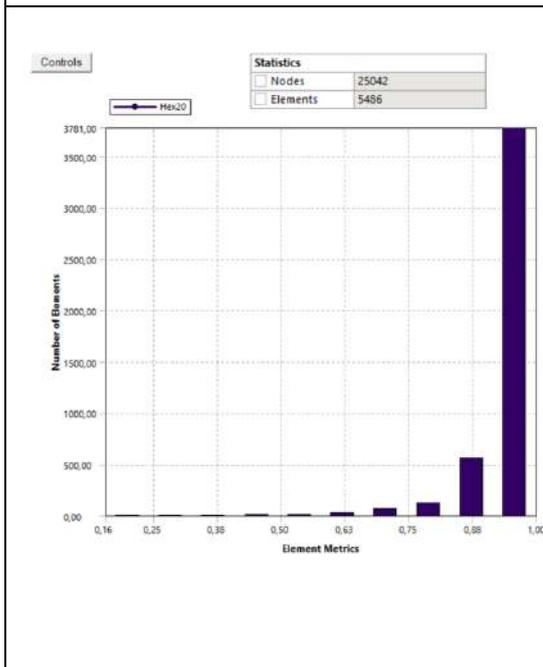
### Pasador oscilador



- Para una de calidad del elemento de 0,774 existen 124 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,865 existen 483 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,955 existen 2432 elementos.

Existen 3039 elementos de un total de 3895, estos están sobre el 0,7 de calidad del elemento, lo que representa un 78% de elementos con una calidad aceptable en cuanto a elementos hexaedros.

### Pasador del eslabón motriz



- Para una de calidad del elemento de 0,704 existen 66 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,789 existen 124 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,873 existen 557 elementos.
- Para una de calidad del elemento de 0,958 existen 3781 elementos.

Existen 4528 elementos de un total de 5486, están sobre el 0,7 de calidad del elemento, lo que representa un 82,5% de elementos con una calidad aceptable en cuanto a elementos hexaedros.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

### 3.15. Construcción y montaje de la máquina agitadora de barriles

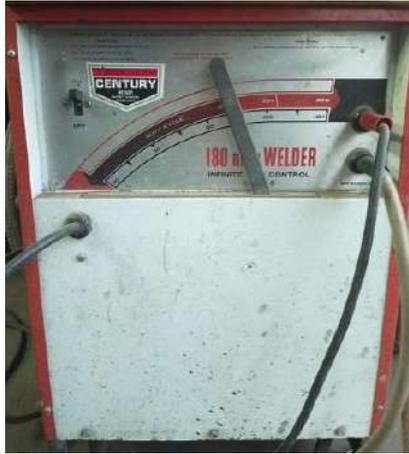
#### 3.15.1. Maquinas herramientas utilizadas



**Ilustración 3-72:** Amoladora

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Una amoladora es una herramienta eléctrica o manual utilizada para cortar, pulir, lijar o dar forma a diversos materiales, en este caso el perfil estructural AISI 1018 utilizado para las estructuras fija y móvil. Este se compone de un motor que hace girar un disco abrasivo o de corte a alta velocidad permitiendo el corte del material.



**Ilustración 3-73:** Soldadora SMAW Century

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

Utilizamos una soldadora eléctrica SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) marca Century de 115 voltios 15 amperios, para crear un arco eléctrico y fundir el material de trabajo con el material base, en este caso las estructuras fija y móvil, así crear la bancada y el sistema oscilatorio.



**Ilustración 3-74:** Corte de tubo de tubo en tronzadora.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

Una tronzadora mecánica es una máquina utilizada para realizar cortes precisos en materiales, generalmente en metal. En este caso la utilizamos para generar los cortes rectos y angulares de 45° en los perfiles.

### 3.15.2. *Materiales utilizados*



**Ilustración 3-75:** Tubo estructural cuadrado de acero negro.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

Se utilizó un tubo cuadrado estructural negro de dimensiones 40x2mm INEN 2415 para formar las estructuras de la maquina agitadora. Este perfil es uno de los más comerciales y versátiles para trabajos de construcción estructural.

### 3.15.3. Equipos



**Ilustración 3-76:** Motorreductor Sesame G12H 400G – 20.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Mediante la selección del motor se utilizará un motorreductor Sesame monofásico con una relación de transmisión de 20:1, este equipo cumple con el requerimiento de agitación para el proceso de carbonatación de la cerveza artesanal.

### 3.15.4. Construcción de la máquina agitadora de barriles

Los pasos que se siguieron para la construcción de la máquina agitadora de barriles son los que se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 3-17:** Procesos de construcción de la maquina agitadora de barriles.

Ilustración	Proceso
	<p>El primer paso de construcción fue generar los cortes en los perfiles estructurales, estos fueron de dos tipos, cortes rectos y angulares de 45° que permitieron formar los marcos de la estructura fija y móvil.</p>
	<p>Se verificó que los ángulos coincidan en sus ángulos y se comprueba la estabilidad y horizontalidad de los perfiles.</p>

	<p>Soldamos el primer marco estructural que corresponde a la bancada o estructura fija que será el soporte de todo el sistema, la soldadura fue mediante el equipo de suelda SMAW y un electrodo 6011.</p>
	<p>Una vez formado el marco de la bancada, se añadieron los travesaños que serán el soporte de los demás elementos y equipos mecánicos de la máquina agitadora, en especial del motor, el cual irá sujeto a través de pernos M12, así mismo servirá de apoyo para el montaje del tablero eléctrico del sistema.</p>
	<p>Una vez añadidos los travesaños se incorporaron los soportes en cada extremo de la estructura y para dar mayor estabilidad y rigidizar al sistema, añadimos dos soportes más en medio de la bancada.</p>
	<p>Se realizó el corte de la base de la estructura móvil que ira posteriormente sujeta mediante soldadura al eje que permitirá el movimiento oscilatorio del sistema, los cortes fueron realizados a 45° mediante la máquina tronzadora.</p>
	<p>Se realizó el corte de los extremos de la estructura móvil que ira posteriormente sujeta a la base anteriormente manufacturada, estos extremos serán los que soporten el peso neto del barril.</p>

	<p>Proceso de soldadura de la estructura móvil mediante soldadura SMAW</p>
	<p>Base de la estructura móvil soldada, previamente comprobada su estabilidad y horizontalidad de los perfiles para la posterior unión con el eje principal del sistema.</p>
	<p>Se unió la base y los extremos de soporte del barril correspondientes a la estructura móvil, mediante soldadura SMAW.</p>
	<p>Se mecanizó el eje de transmisión AISI 1018 para realizar el desbastado de los extremos del eje para el montaje a las chumaceras, además, el fresado de la parte superior del elemento, este se sujetó a la base de la estructura móvil mediante soldadura.</p>
	<p>Se taladró el eje AISI 4340 que pertenece al componente manivela, este proceso se realizó mediante torneado.</p>

	<p>Se mecanizo el eslabón correspondiente a la biela para que sea acoplado a las cabezas de articulación mediante el roscado previamente realizado.</p>
	<p>Finalmente se ensamblaron los elementos como chumaceras, motorreductor, ejes, eslabones, pasadores y perfilería en general para tener como resultado el mecanismo manivela-balancín que compone el sistema de agitación de barriles.</p>

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

### 3.16. Análisis de costos

En esta sección se detallan los valores de los costos de construcción, incluyendo el alquiler de las máquinas, herramientas y mano de obra que son necesarios para la construcción del agitador

#### 3.16.1. Costos directos

En la Tabla 30-3 se detallan los costos de los materiales que fueron necesarios para la construcción del prototipo, se incluye accesorios para ensamblaje y piezas de trabajo necesarios para procesos de construcción.

**Tabla 3-18:** Costos de materiales

Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario [USD]	Sub Total [USD]
1	Tubo cuadrado estructural negro (40x2 mm) (6 metros)	u	2	18,50	37,00
2	Eje AISI 1018 Ø 1 ½ (1 m)	kg	1	36,28	36,28
3	Eje AISI 4043 Ø 7/8 (50 cm)	kg	1	5,76	5,76
4	Chumaceras SKF SY 30 FM	u	2	34,46	68,92
5	Cabezas de articulación SKF SI 14 S	u	2	45,55	91,10
6	Motorreductor WEG monofásico de 0,5 hp y reductor de engranes ortogonales i:20 90 rpm	u	1	430,00	430
7	Planchas de acero ASTM A36 (300x240x2mm)	kg	1	6,00	6,00

8	Pernos (M12x1.25) SAE G2	u	4	0,50	2,00
9	Pernos (M16x1.25) SAE G2	u	4	0,35	1,40
10	Electrodos (E6011)	lb	2	3,10	6,20
11	Discos de corte 7 pulgadas	u	2	1,90	3,80
12	Discos de desbaste 7 pulgadas	u	2	2,50	5,00
13	Lija de disco	u	1	1,50	1,50
14	Pintura acrílica	lt	2	22,45	44,90
15	Señalética de seguridad	u	1	8,00	8,00
16	Cables sólido N° 12	m	4	0,75	3,00
17	Guarda motor A9S60332 Schneider	u	1	37,00	37,00
18	Botonera ON y OFF	u	1	5,85	5,85
<b>Sub Total</b>					793,71

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

**Tabla 3-19:** Costo de mano de obra.

Item	Descripción	Horas-Hombre	Costo x hora	Sub Total [USD]
1	Técnico del taller	40	3,25	130,00
2	Ayudante de construcción	35	2,00	70,00
<b>Sub Total</b>				200,00

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

**Tabla 3-20:** Costo de equipos y herramientas.

Item	Descripción	Horas-Equipo	Costo x hora	Sub Total [USD]
1	Soldadora	4	8,00	32,00
2	Torno	1	13,00	13,00
3	Fresadora	1	17,00	17,00
4	Amoladora	0,5	7,00	3,50
5	Compresor	1	5,00	5,00
6	Otras herramientas	15	0,50	7,50
<b>Sub Total</b>				78,00

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

**Tabla 3-21:** Costo de transporte.

Descripción	Costo [USD]
Transporte	50,00
<b>Sub Total</b>	50,00

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Una vez descrito los costos directos en las tablas anteriores se procede a sumar los totales parciales como se indica en la Tabla 3-22.

**Tabla 3-22:** Total, de costos directos.

<b>Descripción</b>	<b>Costo [USD]</b>
Costo de materiales	793,71
Costo de mano de obra	200,00
Costo de equipos y herramientas	78,00
Costo de transporte	50,00
<b>Total</b>	<b>1121,71</b>

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

### 3.16.2. *Costos indirectos*

Los costos indirectos tienen que ver con los costos ingenieriles, en donde se incluye diseño y fabricación. Además, se incluye un porcentaje en caso de que se generen imprevistos.

**Tabla 3-23:** Costos indirectos

<b>Descripción</b>	<b>Costo [USD]</b>
Costo ingenieril (10%)	112,00
Imprevistos	100,00
Utilidad	0
<b>Total</b>	<b>212,00</b>

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

### 3.16.3. *Costo total*

Corresponde a la suma de los costos directos e indirectos totales que se obtuvieron anteriormente

**Tabla 3-24:** Costo total de la máquina

<b>Descripción</b>	<b>Costo (USD)</b>
Costos directos	1121,71
Costos indirectos	212,00
<b>Total</b>	<b>1333,71</b>

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

## CAPÍTULO IV

### 4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para la interpretación de resultados de los análisis y simulaciones MEF de los elementos que conforman la máquina agitadora de barriles, se deben tomar en cuenta los parámetros de aceptación y validación los siguientes tres análisis:

- **Deformaciones admisibles:** los valores de deflexiones y deformaciones admisibles para árboles varían según la aplicación, el tipo de máquina, el material del árbol y otros factores específicos de diseño. Estos valores son establecidos por estándares de la industria y guías de diseño. A continuación, se indican algunos de estos valores permisibles:

**Tabla 4-1:** Deflexiones

Deformación	Aplicación	Deformación permisible*	
Deflexión (debida a flexión)	y	Deflexión máxima en árboles que soportan ruedas dentadas	$[y] = (0.0002...0.0003)L$ , donde $L$ es la distancia entre apoyos
		En el sitio de asiento de ruedas dentadas cilíndricas	$[y] = (0.01...0.03)m$ , donde $m$ es el módulo de la transmisión
		En el sitio de asiento de ruedas dentadas cónicas e hipoidales	$[y] = (0.005...0.007)m$ , donde $m$ es el módulo de la transmisión
		Deflexión máxima en los árboles de los motores asíncronos	$[y] = 0.1h$ , donde $h$ es la holgura entre el rotor y el estator
		Deflexión máxima en árboles de ventiladores	$[y] = (0.0003...0.0005)D$ , donde $D$ es el diámetro del rotor
Deflexión angular (debida a flexión)	$\varphi$	En el sitio de asiento de ruedas dentadas	$[\varphi] = 0.001$ rad
		En un cojinete	$[\varphi] = 0.001$ rad
		En el asiento de rodamientos de bolas	$[\varphi] = 0.01$ rad
		En el asiento de rodamientos de rodillos cilíndricos	$[\varphi] = 0.0025$ rad
		En el asiento de rodamientos cónicos	$[\varphi] = 0.0016$ rad
En el asiento de rodamientos esféricos	$[\varphi] = 0.05$ rad		
Ángulo de torsión (por unidad de longitud)	$\theta/L$	Grúas desplazables y portátiles	$[\theta/L] = 0.0045...0.006$ rad/m
		Husillos de tornos y taladros	$[\theta/L] = 0.00175$ rad/m
		Árboles medios de destinación general	$[\theta/L] = 0.009$ rad/m
		Árboles de cardanes de vehículos ( $d = 30...50$ mm)	$[\theta/L] = 0.005...0.007$ rad/m

Fuente: Vanegas, L., 2018

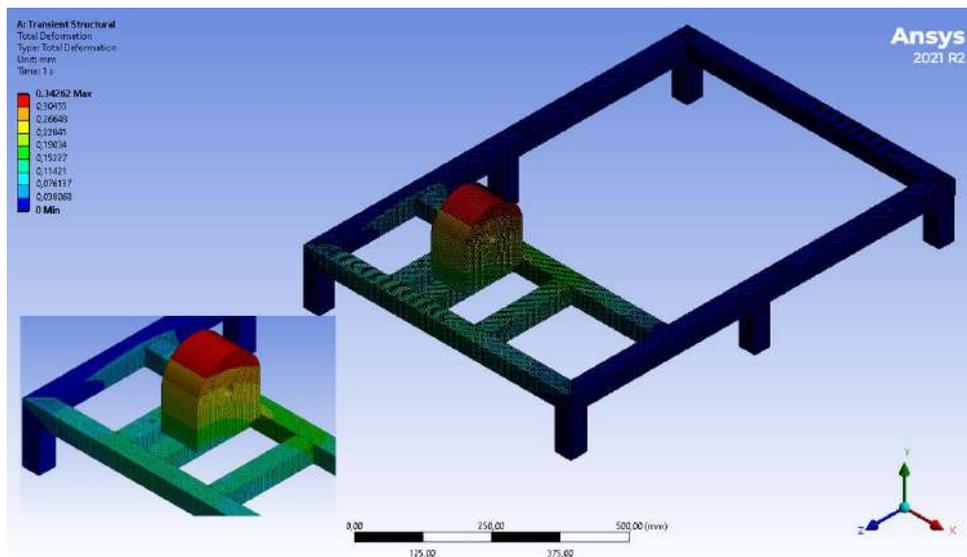
La norma AISC (American Institute of Steel Construction) es una referencia importante para el diseño de estructuras de acero. En la normativa AISC, se establecen límites para las deformaciones admisibles en elementos estructurales de acero, y una de las pautas comunes es la relación  $L/300$ , esta se refiere a la relación entre la longitud de un elemento estructural y la máxima deformación permisible en ese elemento. En otras palabras, se establece que la deformación máxima permitida en el elemento no debe exceder el valor de  $L/300$ , donde  $L$  es la longitud del elemento.

