

**DISEÑO Y SUPERVISIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
UN SISTEMA DE FLOCULACIÓN PARA LA PLANTA LA FLORA DEL
ACUEDUCTO DE BUCARAMANGA**

SERGIO DANIEL OBANDO PÉREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2019

**DISEÑO Y SUPERVISIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
UN SISTEMA DE FLOCULACIÓN PARA LA PLANTA LA FLORA DEL
ACUEDUCTO DE BUCARAMANGA**

SERGIO DANIEL OBANDO PÉREZ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Director

ISNARDO GONZÁLEZ JAIMES

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2019

DEDICATORIA

Primero a Dios por la vida y la salud para culminar esta importante etapa de mi vida. A mi madre Elizabeth Pérez Hernández en la que siempre encontré una voz de aliento y sabias palabras en momentos complicados y a mi padre Adolfo León Obando Santamaría el mejor profesor, guía y quien en muchas ocasiones fue mi compañero de estudio, gracias por su apoyo incondicional, amor, confianza y respaldo durante todo el desarrollo de mi carrera.

A mi Nona Georgina Hernández por sus oraciones y el apoyo dado durante este camino.

A mi hermano Federico Obando, mis tíos Jaime, Pablo y Dora, primos y demás familiares que con sus consejos, apoyo y confianza aportaron en mi formación académica y personal.

A Gennifer Yolima Caballero Bravo (Tutu) quien estuvo presente en momentos cruciales de la finalización de esta carrera y que con su paciencia, amor y apoyo hicieron más fácil culminarla.

AGRADECIMIENTOS

Al Profesor y amigo Isnardo González Jaimes, Director del proyecto, por sus consejos académicos y de vida, aportes, respaldo, guía y compromiso contribuyeron a la culminación de este proyecto.

A los Ingenieros Mecánicos Jolman Lozano Pico codirector del proyecto, Juan Manuel Galvis Casanova y al Ingeniero Ambiental Oscar Naranjo funcionarios del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb) por su ayuda, asesoría y disposición durante el desarrollo de este proyecto.

A todo el personal del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb) quienes me colaboraron en el montaje y puesta en marcha del prototipo.

A mis amigos quienes se convirtieron en una familia y que dejan gratos recuerdos durante los años del desarrollo de la carrera.

A mis padres, y demás familiares quienes aportaron económica y personalmente en el transcurso de este sueño.

A todos los profesores de la Universidad Industrial de Santander en especial a los de Ingeniería Mecánica por su formación personal y profesional.

Y a todas las personas que el transcurso de mi vida estudiantil se vieron relacionadas conmigo, y que dejaron buenos recuerdos, grandes consejos, o que me brindaron apoyo emocional u académico.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	23
1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	24
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	24
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO	27
1.3.1 Objetivo General	27
1.3.2 Objetivos Específicos.....	27
2. TIPOS DE FLOCULADORES	28
2.1 LA FLOCULACIÓN	28
2.2 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (T)	29
2.3 GRADIENTE DE VELOCIDAD	29
2.4 NÚMERO DE CAMP	29
2.5 FLOCULADORES MECÁNICOS	31
2.5.1 Floculadores con agitadores reciprocantes (Walking Beam).	31
3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	35
3.1 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN CALIDAD (QFD)	35
3.1.2 Criterios de diseño	35
3.1.2 Criterios de diseño	35
3.1.3 Subsistema de floculación	36
3.2 PLANTEAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS	37
3.2.1 Alternativas para el subsistema de transmisión	37

3.2.2 Alternativas para el subsistema de floculación	39
3.3 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS	41
3.4 ESPECIFICACIÓN DE LA ALTERNATIVA GANADORA.....	42
4. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL FLOCULADOR.....	44
4.1 GRADIENTE DE VELOCIDAD	44
4.2 TIEMPO DE RETENCIÓN	46
4.3 DIMENSIONES DEL MECANISMO	47
4.4 CÁLCULO DEL COEFICIENTE C_D	51
4.5 ÁREA TOTAL REAL DE PALETAS	51
4.6 DIMENSIONES DEL ALERÓN	52
4.7 VELOCIDAD DE ROTACIÓN DEL MOTOR	52
4.8 ENSAMBLE DEL FLOCULADOR SOBRE LA CÁMARA DE FLOCULACIÓN	54
5.1 VALOR DE TORQUE CRÍTICO.....	56
5.1.1 Análisis cinemático y cálculo de desplazamientos.	57
5.1.2 Análisis cinético.	60
5.2.1 Diseño del mecanismo manivela – biela – balancín.	64
5.2.2 Diseño de la viga que soporta los componentes.....	70
6. DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL FLOCULADOR	73
6.1 SEMEJANZA GEOMÉTRICA	73
6.2 SEMEJANZA CINEMÁTICA	73

6.2.1 Número de Froude.....	74
6.2.2 Relación de las velocidades lineales del floculador real (fr) con el prototipo (p).	74
6.2.3 Relación del tiempo de retención hidráulica del floculador real (fr) con el prototipo (p).....	75
6.2.4 Relación de caudal entre el floculador real (fr) y el prototipo (p).	76
6.2.5 Relación de gradientes entre el floculador real (fr) y el prototipo (p). Para obtener esta relación, se parte de la formula general de gradiente:	77
6.2.6 Relación de las velocidades angulares entre el floculador real (fr) y el prototipo.....	78
6.3 DIMENSIONES DEL MECANISMO	79
6.4 ENSAMBLE DEL PROTOTIPO DEL FLOCULADOR SOBRE EL TANQUE DEL FLOCULACIÓN	80
6.5.1 Valor del torque crítico.	82
6.5.2 Análisis cinemático y cálculo de desplazamientos.	83
6.5.3 Análisis cinético.	86
6.6 DISEÑO MECÁNICO DE LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO	89
6.6.1 Diseño del mecanismo manivela – biela – balancín.	90
6.6.2 Diseño hidráulico.....	95
6.6.3 Orificios circulares para la distribución del caudal de entrada al prototipo del floculador.....	95

6.6.4 Tamaño de los orificios en la lámina de paso a la cámara 1 de floculación del prototipo.	96
7. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES	97
7.1 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL FLOCULADOR REAL.....	97
7.1.1 Chumaceras para los ejes de 3"	97
7.1.2 Chumaceras para las bielas del mecanismo.....	101
7.1.3 Motorreductores de cada cámara.	105
7.2 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO DEL FLOCULADOR.	107
7.2.1 Chumaceras para los ejes de 1"	107
7.2.2 Chumaceras para las bielas del mecanismo.....	112
7.2.3 Motorreductores de cada cámara	115
8. DISEÑO DE LA CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DEL PROTOTIPO	118
8.1 Diseño de la construcción	118
9. MANUAL DEL EQUIPO REAL Y EL PROTOTIPO	143
10. CONCLUSIONES	145
BIBLIOGRAFIA	147

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un Floculador de paletas de eje horizontal	25
Figura 2. Moto reductor del sistema de transmisión del Floculador de Eje Horizontal.....	25
Figura 3. Sistema de transmisión de potencia por cadenas del Floculador de Eje Horizontal.....	26
Figura 4. Esquema del proceso de potabilización del agua.	28
Figura 5. Proceso de floculación.....	28
Figura 6. Floculador oscilante o Walking Beam.	31
Figura 7. Esquema de un agitador reciprocante	32
Figura 8. Primera alternativa para el subsistema de transmisión.....	37
Figura 9. Segunda alternativa para el subsistema de transmisión.....	38
Figura 10. Tercera alternativa para el subsistema de transmisión.....	39
Figura 11. Primera alternativa para el subsistema de floculación.	40
Figura 12. Segunda alternativa para el subsistema de floculación.	40
Figura 13. Tercera alternativa para el subsistema de floculación.	41
Figura 14. Especificación de la alternativa ganadora.....	42
Figura 15. Actual sistema de floculación de la planta la Flora (Floculador de paletas de eje horizontal).	45
Figura 16. Mecanismo manivela – biela – balancín.	47
Figura 17. Mecanismo de retorno rápido.	50
Figura 18. Alerón, cuya dimensión D es la distancia entre centros donde se ubica el pasador.	52
Figura 19. Ensamble del eje con el tubo y la brida.	54
Figura 20. Ensamble general del floculador sobre la cámara de floculación. ...	55

Figura 21. Ensamble general del floculador sobre las 3 cámaras de floculación.....	55
Figura 22. Ángulo recorrido por el balancín respecto de la vertical.	57
Figura 23. Dimensiones del mecanismo manivela- biela- balancín.	58
Figura 24. Gráfica del desplazamiento de la manivela vs el del balancín.	59
Figura 25. Ecuaciones de posición y velocidad del mecanismo de la figura 34.....	59
Figura 26. Posición de análisis de las cargas.	61
Figura 27. Ensamblaje del alerón con los elementos agitadores.	61
Figura 28. DCL del alerón.....	62
Figura 29. Tabla del sistema de agitación.....	62
Figura 30. DCL tabla izquierda.	62
Figura 31. DCL tabla derecha.	63
Figura 32. Propiedades del acero estructural ASTM A36.	64
Figura 33. Fuerza de gravedad para el análisis del mecanismo con el fin que sean considerados de pesos de los componentes.	65
Figura 34. Soportes fijos del mecanismo.	65
Figura 35. Enmallado y soportes fijos del sistema.	66
Figura 36. Fuerza máxima sobre la manivela.	67
Figura 37. Configuración de la herramienta de Fatiga (Fatigue Tool) del software Ansys.	68
Figura 38. Resultado de la vida del mecanismo.	69
Figura 39. Resultados del factor de seguridad a fatiga del mecanismo y sus componentes.	70

Figura 40. Resultados de las deformaciones totales sobre el conjunto.	71
Figura 41. Soportes fijos, aceleración de la gravedad para tener en cuenta los propios pesos y fuerzas en cada soporte.....	71
Figura 42. Resultados de las deformaciones totales sobre el conjunto.	72
Figura 43. Factor de seguridad estático de todo el conjunto.....	72
Figura 44. Ensamble del eje con la viga y demás componentes mecánicos. ...	81
Figura 45. Ensamblaje general del prototipo del floculador sobre el tanque.....	81
Figura 46. Ángulo recorrido por el balancín respecto de la vertical.	83
Figura 47. Dimensiones del mecanismo manivela – biela – balancín del prototipo.	84
Figura 48. Ecuaciones de posición y velocidad del mecanismo de la figura 47	84
Figura 49. Gráfica del desplazamiento de la manivela vs el del balancín.	85
Figura 50. Posición de análisis de cargas del prototipo.	86
Figura 51. Ensamblaje del alerón con los elementos agitadores del prototipo.	87
Figura 52. DCL del alerón del prototipo.	87
Figura 53. DCL tabla izquierda.	88
Figura 54. Tabla del sistema de agitación.....	88
Figura 55. DCL tabla derecha.	88
Figura 56. Enmallado para determinar los esfuerzos sobre el mecanismo.....	90
Figura 57. DCL del mecanismo del prototipo.	90
Figura 58. Configuración de la herramienta de fatiga (Fatigue Tool) del software Ansys.	92
Figura 59. Resultado de la vida del mecanismo.	93