- **Esfuerzos admisibles:** el principio de diseño basado en la resistencia es el principio establece que, al diseñar estructuras y componentes mecánicos, los esfuerzos o cargas permisibles a los que se expondrá el material no deben superar el esfuerzo admisible o la resistencia última del material. (Budynas et al., 2012, págs. 258-263)

- **Factor de seguridad:** el factor de diseño, denotado como N, evalúa la seguridad de un componente frente a una carga. Generalmente, la resistencia del material del componente se divide por el factor de diseño para obtener la tensión de diseño, también llamada tensión permisible. Así, la tensión real en el componente debe ser menor que la tensión de diseño. La elección del factor de diseño depende del juicio del diseñador y se define en códigos de estándares como los de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos, entre otros. Las pautas sugeridas son: para materiales dúctiles, N varía de 1,25 a 2,0 para estructuras bajo cargas estáticas, de 2,0 a 2,5 para elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con confianza media y de 2,5 a 4,0 para estructuras o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con incertidumbre. Valores de N mayores a 4,0 indican cargas muy inciertas o seguridad adicional deseada. (Mott, R., 2006)

#### 4.1. Resultados de los análisis MEF de la estructura fija

##### 4.1.1. Deformaciones de la estructura fija

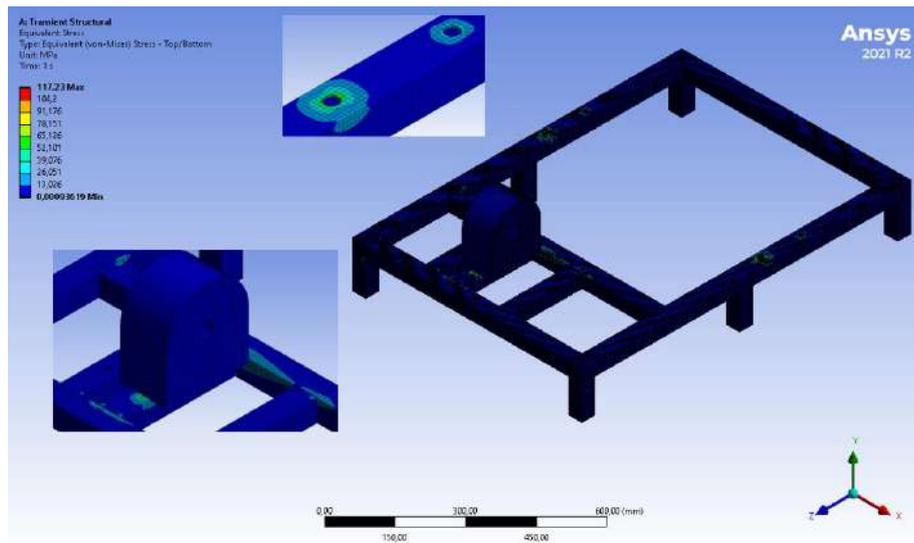


**Ilustración 4-1:** Análisis de deformaciones de la estructura fija

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

Mediante el análisis de elementos finitos se pudo determinar que la deformación en la estructura fija corresponde a un valor de 0.34922 mm debido a las propiedades mecánicas del acero estructural utilizado, en base al fundamento teórico la deformación permisible es de  $L/300$  es decir 2,3 mm, siendo así una deformación válida y aceptable como se indica en el apartado 4, tabla 4-1.

#### 4.1.2. Esfuerzos de la estructura fija

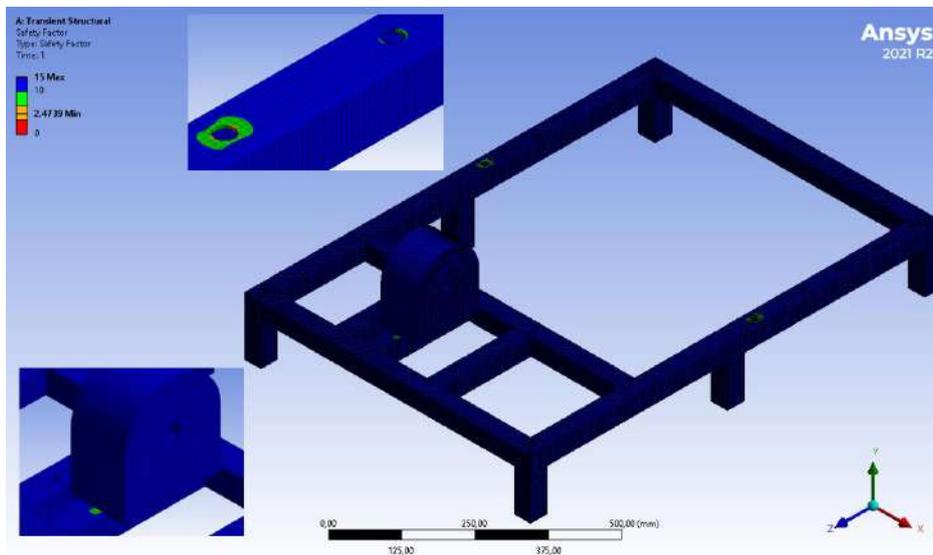


**Ilustración 4-2:** Análisis de esfuerzos de la estructura fija

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Dentro del análisis estático estructural de esfuerzos equivalentes de Von Mises se evidenciaron concentradores de esfuerzos en los puntos de montaje del motor, datando un máximo de 117.23 MPa de esfuerzos equivalentes sobre el elemento. Tomando como referencia el fundamento teórico, el esfuerzo generado no debe superar la resistencia última del material, en este caso 290 MPa, es decir se considera un esfuerzo equivalente válido y aceptable de acuerdo con lo indicado en el numeral 4.

#### 4.1.3. Factor de seguridad de la estructura fija



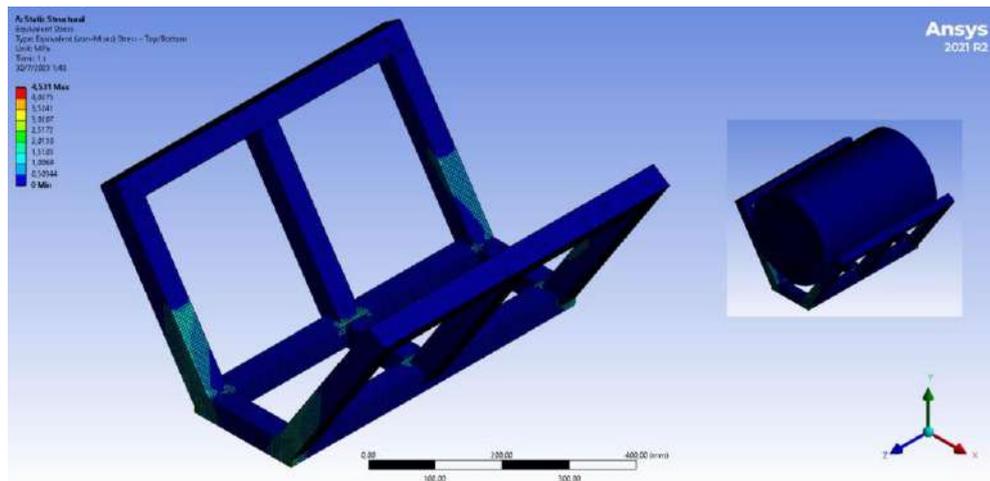
**Ilustración 4-3.** Factor de seguridad de la estructura fija.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

El factor de seguridad que se obtuvo para carga estática de acuerdo con el análisis MEF es de 2.4739, en otras palabras, la estructura fija no falla por esfuerzos de fluencia según el sustento teórico, en donde, no se debe estar por debajo del 1,5 para materiales dúctiles y estructuras bajo cargas estáticas. Este factor de seguridad comprende toda el área de soporte del sistema, en donde se comprobó que los esfuerzos son máximos como se evidencia con lo indicado en el numeral 4.

## 4.2. Resultados análisis MEF de la estructura móvil

### 4.2.1. Esfuerzos de la estructura móvil

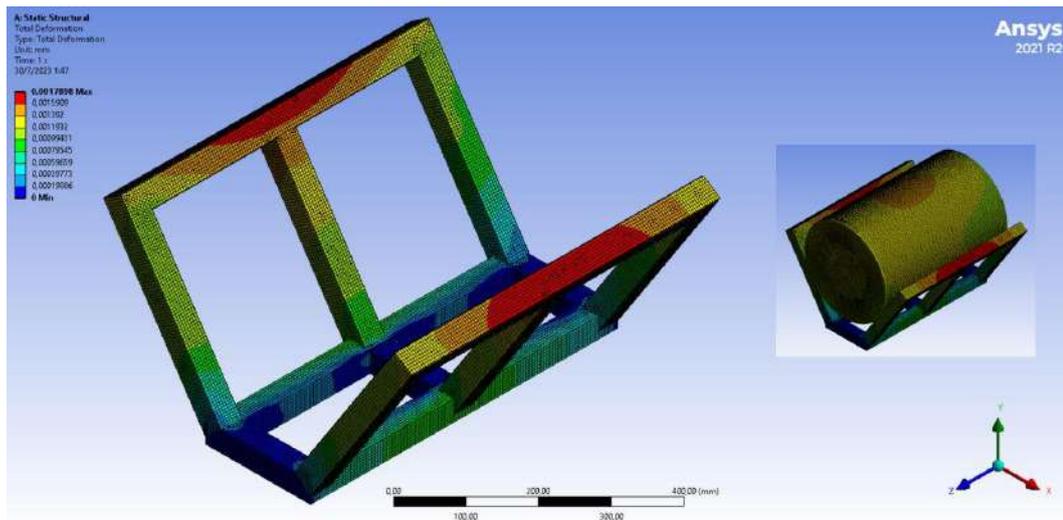


**Ilustración 4-4:** Esfuerzos en estructura móvil.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Dentro del análisis estático estructural de esfuerzos equivalentes de Von Mises se evidenciaron concentradores de esfuerzos en los puntos de soporte lateral del barril, datando un máximo de 4.531 MPa de esfuerzos equivalentes sobre la estructura móvil. Tomando como referencia el fundamento teórico, el esfuerzo generado no debe superar la resistencia última del material, en este caso 290 MPa, es decir se considera un esfuerzo equivalente válido y aceptable de acuerdo con lo indicado en el numeral 4.

#### 4.2.2. Deformaciones de la estructura móvil

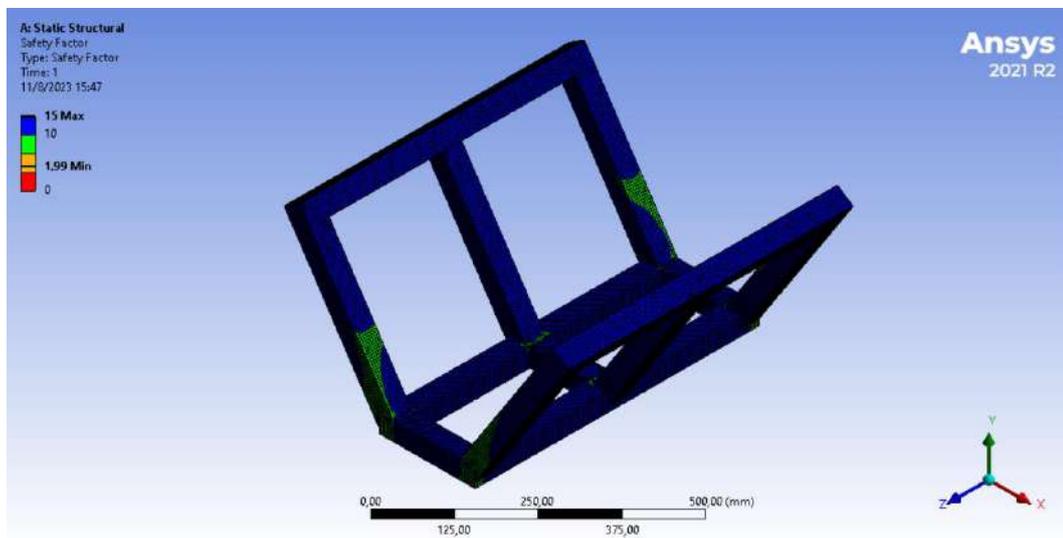


**Ilustración 4-5:** Deformaciones en estructura móvil.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Mediante el análisis de elementos finitos se pudo determinar que la deformación en la estructura móvil corresponde a un valor de 0.0017898 mm debido a las propiedades mecánicas del acero estructural utilizado, en base al fundamento teórico la deformación permisible es de  $L/300$  es decir 2 mm, siendo así una deformación válida y aceptable como se indica en el apartado 4, tabla 4-1.

#### 4.2.3. Factor de seguridad de la estructura móvil



**Ilustración 4-6:** Factor de seguridad en estructura móvil.

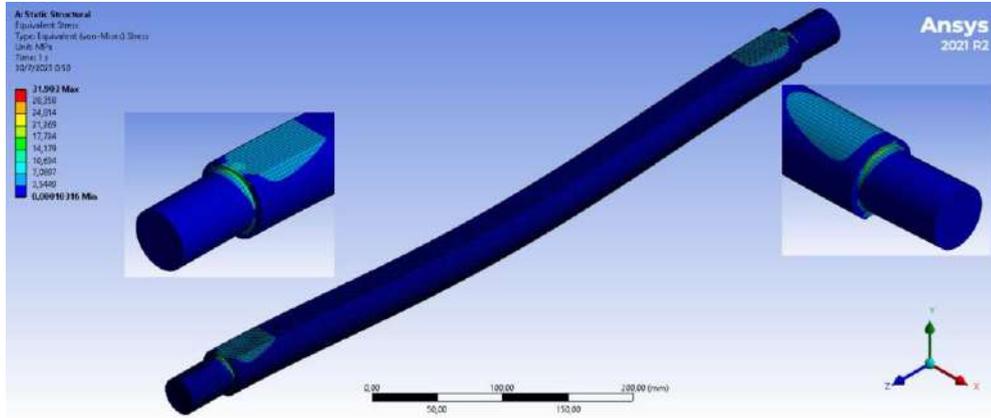
Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

El factor de seguridad que se obtuvo para carga estática de acuerdo con el análisis MEF es de 1,99, en otras palabras, la estructura móvil no falla por esfuerzos de fluencia según el sustento teórico, en donde, no se debe estar por debajo del 1,5 para materiales dúctiles y estructuras bajo

cargas estáticas. Este factor de seguridad comprende toda el área de soporte del barril lleno, en donde se comprobó que los esfuerzos son máximos como se evidencia con lo indicado en el numeral 4.

### 4.3. Resultados análisis MEF del eje

#### 4.3.1. Esfuerzos del eje

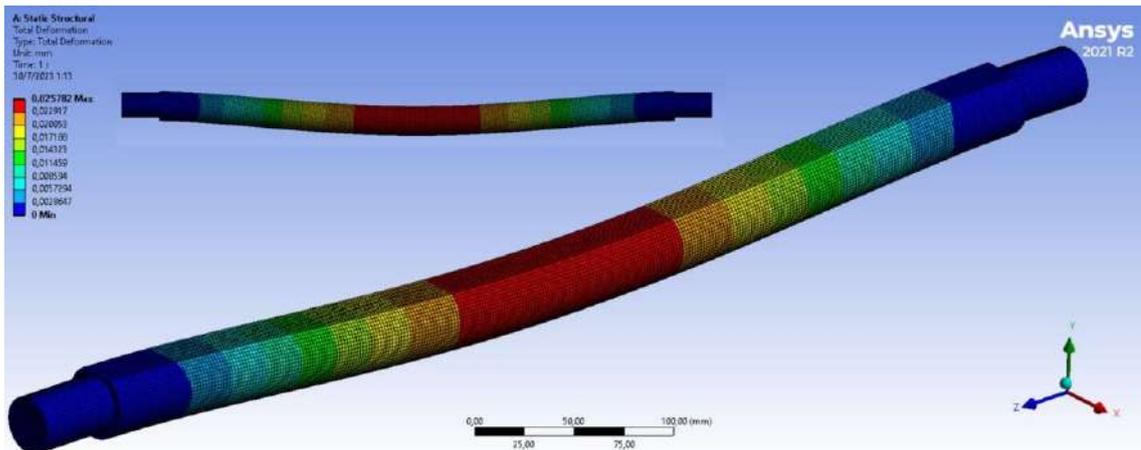


**Ilustración 4-7:** Esfuerzos en el eje.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Dentro del análisis estático estructural de esfuerzos equivalentes de Von Mises se evidenciaron concentradores de esfuerzos en los puntos de soporte extremo con las chumaceras, datando un máximo de 31,903 MPa de esfuerzos equivalentes sobre la estructura. Tomando como referencia el fundamento teórico, el esfuerzo generado no debe superar la resistencia última del material, en este caso 235 MPA, es decir se considera un esfuerzo equivalente válido y aceptable.