Figura 60. Resultados del factor de seguridad a fatiga del mecanismo del prototipo y sus componentes.	94
Figura 61. Platina con los orificios de distribución de caudal.	95
Figura 62. Lámina de paso a la cámara de floculación 1.	96
Figura 63. DCL de los ejes con las chumaceras, plano X-Y.	97
Figura 64. Vista del alerón desde el plano Z-Y.	98
Figura 65. Selección de chumaceras del catálogo del fabricante SKF.	99
Figura 66. Especificaciones de la chumacera seleccionada.	100
Figura 67. DCL de la biela con el pasador.	101
Figura 68. Selección de chumaceras del catálogo del fabricante SKF.	103
Figura 69. Especificaciones de la chumacera seleccionada.	104
Figura 70. Motorreductor de la cámara 1.	105
Figura 71. Motorreductor de la cámara 2.	106
Figura 72. Motorreductor de la cámara 3.	106
Figura 73. DCL de los ejes con las chumaceras, plano X-Y.	107
Figura 74. DCL de los ejes con las chumaceras, plano X-Z.	107
Figura 75. Selección de chumaceras del catálogo del fabricante SKF.	110
Figura 76. Especificaciones de la chumacera seleccionada.	111
Figura 77. DCL de la biela con el pasador.	112
Figura 78. Selección de chumaceras del catálogo del fabricante SKF.	114
Figura 79. Especificaciones de la chumacera seleccionada.	114
Figura 80. Selección de los motorreductores del prototipo para cada una de las 3 cámaras.	116
Figura 81. Equipo de jarras de la planta la Flora del amb.	122

Figura 82. Colorímetro digital de la planta la Flora del amb.....	122
Figura 83. Turbidímetro digital de la planta la Flora del amb	123
Figura 84. Sección antes de la coagulación en la canaleta Parshall.	123
Figura 85. Jarra después de simulada la agitación cámara a cámara.	124
Figura 86.Toma de muestra de la jarra del agua sedimentada.	125
Figura 87. Gráfico de la turbiedad vs los gradientes equivalentes en RPM. ...	129
Figura 88. Gráfico del color vs los gradientes equivalentes en RPM.	130
Figura 89. Gráfico de la turbiedad vs los gradientes equivalentes en RPM. ...	131
Figura 90. Gráfico del Color vs los gradientes equivalentes en RPM.	132
Figura 91. Gráfico de la turbiedad vs los gradientes equivalentes del prototipo en RPM.	135
Figura 92. Combinaciones de RPM del prototipo para la figuras 153.	135
Figura 93. Gráfico del color vs los gradientes equivalentes del prototipo en RPM.	135
Figura 94. Gráfico de la turbiedad vs los gradientes equivalentes del prototipo en RPM.	136
Figura 95. Gráfico del color vs los gradientes equivalentes del prototipo en RPM.	137
Figura 96. Montaje del prototipo.	138
Figura 97. Toma de muestra del agua floculada de la cámara 3.	139
Figura 98. Muestras de agua floculada.	139
Figura 99. Sistema de agitación del prototipo en funcionamiento.	140
Figura 100. Moto bomba succionando agua coagulada, justo antes de la entrada a los floculadores actuales (sistema de eje rotatorio horizontal).	141

Figura 101. Sistema de tubería con válvula reguladora de caudal a la entrada.....	141
Figura 102. Salida del agua del prototipo.....	141
Figura 103. Acta de entrega del prototipo.	142

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los floculadores	30
Tabla 2. Tablas de Cálculo de los coeficientes del floculador tipo “Walking Beam”.	33
Tabla 3 Matriz de calidad del subsistema de floculación.	36
Tabla 4. Ponderación, del subsistema de floculación.	37
Tabla 5. Evaluación de las alternativas del subsistema de transmisión.	41
Tabla 6. Evaluación de las alternativas del subsistema de potencia.	42
Tabla 7. Evaluación de las alternativas del subsistema de floculación.	42
Tabla 8. Gradientes de velocidad para el floculador de paletas de eje horizontal.	45
Tabla 9. Gradientes de velocidad para el floculador reciprocante (Walking beam).	46
Tabla 10. Cálculo del tiempo de retención hidráulica.	46
Tabla 11. Tablas de Cálculo de los coeficientes del floculador tipo “ Walking Beam”.	49
Tabla 12. Cálculo del coeficiente de arrastre.	51
Tabla 13. Cálculo del área total real de paletas.	51
Tabla 14. Cálculo de las RPM de cada motor.	53
Tabla 15. Valores de torque generados en cada compartimiento.	57
Tabla 16. Resultados de la síntesis del mecanismo.	58
Tabla 17. Resultados de los desplazamientos del balancín.	60
Tabla 18. Resultados obtenidos de los DCL de las figuras 40, 42 y 43.	63
Tabla 19. Cálculo de la fuerza máxima de la manivela.	67

Tabla 20. Cálculo de la fuerza mínima de la manivela.....	68
Tabla 21. Pesos de los componentes que soporta la viga.	70
Tabla 22. Dimensiones del tanque del prototipo.	73
Tabla 23. Tiempo de retención hidráulica del prototipo.....	76
Tabla 24. Caudal del prototipo	77
Tabla 25. Gradientes del prototipo en cada cámara de floculación.	78
Tabla 26. RPM de los motores del prototipo.	79
Tabla 27. Dimensiones del mecanismo del prototipo.....	80
Tabla 28. Dimensiones del mecanismo del prototipo con la escala 1:4.	80
Tabla 29. Valores de torque generados en cada compartimiento del prototipo.....	82
Tabla 30. Resultados de la síntesis.	84
Tabla 31. Resultados de los desplazamientos del balancín.	85
Tabla 32. Resultados obtenidos de los DCL de las figuras 81, 82, 83 y 84.	89
Tabla 33. Cálculo de la fuerza máxima de la manivela.	91
Tabla 34. Cálculo de la fuerza mínima de la manivela.....	91
Tabla 35. Número de orificios para la distribución del caudal a la entrada del prototipo del floculador.....	95
Tabla 36. Tamaño de los orificios en la lámina de paso a la cámara 1 de floculación.	96
Tabla 37 .Cálculo de las fuerzas que soportan las chumaceras	98
Tabla 38. Cálculo de la capacidad de carga que debe soportar la chumacera seleccionada.	99

Tabla 39. Cálculo de la capacidad de carga que debe soportar la chumacera seleccionada.....	102
Tabla 40. Cálculo de la fuerza que soporta cada una de las chumaceras que soportan el pasador de la biela.	102
Tabla 41. Cálculo de los torques requeridos por cada uno de los motorreductores.	105
Tabla 42. Cálculo de la fuerza que soporta cada una de las 4 chumaceras que soportan el eje.	108
Tabla 43. Cálculo de la capacidad de carga que debe soportar la chumacera seleccionada.....	109
Tabla 44. Cálculo de la fuerza que soporta cada una de las chumaceras que sostienen el pasador de biela.	113
Tabla 45. Cálculo de la capacidad de carga que debe soportar la chumacera seleccionada.....	113
Tabla 46. Cálculo de la capacidad de carga que debe soportar la chumacera seleccionada.....	115
Tabla 47. Presupuesto de construcción del prototipo.	117
Tabla 48. Operaciones que se le realizaron a las piezas que componen el prototipo.....	118
Tabla 49. Operaciones realizadas al tanque del prototipo.	119
Tabla 50. Operaciones realizadas a los alerones.	119
Tabla 51. Operaciones realizadas a las bielas del mecanismo.....	120
Tabla 52. Operaciones realizadas a las manivelas del prototipo	120
Tabla 53. Operaciones realizadas a los balancines del mecanismo	121

Tabla 54. Gradientes equivalentes para las pruebas de jarras.	126
Tabla 55. Prueba con los gradientes superiores.	127
Tabla 56. Prueba con los gradientes medios.	127
Tabla 57. Prueba con los gradientes inferiores.	127
Tabla 58. Prueba con el gradiente promedio superior.	127
Tabla 59. Prueba con el gradiente promedio medio.	128
Tabla 60. Prueba con el gradiente promedio inferior.	128
Tabla 61. Combinaciones de RPM para la figuras 148.	128
Tabla 62. Combinaciones de RPM para la figuras 149.	129
Tabla 63. Combinaciones entre los gradientes superiores, medios e inferiores para las figuras 150 y 151.	131
Tabla 64. Gradientes del prototipo equivalentes en las pruebas de jarras.	133
Tabla 65. Prueba con los gradientes superiores del prototipo.	134
Tabla 66. Prueba con los gradientes medios del prototipo.	134
Tabla 67. Prueba con los gradientes inferiores del prototipo.	134
Tabla 68. Combinaciones de RPM para la figuras 152.	134
Tabla 69. Combinaciones de RPM del prototipo para la figuras 153.	136

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y SUPERVISIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE FLOCULACIÓN PARA LA PLANTA LA FLORA DEL ACUEDUCTO DE BUCARAMANGA*.

AUTOR: SERGIO DANIEL OBANDO PÉREZ**

PALABRAS CLAVE: Diseño, Floculación, Prototipo, amb***, agitación mecánica, floculador reciprocante.

DESCRIPCION:

En el presente trabajo de grado se realizó el diseño de un floculador reciprocante para el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP (amb), cuya ubicación será en la Planta la Flora del mismo, para que la empresa pueda cambiar el sistema actual de floculación, por uno reciprocante, cuyos componentes están sobre la superficie de la lámina de agua.

Luego de planteado el diseño conceptual del floculador real, se continuo con el diseño cinemático del equipo según el espacio y relación entre sus barras; después se realizó el diseño mecánico que comprueba la selección de dimensiones, con resultados óptimos de factores de seguridad obtenidos usando un software CAE (Ansys) corroborando los resultados de los métodos ingenieriles convencionales.

El diseño anterior se realizó en las posiciones críticas del floculador para asegurar el funcionamiento del equipo durante toda su operación. Basado en los mismos criterios de diseño del equipo real, se diseña y se supervisa la construcción de un prototipo del sistema de floculación reciprocante, escalado con las capacidades del equipo real, con el fin de verificar el proceso de floculación, los métodos de diseño y determinar las mejoras y comportamiento del prototipo con el agua de la Planta La Flora para determinar si el sistema actual puede ser reemplazado por el sistema reciprocante; en el documento también se encuentran consignados los procesos de manufactura realizados al prototipo y las pruebas, finalmente las conclusiones donde se determina que el diseño mecánico fue correcto ya que el prototipo cumple la función de agitar el agua pero se anota que debe haber un cambio en los diámetros de entrada y salida del agua, para tener un floc consistente.

*Proyecto de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.
Director: Ing. Isnardo González Jaimes

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND SUPERVISION OF THE CONSTRUCTION OF A PROTOTYPE OF A FLOCCULATION SYSTEM FOR THE PLANT THE FLORA OF THE AUCEDUCT OF BUCARAMANGA *.

AUTHOR: SERGIO DANIEL OBANDO PÉREZ **

KEY WORDS: Design, flocculation, prototype, amb, mechanical agitation, walking beam flocculator.