#### 4.3.2. Deformaciones del eje



**Ilustración 4-8:** Análisis de deformaciones del eje.

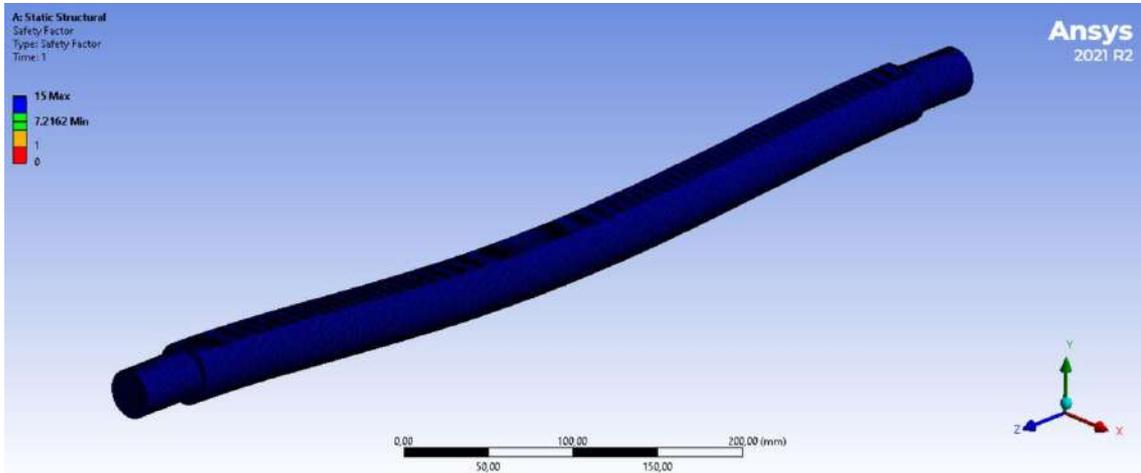
Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Mediante el análisis de elementos finitos se pudo determinar que la deformación en el eje principal y corresponde a un valor de 0.025782 mm debido a las propiedades mecánicas del material

utilizado, en base al fundamento teórico y siendo conservadores la deformación permisible es de  $0.0002 \cdot L$  es decir 0,14 mm, siendo así una deformación válida y aceptable como se indica en el apartado 4, tabla 4-1.

#### 4.3.3. Factor de seguridad del eje



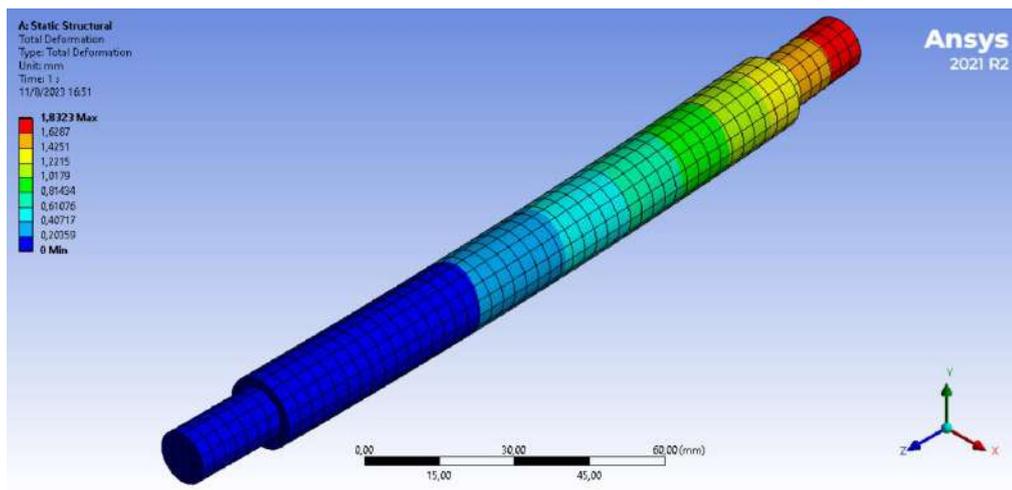
**Ilustración 4-9:** Análisis de factor de seguridad del eje.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

El factor de seguridad que se obtuvo de acuerdo con el análisis MEF es de 7,2162, en otras palabras, el eje principal no falla por esfuerzos de fluencia según el sustento teórico, en donde, no se debe estar por debajo de 2 para materiales dúctiles y elementos bajo cargas dinámicas. Este factor de seguridad comprende toda el área de anclaje con las chumaceras y la base superior plana como se evidencia con lo indicado en el numeral 4.

#### 4.4. Resultados análisis MEF del elemento conductor o biela

##### 4.4.1. Deformaciones del elemento conductor o biela

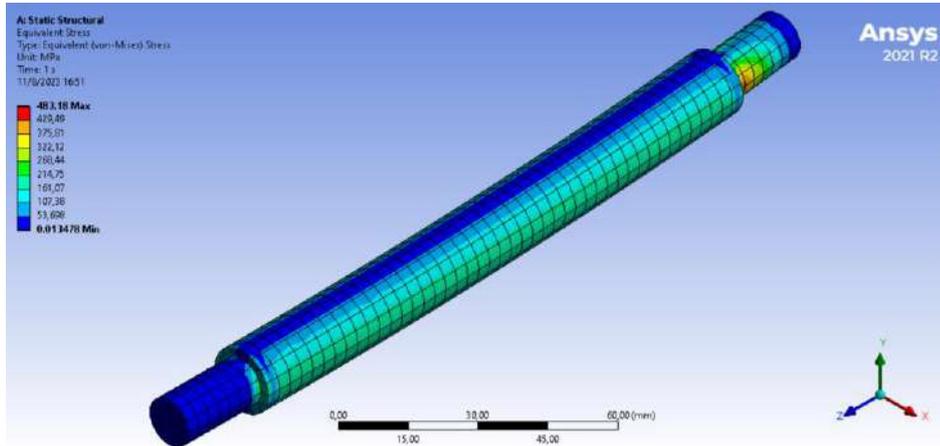


**Ilustración 4-10:** Análisis de deformaciones del elemento conductor o biela.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Mediante el análisis de elementos finitos se pudo determinar que la deformación en el elemento conductor o biela y corresponde a un valor de 1,8323 mm debido a las propiedades mecánicas del material utilizado, en base al fundamento teórico y siendo conservadores la deformación permisible es de  $0.0002 \cdot L$  es decir 0,038 mm, siendo así una deformación válida y aceptable como se indica en el apartado 4, tabla 4-1.

#### 4.4.2. Esfuerzos del elemento conductor o biela

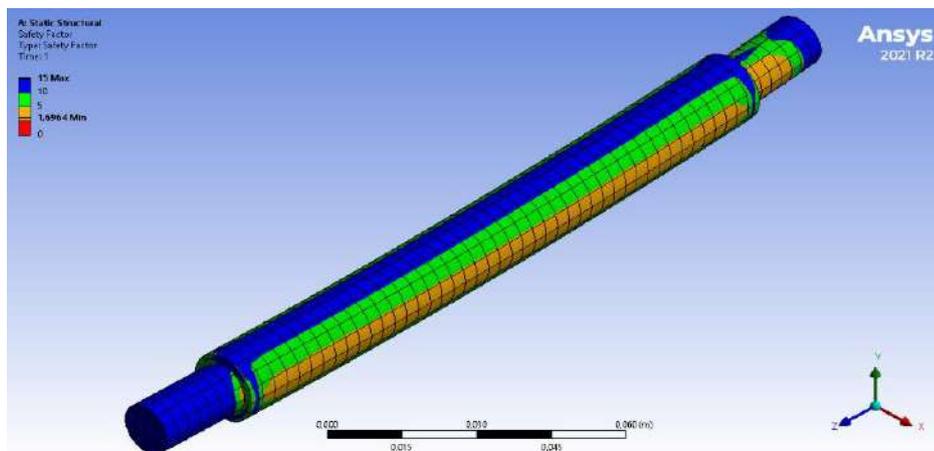


**Ilustración 4-11:** Análisis de esfuerzos equivalentes de Von Mises del elemento conductor o biela.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

Dentro del análisis estático estructural de esfuerzos equivalentes de Von Mises se evidenciaron concentradores de esfuerzos en los puntos de anclaje con las cabezas de articulación, datando un máximo de 483,18 MPa de esfuerzos equivalentes sobre la estructura. Tomando como referencia el fundamento teórico, el esfuerzo generado no debe superar la resistencia última del material, en este caso 710 MPa, es decir se considera un esfuerzo equivalente válido y aceptable de acuerdo con lo indicado en el numeral 4.

#### 4.4.3. Factor de seguridad del elemento conductor o biela



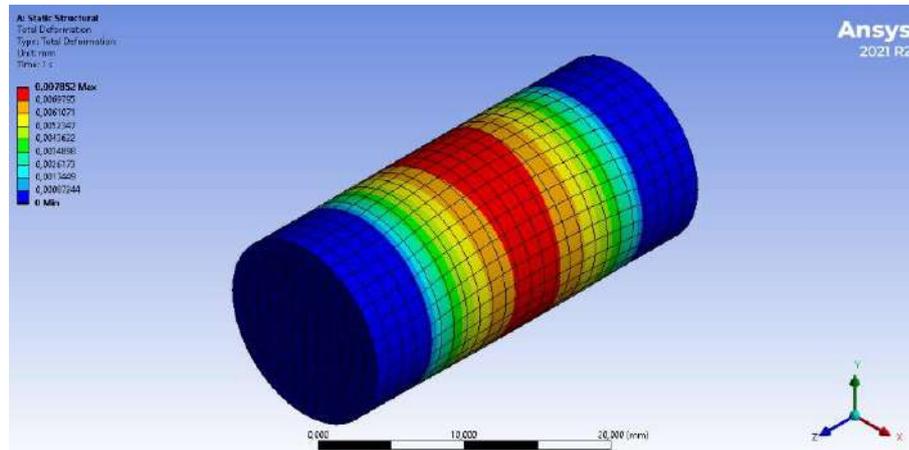
**Ilustración 4-12:** Análisis del factor de seguridad del elemento conductor o biela.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

El factor de seguridad que se obtuvo para carga estática de acuerdo con el análisis MEF es de 1,6964, en otras palabras, el elemento conductor o biela no falla por esfuerzos de fluencia según el sustento teórico, en donde, no se debe estar por debajo del 1,5 para materiales dúctiles y elementos bajo cargas estáticas como se evidencia con lo indicado en el numeral 4.

#### 4.5. Resultados análisis MEF del pasador del elemento motriz.

##### 4.5.1. Deformaciones del pasador elemento motriz o manivela.

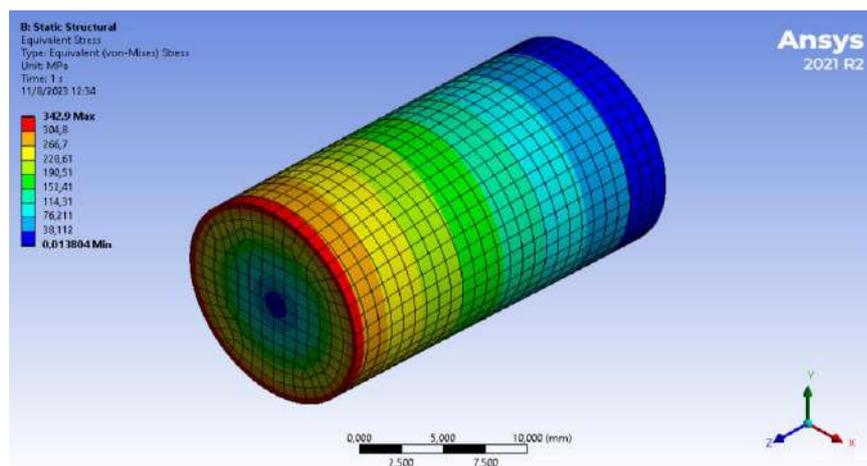


**Ilustración 4-13:** Análisis de deformaciones del pasador del elemento motriz.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Mediante el análisis de elementos finitos se pudo determinar que la deformación en el pasador del elemento motriz y corresponde a un valor de 0.007852 mm debido a las propiedades mecánicas del material utilizado, en base al fundamento teórico y siendo conservadores la deformación permisible es de  $0.0002 * L$  es decir 0,01 mm, siendo así una deformación válida y aceptable como se indica en el apartado 4, tabla 4-1.

##### 4.5.2. Esfuerzos del pasador del elemento motriz o manivela.

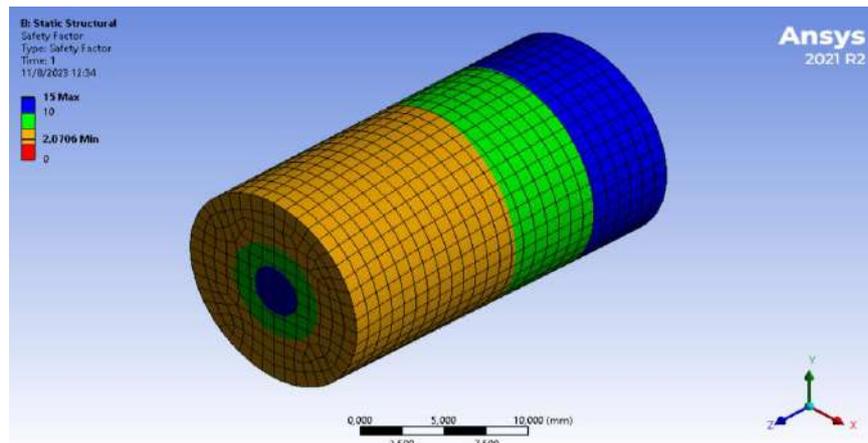


**Ilustración 4-14:** Análisis de esfuerzos equivalentes de Von Mises del pasador del elemento motriz.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Dentro del análisis estático estructural de esfuerzos equivalentes de Von Mises se evidenciaron concentradores de esfuerzos en los puntos de soporte extremo con la manivela, datando un máximo de 342,9 MPa de esfuerzos equivalentes sobre la estructura. Tomando como referencia el fundamento teórico, el esfuerzo generado no debe superar la resistencia última del material, en este caso 710 MPa, es decir se considera un esfuerzo equivalente válido y aceptable de acuerdo con lo indicado en el numeral 4.

#### 4.5.3. Factor de seguridad del pasador del elemento motriz o manivela.



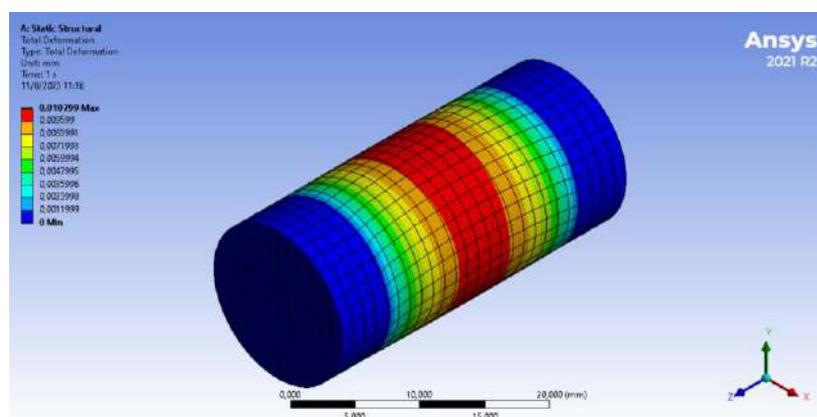
**Ilustración 4-15:** Análisis de factor de seguridad del pasador del elemento motriz.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

El factor de seguridad que se obtuvo para carga estática de acuerdo con el análisis MEF es de 2.0706, en otras palabras, el elemento pasador del eslabón motriz no falla por esfuerzos de fluencia según el sustento teórico, en donde, no se debe estar por debajo del 1,5 para materiales dúctiles y elementos bajo cargas estáticas. Este factor de seguridad comprende toda el área de soporte de las cabezas de articulación y eslabonamiento, en donde se comprobó que los esfuerzos son máximos.