DESCRIPTION:

In the present work of degree the design of a walking beam flocculator for the Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga SA ESP (amb) was carried out, whose location will be in the Flora Plant of the same, so that the company can change the current system of flocculation, by a reciprocating one, whose components are on the surface of the sheet of water.

Then, the conceptual design of the real flocculator is described, the kinematic design of the equipment was continued according to the space and the relationship between its bars; after the mechanical design was made, the selection of dimensions is checked, with optimal results of the safety factors obtained using a CAE software (Ansys) corroborating the results of conventional engineering methods.

The previous design was carried out in the critical positions of the flocculator to ensure the operation of the equipment throughout its operation. Based on the same design criteria of the real equipment design, the construction of a prototype of the reciprocating flocculation system is designed and supervised, scaled with the capabilities of the real equipment, in order to verify the flocculation process, the design methods and to determine the improvements and the behavior of the prototype with the water of the plant The flora to determine if the current system can be replaced by the walking beam system; in the document are also consigned the manufacturing processes carried out the prototype and the tests, finally the conclusions where it is determined that the mechanical design was correct since the prototype fulfills the function of stirring the water but it is noted that there must be a change in the water inlet and outlet diameters, to have a consistent floc.

*Degree Project

**Physical – mechanical Engineering faculty. Mechanical Engineering School.
Director: Eng. Isnardo González Jaimes

INTRODUCCIÓN

La constante búsqueda del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb) por brindar un servicio de calidad a sus usuarios, lo ha llevado a mejorar procesos internos, imperceptibles a los ojos y el bolsillo de nosotros los consumidores del preciado líquido. El proceso a mejorar motivo de este trabajo de grado, es el de la floculación, que a grandes rasgos es la agitación mecánica de toda el agua captada por la planta de tratamiento de La Flora, a la cual se le añaden químicos (floculantes) para aglutinar las partículas coloidales presentes en el agua; a pesar de que dicho procedimiento ya existe, en este libro se plantea el cambio y la mejora del sistema actual, lo que disminuye y hace más fácil el mantenimiento y la supervisión del proceso. A continuación se hará el diseño del aparato mecánico para la agitación del agua llamado Floculador Reciprocante (Walking Beam) usando la metodología propia para el cálculo de estos sistemas proporcionada por libros de acueductos y expertos que se han dedicado a estudiar dicho fenómeno, además, se diseña y construye un prototipo del equipo de bajo costo que permita realizar pruebas para comprobar los cálculos hechos y la metodología utilizada. El diseño mecánico de todos los componentes del floculador es realizado bajo la metodología utilizada por los libros de acueducto y comprobados por medio de software obteniendo factores de seguridad que avale el diseño; también se seleccionan los componentes del floculador como motor, sistema de transmisión, cojinetes con el fin de dar una alta confiabilidad al equipo. El prototipo es diseñado bajo la misma metodología y será construido manteniendo los criterios de diseño del equipo para la planta de la Flora. Por último se mostraran los resultados obtenidos en las pruebas del prototipo con el fin de mejorar el diseño del equipo real, además de los manuales de mantenimiento para cada uno.

1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Hoy en día con el crecimiento de las tecnologías los procesos de purificación del agua también han mejorado considerablemente logrando mejorar la calidad de vida de las personas, como ocurre en la ciudad de Bucaramanga, donde se encuentra la mejor planta de tratamiento de Colombia que es El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb).

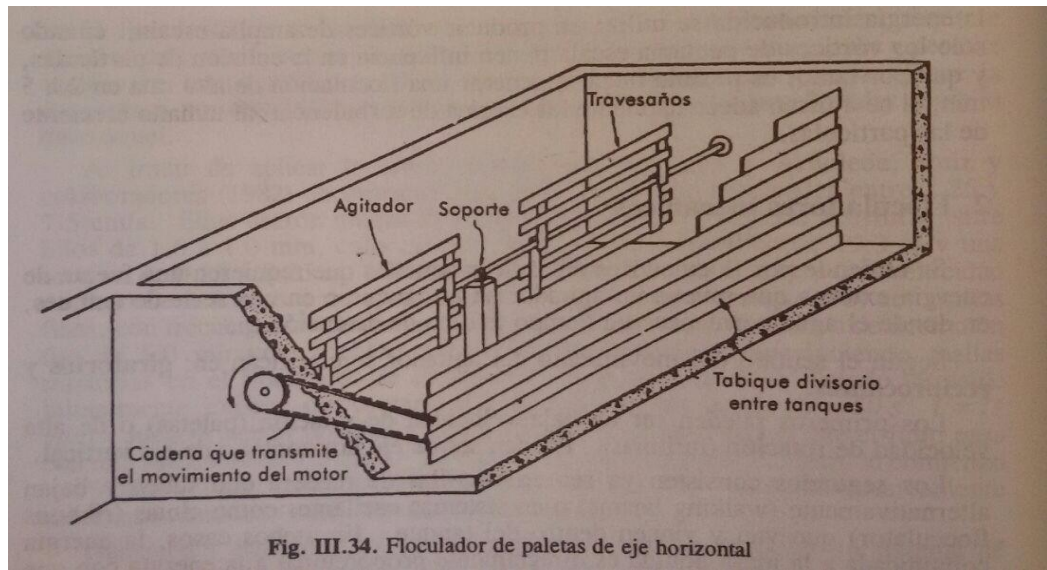
El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga posee diferentes plantas de tratamiento como lo son la de la Flora, Bosconia, Morrorico y Floridablanca, en las cuales se trabaja constantemente para la mejora de los procesos y así seguir manteniendo la excelente calidad del agua.

Estas 4 plantas realizan los mismos procesos de purificación del agua pero con tecnologías diferentes, entre los procesos de purificación se encuentran la aireación, la presedimentación, la medición del flujo, la dosificación de alumbre (Sulfato de Aluminio), la filtración, la sedimentación y la floculación.

Con el aumento de población, y en aras de hacer los procesos más rápidos, eficientes, más económicos de mantener, y menos peligrosos para los mantenedores, la planta de la Flora cuya capacidad es de 1020 L/s busca mejorar el sistema de floculación actual por uno más sencillo.

La floculación es el proceso en el cual se añade un químico (Sulfato de Aluminio), al agua que viene de la fuente hídrica (Río Tona) hacia la planta de la Flora, se mezcla rápidamente en la canaleta Parshall y posterior las partículas que quedaron en suspensión son agitadas por los floculadores donde por medio de atracción eléctrica estas partículas se aglomeran y caen por gravedad.

Figura 1. Esquema de un Floculador de paletas de eje horizontal



Fuente: ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua Tomo 1 [imagen]. Bogotá: McGraw-Hill, 2000.

El agitador o floculador existente en la planta la Flora es un floculador rotativo mecánico de paletas de eje horizontal, que tiene un mantenimiento de tipo correctivo, un sistema de potencia obsoleto peligroso de operar y verificar.

Figura 2. Moto reductor del sistema de transmisión del Floculador de Eje Horizontal.



Debido a estos inconvenientes el amb está interesado en cambiar el sistema de floculación a uno que permita un mejor mantenimiento y no sea peligroso para los operarios.

1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Debido al crecimiento poblacional, la búsqueda por optimizar los procesos en cualquier tipo de industria es un objetivo incansable para los ingenieros, tal cual se realiza en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga planta la Flora, es por ello la necesidad de migrar hacia un sistema más eficiente y que permita un mantenimiento preventivo programado, o al menos una inspección visual y auditiva detallada.

Con otro sistema de floculación que no esté sumergido sino que por el contrario sus partes estén expuestas las inspecciones diarias visuales permitirían prever cualquier tipo de inconveniente y no requerían de paradas de planta prolongadas, sino por el contrario serían cortas pues el nuevo sistema tendría un suministro de potencia independiente, lo que haría que pueda dejar de funcionar un floculador sin que el otro lo deje de hacer, contrario a lo que sucede hoy en día pues los floculadores dependen del mismo sistema de potencia.

Otra ventaja evidente para el acueducto metropolitano es que con la construcción de un prototipo, se pueden realizar pruebas de laboratorio con una menor cantidad de insumos, tiempos, y variando los parámetros presente en el proceso

Figura 3. Sistema de transmisión de potencia por cadenas del Floculador de Eje Horizontal. de floculación.



1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.3.1 Objetivo General. Mejorar el proceso de floculación del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb), por medio del reemplazo del actual sistema, a uno más económico y fácil de mantener, comprobando la mejora por medio de un prototipo que contribuya a posteriores investigaciones del amb y con esto continuar con el propósito misional de la Universidad Industrial de Santander en el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Diseñar un sistema de floculación que cumpla con las siguientes características:
 - Capacidad 510 L/s.
 - Tiempo de retención de 25 a 30 min.
 - Turbiedad 4000 NTU (*Nephelometric Turbidity Unit o Unidades Nefelométricas de turbidez*).

- Diseñar un prototipo por medio de la misma metodología de cálculo del primer objetivo que cumpla con las siguientes especificaciones:
 - Capacidad 0.7 L/s.
 - Tiempo de retención de 25 a 30 min.
 - Turbiedad 4000 NTU (*Nephelometric Turbidity Unit o Unidades Nefelométricas de turbidez*).

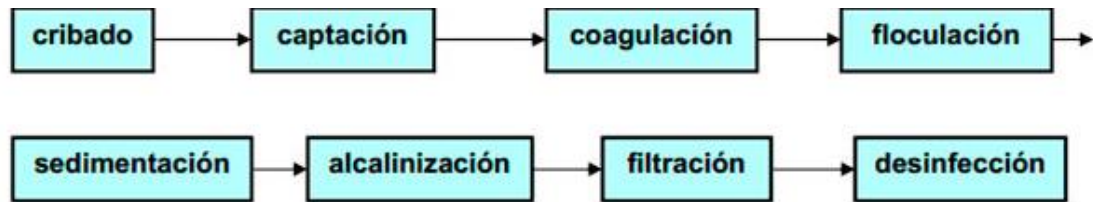
- Supervisar la construcción de dicho prototipo con el fin de comprobar los procesos de diseño llevados a cabo, para que sea usado por el amb como un floculador de laboratorio.

- Redactar el manual de mantenimiento tanto del prototipo, como del sistema de floculación.

2. TIPOS DE FLOCULADORES

La potabilización del agua consta de diferentes etapas, fundamentales para que esta sea apta para el consumo humano, el siguiente esquema ilustra las diferentes fases de potabilización:

Figura 4. Esquema del proceso de potabilización del agua.



Fuente: < <http://edos.concordia.gob.ar/?p=61>>

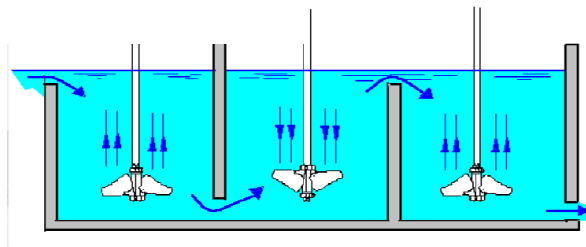
El presente proyecto se ocupa de la etapa de floculación.

2.1 LA FLOCULACIÓN

El proceso de floculación es el siguiente al de la coagulación y está definido como el proceso de unir partículas coaguladas para formar mayores masas o flocs, para poder posibilitar su posterior sedimentación y/o filtración del agua a la cual se le está aplicando tratamiento. Este proceso es el ideal para remover las sustancias que producen color y turbiedad en el agua.

La energía que debe ser entregada para el proceso de floculación puede ser obtenida por medios hidráulicos, mecánicos y/o neumáticos.

Figura 5. Proceso de floculación.



Fuente: <https://www.agitador.es/blog/wp-content/uploads/2011/09/floculacion-2.png>

2.2 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRAÚLICA (T)

Hace referencia al tiempo que le toma al agua pasar por las diferentes cámaras de floculación para que pueda haber formación de floc.

2.3 GRADIENTE DE VELOCIDAD

Es el grado de agitación que debe existir en el agua para que exista fricción entre las partículas suspendidas en el agua y los reactivos químicos, promoviendo así la formación de los flocs.

2.4 NÚMERO DE CAMP¹

Es un producto adimensional entre el gradiente de velocidad (G) y el tiempo de permanencia (T). Para valores iguales de $G \cdot T$ en diferentes plantas podría decirse que la oportunidad de que ocurran choques es la misma, por lo que para valores bajos de G y altos de T o viceversa el desempeño de las unidades de floculación sería la misma.

No obstante es necesario realizar ensayos en cada planta, pues las propiedades de la calidad del agua varían de un sitio a otro.

¹ ARBOLEDA VALENCIA, JORGE. Teoría y práctica de la purificación del agua Tomo 1. Bogotá, McGraw-Hill, 2000.

En la siguiente tabla se muestra los tipos de floculadores y sus características.

Tabla 1. Clasificación de los floculadores

SEGÚN LA ENERGÍA DE AGITACIÓN	SEGÚN EL SENTIDO DEL FLUJO	DESCRIPCIÓN	NOMBRE
Hidráulicos	Flujo Horizontal	Con tabiques de ida y regreso	De tabiques
	Flujo Vertical	Con tabiques arriba y abajo del tanque	Alabama
		Con codos en el fondo que proyectan el agua hacia arriba	Cox
Mecánicos	Rotatorios	De paletas de eje horizontal o vertical	De paletas
		De turbinas horizontales o verticales	De turbinas
	Reciprocantes	Rejas o cintas oscilantes	Reciprocantes
Hidromecánicos	Flujo Horizontal	De turbina Pelton y paletas horizontales	Hidromecánicos

VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua Tomo 1 [tabla].Bogotá, McGraw-Hill, 2000.

2.5 FLOCULADORES MECÁNICOS

Los floculadores mecánicos son aquellos que necesitan de una fuente externa de potencia que muevan los agitadores en una cámara o varias mientras el agua dura en las mismas un determinado tiempo de retención.

Según el sentido del movimiento del agitador se clasifican en: giratorios y reciprocantes.

Los floculadores giratorios pueden ser de baja velocidad (paletas) o de alta velocidad (turbinas) también de eje horizontal o vertical.

Los reciprocantes (Walking beams) pueden ser canastillas con tablas de madera que suben y bajan alternativamente o cintas oscilantes (ribbons flocculator) que hacen un movimiento de vaivén dentro del tanque.

2.5.1 Floculadores con agitadores reciprocantes (Walking Beam). Los agitadores reciprocantes consisten esencialmente de una parrilla, serie de parillas, o cintas colocadas en un balancín, de modo que se desplazan verticalmente hacia arriba y hacia abajo dentro del agua, comunicando un movimiento de agitación al líquido. También, pueden consistir en estructuras que hacen un movimiento de vaivén en el agua. La ventaja de estos sistemas es que los motores y los ejes se encuentran fuera del agua.

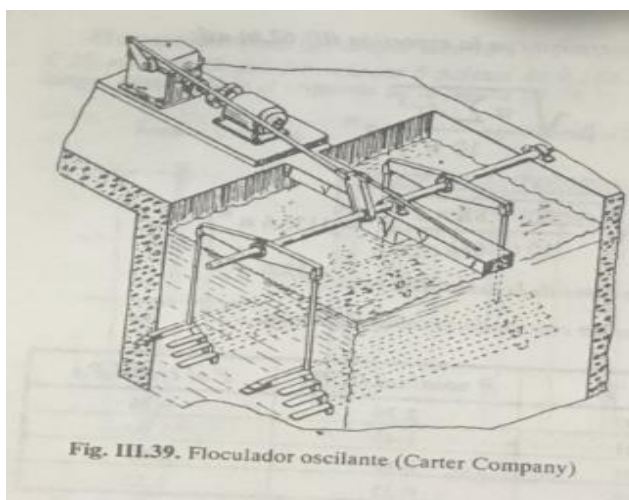
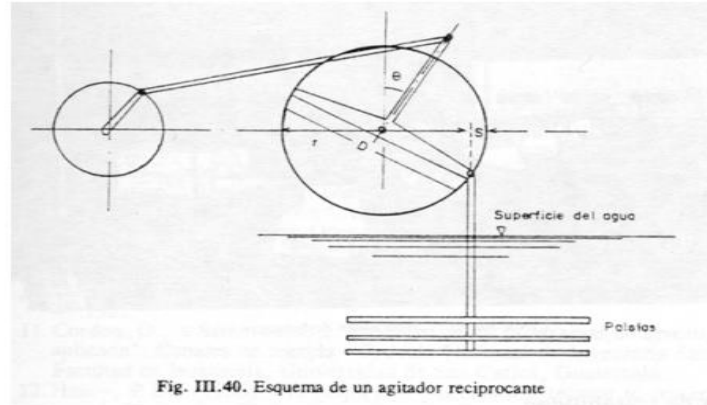


Fig. III.39. Floculador oscilante (Carter Company)

Fuente: ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua Tomo 1. Bogotá, McGraw-Hill, 2000.

Figura 7. Esquema de un agitador reciprocante



Fuente: ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua Tomo 1. Bogotá, McGraw-Hill, 2000.

La distancia, s, recorrida es igual a:

$$S = r - r * \cos(\theta) \quad \text{Ecuación 1}$$

El gradiente para este tipo de floculadores se calcula de la siguiente manera:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu * V}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

μ = Viscosidad dinámica del agua en Pa.s.

V=volumen de la cámara de floculación en m³.

P=potencia en watios.

Las revoluciones por minuto de estos floculadores se hallan de la siguiente forma:

$$n = \sqrt[3]{\frac{\mu * V * G^2}{\rho * \phi * C_D * D^3 * \sum A}} * 60 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde C_D se calcula por la siguiente ecuación:

$$C_D = 1.1 + 0.02 * \left(\frac{l}{b} + \frac{b}{l} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Y, l y b son el largo y ancho de las paletas respectivamente.

De la ecuación 12 los términos faltantes que la componen son:

ρ = Densidad del agua.

D= es la longitud que se indica en la figura 14.

$\sum A$ =Área total real de las paletas.

El ángulo θ se toma de las siguientes tablas, según se defina a criterio de diseñador el ángulo θ^2 :

Tabla 2.Tablas de Cálculo de los coeficientes del floculador tipo “Walking Beam”.

$a = \frac{H}{L}$	$\theta = 15^\circ$			$\theta = 20^\circ$			$\theta = 25^\circ$		
	$b = \frac{F}{L}$	$c = \frac{d}{L}$	θ	$b = \frac{F}{L}$	$c = \frac{d}{L}$	θ	$b = \frac{F}{L}$	$c = \frac{d}{L}$	θ
0,100	0,0258	1,0047	0,11397	0,0341	1,0044	0,26351	0,0421	1,0041	0,49795
0,150	0,0384	1,0105	0,11414	0,0508	1,0099	0,26421	0,0628	1,0092	0,50000
0,200	0,0508	1,0185	0,11438	0,0672	1,0176	0,26518	0,0832	1,0164	0,50285
0,250	0,0629	1,0289	0,11468	0,0832	1,0274	0,26640	0,1030	1,0256	0,50647
0,300	0,0746	1,0414	0,11503	0,0987	1,0394	0,26786	0,1223	1,0368	0,51083
0,350	0,0858	1,0560	0,11544	0,1136	1,0534	0,26955	0,1409	1,0501	0,51589
0,400	0,0965	1,0727	0,11589	0,1279	1,0694	0,27143	0,1587	1,0653	0,52158
0,450	0,1067	1,0914	0,11637	0,1415	1,0874	0,27349	0,1757	1,0824	0,52786
0,500	0,1164	1,1120	0,11689	0,1544	1,1073	0,27570	0,1918	1,1015	0,53465
0,550	0,1240	1,1355	0,11801	0,1781	1,1255	0,28045	0,2215	1,1450	0,54943
0,600	0,1495	1,2115	0,11916	0,1988	1,2044	0,28546	0,2475	1,1953	0,56527
0,650	0,1630	1,2707	0,12032	0,2168	1,2621	0,29053	0,2701	1,2518	0,58153
0,700	0,1746	1,3340	0,12172	0,2323	1,3252	0,29551	0,2895	1,3138	0,59765
1,000	0,1846	1,4021	0,12252	0,2456	1,3927	0,30026	0,3061	1,3807	0,61319

² RITCHER, Carlos A. Curso sobre tecnología de Tratamiento del agua para países en desarrollo. Lima, 1-16 Dic. 1977.15 p.

$a = \frac{R}{L}$	$\theta = 30^\circ$			$\theta = 35^\circ$			$\theta = 40^\circ$		
	$b = \frac{r}{L}$	$c = \frac{d}{L}$	θ	$b = \frac{r}{L}$	$c = \frac{d}{L}$	θ	$b = \frac{r}{L}$	$c = \frac{d}{L}$	θ
0,100	0,0498	1,0038	0,82598	0,0572	1,0034	1,24910	0,0641	1,0029	1,76134
0,150	0,0744	1,0084	0,83083	0,0854	1,0076	1,25897	0,0958	1,0066	1,77926
0,200	0,0985	1,0150	0,83761	0,1132	1,0135	1,27283	0,1271	1,0119	1,80457
0,250	0,1221	1,0235	0,84627	0,1404	1,0212	1,29069	0,1578	1,0186	1,83745
0,300	0,1451	1,0339	0,85679	0,1670	1,0306	1,31255	0,1878	1,0270	1,87812
0,350	0,1673	1,0462	0,86909	0,1927	1,0418	1,33839	0,2169	1,0370	1,92674
0,400	0,1886	1,0604	0,88309	0,2175	1,0548	1,36814	0,2452	1,0488	1,98344
0,450	0,2090	1,0765	0,89867	0,2413	1,0697	1,40165	0,2723	1,0622	2,04825
0,500	0,2284	1,0945	0,91569	0,2640	1,0864	1,43874	0,2983	1,0775	2,12106
0,600	0,2641	1,1359	0,95336	0,3058	1,1254	1,52247	0,3463	1,1136	2,28950
0,700	0,2955	1,1843	0,99456	0,3427	1,1716	1,61638	0,3889	1,1571	2,48447
0,800	0,3228	1,2393	1,03759	0,3747	1,2246	1,71675	0,4258	1,2078	2,69901
0,900	0,3461	1,3001	1,08089	0,4021	1,2839	1,81967	0,4572	1,2653	2,92452
1,000	0,3660	1,3660	1,12312	0,4253	1,3488	1,92160	0,4837	1,3289	3,15230

De las tablas se obtienen a, b y c que son coeficientes que salen de la relación de longitudes entre el balancín (R), la manivela (r), la biela (d) y la distancia entre apoyos (L).