#### 4.6. Resultados análisis MEF del pasador del elemento oscilador.

##### 4.6.1. Deformaciones del pasador del elemento oscilador o balancín.

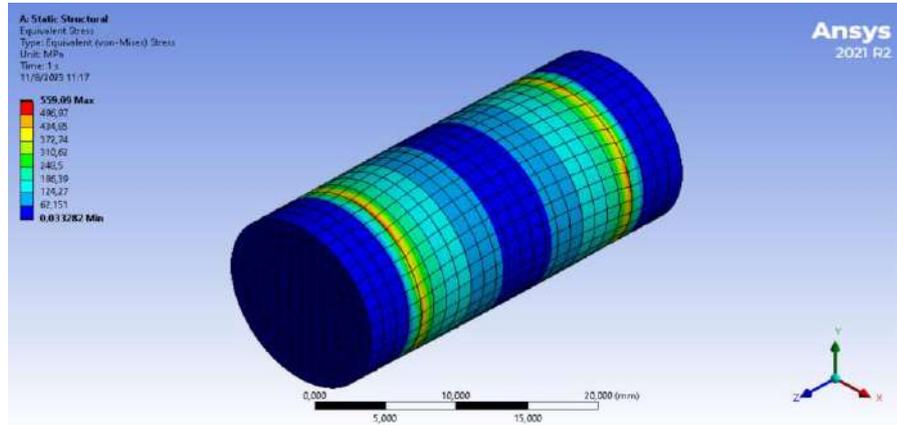


**Ilustración 4-16:** Análisis de deformaciones del pasador del elemento oscilador.

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

Mediante el análisis de elementos finitos se pudo determinar que la deformación en el pasador del elemento oscilador y corresponde a un valor de 0,010799 mm debido a las propiedades mecánicas del material utilizado, en base al fundamento teórico y siendo conservadores la deformación permisible es de  $0.0002 * L$  es decir 0,016 mm, siendo así una deformación válida y aceptable como se indica en el apartado 4, tabla 4-1.

#### 4.6.2. Esfuerzos del pasador del elemento oscilador o balancín.

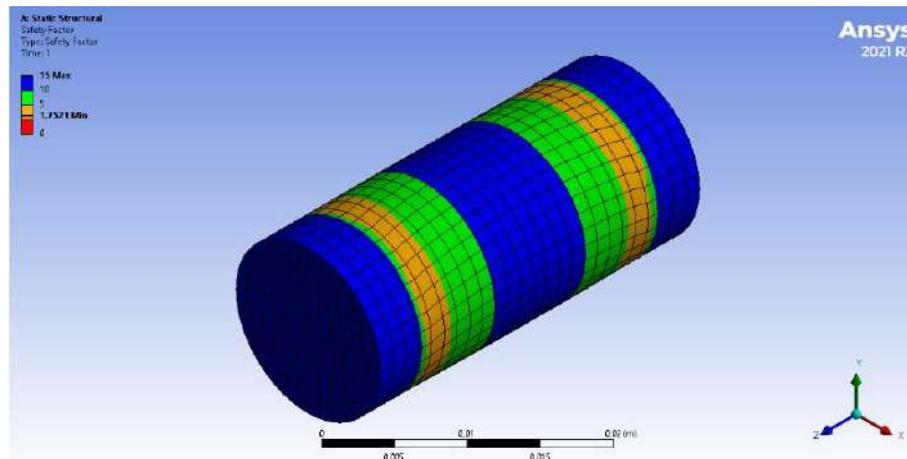


**Ilustración 4-17:** Análisis de esfuerzos equivalentes de Von Mises del pasador del elemento oscilador.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

Dentro del análisis estático estructural de esfuerzos equivalentes de Von Mises se evidenciaron concentradores de esfuerzos en los puntos de soporte extremo con el sujetador, datando un máximo de 559,09 MPa de esfuerzos equivalentes sobre la estructura. Tomando como referencia el fundamento teórico, el esfuerzo generado no debe superar la resistencia última del material, en este caso 710 MPa, es decir se considera un esfuerzo equivalente válido y aceptable de acuerdo con lo indicado en el numeral 4 como se evidencia con lo indicado en el numeral 4.

#### 4.6.3. Factor de seguridad del pasador del elemento oscilador o balancín.



**Ilustración 4-18:** Análisis de factor de seguridad del pasador del elemento oscilador.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

El factor de seguridad que se obtuvo para carga estática de acuerdo con el análisis MEF es de 1.7521, en otras palabras, el elemento pasador del eslabón oscilador no falla por esfuerzos de fluencia según el sustento teórico, en donde, no se debe estar por debajo del 1,5 para materiales dúctiles y elementos bajo cargas estáticas. Este factor de seguridad comprende toda el área de soporte de las cabezas de articulación y eslabonamiento, en donde se comprobó que los esfuerzos son máximos.

#### 4.7. Pruebas de carbonatación

Para realizar las pruebas de carbonatación de cerveza, escogemos un estilo de cerveza artesanal con el que vamos a trabajar, en este caso es una American Pale Ale que tiene una recomendación de inyección de entre 2,20 y 2,80 volúmenes de CO<sub>2</sub>, como se observa en la tabla 4-1.

**Tabla 4-2:** Selección de estilo de cerveza a carbonatar

Estilo de Cerveza	Volumen CO <sub>2</sub>		Estilo de Cerveza	Volumen CO <sub>2</sub>	
	Min	Max		Min	Max
American Amber Ale	2,20	2,80	English Dark Mild	1,30	2,00
American Brown	1,50	2,50	English Light Mild	1,30	2,00
American Dark Lager	2,50	2,70	English Old/StrongAle	1,50	2,30
American Lager	2,60	2,70	English Ordinary Bitter	0,75	1,30
American Light Lager	2,60	2,60	English Pale Ale	1,50	2,30
American Pale Ale	2,20	2,80	English Strong (ESB) Bitter	0,75	1,30
American Pilsener	2,60	2,70	Flanders Brown	1,90	2,50
American Premium Lager	2,60	2,70	Foreign-Style Stout	2,30	2,60
American Wheat	2,30	2,60	German Pilsener	2,50	2,50
Bamberg Rauchbier	2,20	2,60	Helles Bock	2,20	2,70

Fuente: Rincón del Cervecer, 2018

La temperatura inicial de las pruebas será de 14°C, tomando en cuenta que durante el tiempo de agitación el barril incrementará su temperatura en aproximadamente 2°C hasta finalizar el proceso, de esta forma mediante la tabla 4-2 verificamos que la presión de inyección al barril según el estilo y temperatura es de 1,77 bares o 25,67 psi.

**Tabla 4-3:** Selección de presión de inyección en relación con la temperatura - volúmenes de CO<sub>2</sub>

		Temperatura °C															
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Carbonatación Volúmenes CO <sub>2</sub>	1.5			0.08	0.16	0.25	0.34	0.43	0.53	0.62	0.72	0.82	0.92	1.03	1.13	1.24	1.35
	1.6		0.06	0.15	0.24	0.34	0.43	0.52	0.62	0.72	0.82	0.93	1.04	1.14	1.26	1.37	1.48
	1.7	0.04	0.13	0.22	0.32	0.42	0.51	0.61	0.72	0.82	0.92	1.04	1.15	1.26	1.38	1.49	1.61
	1.8	0.11	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.71	0.81	0.92	1.03	1.15	1.26	1.38	1.50	1.62	1.74
	1.9	0.17	0.27	0.37	0.48	0.58	0.69	0.80	0.91	1.02	1.14	1.26	1.38	1.50	1.62	1.75	1.87
	2.0	0.24	0.34	0.45	0.56	0.66	0.78	0.89	1.01	1.12	1.24	1.36	1.49	1.61	1.74	1.87	2.00
	2.1	0.31	0.41	0.52	0.63	0.75	0.86	0.98	1.10	1.22	1.35	1.47	1.60	1.73	1.86	2.00	2.13
	2.2	0.37	0.48	0.60	0.71	0.83	0.95	1.07	1.20	1.32	1.45	1.58	1.71	1.85	1.99	2.12	2.26
	2.3	0.44	0.55	0.67	0.79	0.91	1.04	1.16	1.29	1.42	1.56	1.69	1.83	1.97	2.11	2.25	2.39
	2.4	0.50	0.62	0.74	0.87	1.00	1.12	1.25	1.39	1.52	1.66	1.80	1.94	2.08	2.23	2.38	2.52
	2.5	0.57	0.69	0.82	0.95	1.08	1.21	1.35	1.48	1.62	1.76	1.91	2.05	2.20	2.35	2.50	2.65
	2.6	0.63	0.76	0.89	1.02	1.16	1.30	1.44	1.58	1.72	1.87	2.01	2.16	2.32	2.47	2.63	2.78
	2.7	0.70	0.83	0.97	1.10	1.24	1.38	1.53	1.67	1.82	1.97	2.12	2.28	2.43	2.59	2.75	2.91
	2.8	0.76	0.90	1.04	1.18	1.32	1.47	1.62	1.77	1.92	2.07	2.23	2.39	2.55	2.71	2.88	3.04
	2.9	0.83	0.97	1.11	1.26	1.41	1.56	1.71	1.86	2.02	2.18	2.34	2.50	2.67	2.83	3.00	3.17
3.0	0.89	1.04	1.19	1.34	1.49	1.64	1.80	1.96	2.12	2.28	2.45	2.61	2.78	2.95	3.13	3.30	

Fuente: Henselbier, 2016

La temperatura del barril es medida mediante un termómetro adhesivo LCD colocado directamente en la pared del keg.



**Ilustración 4-19:** Temperatura del barril.

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

Conociendo que se necesita una presión de setado de 1,77 bares o 25,67 psi, se regula directamente en la válvula de acción del regulador de presión del tanque de CO<sub>2</sub>, en el manómetro verificamos que la presión sea la correcta y abrimos las líneas de gas para empezar el proceso de agitación.



**Ilustración 4-20:** Inyección de CO<sub>2</sub>

**Realizado por:** Minda, R.; Ramos, P. 2023

A continuación, se detallan las pruebas de carbonatación forzada realizadas durante cuatro diferentes tiempos y porcentajes de líquido dentro del barril:

**Tabla 4-4:** Resultados obtenidos en las pruebas de carbonatación forzada.

Tiempo (min)	Presión resultante (psi)	Porcentaje de líquido	Ilustración	Observaciones
20	25	25		<p>En la prueba de carbonatación forzada con el barril a su 25% de capacidad, se evidenciaron ingresos óptimos de gas carbónico, teniendo un máximo de 25 psi disueltos en la cerveza tras dejar reposar el barril, lo que produjo una carbonatación adecuada en el rango de tiempo establecido de 20 minutos, debido a que, por existir mayor espacio ocupado por el CO<sub>2</sub>, la disolución es más efectiva.</p>
	22	50		<p>En la prueba de carbonatación forzada con el barril a su 50% de capacidad, se evidenciaron ingresos óptimos de gas carbónico, teniendo un máximo de 22 psi disueltos en la cerveza tras dejar reposar el barril, lo que produjo una carbonatación adecuada en el rango de tiempo establecido de 20 minutos, debido a que, por existir la mitad de espacio ocupado por el CO<sub>2</sub>, la disolución es muy efectiva.</p>

	21	75		<p>En la prueba de carbonatación forzada con el barril a su 75% de capacidad, se evidenciaron ingresos medios-altos de gas carbónico, teniendo un máximo de 21 psi disueltos en la cerveza tras dejar reposar el barril, lo que produjo una carbonatación adecuada en el rango de tiempo establecido de 20 minutos, debido a que se tiene el 25% de espacio ocupado por el CO<sub>2</sub>, la disolución es efectiva y se conserva dentro de los rangos de inyección sugeridos según el estilo.</p>
	18	100		<p>En la prueba de carbonatación forzada con el barril a su 100% de capacidad, se evidenciaron ingresos medios-altos de gas carbónico, teniendo un máximo de 18 psi disueltos en la cerveza tras dejar reposar el barril, lo que produjo una carbonatación adecuada en el rango de tiempo establecido de 20 minutos, la disolución es efectiva y se conserva dentro de los rangos de inyección sugeridos según el estilo.</p>

25	25	25		<p>En la prueba de carbonatación forzada con el barril a su 25% de capacidad, se evidenciaron ingresos óptimos de gas carbónico, teniendo un máximo de 25 psi disueltos en la cerveza tras dejar reposar el barril, lo que produjo una carbonatación adecuada en el rango de tiempo establecido de 25 minutos, debido a que, por existir mayor espacio ocupado por el CO<sub>2</sub>, la disolución es más efectiva.</p>
	24	50		<p>En la prueba de carbonatación forzada con el barril a su 50% de capacidad, se evidenciaron ingresos óptimos de gas carbónico, teniendo un máximo de 24 psi disueltos en la cerveza tras dejar reposar el barril, lo que produjo una carbonatación adecuada en el rango de tiempo establecido de 25 minutos, debido a que, por existir la mitad de espacio ocupado por el CO<sub>2</sub>, la disolución es muy efectiva.</p>
	22	75		<p>En la prueba de carbonatación forzada con el barril a su 75% de capacidad, se evidenciaron ingresos medios-altos de gas carbónico, teniendo un máximo de 22 psi disueltos en la cerveza tras dejar reposar el</p>

				<p>barril, lo que produjo una carbonatación adecuada en el rango de tiempo establecido de 25 minutos, debido a que se tiene el 25% de espacio ocupado por el CO<sub>2</sub>, la disolución es efectiva y se conserva dentro de los rangos de inyección sugeridos según el estilo.</p>
	20	100		<p>En la prueba de carbonatación forzada con el barril a su 100% de capacidad, se evidenciaron ingresos medios-altos de gas carbónico, teniendo un máximo de 20 psi disueltos en la cerveza tras dejar reposar el barril, lo que produjo una carbonatación adecuada en el rango de tiempo establecido de 25 minutos, la disolución es efectiva y se conserva dentro de los rangos de inyección sugeridos según el estilo.</p>
30	25	25		<p>En la prueba de carbonatación forzada con el barril a su 25% de capacidad, se evidenciaron ingresos óptimos de gas carbónico, teniendo un máximo de 25 psi disueltos en la cerveza tras dejar reposar el barril, lo que produjo una carbonatación adecuada en el</p>

			<p>rango de tiempo establecido de 30 minutos, debido a que, por existir mayor espacio ocupado por el CO<sub>2</sub>, la disolución es más efectiva.</p>
25	50		<p>En la prueba de carbonatación forzada con el barril a su 50% de capacidad, se evidenciaron ingresos óptimos de gas carbónico, teniendo un máximo de 25 psi disueltos en la cerveza tras dejar reposar el barril, coincidiendo con el valor obtenido al llegar el barril al 25%, lo que produjo una carbonatación adecuada en el rango de tiempo establecido de 30 minutos, debido a que, por existir la mitad de espacio ocupado por el CO<sub>2</sub>, la disolución es muy efectiva.</p>
24	75		<p>En la prueba de carbonatación forzada con el barril a su 75% de capacidad, se evidenciaron ingresos altos de gas carbónico, teniendo un máximo de 24 psi disueltos en la cerveza tras dejar reposar el barril, lo que produjo una carbonatación adecuada en el rango de tiempo establecido de 30 minutos, debido a que se tiene el 25% de espacio ocupado por el CO<sub>2</sub>, la</p>

				<p>disolución es muy efectiva aproximándose a los parámetros de inyección ideal.</p>
	22	100		<p>En la prueba de carbonatación forzada con el barril a su 100% de capacidad, se evidenciaron ingresos medios-altos de gas carbónico, teniendo un máximo de 22 psi disueltos en la cerveza tras dejar reposar el barril, lo que produjo una carbonatación adecuada en el rango de tiempo establecido de 30 minutos, la disolución es efectiva y se conserva dentro de los rangos de inyección sugeridos según el estilo.</p>

Realizado por: Minda, R.; Ramos, P. 2023

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- Fue posible establecer los parámetros de diseño y la selección de materiales adecuados. En el caso de la máquina, se optó por utilizar materiales resistentes en base al trabajo a realizar y con sustento en los análisis MEF. Por otro lado, para el material de la manivela, biela y pasadores se utilizó AISI 4340 ya que con los resultados obtenidos en los análisis de elementos finitos el material AISI 1018 no resistía las cargas de trabajo del sistema, a diferencia del eje principal de soporte a la estructura fija, su dimensionamiento y factor de seguridad resultante permitió su construcción con un material AISI 1018.
- Se evaluó las diversas alternativas para el diseño de la máquina agitadora de barriles, el uso de una matriz morfológica permitió verificar y considerar la eficiencia y la facilidad para construir y además demostró una gran pauta en la efectividad del proceso de carbonatación. En este contexto, uno de los desafíos más significativos fue decidir el tipo de sistema que mantenga al barril estable y no genere un excedente de vibraciones durante su periodo de trabajo.
- Se logró identificar, a través del diseño conceptual y el análisis funcional, los requisitos que la máquina debía cumplir para un funcionamiento óptimo. Tomando en cuenta el espacio de instalación de la máquina y las recomendaciones de los artesanos productores, se seleccionó la alternativa más adecuada para nuestra aplicación.
- A través de la validación de análisis de elementos finitos en los componentes mecánicos de la máquina agitadora, se confirmó la resistencia y rendimiento de estos, preparándolos para su implementación práctica mediante la construcción del prototipo.
- Se realizó la fabricación del prototipo seleccionado siguiendo los parámetros de diseño, asegurando la satisfacción de todas las especificaciones establecidas por la microempresa Vértigo Cervecería Artesanal. Este paso precedió a la carbonatación exitosa de cerveza artesanal.
- Se evidenció una variación en la carbonatación a diferentes tiempos y niveles de llenado del barril, en donde se tuvo mayor precisión con el tanque al 25% de su capacidad total, sin embargo al realizar las pruebas con el tanque a su 100% de capacidad, se encontraron resultados válidos y dentro de los rangos recomendados de carbonatación según el estilo, en donde en el caso más crítico, con un tiempo de agitación de 20 minutos, se obtuvo una variación de 7 psi en comparación al caso ideal, no obstante, cumple con el parámetro de carbonatación estando 0.6 psi sobre el límite inferior de carbonatación.

- Se comprobó que el tiempo de carbonatación influye directamente en la efectividad de disolución de gas carbónico en la cerveza artesanal, en donde a 30 minutos de carbonatación se obtiene un mezclado efectivo a la capacidad máxima del barril, consiguiendo una magnitud final de presión de 22 psi, siendo un valor medio del rango establecido según el estilo.

## **5.2. Recomendaciones**

- Para un mejor y preciso control del proceso de agitación se recomienda agregar un *timer* o temporizador digital para el seteo de un tiempo específico de trabajo de la máquina agitadora de barriles.
- Se recomienda agitar el barril entre 25 y 30 minutos para conseguir un nivel de carbonatación resultante medio-alto en base a los rangos mínimos y máximos establecidos por el estilo de cerveza artesanal.
- Es necesario ubicar la máquina agitadora de barriles sobre una superficie plana y antideslizante. Esto se hace con la finalidad de prevenir desplazamientos causados por vibraciones, así como posibles desalineaciones en el mecanismo manivela-balancín que pueden derivar de estas pequeñas cargas cíclicas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **BUDYNAS, Richard; et al.** *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* [en línea]. 9ª edición. México D.F.: McGraw-Hill, 2012. [Consulta: 19 abril 2023]. Disponible en: <https://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2015/03/diseño-en-ingeniería-mecánica-de-shigley-8-edición-budynas.pdf>
2. **COBA, Gabriela.** *El número de marcas de cerveza artesanal crece un 20% en Ecuador.* [blog]. Quito: Primicias, 2021. [Consulta: 24 abril 2023]. Disponible en: <https://www.primicias.ec/noticias/economia/marcas-cerveza-artesanal-crecimiento-ecuador/>
3. **DECRETO EJECUTIVO 617.** *Reglamento Ley para Fomento Productivo, Atracción de Inversiones*
4. **FÁLDER, Angel.** “Enciclopedia de los alimentos: Cervezas”. *Distribución y consumo* [en línea], 2006, (España) volumen 87 (1), págs. 107-118. [Consulta: 26 abril 2023]. ISSN 1132-0176. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2948923>
5. **GARCÍA, Juan; et al.** *Problemas resueltos de teoría de máquinas y mecanismos.* 2ª edición. Madrid - España: Ediciones Paraninfo, 2014. ISBN 9788428334426, págs. 15-18
6. **GONZÁLES, Marcos.** *Principios de Elaboración de las Cervezas Artesanales* [en línea]. Carolina-USA: Lulu Enterprises, 2017. [Consulta: 27 abril 2023]. Disponible en: <https://www.lulu.com/shop>
7. **HUNT, Kenneth.** *Kinematic Geometry of Mechanisms.* Oxford - Reino Unido: Clarendon Press, 1978, pág 1.
8. **MOTT, Robert.** *Diseño de elementos de máquinas* [en línea]. 4ª edición. México D.F.: Pearson Educación, 2006. [Consulta: 23 abril 2023]. Disponible en: <https://www.udocz.com/apuntes/20762/diseño-de-elementos-de-máquinas-robert-l-mott-4ta-ed>
9. **MYSZKA, David.** *Máquinas y mecanismos.* [en línea]. 4ª edición. México D.F.: Pearson Educación, 2012 [Consulta: 25 abril 2023]. Disponible en: <https://pavisva.files.wordpress.com/2016/01/máquinas-y-mecanismos-4-ed-david-h-myszka.pdf>
10. **NORTON, Robert.** *Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos* [en línea]. 4ª edición. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana de España S.L. Libro Catedra, 2009. [Consulta: 23 abril 2023]. Disponible en: <https://lsbunefm.files.wordpress.com/2018/10/diseño-de-maquinaria-robert-l-norton-4.pdf>

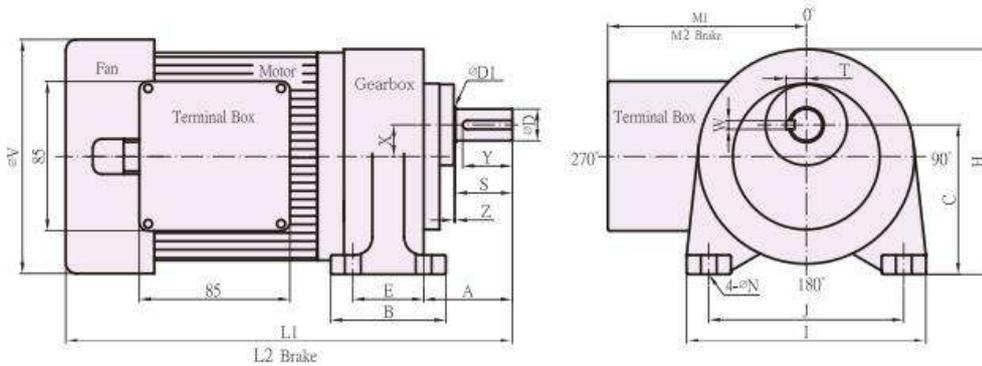
11. **RYAN, R.** *Safety of Food and Beverages: Soft Drinks and Fruit Juices. Encyclopedia of Food Safety* [en línea], Dublin - Irlanda: Elsevier Science & Technology, 2014. [Consulta: 26 abril 2023]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/456193205/Ryan-2014-Soft-Drinks-and-Fruit-Juices>
12. **SANCHO, Rubén.** *Diseño de una micro-planta de fabricación de cerveza y estudio de técnicas y procesos de producción* [en línea], Barcelona - España: Universitat Politècnica de Catalunya., 2015. [Consulta: 24 abril 2023]. Disponible en: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/76575/02\\_Memoria.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/76575/02_Memoria.pdf?sequence=5&isAllowed=y)
13. **SANDER, Rolf; et al.** *Henry's law constants* [en línea], New York- USA: Brookhaven National Lab.(BNL), 2021. [Consulta: 24 abril 2023]. Disponible en: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1763996>
14. **SIMONAZZI, Analía.** *Cerveza* [en línea], Córdoba - España: El Cid Editor apuntes, 2009. . [Consulta: 29 abril 2023]. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/udla/titulos/29301>
15. **VÁZQUEZ, Manuel & LÓPEZ, Eloísa.** *El método de los elementos finitos aplicado al análisis estructural* [en línea], Madrid - España: Editorial Noela, 2001. [Consulta: 27 abril 2023]. Disponible en: <https://lc.cx/bfs44i>

# ANEXOS

## ANEXO A: SELECCIÓN MOTORREDUCTOR MONOFÁSICO 0,5HP, 85RPM

### SPECIFICATIONS AND DIMENSIONS, FOOT-MOUNT TYPE

Terminal box position: at 270° for foot - mount type.

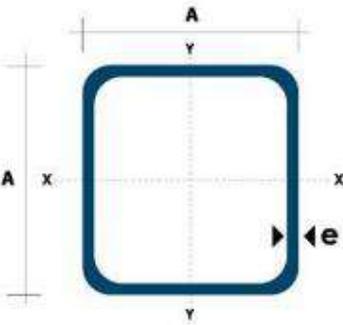


DIMENSION (mm)		OUTPUT SHAFT																					
MOTOR'S CAPACITY	TYPE NO.	GEAR RATIO	A	B	C	E	H	I	J	L1	L2	M1	M2	N	V	X	D	D1	S	T	W	Y	Z
100W 1/8HP x4P	11	1/3~1/90	50	65	85	40	128	135	110	252	297	111	137	9	133	18	18	20	32	11.3	5	28	1
	12	1/75~1/165	60	90	94	65	147.5	158	130	273	318	111	137	11	133	18	22	25	40	14.3	7	35	8.5
200W 1/4HP x4P	11	1/3~1/40	50	65	85	40	128	135	110	277	322	111	137	9	133	18	18	20	32	11.3	5	28	1
	11	(1/50~1/90)	50	65	85	40	128	135	110	277	322	111	137	9	133	18	18	20	32	11.5	5	28	1
	12	1/20~1/90	60	90	94	65	147.5	158	130	298	343	111	137	11	133	18	22	25	40	14.3	7	35	8.5
	12	(1/100~1/165)	60	90	94	65	147.5	158	130	298	343	111	137	11	133	18	22	25	40	14.3	7	35	8.5
400W 1/2HP x4P	13	1/100~1/180	68	120	115	90	175	180	140	322	367	111	137	11	133	25	28	30	45	17.3	7	40	2
	12	1/3~1/40	60	90	94	65	147.5	158	130	324	358.5	118.5	144.5	11	147	18	22	25	40	14.3	7	35	8.5
	12	(1/50~1/90)	60	90	94	65	147.5	158	130	324	358.5	118.5	144.5	11	147	18	22	25	40	14.5	7	35	8.5
	13	1/50~1/90	68	120	115	90	175	180	140	348.5	383	118.5	144.5	11	147	25	28	30	45	17.3	7	40	2
	13	(1/100~1/180)	68	120	115	90	175	180	140	348.5	383	118.5	144.5	11	147	25	28	30	45	17.3	7	40	2
750W 1HP x4P	14	1/100~1/180	74	165	130	130	204	210	170	376	410.5	118.5	144.5	13	147	26	32	35	55	19.8	10	50	7
	13	1/3~1/30	68	120	115	90	175	180	140	348.5	392	127	153	11	161	25	28	30	45	17.3	7	40	2
	13	(1/40~1/90)	68	120	115	90	175	180	140	348.5	392	127	153	11	161	25	28	30	45	17.3	7	40	2
	14	1/30~1/90	74	165	130	130	204	210	170	376	419.5	127	153	13	161	26	32	35	55	19.8	10	50	7
	14	(1/100~1/180)	74	165	130	130	204	210	170	376	419.5	127	153	13	161	26	32	35	55	19.8	10	50	7
1500W 2HP x4P	15	1/80~1/200	95	195	150	150	237	255	210	412	455.5	127	153	15	161	28	40	-	69	23.8	10	60	-
	14	1/3~1/60	74	165	130	130	204	210	170	418	454.5	138.5	164.5	13	192	26	32	35	55	19.8	10	50	7
	15	1/50~1/90	95	195	150	150	237	255	210	454	490.5	138.5	164.5	15	192	28	40	-	69	23.8	10	60	-
2200W 3HP x4P	14	1/3~1/40	74	165	130	130	204	210	170	448	484.5	138.5	164.5	13	192	26	32	35	55	19.8	10	50	7
	15	1/3~1/40	95	195	150	150	237	255	210	484	520.5	138.5	164.5	15	192	28	40	-	69	23.8	10	60	-
	15	(1/50~1/90)	95	195	150	150	237	255	210	484	520.5	138.5	164.5	15	192	28	40	-	69	23.8	10	60	-

※ For light loading type.

■ Under normal usage, products come with a one-year limited warranty. ■ Specifications subject to change without notice.

**ANEXO B: SELECCIÓN DE PERFIL ESTRUCTURAL TUBO CUADRADO SAE J 304 1008.**



Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm <sup>2</sup>	I cm <sup>4</sup>	W cm <sup>3</sup>	I cm <sup>3</sup>
20	1.2	0.72	0.90	0.53	0.53	0.77
20	1.5	0.88	1.05	0.58	0.58	0.74
20	2.0	1.15	1.34	0.69	0.69	0.72
25	1.2	0.90	1.14	1.08	0.87	0.97
25	1.5	1.12	1.35	1.21	0.97	0.95
25	2.0	1.47	1.74	1.48	1.18	0.92
30	1.2	1.09	1.38	1.91	1.28	1.18
30	1.5	1.35	1.65	2.19	1.46	1.15
30	2.0	1.78	2.14	2.71	1.81	1.13
40	1.2	1.47	1.80	4.38	2.19	1.25
40	1.5	1.82	2.25	5.48	2.74	1.56
40	2.0	2.41	2.94	6.93	3.46	1.54
40	3.0	3.54	4.44	10.20	5.10	1.52
50	1.5	2.29	2.85	11.06	4.42	1.97
50	2.0	3.03	3.74	14.13	5.65	1.94
50	3.0	4.48	5.61	21.20	4.48	1.91
60	2.0	3.66	3.74	21.26	7.09	2.39
60	3.0	5.42	6.61	35.06	11.69	2.34
75	2.0	4.52	5.74	50.47	13.46	2.97
75	3.0	6.71	8.41	71.54	19.08	2.92
75	4.0	8.59	10.95	89.98	24.00	2.87
100	2.0	6.17	7.74	122.99	24.60	3.99
100	3.0	9.17	11.41	176.95	35.39	3.94
100	4.0	12.13	14.95	226.09	45.22	3.89
100	5.0	14.40	18.36	270.57	54.11	3.84

Seleccionamos un tubo de acero estructural cuadrado de acero negro, norma de fabricación NTE INEN 2415; Calidad SAE J 403 1008; también disponible en presentación de galvanizado. La selección fue a partir de la disponibilidad del material dentro del mercado actual nacional y el costo.