La potencia para este tipo de floculadores se calcula con la siguiente ecuación⁵:

$$P = \frac{2*\pi^2*\rho*C_D*\sum A*D^3*n^3}{3*V} \quad \text{Ecuación 5}$$

3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

El mantenimiento de cualquier equipo, representa la prolongación de su vida útil y su correcto funcionamiento, por lo que un equipo difícil de mantener representa un incremento en el presupuesto que una compañía tenga destinado para dichos fines.

Este proyecto busca cambiar el actual sistema de floculación para que sea permitido realizar mantenimientos preventivos que no generen traumatismos en los procesos de suministro de agua para los bumangueses, sino que por el contrario se hagan labores de mantenimiento paralelas a este suministro.

Se realizará el despliegue de la función calidad (QFD), con el fin de evaluar las posibles alternativas de sustitución del actual sistema para poder hacer la elección del mejor sistema para continuar alimentando el proceso de diseño:

3.1 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN CALIDAD (QFD)

3.1.1 Requerimientos del usuario: a continuación, se presentan las especificaciones dadas por el cliente para realizar el cambio del sistema de floculación:

- Fácil Mantenimiento.
- Consumo de potencia.
- Independencia en los sistemas de transmisión de potencia.
- Sistema compacto.
- Estética.
- Ruido.
- Seguridad.
- Consumo de energía.

3.1.2 Criterios de diseño: para hacer más sencillo el proceso de diseño del Floculador, se utilizará una distribución por subsistemas lo que permite destacar los parámetros más importantes del equipo que se va a diseñar:

➤ **Subsistema de potencia:**

Motor eléctrico.

➤ **Subsistema de transmisión:**

Caja reductora, dependiendo del módulo en que se encuentre ubicado el motor y el gradiente del mismo.

➤ **Subsistema de control:**

Control del encendido y apagado del floculador, así como variador de frecuencia para las revoluciones del motor.

➤ **Subsistema de soporte mecánico:**

Eje de acero, con soporte de rodamientos en los extremos y el centro, anclados a tierra.

➤ **Subsistema de floculación:**

Tablas de sapan dispuestas en forma trapezoidal, soportadas por armazones de acero, agarradas por un balancín que ayuda a agitar el agua verticalmente de forma mecánica.

3.1.3 Subsistema de floculación

Tabla 3. Matriz de calidad del subsistema de floculación.

	Prioridad	Mantenibilidad		Floculación Mecánica		Floculación Hidráulica		Floculación Hidromecánica		Tamaño	
Fácil Mantenimiento	7	9	63	9	63	1	7	1	7	9	63
Independencia en los sistemas de transmisión de potencia	6	9	54	9	54	3	18	3	18	9	54
Seguridad	5	3	15	9	45	3	15	1	5	9	45
Consumo de energía	4	9	36	9	36	3	12	1	4	3	12
Ruido	3	3	9	9	27	3	9	1	3	3	9
Sistema compacto	2	9	18	9	18	0	0	1	2	9	18
Estética	1	1	1	3	3	1	1	1	1	1	1
Total			196		246		62		40		202

3.1.3.1 Ponderación de los resultados

Tabla 4. Ponderación, del subsistema de floculación.

	Puntaje	Atributo	%Porcentaje
	246	Floculación Mecánica	38.20%
	202	Tamaño	31.37%
	196	Mantenibilidad	30.43%
Total	644		

Parámetros más relevantes a tener presente en el proceso de diseño del subsistema de floculación.

3.2 PLANTEAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS

Con lo obtenido de la matriz de calidad y la ponderación de los resultados con los parámetros más relevantes a tener en cuenta en el diseño, se sugieren a continuación las alternativas para dar solución a los subsistemas planteados anteriormente.

3.2.1 Alternativas para el subsistema de transmisión

3.2.1.1 Alternativa 1. Caja reductora se adapta a las condiciones de velocidad necesarias para lograr la agitación y gradientes óptimos cruciales en la formación del floc. Su tamaño es reducido y posee un mantenimiento económico.

Figura 8. Primera alternativa para el subsistema de transmisión.



Fuente: < <http://www.erhsa.com/html/mecanicos/reductores/sinfin-corona.html> >

3.2.1.2 Alternativa 2. Transmisión por cadenas la transmisión de potencia por cadenas es eficiente, pero tiene un costo de mantenimiento alto, además que necesita un gran espacio para proveer las diferentes velocidades en los módulos de floculación, sumado a esto el ruido que generan es alto por lo que deben estar aislados para que no generen traumatismos en la planta. Otro factor importante a tener en cuenta en este tipo de transmisiones es el desgaste que produce Figura 9. Segunda alternativa para el subsistema de transmisión. holgura en la cadena.



Fuente: < <http://www.proveedorariobamba.com/index.php/portfolio/pinones-y-cadenas/> >

3.2.1.3 Alternativa 3. Transmisión por correas al igual que la transmisión por cadenas cumpliría su función a cabalidad, pero necesitaría poleas de gran tamaño para poder hacer las etapas de reducción respectivas encareciendo el costo del sistema de floculación.

Figura 10. Tercera alternativa para el subsistema de trasmisión.

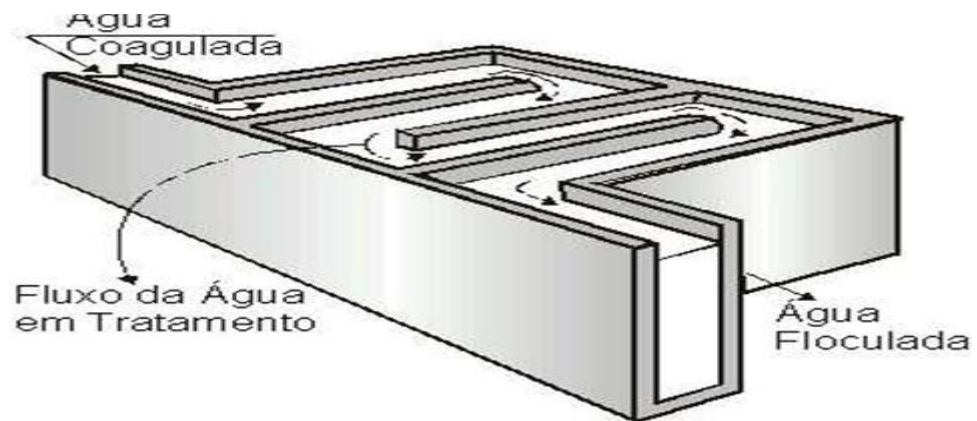


Fuente:< http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1101/html/3_transmision_por_poleas_y_correas_o_cadenas.html >

3.2.2 Alternativas para el subsistema de floculación

3.2.2.1 Alternativa 1. Floculador hidráulico de flujo horizontal están compuestos por tabiques hechos por placas de concreto que van aumentando sustancialmente su espaciamiento a medida que el flujo va y viene realizando un giro de 180° al final de cada uno, en cada cambio de dirección del flujo se produce una turbulencia que da origen a la formación del floc, a pesar de ser los de menor mantenimiento requieren gran espacio para poder ser instalados y una vez contruidos no se pueden volver a modificar.

Figura 11. Primera alternativa para el subsistema de floculación.



Fonte: SANEAGO

Fuente: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABaakAB/trabalho2> >

3.2.2.2 Alternativa 2. Floculador hidromecánico (Turbina Pelton) consiste en una turbina Pelton unida a un eje de paletas horizontal que agita el agua. No son aptas para algunos montajes de plantas de tratamiento debido a la cabeza que necesita la turbina, a pesar de ser baja, o de lo contrario un sistema adicional que propulse el agua para que haga girar las cucharas de la turbina.

Figura 12. Segunda alternativa para el subsistema de floculación.

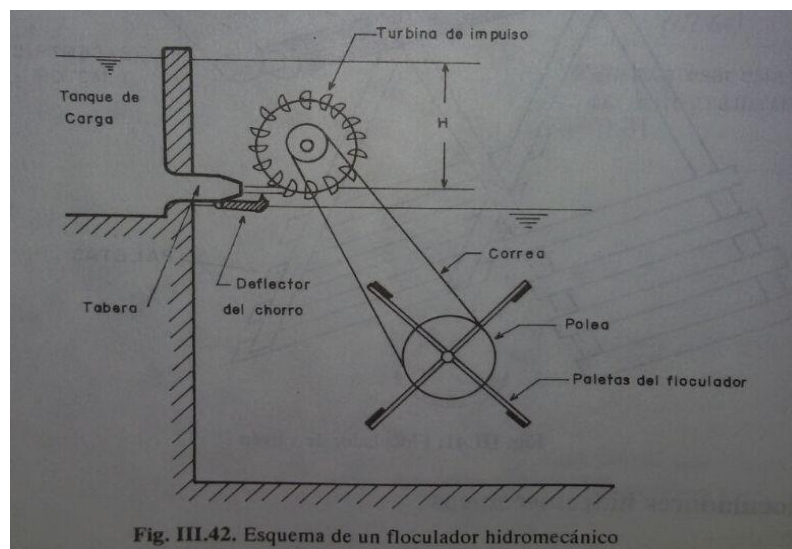


Fig. III.42. Esquema de un floculador hidromecánico

ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera Edición. Bogotá, McGraw-Hill, 2000, Tomo1.p.158.

3.2.2.3 Alternativa 3. Floculador mecánico reciprocante de balancín (Walking Beam) este tipo de floculador se adapta a la estructura de la planta existente y realiza eficientemente el trabajo de floculación. Sus sistemas de control son fáciles de mantener y proveen independencia en los módulos de floculación que se dispongan en cada tanque dispuesto para dicho fin.

Figura 13. Tercera alternativa para el subsistema de floculación.



3.3 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

Tabla 5. Evaluación de las alternativas del subsistema de transmisión.

SUBSISTEMA DE TRANSMISIÓN							
Criterio de evaluación		Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
Eficiencia	39.05%	5	1.95	5	1.95	5	1.95
Mantenibilidad	35.24%	5	1.76	1	0.35	2	0.70
Economía	25.71%	5	1.29	2	0.51	2	0.51
		5.00		2.82		3.17	

Tabla 6. Evaluación de las alternativas del subsistema de potencia.