## ANEXO C: SELECCIÓN DE CHUMACERAS



### Características técnicas

UCP206

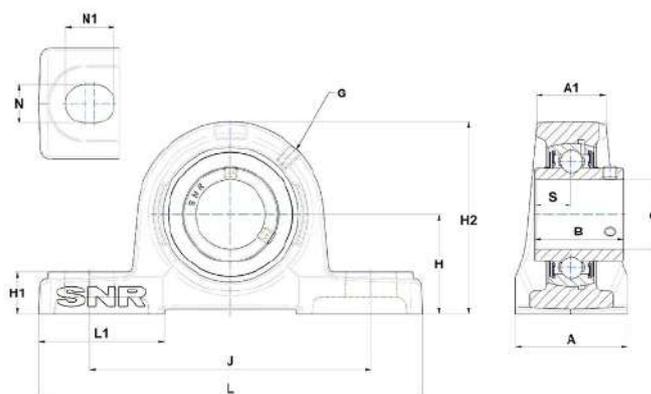
Brida

Cuerpo de fundición, rodamiento inserto de bolas de contacto radial, con tornillo de fijación, junta de estanqueidad con arandela de obturación

### COMPOSICIÓN DEL KIT

UC206G2

### VISUAL (S)



### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Marca	SNR
A - Ancho del alojamiento	48 mm
A1 - Anchura en la parte superior del alojamiento	30 mm
B - Ancho anillo interior	38,1 mm
d - Diámetro eje	30 mm

NTN-SNR ROULEMENTS

www.ntn-snr.com

1 rue des Usines - 74010 Annecy Cedex - France - Tel. +33 (0)4 50 65 30 00  
S.A. au capital de 241 599 528 € - RCS ANNECY B 325 821 072 - Id. Fiscale : FR 48 325 821 072  
SIRET 325 821 072 00015 - Code APE 2815 Z - Code NACE 28.15

Página 1/2

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
G - Engrasador	M6x1
H - Distancia base del alojamiento al centro del rodamiento	42,9 mm
H1 - Altura del respaldo del alojamiento	18 mm
H2 - Altura del alojamiento	83 mm
J - Distancia entre los agujeros de fijación	121 mm
L - Largo del alojamiento	165 mm
L1 - Largo del respaldo del alojamiento	54 mm
N - Dimension agujero de fijación	17 mm
N1 - Largo del agujero de montaje	21 mm
S - Distancia cara al centro del rodamiento	15,9 mm

PRESTACIONES	
C - Capacidad de carga dinámica	19,5 kN
C0 - Capacidad de carga estática	11,2 kN
Temperatura min de funcionamiento	-20 °C
Temperatura max de funcionamiento	100 °C

OTRAS CARACTERÍSTICAS	
Peso	1,36 kg
Par de apriete recomendado para el tornillo de fijación	5,5 N-m

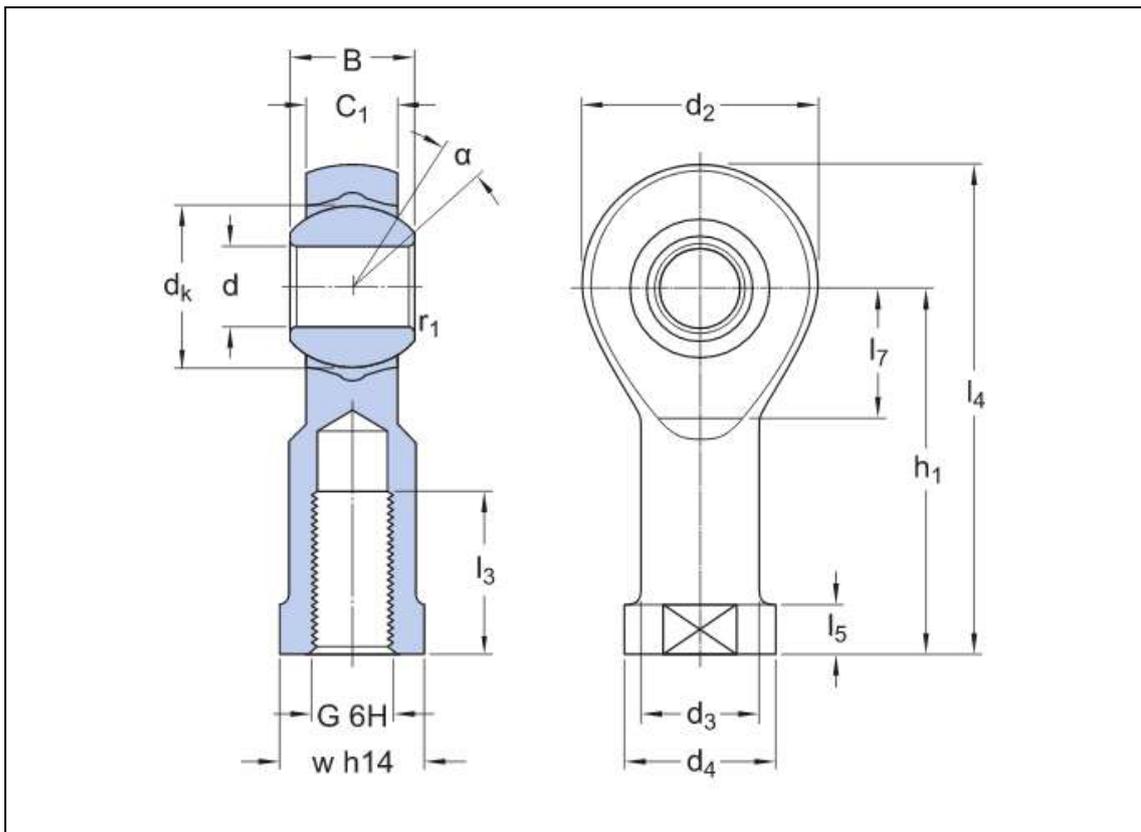
## ANEXO D: CABEZAS DE ARTICULACIÓN



<b>Dimensiones generales</b>	
Diámetro del agujero del aro interior del rodamiento	10 mm
Diámetro exterior/ojo del soporte	30 mm
Ancho del aro interior del rodamiento	9 mm
Designación de la rosca	M 10
Ancho del ojo del soporte	7.5 mm
Altura del centro, soporte (desde el extremo del vástago)	43 mm
Longitud del soporte, total	60 mm
<b>Datos de cálculo</b>	
Capacidad de carga dinámica básica	17 kN
Capacidad de carga estática básica	27.5 kN
Factor de carga dinámica específica	50 N/mm <sup>2</sup>
Constante de material	530
Masa de cabeza de articulación	0.16 kg
<b>Propiedades</b>	
Material de deslizamiento, superficies de contacto	Acero/plástico reforzado con fibra de vidrio de PTFE
Material, soporte	Acero
Material, aro interior	Acero para rodamientos
Mantenimiento	Sin mantenimiento
Característica de fijación, vástago de la cabeza de articulación	Rosca hembra a la izquierda
Sellado	Sin

Fuente: SKF, 2023

## Dimensiones de la cabeza de articulación



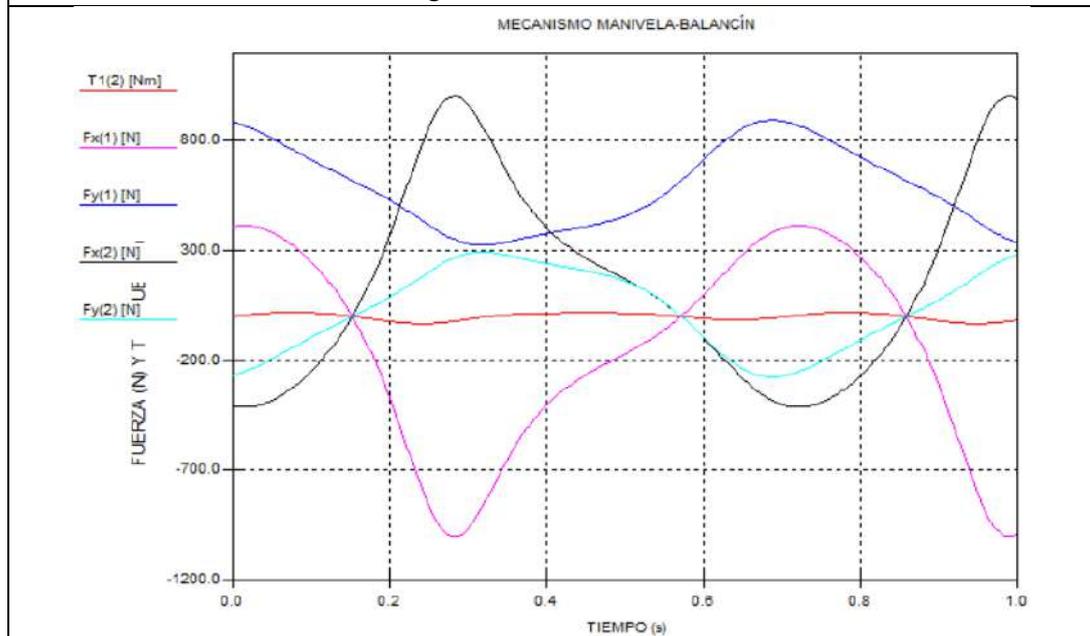
### Dimensiones

<b>d</b>	14 mm	Diámetro interno
<b>d<sub>2</sub></b>	max. 37 mm	Diámetro de la cabeza
<b>B</b>	19 mm	Ancho del aro interior
<b>G</b>	M 14	Rosca
<b>C<sub>1</sub></b>	max. 14.5 mm	Ancho de la cabeza
<b>h<sub>1</sub></b>	57 mm	Altura de la cara del extremo del vástago al ojo de la cabeza de articulación central
<b>α</b>	16 °	Ángulo de inclinación
<b>d<sub>k</sub></b>	25.4 mm	Diámetro del camino de rodadura del aro interior
<b>d<sub>3</sub></b>	≈ 20 mm	Diámetro del soporte del vástago
<b>d<sub>4</sub></b>	max. 27 mm	Diámetro del soporte del vástago
<b>l<sub>3</sub></b>	min. 21 mm	Longitud de rosca
<b>l<sub>4</sub></b>	max. 77 mm	Longitud (altura) del soporte
<b>l<sub>5</sub></b>	≈ 8 mm	Longitud de llave plana
<b>l<sub>7</sub></b>	min. 18 mm	Distancia del chaflán del vástago al ojo de la cabeza de articulación central
<b>w</b>	22 mm	Tamaño de llave
<b>r<sub>1</sub></b>	min. 0.3 mm	Dimensión del chaflán del agujero

Fuente: SKF, 2023

**ANEXO E: FUERZAS Y TORQUE EN LOS PUNTOS DE APOYO DEL MECANISMOS  
PARA EL ANÁLISIS TRANSITORIO DE LA ESTRUCTURA FIJA.**

**DATOS DE FUERZAS Y TORQUE OBTENIDAS EN 510 PUNTOS DE ANÁLISIS**



Nr:	Hora	T1(2)	Fx(1)	Fy(1)	Fx(2)	Fy(2)
[-]	[s]	[Nm]	[N]	[N]	[N]	[N]
0	0	0	407,145	885,34	-407,18	-267,225
1	0,002	0,735	408,616	883,671	-408,651	-265,556
2	0,004	1,471	409,877	881,861	-409,912	-263,746
3	0,006	2,205	410,927	879,915	-410,962	-261,799
4	0,008	2,936	411,767	877,837	-411,802	-259,722
5	0,01	3,663	412,399	875,633	-412,434	-257,518
6	0,012	4,384	412,823	873,308	-412,858	-255,193
7	0,014	5,097	413,042	870,867	-413,076	-252,752
8	0,016	5,803	413,055	868,315	-413,09	-250,2
9	0,018	6,498	412,865	865,658	-412,9	-247,543
10	0,02	7,183	412,474	862,9	-412,509	-244,786
11	0,022	7,855	411,884	860,047	-411,918	-241,933
12	0,024	8,513	411,096	857,104	-411,13	-238,99
13	0,025	9,157	410,113	854,076	-410,147	-235,961
14	0,027	9,786	408,937	850,967	-408,97	-232,853
15	0,029	10,398	407,569	847,782	-407,603	-229,668
16	0,031	10,992	406,014	844,526	-406,047	-226,413
17	0,033	11,567	404,272	841,204	-404,305	-223,091
18	0,035	12,123	402,346	837,821	-402,379	-219,707
19	0,037	12,658	400,24	834,38	-400,272	-216,266
20	0,039	13,173	397,954	830,885	-397,986	-212,772
21	0,041	13,665	395,492	827,342	-395,524	-209,229
22	0,043	14,135	392,856	823,754	-392,888	-205,642

23	0,045	14,582	390,049	820,125	-390,08	-202,013
24	0,047	15,005	387,072	816,459	-387,103	-198,347
25	0,049	15,404	383,929	812,76	-383,96	-194,648
26	0,051	15,777	380,622	809,03	-380,652	-190,918
27	0,053	16,126	377,152	805,274	-377,182	-187,162
28	0,055	16,449	373,523	801,494	-373,552	-183,383
29	0,057	16,745	369,736	797,695	-369,765	-179,583
30	0,059	17,016	365,793	793,878	-365,822	-175,766
31	0,061	17,259	361,696	790,046	-361,725	-171,935
32	0,063	17,476	357,448	786,203	-357,476	-168,092
33	0,065	17,665	353,049	782,35	-353,077	-164,24
34	0,067	17,827	348,502	778,491	-348,529	-160,381
35	0,069	17,962	343,808	774,627	-343,835	-156,517
36	0,071	18,069	338,968	770,761	-338,995	-152,651
37	0,073	18,149	333,984	766,894	-334,01	-148,784
38	0,075	18,201	328,857	763,029	-328,883	-144,92
39	0,076	18,225	323,587	759,167	-323,613	-141,058
40	0,078	18,222	318,176	755,31	-318,201	-137,201
41	0,08	18,191	312,625	751,46	-312,649	-133,351
42	0,082	18,132	306,933	747,617	-306,957	-129,508
43	0,084	18,046	301,101	743,783	-301,125	-125,675
44	0,086	17,933	295,13	739,96	-295,153	-121,851
45	0,088	17,793	289,019	736,147	-289,041	-118,039
46	0,09	17,626	282,768	732,347	-282,79	-114,239
47	0,092	17,432	276,377	728,56	-276,399	-110,452
48	0,094	17,212	269,846	724,786	-269,867	-106,678
49	0,096	16,965	263,173	721,026	-263,194	-102,919
50	0,098	16,693	256,359	717,282	-256,378	-99,175
51	0,1	16,394	249,401	713,552	-249,42	-95,445
52	0,102	16,07	242,299	709,838	-242,317	-91,731
53	0,104	15,721	235,05	706,14	-235,068	-88,033
54	0,106	15,346	227,655	702,457	-227,672	-84,351
55	0,108	14,948	220,11	698,791	-220,127	-80,684
56	0,11	14,524	212,414	695,14	-212,43	-77,033
57	0,112	14,077	204,564	691,504	-204,58	-73,398
58	0,114	13,607	196,558	687,885	-196,574	-69,779
59	0,116	13,113	188,394	684,28	-188,409	-66,174
60	0,118	12,596	180,069	680,69	-180,083	-62,585
61	0,12	12,057	171,579	677,115	-171,593	-59,009
62	0,122	11,495	162,922	673,553	-162,935	-55,448
63	0,124	10,912	154,095	670,005	-154,107	-51,9
64	0,125	10,308	145,092	666,47	-145,104	-48,364
65	0,127	9,683	135,912	662,946	-135,923	-44,841
66	0,129	9,038	126,55	659,434	-126,56	-41,328
67	0,131	8,373	117,002	655,931	-117,011	-37,826

68	0,133	7,688	107,263	652,439	-107,272	-34,333
69	0,135	6,984	97,33	648,954	-97,338	-30,849
70	0,137	6,262	87,197	645,477	-87,205	-27,372
71	0,139	5,522	76,86	642,007	-76,867	-23,902
72	0,141	4,765	66,315	638,542	-66,321	-20,436
73	0,143	3,991	55,555	635,08	-55,561	-16,975
74	0,145	3,2	44,577	631,622	-44,582	-13,517
75	0,147	2,394	33,374	628,165	-33,379	-10,06
76	0,149	1,573	21,942	624,708	-21,946	-6,603
77	0,151	0,737	10,276	621,25	-10,279	-3,145
78	0,153	-0,112	-1,631	617,79	1,628	0,316
79	0,155	-0,974	-13,782	614,325	13,78	3,781
80	0,157	-1,849	-26,185	610,855	26,183	7,251
81	0,159	-2,735	-38,843	607,377	38,842	10,729
82	0,161	-3,632	-51,762	603,891	51,762	14,215
83	0,163	-4,539	-64,947	600,394	64,948	17,712
84	0,165	-5,455	-78,403	596,886	78,404	21,221
85	0,167	-6,379	-92,135	593,364	92,137	24,743
86	0,169	-7,31	-106,146	589,826	106,149	28,281
87	0,171	-8,248	-120,442	586,272	120,446	31,835
88	0,173	-9,19	-135,026	582,698	135,031	35,409
89	0,175	-10,137	-149,901	579,104	149,907	39,003
90	0,176	-11,087	-165,071	575,488	165,077	42,619
91	0,178	-12,038	-180,537	571,848	180,543	46,26
92	0,18	-12,989	-196,301	568,183	196,308	49,926
93	0,182	-13,94	-212,365	564,49	212,373	53,619
94	0,184	-14,888	-228,728	560,768	228,736	57,341
95	0,186	-15,833	-245,389	557,015	245,399	61,094
96	0,188	-16,772	-262,349	553,23	262,359	64,88
97	0,19	-17,705	-279,602	549,411	279,613	68,699
98	0,192	-18,629	-297,147	545,557	297,158	72,553
99	0,194	-19,542	-314,977	541,666	314,99	76,445
100	0,196	-20,444	-333,087	537,738	333,1	80,374
101	0,198	-21,332	-351,469	533,77	351,482	84,342
102	0,2	-22,203	-370,113	529,762	370,127	88,351
103	0,202	-23,058	-389,008	525,712	389,023	92,401
104	0,204	-23,892	-408,142	521,621	408,157	96,493
105	0,206	-24,704	-427,499	517,487	427,516	100,627
106	0,208	-25,493	-447,064	513,309	447,081	104,805
107	0,21	-26,255	-466,818	509,089	466,836	109,026
108	0,212	-26,988	-486,74	504,825	486,758	113,29
109	0,214	-27,692	-506,807	500,519	506,826	117,597
110	0,216	-28,362	-526,995	496,169	527,014	121,947
111	0,218	-28,997	-547,275	491,779	547,295	126,338
112	0,22	-29,594	-567,618	487,347	567,639	130,771

113	0,222	-30,152	-587,993	482,876	588,015	135,242
114	0,224	-30,669	-608,365	478,368	608,388	139,75
115	0,225	-31,141	-628,698	473,825	628,721	144,294
116	0,227	-31,567	-648,952	469,249	648,976	148,871
117	0,229	-31,945	-669,088	464,644	669,112	153,477
118	0,231	-32,273	-689,063	460,012	689,087	158,109
119	0,233	-32,55	-708,831	455,357	708,857	162,765
120	0,235	-32,773	-728,348	450,684	728,373	167,438
121	0,237	-32,941	-747,564	445,998	747,59	172,125
122	0,239	-33,054	-766,432	441,303	766,459	176,821
123	0,241	-33,109	-784,902	436,605	784,929	181,519
124	0,243	-33,105	-802,923	431,91	802,95	186,215
125	0,245	-33,043	-820,444	427,224	820,472	190,902
126	0,247	-32,922	-837,415	422,554	837,444	195,572
127	0,249	-32,741	-853,786	417,907	853,815	200,22
128	0,251	-32,5	-869,508	413,291	869,537	204,836
129	0,253	-32,201	-884,531	408,713	884,561	209,415
130	0,255	-31,842	-898,81	404,182	898,84	213,946
131	0,257	-31,427	-912,299	399,705	912,329	218,423
132	0,259	-30,954	-924,957	395,292	924,988	222,837
133	0,261	-30,427	-936,745	390,951	936,776	227,179
134	0,263	-29,846	-947,626	386,69	947,657	231,44
135	0,265	-29,213	-957,568	382,519	957,599	235,612
136	0,267	-28,532	-966,542	378,445	966,573	239,686
137	0,269	-27,804	-974,523	374,478	974,554	243,654
138	0,271	-27,032	-981,492	370,625	981,523	247,507
139	0,273	-26,218	-987,432	366,894	987,464	251,238
140	0,275	-25,367	-992,334	363,294	992,366	254,839
141	0,276	-24,48	-996,192	359,83	996,224	258,302
142	0,278	-23,562	-999,004	356,512	999,036	261,621
143	0,28	-22,616	-1000,775	353,343	1000,807	264,79
144	0,282	-21,645	-1001,514	350,331	1001,546	267,803
145	0,284	-20,653	-1001,234	347,48	1001,266	270,654
146	0,286	-19,643	-999,954	344,795	999,986	273,339
147	0,288	-18,619	-997,696	342,279	997,728	275,855
148	0,29	-17,584	-994,488	339,936	994,519	278,199
149	0,292	-16,542	-990,359	337,767	990,39	280,367
150	0,294	-15,496	-985,344	335,775	985,375	282,36
151	0,296	-14,449	-979,479	333,959	979,51	284,175
152	0,298	-13,405	-972,806	332,321	972,837	285,814
153	0,3	-12,366	-965,367	330,859	965,397	287,276
154	0,302	-11,335	-957,205	329,572	957,235	288,563
155	0,304	-10,314	-948,367	328,457	948,396	289,677
156	0,306	-9,306	-938,899	327,513	938,928	290,622
157	0,308	-8,313	-928,85	326,735	928,879	291,399

158	0,31	-7,337	-918,267	326,121	918,296	292,014
159	0,312	-6,381	-907,2	325,664	907,229	292,47
160	0,314	-5,444	-895,696	325,361	895,724	292,773
161	0,316	-4,529	-883,802	325,206	883,83	292,928
162	0,318	-3,637	-871,565	325,193	871,593	292,941
163	0,32	-2,769	-859,03	325,316	859,058	292,818
164	0,322	-1,926	-846,242	325,57	846,269	292,564
165	0,324	-1,109	-833,242	325,946	833,269	292,187
166	0,325	-0,317	-820,071	326,44	820,098	291,693
167	0,327	0,449	-806,769	327,044	806,795	291,089
168	0,329	1,189	-793,371	327,751	793,396	290,382
169	0,331	1,902	-779,913	328,554	779,938	289,579
170	0,333	2,589	-766,427	329,447	766,451	288,686
171	0,335	3,249	-752,943	330,423	752,967	287,71
172	0,337	3,884	-739,49	331,475	739,514	286,657
173	0,339	4,494	-726,095	332,597	726,118	285,535
174	0,341	5,079	-712,78	333,782	712,803	284,349
175	0,343	5,639	-699,568	335,025	699,591	283,106
176	0,345	6,175	-686,479	336,319	686,502	281,812
177	0,347	6,688	-673,531	337,659	673,553	280,471
178	0,349	7,179	-660,739	339,04	660,761	279,091
179	0,351	7,648	-648,118	340,455	648,14	277,675
180	0,353	8,096	-635,68	341,901	635,702	276,229
181	0,355	8,523	-623,437	343,372	623,458	274,758
182	0,357	8,931	-611,397	344,864	611,417	273,266
183	0,359	9,32	-599,567	346,373	599,588	271,756
184	0,361	9,691	-587,956	347,895	587,976	270,234
185	0,363	10,045	-576,567	349,427	576,587	268,702
186	0,365	10,382	-565,405	350,965	565,424	267,163
187	0,367	10,703	-554,473	352,507	554,492	265,622
188	0,369	11,009	-543,772	354,049	543,791	264,08
189	0,371	11,301	-533,304	355,588	533,323	262,54
190	0,373	11,579	-523,069	357,124	523,088	261,004
191	0,375	11,844	-513,067	358,653	513,085	259,475
192	0,376	12,096	-503,296	360,174	503,314	257,953
193	0,378	12,337	-493,754	361,685	493,772	256,442
194	0,38	12,566	-484,44	363,185	484,457	254,942
195	0,382	12,785	-475,35	364,673	475,367	253,454
196	0,384	12,993	-466,481	366,148	466,498	251,979
197	0,386	13,192	-457,83	367,608	457,846	250,518
198	0,388	13,382	-449,392	369,054	449,408	249,072
199	0,39	13,563	-441,163	370,485	441,18	247,641
200	0,392	13,735	-433,14	371,9	433,156	246,225
201	0,394	13,9	-425,317	373,3	425,333	244,826
202	0,396	14,058	-417,69	374,684	417,706	243,441

203	0,398	14,208	-410,253	376,053	410,269	242,072
204	0,4	14,352	-403,002	377,407	403,017	240,718
205	0,402	14,489	-395,931	378,745	395,947	239,379
206	0,404	14,619	-389,036	380,07	389,052	238,055
207	0,406	14,744	-382,312	381,381	382,327	236,744
208	0,408	14,863	-375,752	382,679	375,767	235,445
209	0,41	14,977	-369,352	383,964	369,367	234,16
210	0,412	15,086	-363,107	385,239	363,121	232,885
211	0,414	15,189	-357,011	386,503	357,025	231,621
212	0,416	15,287	-351,059	387,758	351,074	230,366
213	0,418	15,381	-345,247	389,004	345,261	229,119
214	0,42	15,469	-339,569	390,244	339,583	227,879
215	0,422	15,554	-334,02	391,478	334,034	226,645
216	0,424	15,633	-328,596	392,707	328,61	225,415
217	0,425	15,708	-323,291	393,934	323,305	224,189
218	0,427	15,779	-318,101	395,159	318,115	222,963
219	0,429	15,846	-313,021	396,385	313,035	221,738
220	0,431	15,908	-308,047	397,612	308,06	220,511
221	0,433	15,965	-303,173	398,842	303,186	219,28
222	0,435	16,019	-298,395	400,077	298,409	218,045
223	0,437	16,067	-293,71	401,319	293,723	216,803
224	0,439	16,112	-289,112	402,569	289,125	215,553
225	0,441	16,152	-284,598	403,829	284,611	214,292
226	0,443	16,187	-280,163	405,102	280,176	213,019
227	0,445	16,218	-275,803	406,389	275,816	211,733
228	0,447	16,244	-271,515	407,691	271,527	210,43
229	0,449	16,265	-267,293	409,012	267,306	209,109
230	0,451	16,281	-263,135	410,352	263,148	207,768
231	0,453	16,292	-259,037	411,715	259,049	206,405
232	0,455	16,298	-254,994	413,102	255,006	205,018
233	0,457	16,298	-251,003	414,515	251,015	203,605
234	0,459	16,293	-247,061	415,957	247,073	202,163
235	0,461	16,282	-243,163	417,43	243,175	200,69
236	0,463	16,265	-239,307	418,935	239,319	199,184
237	0,465	16,242	-235,487	420,477	235,499	197,643
238	0,467	16,213	-231,703	422,055	231,715	196,064
239	0,469	16,177	-227,95	423,674	227,962	194,445
240	0,471	16,135	-224,225	425,335	224,236	192,785
241	0,473	16,086	-220,523	427,04	220,535	191,079
242	0,475	16,029	-216,843	428,792	216,854	189,327
243	0,476	15,965	-213,181	430,594	213,192	187,525
244	0,478	15,894	-209,533	432,448	209,544	185,671
245	0,48	15,814	-205,897	434,356	205,907	183,762
246	0,482	15,726	-202,269	436,321	202,279	181,797
247	0,484	15,63	-198,646	438,345	198,656	179,773

248	0,486	15,526	-195,025	440,431	195,035	177,687
249	0,488	15,412	-191,403	442,581	191,413	175,536
250	0,49	15,289	-187,777	444,798	187,787	173,319
251	0,492	15,157	-184,145	447,084	184,154	171,033
252	0,494	15,014	-180,502	449,442	180,511	168,675
253	0,496	14,862	-176,846	451,874	176,855	166,243
254	0,498	14,7	-173,174	454,382	173,183	163,734
255	0,5	14,527	-169,483	456,97	169,492	161,147
256	0,502	14,343	-165,77	459,638	165,779	158,478
257	0,504	14,148	-162,033	462,39	162,041	155,726
258	0,506	13,942	-158,268	465,228	158,276	152,889
259	0,508	13,725	-154,472	468,153	154,48	149,963
260	0,51	13,495	-150,644	471,169	150,651	146,947
261	0,512	13,254	-146,779	474,277	146,786	143,838
262	0,514	13	-142,875	477,479	142,882	140,636
263	0,516	12,734	-138,93	480,778	138,937	137,337
264	0,518	12,456	-134,94	484,174	134,947	133,941
265	0,52	12,164	-130,903	487,67	130,91	130,445
266	0,522	11,86	-126,817	491,268	126,823	126,847
267	0,524	11,543	-122,678	494,968	122,684	123,146
268	0,525	11,213	-118,484	498,773	118,49	119,342
269	0,527	10,869	-114,233	502,683	114,239	115,431
270	0,529	10,512	-109,922	506,699	109,927	111,415
271	0,531	10,142	-105,549	510,824	105,554	107,29
272	0,533	9,759	-101,111	515,056	101,116	103,058
273	0,535	9,362	-96,607	519,398	96,611	98,716
274	0,537	8,952	-92,033	523,849	92,036	94,265
275	0,539	8,53	-87,387	528,409	87,391	89,704
276	0,541	8,094	-82,669	533,079	82,672	85,034
277	0,543	7,645	-77,875	537,859	77,877	80,254
278	0,545	7,184	-73,004	542,747	73,006	75,366
279	0,547	6,711	-68,054	547,744	68,055	70,369
280	0,549	6,225	-63,023	552,848	63,024	65,264
281	0,551	5,728	-57,91	558,059	57,911	60,053
282	0,553	5,22	-52,714	563,375	52,714	54,737
283	0,555	4,7	-47,432	568,794	47,432	49,318
284	0,557	4,17	-42,065	574,315	42,065	43,797
285	0,559	3,631	-36,611	579,935	36,61	38,177
286	0,561	3,082	-31,07	585,652	31,068	32,46
287	0,563	2,525	-25,439	591,463	25,437	26,649
288	0,565	1,959	-19,72	597,365	19,718	20,747
289	0,567	1,386	-13,912	603,354	13,909	14,757
290	0,569	0,807	-8,015	609,428	8,012	8,684
291	0,571	0,222	-2,029	615,582	2,025	2,53
292	0,573	-0,368	4,046	621,812	-4,051	-3,7

293	0,575	-0,961	10,209	628,113	-10,215	-10,002
294	0,576	-1,558	16,46	634,481	-16,466	-16,37
295	0,578	-2,156	22,797	640,91	-22,803	-22,799
296	0,58	-2,755	29,219	647,396	-29,226	-29,285
297	0,582	-3,354	35,725	653,933	-35,733	-35,822
298	0,584	-3,952	42,313	660,514	-42,321	-42,403
299	0,586	-4,547	48,981	667,134	-48,989	-49,023
300	0,588	-5,138	55,726	673,786	-55,736	-55,675
301	0,59	-5,724	62,547	680,464	-62,557	-62,353
302	0,592	-6,304	69,44	687,16	-69,451	-69,05
303	0,594	-6,876	76,403	693,869	-76,414	-75,758
304	0,596	-7,44	83,431	700,582	-83,443	-82,471
305	0,598	-7,993	90,522	707,291	-90,535	-89,181
306	0,6	-8,535	97,672	713,991	-97,685	-95,88
307	0,602	-9,064	104,876	720,672	-104,89	-102,561
308	0,604	-9,579	112,131	727,328	-112,145	-109,217
309	0,606	-10,078	119,431	733,949	-119,446	-115,838
310	0,608	-10,56	126,772	740,529	-126,788	-122,418
311	0,61	-11,024	134,149	747,059	-134,165	-128,948
312	0,612	-11,469	141,555	753,531	-141,572	-135,42
313	0,614	-11,893	148,987	759,937	-149,004	-141,826
314	0,616	-12,295	156,437	766,269	-156,456	-148,157
315	0,618	-12,674	163,901	772,519	-163,92	-154,407
316	0,62	-13,028	171,371	778,679	-171,391	-160,567
317	0,622	-13,357	178,842	784,741	-178,862	-166,63
318	0,624	-13,66	186,307	790,698	-186,327	-172,587
319	0,625	-13,935	193,758	796,542	-193,78	-178,431
320	0,627	-14,182	201,191	802,266	-201,213	-184,154
321	0,629	-14,399	208,597	807,862	-208,619	-189,75
322	0,631	-14,586	215,969	813,324	-215,992	-195,212
323	0,633	-14,743	223,301	818,644	-223,324	-200,532
324	0,635	-14,868	230,585	823,816	-230,609	-205,704
325	0,637	-14,96	237,814	828,835	-237,838	-210,723
326	0,639	-15,021	244,981	833,693	-245,006	-215,581
327	0,641	-15,048	252,078	838,386	-252,104	-220,274
328	0,643	-15,042	259,098	842,909	-259,125	-224,796
329	0,645	-15,002	266,035	847,255	-266,062	-229,142
330	0,647	-14,929	272,881	851,421	-272,908	-233,308
331	0,649	-14,823	279,628	855,402	-279,656	-237,289
332	0,651	-14,682	286,271	859,195	-286,299	-241,082
333	0,653	-14,509	292,801	862,796	-292,83	-244,683
334	0,655	-14,302	299,213	866,202	-299,242	-248,089
335	0,657	-14,062	305,5	869,411	-305,529	-251,297
336	0,659	-13,79	311,654	872,419	-311,684	-254,305
337	0,661	-13,486	317,671	875,226	-317,701	-257,112