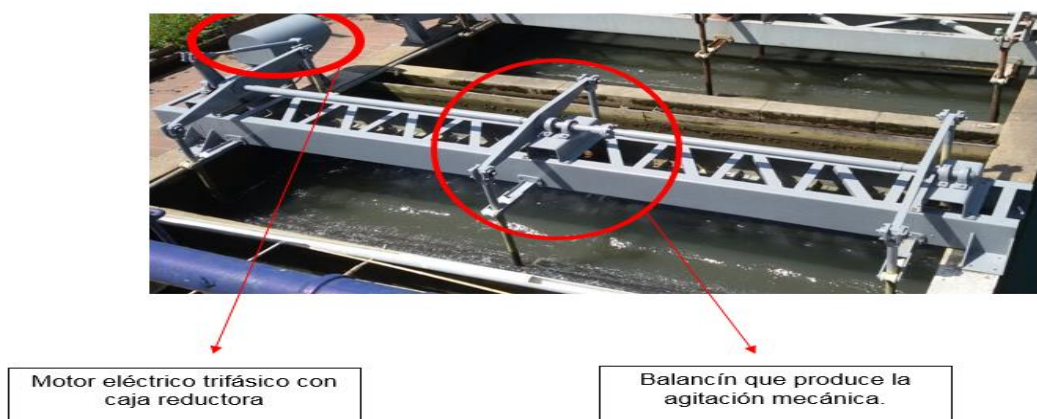
SUBSISTEMA DE POTENCIA							
Criterio de evaluación		Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
Capacidad	34.02%	5	1.70	5	1.70	5	1.70
Economía	33.76%	5	1.69	2	0.68	3	1.01
Fácil mantenimiento	32.23%	5	1.61	2	0.64	3	0.97
		5.00		3.02		3.68	

Tabla 7. Evaluación de las alternativas del subsistema de floculación.

SUBSISTEMA DE FLOCULACIÓN							
Criterio de evaluación		Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
Floculación Mecánica	38.20%	1	0.38	3	1.15	5	1.91
Tamaño	31.37%	1	0.31	2	0.63	4	1.25
Mantenibilidad	30.43%	5	1.52	1	0.30	4	1.22
		2.22		2.08		4.38	

3.4 ESPECIFICACIÓN DE LA ALTERNATIVA GANADORA

Figura 14. Especificación de la alternativa ganadora.



La alternativa escogida es el conjunto de opciones ganadoras en cada una de las matrices analizadas anteriormente que satisfacen los requerimientos del acueducto en cuanto a mantenimiento y funcionalidad dentro del proceso de floculación.

En cuanto al subsistema de potencia escogido fue el del motor eléctrico trifásico (alternativa 1) debido a que permite hacer variaciones en la velocidad de giro, su tamaño es reducido, posee eficiencia alta y su par es casi constante.

Para el sistema de transmisión la opción escogida fue la 1 ya que las cajas reductoras permiten que el sistema sea compacto y su mantenimiento es menos exigente que la transmisión hoy instalada (cadenas).

La opción 3 se escogió para el subsistema de floculación ya que junto con las dos anteriores forman el floculador de balancín reciprocante, con tablas de sapan que agitan el agua y sistemas de transmisión y potencia independientes para cada compartimiento haciendo que la limpieza de los mismos sea uno a uno y el proceso de floculación no se vea afectado a la hora de realizar mantenimientos programados dentro de la planta.

En el anexo E. se encuentran consignados la matriz de calidad del subsistema de transmisión, la ponderación de resultados del mismo, así como las alternativas para el subsistema de potencia y la matriz de calidad del floculador y la ponderación de los resultados.

4. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL FLOCULADOR

La agitación que provee el floculador al agua viene definida por el gradiente de velocidad, el tiempo de retención y el número de revoluciones a las cuales gira el motor; cuyos parámetros dependen de la geometría de la cámara de floculación, la cantidad y dimensión de los elementos agitadores, las medidas del mecanismo, escogidas por medio de tablas que están construidas con base en el recorrido del balancín, el caudal manejado por la planta la Flora y las propiedades del agua.

4.1 GRADIENTE DE VELOCIDAD

El gradiente de velocidad según la RAS³ debe estar entre 10 y 70 s⁻¹, y con agitación mecánica para un caudal mayor a 250 L/s. En la planta la Flora, se maneja un caudal de 1020 L/s repartido en dos tanques de floculación asumiendo la mitad del caudal cada uno (510 L/s). Los gradientes escogidos para este diseño se fundamentan en un diagnóstico⁴ hecho a la planta la Flora con el actual sistema de floculación que es de paletas de eje horizontal, respetando los límites de la RAS y con valores cercanos a los obtenidos en el diagnóstico.

³ MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Resolución 0330. Bogotá D.C: El ministerio. 2017. 182 p.

⁴ ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Diagnóstico y Evaluación de la planta la Flora. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb). 2002.

Figura 15. Actual sistema de floculación de la planta la Flora (Floculador de paletas de eje horizontal).

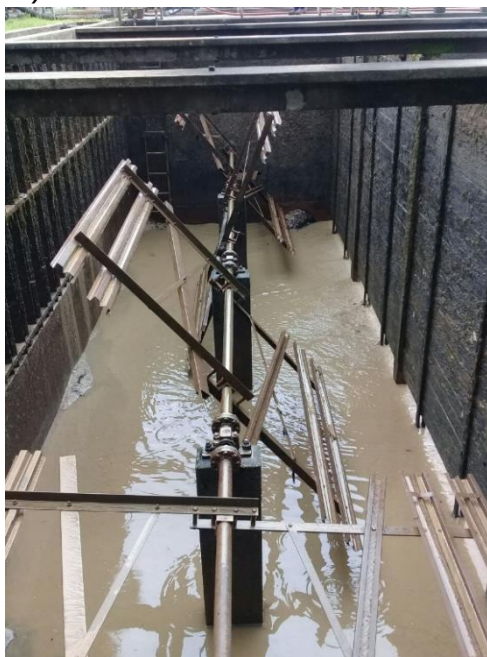


Tabla 8. Gradientes de velocidad para el floculador de paletas de eje horizontal.

PARÁMETRO	FLOCULADOR 1			FLOCULADOR 2		
	EJE 1	EJE 2	EJE 3	EJE 1	EJE 2	EJE 3
GRADIENTES s-1	62,8	41,9	31,6	63,1	42,2	31,8

Tabla 9. Gradientes de velocidad para el floculador recíprocante (Walking beam).

Parámetro	FLOCULADORES No. 1 Y 2								
	Compartimento No. 1			Compartimento No. 2			Compartimento No. 3		
	S	M	I	S	M	I	S	M	I
Rangos Gradientes de operación (s ⁻¹)	60	55	50	40	35	30	30	25	10

S= gradiente superior.

M= gradiente medio.

I= gradiente inferior.

4.2 TIEMPO DE RETENCIÓN

Esta variable hace referencia a cuanto demora el agua en pasar por las 3 cámaras de floculación en cada uno de los tanques de 0.510 m³/s.

Tabla 10. Cálculo del tiempo de retención hidráulica.

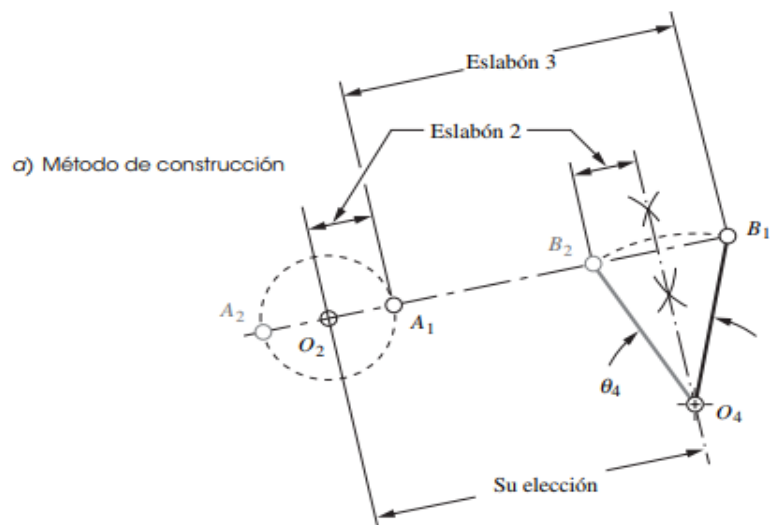
TIEMPO DE RETENCIÓN			
$Q = \frac{V}{t_{\text{retención}} * 60} \text{ [m}^3 \text{ /min]}$			
Variables de entrada			
V	764.5	m ³	Volumen
Q	0.51	m ³ /min	Caudal
Variables de salida			
t _{retención}	25	min	Tiempo

4.3 DIMENSIONES DEL MECANISMO

Inicialmente se dimensiona el mecanismo partiendo de un $\theta_4 = 60^\circ$ siguiendo el procedimiento⁵ del libro de mecanismos de Norton, obteniendo las siguientes dimensiones:

⁵ NORTON, Robert. Diseño de maquinaria Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. 4 ed. México; D.F: McGraw-Hill. 2004, p 93-94.

Figura 16. Mecanismo manivela – biela – balancín.



Fuente: NORTON, Robert. Diseño de maquinaria Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. 4 ed. México, D.F: McGraw-Hill. 2004, p 93-94.

Las distancias obtenidas por este procedimiento se presentan a continuación:

O_2 - A_1 = 225 mm.

A_1 - B_1 =1260 mm.

O_4 - B_1 = 490 mm.

O_2 - O_4 =1320 mm.

Seguido de esto se hallaron las longitudes del mecanismo por medio de la metodología propuesta por Ritcher⁶ esta consiste en definir un ángulo de oscilación para el balancín suponiendo y relacionando las medidas de componentes del mecanismo (manivela, biela, balancín, y distancia entre apoyos), con el fin de obtener los valores adimensionales ya definidos en las tablas empíricas que servirán en posteriores cálculos y así no tener que interpolar para encontrar valores intermedios.

⁶RITCHER, Carlos A. Curso sobre tecnología de Tratamiento del agua para países en desarrollo. Lima, 1-16 Dic. 1977.15 p.

Longitudes asumidas:

$$O_2-A_1= 228.4 \cong 230 \text{ mm.}$$

$$A_1-B_1= 1094.5 \cong 1090 \text{ mm.}$$

$$O_4- B_1= 500 \text{ mm.}$$

$$O_2-O_4= 1000 \text{ mm.}$$

$$\theta_4 = 30^\circ \text{ Respecto de la vertical, es decir, la oscilación completa } \theta_4 = 60^\circ.$$

Relaciones:

$$a = \frac{O_4 - B_1}{O_2 - O_4} = \frac{R}{L} = \frac{500}{1000} = 0.5$$

$$b = \frac{O_2 - A_1}{O_2 - O_4} = \frac{r}{L} = \frac{228.4}{1000} = 0.2284$$

$$c = \frac{A_1 - B_1}{O_2 - O_4} = \frac{d}{L} = \frac{1094.5}{1000} = 1.0945$$

$$\phi = 0.9156$$

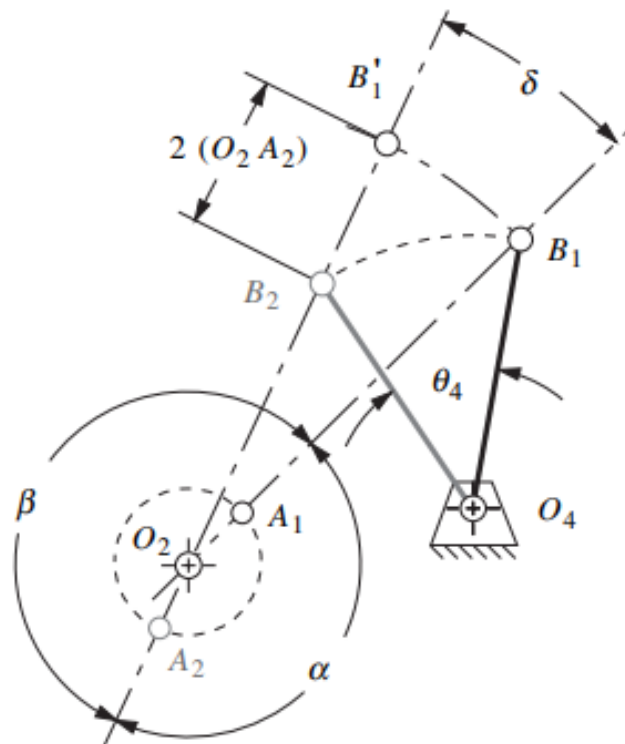
Tabla 11. Tablas de Cálculo de los coeficientes del floculador tipo "Walking Beam".

$a = \frac{R}{L}$	$\theta = 15^\circ$			$\theta = 20^\circ$			$\theta = 25^\circ$		
	$b = \frac{r}{L}$	$c = \frac{d}{L}$	θ	$b = \frac{r}{L}$	$c = \frac{d}{L}$	θ	$b = \frac{r}{L}$	$c = \frac{d}{L}$	θ
0,100	0,0258	1,0047	0,11397	0,0341	1,0044	0,26351	0,0421	1,0041	0,49795
0,150	0,0384	1,0105	0,11414	0,0508	1,0099	0,26421	0,0628	1,0092	0,50000
0,200	0,0508	1,0185	0,11438	0,0672	1,0176	0,26518	0,0832	1,0164	0,50285
0,250	0,0629	1,0289	0,11468	0,0832	1,0274	0,26640	0,1030	1,0256	0,50647
0,300	0,0746	1,0414	0,11503	0,0987	1,0394	0,26786	0,1223	1,0368	0,51083
0,350	0,0858	1,0560	0,11544	0,1136	1,0534	0,26955	0,1409	1,0501	0,51589
0,400	0,0965	1,0727	0,11589	0,1279	1,0694	0,27143	0,1587	1,0653	0,52158
0,450	0,1067	1,0914	0,11637	0,1415	1,0874	0,27349	0,1757	1,0824	0,52786
0,500	0,1164	1,1120	0,11689	0,1544	1,1073	0,27570	0,1918	1,1015	0,53465
0,600	0,1340	1,1585	0,11801	0,1781	1,1525	0,28045	0,2215	1,1450	0,54943
0,700	0,1495	1,2115	0,11916	0,1988	1,2044	0,28546	0,2475	1,1953	0,56577
0,800	0,1630	1,2702	0,12032	0,2168	1,2621	0,29053	0,2701	1,2518	0,58153
0,900	0,1746	1,3340	0,12172	0,2323	1,3252	0,29551	0,2895	1,3138	0,59765
1,000	0,1846	1,4021	0,12252	0,2456	1,3927	0,30026	0,3061	1,3807	0,61319

$a = \frac{R}{L}$	$\theta = 30^\circ$			$\theta = 35^\circ$			$\theta = 40^\circ$		
	$b = \frac{r}{L}$	$c = \frac{d}{L}$	θ	$b = \frac{r}{L}$	$c = \frac{d}{L}$	θ	$b = \frac{r}{L}$	$c = \frac{d}{L}$	θ
0,100	0,0498	1,0038	0,82598	0,0572	1,0034	1,24910	0,0641	1,0029	1,76134
0,150	0,0744	1,0084	0,83083	0,0854	1,0076	1,25897	0,0958	1,0066	1,77926
0,200	0,0985	1,0150	0,83761	0,1132	1,0135	1,27283	0,1271	1,0119	1,80457
0,250	0,1221	1,0235	0,84627	0,1404	1,0212	1,29069	0,1578	1,0186	1,83745
0,300	0,1451	1,0339	0,85679	0,1670	1,0306	1,31255	0,1878	1,0270	1,87812
0,350	0,1673	1,0462	0,86909	0,1927	1,0418	1,33839	0,2169	1,0370	1,92674
0,400	0,1886	1,0604	0,88309	0,2175	1,0548	1,36814	0,2452	1,0488	1,98344
0,450	0,2090	1,0765	0,89867	0,2413	1,0697	1,40165	0,2723	1,0622	2,04825
0,500	0,2284	1,0945	0,91569	0,2640	1,0864	1,43874	0,2983	1,0775	2,12106
0,600	0,2641	1,1359	0,95336	0,3058	1,1254	1,52247	0,3463	1,1136	2,28950
0,700	0,2955	1,1843	0,99456	0,3427	1,1716	1,61638	0,3889	1,1571	2,48447
0,800	0,3228	1,2393	1,03759	0,3747	1,2246	1,71675	0,4258	1,2078	2,69901
0,900	0,3461	1,3001	1,08089	0,4021	1,2839	1,81967	0,4572	1,2653	2,92452
1,000	0,3660	1,3660	1,12312	0,4253	1,3488	1,92160	0,4837	1,3289	3,15230

Al tener las medidas se procede a realizar la comprobación por medio gráfico⁷ de los desplazamientos del balancín sobre la circunferencia descrita por la manivela, encontrando así, que el mecanismo obtenido es más compacto y de retorno rápido como se indica en la figura 29.

Figura 17. Mecanismo de retorno rápido.



Fuente: NORTON, Robert. Diseño de maquinaria Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. 4 ed. México, D.F: McGraw-Hill. 2004.

⁷ Ibíd.105 - 107.

Donde $\alpha = 169^\circ$, $\beta = 191^\circ$ y $\delta = 10^\circ$, cuya relación de tiempo $T_R = \frac{\alpha}{\beta}$ es igual a 1:1.13.

4.4 CÁLCULO DEL COEFICIENTE C_D

Tabla 12. Cálculo del coeficiente de arrastre.

COEFICIENTE DE ARRASTRE			
$C_D = 1.10 + 0.02 * (\frac{b}{l} + \frac{l}{b})$			
Variables de entrada			
b	0.1	m	Ancho de las paletas
l	2.73	m	Longitud asumida de las paletas
Variables de salida			
C_D	1.65	-----	Coeficiente de arrastre

4.5 ÁREA TOTAL REAL DE PALETAS

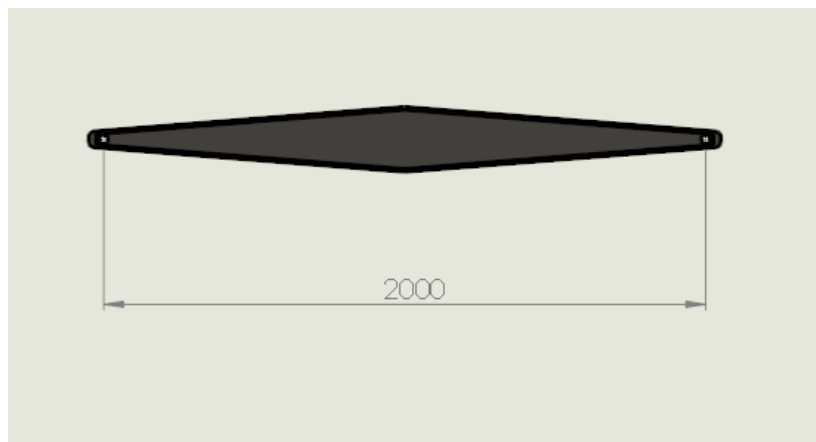
Tabla 13. Cálculo del área total real de paletas.

ÁREA TOTAL REAL DE PALETAS			
$\sum A = J_c * \#ta * b * l$			
Variables de entrada			
Juegos de paletas asumidos por cámara (J_c)	4	m	Ancho de las paletas
Número de tablas asumido por cada juego ($\#ta$)	12	m	Longitud asumida de las paletas
b	0.1	m	Ancho de las paletas
l	2.73	m	Longitud asumida de las paletas
Variables de salida			
$\sum A$	13.1	m^2	Área total real de paletas

4.6 DIMENSIONES DEL ALERÓN

La longitud del alerón viene dada con respecto a el ancho de la cámara de floculación, esta se asume como aproximadamente la mitad de la longitud de la cámara que es de 4.4 metros.

Figura 18. Alerón, cuya dimensión D es la distancia entre centros donde se ubica el pasador.



4.7 VELOCIDAD DE ROTACIÓN DEL MOTOR

Como es necesario tener distintos rangos de rpm en cada cámara, se le incluirá un variador de frecuencia a cada motor.

El volumen de cada cámara es el volumen total 764.54 m^3 dividido en 3 cámaras, para un total de 254.85 m^3 por cámara.

Tabla 14. Cálculo de las RPM de cada motor.

VELOCIDAD DE ROTACIÓN			
$n = \frac{\mu * V * G^2}{\sqrt[3]{\rho * \Phi * C_D * D^3 * \sum A}} * 60$			
Variables de entrada			
μ	0.00108	Pa.s	Viscosidad dinámica del agua
V	254.85	m ³	Longitud asumida de las paletas
G_{S1}	60	s ⁻¹	Gradiente superior cámara 1
G_{S2}	40	s ⁻¹	Gradiente superior cámara 2
G_{S3}	30	s ⁻¹	Gradiente superior cámara 3
G_{M1}	55	s ⁻¹	Gradiente mediacámara 1
G_{M2}	35	s ⁻¹	Gradiente medio cámara 2
G_{M3}	25	s ⁻¹	Gradiente medio cámara 3
G_{I1}	50	s ⁻¹	Gradiente inferior cámara 1
G_{I2}	30	s ⁻¹	Gradiente inferior cámara 2
G_{I3}	10	s ⁻¹	Gradiente inferior cámara 3
ρ	998.77	Kg/m ³	Densidad del agua
ϕ	0.91569	-----	Ángulo phi de tabla
D	2	m	Longitud del alerón
$\sum A$	13.1	m ²	Área total real de paletas
Variables de salida			
n_{s1}	11.1	RPM	RPM superior cámara 1
n_{s2}	8.5	RPM	RPM superior cámara 2
n_{s3}	7	RPM	RPM superior cámara 3
n_{m1}	10.5	RPM	RPM media cámara 1
n_{m2}	7.7	RPM	RPM media cámara 2
n_{m3}	6.2	RPM	RPM media cámara 3
n_{I1}	9.8	RPM	RPM inferior cámara 1
n_{I2}	7	RPM	RPM inferior cámara 2
n_{I3}	3.4	RPM	RPM inferior cámara 3

4.8 ENSAMBLE DEL FLOCULADOR SOBRE LA CÁMARA DE FLOCULACIÓN

La longitud de dicho eje viene dada por el largo de la cámara de floculación que en este caso es de 14.48 metros aunque el total de tramos de eje suman 14.2127 m, el eje es seccionado, encamisado en tubo y unido con bridas al alerón para transmitir la agitación, ya que fabricar un eje tan largo es bastante costoso y no se encuentra la maquinaria disponible para tal caso. En la figura 32 se muestra el ensamblaje de todos los componentes de una sola unidad de floculación (ya que son 3), los cuales son: los 8 alerones que sostienen el sistema de agitación de tablas, el mecanismo manivela – biela – balancín, 4 tubos que encamisán 8 ejes, chumaceras y la viga de soporte de todo el sistema.