338	0,663	-13,15	323,543	877,829	-323,574	-259,715
339	0,665	-12,784	329,266	880,228	-329,297	-262,114
340	0,667	-12,389	334,833	882,422	-334,865	-264,308
341	0,669	-11,964	340,239	884,411	-340,271	-266,297
342	0,671	-11,512	345,479	886,194	-345,511	-268,08
343	0,673	-11,032	350,548	887,773	-350,58	-269,659
344	0,675	-10,527	355,441	889,148	-355,473	-271,033
345	0,676	-9,997	360,153	890,32	-360,187	-272,206
346	0,678	-9,443	364,682	891,291	-364,716	-273,177
347	0,68	-8,867	369,023	892,063	-369,057	-273,948
348	0,682	-8,27	373,172	892,638	-373,206	-274,523
349	0,684	-7,654	377,127	893,018	-377,161	-274,903
350	0,686	-7,019	380,884	893,207	-380,918	-275,092
351	0,688	-6,368	384,441	893,207	-384,475	-275,092
352	0,69	-5,701	387,795	893,021	-387,829	-274,906
353	0,692	-5,021	390,944	892,654	-390,979	-274,539
354	0,694	-4,328	393,887	892,109	-393,922	-273,994
355	0,696	-3,625	396,622	891,39	-396,657	-273,275
356	0,698	-2,912	399,148	890,502	-399,183	-272,386
357	0,7	-2,192	401,463	889,448	-401,498	-271,332
358	0,702	-1,465	403,568	888,233	-403,604	-270,118
359	0,704	-0,734	405,462	886,862	-405,497	-268,747
360	0,706	0	407,145	885,34	-407,18	-267,225
361	0,708	0,735	408,616	883,671	-408,651	-265,556
362	0,71	1,471	409,877	881,861	-409,912	-263,746
363	0,712	2,205	410,927	879,914	-410,962	-261,799
364	0,714	2,936	411,767	877,837	-411,802	-259,721
365	0,716	3,663	412,399	875,632	-412,434	-257,517
366	0,718	4,384	412,823	873,307	-412,858	-255,192
367	0,72	5,097	413,041	870,866	-413,076	-252,752
368	0,722	5,803	413,055	868,315	-413,09	-250,2
369	0,724	6,498	412,865	865,658	-412,9	-247,543
370	0,725	7,183	412,474	862,9	-412,509	-244,786
371	0,727	7,855	411,884	860,047	-411,918	-241,933
372	0,729	8,513	411,096	857,104	-411,13	-238,99
373	0,731	9,157	410,113	854,075	-410,147	-235,961
374	0,733	9,786	408,936	850,966	-408,97	-232,852
375	0,735	10,398	407,569	847,782	-407,603	-229,668
376	0,737	10,992	406,013	844,526	-406,047	-226,412
377	0,739	11,567	404,271	841,204	-404,305	-223,09
378	0,741	12,123	402,346	837,82	-402,379	-219,707
379	0,743	12,658	400,239	834,379	-400,272	-216,266
380	0,745	13,173	397,953	830,885	-397,986	-212,772
381	0,747	13,665	395,491	827,342	-395,523	-209,229
382	0,749	14,135	392,855	823,754	-392,887	-205,641

383	0,751	14,582	390,048	820,125	-390,079	-202,012
384	0,753	15,005	387,071	816,459	-387,103	-198,346
385	0,755	15,404	383,928	812,759	-383,959	-194,647
386	0,757	15,777	380,621	809,03	-380,651	-190,918
387	0,759	16,126	377,151	805,273	-377,181	-187,162
388	0,761	16,449	373,522	801,494	-373,552	-183,382
389	0,763	16,745	369,735	797,694	-369,764	-179,583
390	0,765	17,016	365,792	793,877	-365,821	-175,766
391	0,767	17,259	361,695	790,046	-361,724	-171,935
392	0,769	17,476	357,447	786,202	-357,475	-168,091
393	0,771	17,665	353,048	782,35	-353,076	-164,239
394	0,773	17,827	348,501	778,49	-348,528	-160,38
395	0,775	17,962	343,807	774,627	-343,834	-156,516
396	0,776	18,069	338,967	770,76	-338,994	-152,65
397	0,778	18,149	333,983	766,894	-334,009	-148,784
398	0,78	18,201	328,856	763,029	-328,881	-144,919
399	0,782	18,225	323,586	759,167	-323,611	-141,057
400	0,784	18,221	318,175	755,31	-318,2	-137,201
401	0,786	18,191	312,624	751,459	-312,648	-133,35
402	0,788	18,132	306,932	747,616	-306,956	-129,508
403	0,79	18,046	301,1	743,783	-301,123	-125,674
404	0,792	17,933	295,129	739,959	-295,151	-121,851
405	0,794	17,793	289,018	736,147	-289,04	-118,039
406	0,796	17,626	282,767	732,346	-282,789	-114,238
407	0,798	17,432	276,376	728,559	-276,397	-110,451
408	0,8	17,212	269,845	724,785	-269,866	-106,678
409	0,802	16,965	263,172	721,026	-263,192	-102,919
410	0,804	16,693	256,357	717,281	-256,377	-99,174
411	0,806	16,394	249,399	713,552	-249,419	-95,445
412	0,808	16,07	242,297	709,838	-242,316	-91,731
413	0,81	15,721	235,049	706,139	-235,067	-88,033
414	0,812	15,346	227,653	702,457	-227,671	-84,35
415	0,814	14,947	220,108	698,79	-220,125	-80,684
416	0,816	14,524	212,412	695,139	-212,428	-77,033
417	0,818	14,077	204,562	691,504	-204,578	-73,398
418	0,82	13,607	196,557	687,884	-196,572	-69,778
419	0,822	13,113	188,393	684,279	-188,407	-66,174
420	0,824	12,596	180,067	680,69	-180,081	-62,584
421	0,825	12,057	171,578	677,114	-171,591	-59,009
422	0,827	11,495	162,921	673,553	-162,934	-55,447
423	0,829	10,912	154,093	670,005	-154,105	-51,899
424	0,831	10,308	145,091	666,469	-145,102	-48,364
425	0,833	9,683	135,91	662,945	-135,921	-44,84
426	0,835	9,038	126,548	659,433	-126,559	-41,328
427	0,837	8,372	117	655,931	-117,01	-37,826

428	0,839	7,688	107,261	652,438	-107,27	-34,333
429	0,841	6,984	97,328	648,954	-97,336	-30,849
430	0,843	6,262	87,195	645,477	-87,203	-27,372
431	0,845	5,522	76,858	642,006	-76,865	-23,901
432	0,847	4,765	66,313	638,541	-66,319	-20,436
433	0,849	3,99	55,553	635,08	-55,559	-16,975
434	0,851	3,2	44,575	631,621	-44,58	-13,516
435	0,853	2,394	33,372	628,164	-33,377	-10,059
436	0,855	1,573	21,94	624,708	-21,944	-6,602
437	0,857	0,737	10,274	621,25	-10,277	-3,144
438	0,859	-0,112	-1,633	617,789	1,63	0,317
439	0,861	-0,974	-13,784	614,324	13,783	3,781
440	0,863	-1,849	-26,187	610,854	26,186	7,252
441	0,865	-2,735	-38,845	607,376	38,844	10,729
442	0,867	-3,632	-51,764	603,89	51,764	14,216
443	0,869	-4,539	-64,949	600,394	64,95	17,713
444	0,871	-5,455	-78,405	596,885	78,407	21,221
445	0,873	-6,379	-92,137	593,363	92,139	24,744
446	0,875	-7,31	-106,149	589,826	106,152	28,281
447	0,876	-8,248	-120,445	586,271	120,448	31,836
448	0,878	-9,191	-135,029	582,698	135,033	35,41
449	0,88	-10,137	-149,904	579,104	149,909	39,004
450	0,882	-11,087	-165,073	575,488	165,079	42,62
451	0,884	-12,038	-180,539	571,848	180,546	46,26
452	0,886	-12,99	-196,304	568,182	196,311	49,926
453	0,888	-13,94	-212,367	564,489	212,375	53,62
454	0,89	-14,889	-228,73	560,767	228,739	57,342
455	0,892	-15,833	-245,392	557,014	245,401	61,095
456	0,894	-16,773	-262,351	553,229	262,361	64,88
457	0,896	-17,705	-279,605	549,411	279,616	68,7
458	0,898	-18,629	-297,15	545,557	297,161	72,554
459	0,9	-19,542	-314,98	541,666	314,992	76,445
460	0,902	-20,444	-333,09	537,737	333,103	80,374
461	0,904	-21,332	-351,472	533,769	351,485	84,343
462	0,906	-22,204	-370,115	529,761	370,13	88,351
463	0,908	-23,058	-389,011	525,711	389,026	92,401
464	0,91	-23,892	-408,144	521,62	408,16	96,493
465	0,912	-24,704	-427,502	517,486	427,518	100,628
466	0,914	-25,493	-447,067	513,309	447,084	104,805
467	0,916	-26,255	-466,821	509,088	466,839	109,026
468	0,918	-26,989	-486,743	504,825	486,761	113,291
469	0,92	-27,692	-506,81	500,518	506,829	117,598
470	0,922	-28,362	-526,997	496,169	527,017	121,948
471	0,924	-28,997	-547,278	491,778	547,298	126,339
472	0,925	-29,594	-567,621	487,346	567,642	130,771

473	0,927	-30,152	-587,996	482,876	588,018	135,242
474	0,929	-30,669	-608,368	478,368	608,39	139,751
475	0,931	-31,141	-628,701	473,824	628,724	144,295
476	0,933	-31,567	-648,955	469,249	648,979	148,871
477	0,935	-31,945	-669,091	464,643	669,115	153,478
478	0,937	-32,273	-689,065	460,011	689,09	158,11
479	0,939	-32,55	-708,834	455,357	708,859	162,765
480	0,941	-32,773	-728,35	450,684	728,376	167,439
481	0,943	-32,942	-747,567	445,997	747,593	172,126
482	0,945	-33,054	-766,435	441,302	766,461	176,821
483	0,947	-33,109	-784,904	436,604	784,932	181,52
484	0,949	-33,105	-802,925	431,909	802,953	186,216
485	0,951	-33,043	-820,446	427,223	820,475	190,902
486	0,953	-32,922	-837,418	422,553	837,446	195,573
487	0,955	-32,741	-853,789	417,906	853,818	200,22
488	0,957	-32,5	-869,51	413,29	869,539	204,837
489	0,959	-32,201	-884,533	408,712	884,563	209,415
490	0,961	-31,842	-898,812	404,181	898,842	213,947
491	0,963	-31,427	-912,301	399,705	912,331	218,424
492	0,965	-30,954	-924,959	395,292	924,99	222,837
493	0,967	-30,427	-936,747	390,951	936,778	227,179
494	0,969	-29,846	-947,628	386,69	947,659	231,44
495	0,971	-29,213	-957,569	382,518	957,601	235,612
496	0,973	-28,532	-966,543	378,445	966,575	239,686
497	0,975	-27,804	-974,524	374,477	974,556	243,654
498	0,976	-27,032	-981,493	370,624	981,525	247,508
499	0,978	-26,218	-987,433	366,893	987,465	251,239
500	0,98	-25,367	-992,335	363,293	992,367	254,839
501	0,982	-24,48	-996,193	359,83	996,225	258,303
502	0,984	-23,562	-999,005	356,511	999,037	261,622
503	0,986	-22,616	-1000,776	353,343	1000,808	264,791
504	0,988	-21,645	-1001,515	350,331	1001,547	267,803
505	0,99	-20,653	-1001,235	347,48	1001,267	270,654
506	0,992	-19,643	-999,955	344,795	999,986	273,339
507	0,994	-18,619	-997,697	342,279	997,728	275,855
508	0,996	-17,584	-994,488	339,935	994,519	278,199
509	0,998	-16,542	-990,359	337,767	990,39	280,368
510	1	-15,496	-985,344	335,774	985,375	282,36

## **ANEXO F: MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA MÁQUINA AGITADORA DE BARRILES DE ALMACENAMIENTO DE CERVEZA ARTESANAL**

### **Operación**

La operación de una máquina se refiere a todas las acciones y actividades necesarias para poner en funcionamiento y controlar correctamente una máquina o equipo con el fin de realizar tareas específicas. En esta sección se detallará el uso adecuado de la máquina para llevar a cabo las funciones para las que fue diseñada, siempre salvaguardando la integridad del operario y el equipo.

### **Antes de operar**

Existen varias exigencias a seguir antes del proceso de encendido y operación de la máquina agitadora de barriles, estos se describen a continuación:

- Antes de iniciar el proceso de operación de la máquina es necesario verificar que no existan objetos que obstaculicen el movimiento del mecanismo o de la estructura móvil, en caso de existir hay que retirarlos a una distancia segura, estos por lo general suelen ser cables, instrumentos de medición o mangueras de gas y líquido.
- Compruebe que el equipo se encuentre ubicado en una superficie plana para evitar el tambaleo de la máquina, ruidos y vibraciones que afecten al funcionamiento.
- Asegúrese de sujetar de manera segura y correcta el barril mediante los asideros colocados en la parte interna de los laterales de la estructura móvil.
- Asegúrese que el tablero de mando no presenta ningún indicador de alerta y que la llave de seguridad esté colocada para su arranque.

### **Operación de la máquina**

Para iniciar con la operación de la máquina agitadora de barriles debemos seguir los siguientes pasos:

- Compruebe que el cabezal del barril se encuentra conectado y que las válvulas de las líneas de gas carbónico se encuentren abiertas y seteadas a la presión deseada a través del regulador de presión del tanque de CO<sub>2</sub>.
- Desactive el bloqueo de operación con la llave de seguridad.
- Presione el botón de inicio y controle el tiempo de agitación.

### **Paro de emergencia**

El paro de emergencia en una máquina está diseñado para detener rápidamente y de manera segura el funcionamiento de la máquina en situaciones peligrosas o de emergencia. En el presente equipo es esencial tener un sistema de paro de emergencia para garantizar la seguridad de los operadores. El botón de paro de emergencia se encuentra situado en el tablero de control de mando junto a los

indicadores digitales, las razones más comunes de accionamiento de paro de emergencia en este tipo de mecanismos son:

- Peligro para la seguridad personal
- Atrapamiento o atracción
- Incendio o explosión
- Fallo en los sistemas de control
- Sobrecarga o funcionamiento incontrolado
- Accidente inminente
- Mal funcionamiento eléctrico
- Problemas de control de calidad

### **Después de la operación**

Después de la operación de la máquina se deben seguir los siguientes pasos para desmontar los equipos auxiliares para el proceso de carbonatación, y estos son:

- Asegurarse que el equipo se detenga por completo y que no exista posibilidad de que la máquina se ponga en acción nuevamente.
- Desconectar y cerrar las válvulas de gas carbónico, tanto del barril como del tanque de CO<sub>2</sub>.
- Liberar los asideros que sujetan al barril y desmontarlo de la base móvil.

## **MANTENIMIENTO**

El mantenimiento de una máquina se refiere a todas las actividades planificadas y realizadas para asegurar que la máquina funcione de manera óptima, confiable y segura durante su ciclo de vida útil. A continuación, se especifican las directrices recomendadas para esta actividad.

### **Información sobre limpieza del equipo**

La limpieza del equipo se recomienda realizar al empezar y acabar la operación, debido a que el barril contenedor estará frío y se producirá la condensación del vapor de agua presente en el aire, generando el aspecto empañado al barril y humedeciendo la superficie de este, tendiendo a cubrir de partículas de polvo que se encuentren depositadas en los laterales de la base móvil. Por otro lado, evitará la corrosión y daño de la estructura metálica por líquidos salpicados sobre la máquina.

### **Agitador y condiciones de trabajo**

El agitador está diseñado para mezclar hasta 400 ml de la emulsión de silicona. No es recomendable añadir más, ya que la medida sobrepasaría las capacidades del motor y se podría quemar.

### **Programa de intervalos de mantenimiento**

El programa consiste en la revisión de los componentes de la máquina agitadora de barriles, para este proceso utilizaremos un mantenimiento previsual en donde la mayoría de las acciones serán a partir de las siguientes herramientas de control:

- Control visual
- Control auditivo
- Control por resudación