Figura 19. Ensamble del eje con el tubo y la brida.

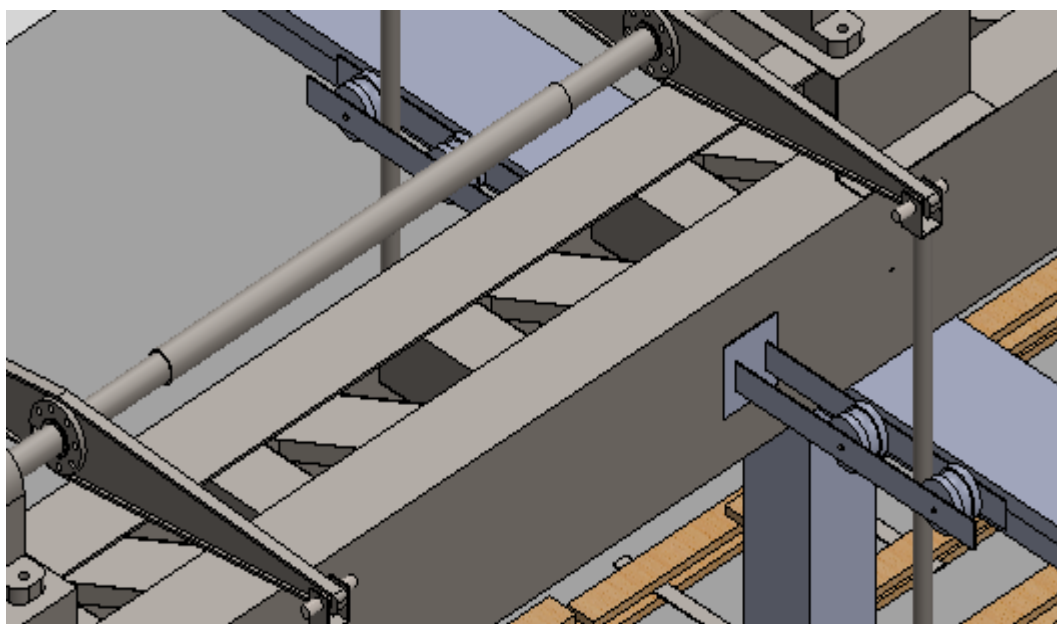


Figura 20. Ensamble general del floculador sobre la cámara de floculación.

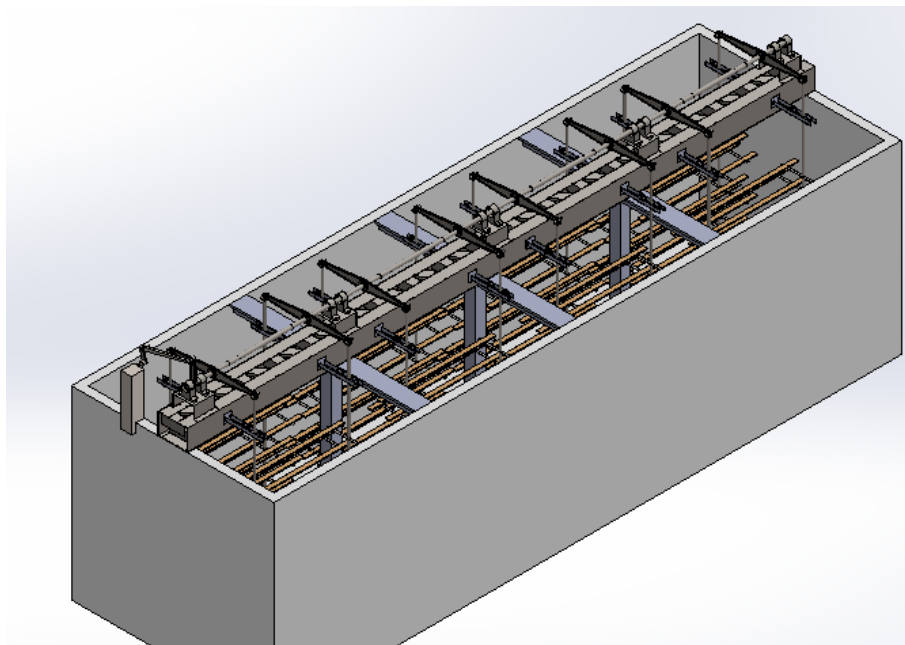
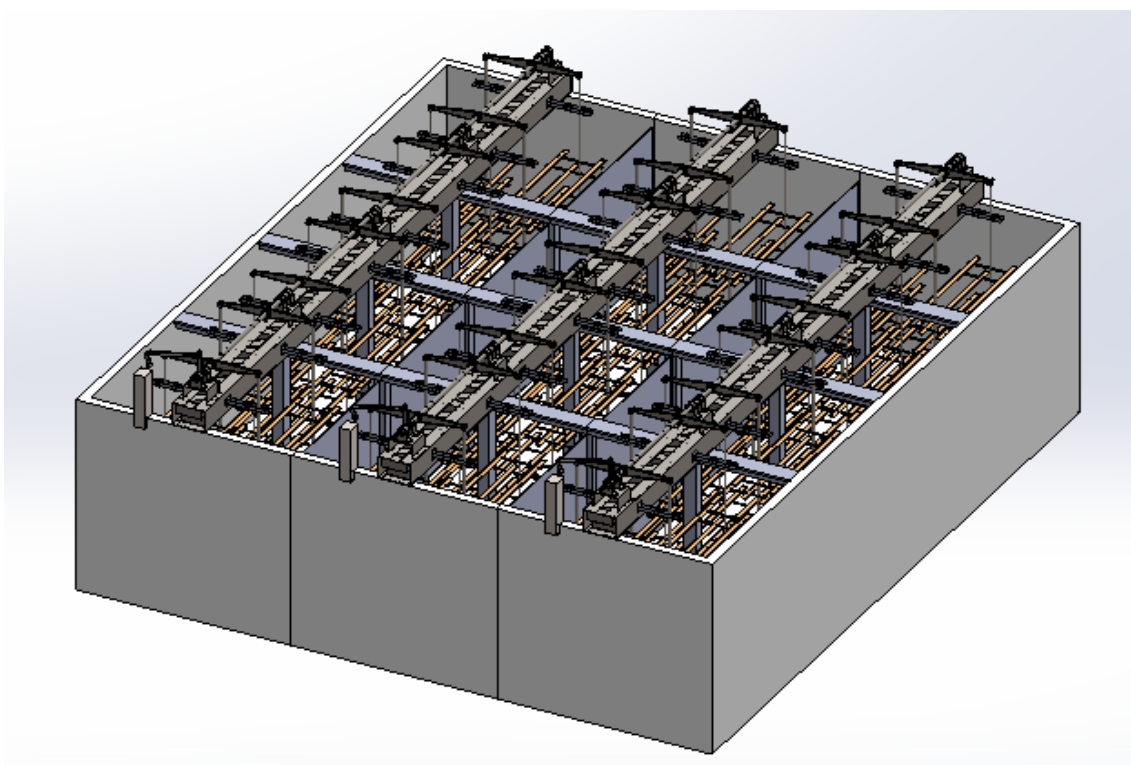


Figura 21. Ensamble general del floculador sobre las 3 cámaras de floculación.



5. DISEÑO EN DETALLE DE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO

En este capítulo se presentan los procedimientos, memorias de cálculo y criterios tenidos en cuenta para el diseño del floculador.

En el diseño conceptual se da respuesta a los requerimientos del usuario (amb), obteniendo así, el tipo de mecanismo y su geometría, cuya funcionalidad será verificada por medio de análisis cinemático y cinético, las cargas obtenidas por medios de estos análisis tendrán como valores de partida las velocidades de rotación y las potencias consumidas por cada compartimiento que generen las cargas más críticas.

5.1 VALOR DE TORQUE CRÍTICO.

Debido a que en el proceso se necesitan velocidades de rotación y potencias específicas, el punto de partida del diseño de los componentes mecánicos del floculador es el valor de torque máximo de cualquiera de las 3 cámaras en respuesta a los gradientes, potencias superiores, y RPMs inferiores.

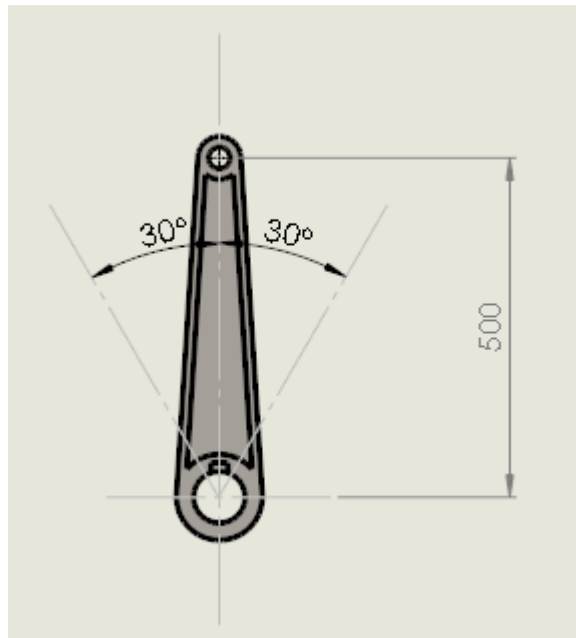
En la tabla 23, se colocan los valores de potencias máximos de cada cámara y sus respectivas RPM mínimas; de donde se obtiene un torque de 2906.464 N-m dado en la cámara 1; por lo que en adelante se diseñaran y seleccionarán todos los componentes con respecto de la cámara 1 de floculación para luego ser replicados a las cámaras 2 y 3 y a las otras 3 unidades de floculación.

Tabla 15. Valores de torque generados en cada compartimiento.

TORQUE GENERADO EN CADA COMPARTIMIENTO			
$TORQUE = \frac{POTENCIA * 745.7}{n * \frac{2 * \pi}{60}}$			
Variables de entrada			
P_{s1}	4	HP	Potencia superior cámara 1
P_{s2}	1.8	HP	Potencia superior cámara 2
P_{s3}	1	HP	Potencia superior cámara 3
n_{i1}	9.8	RPM	RPM inferior cámara 1
n_{i2}	7	RPM	RPM inferior cámara 2
n_{i3}	3.4	RPM	RPM inferior cámara 3
Variables de salida			
$T_{máx1}$	2906.494	N-m	Torque máximo cámara 1
$T_{máx2}$	1831.091	N-m	Torque máximo cámara 2
T_{i1}	2094.385	N-m	Torque máximo cámara 3

5.1.1 Análisis cinemático y cálculo de desplazamientos. En el siguiente análisis se calculan los desplazamientos ($\theta = 60^\circ$) del balancín de la cámara 1, para comprobar el ángulo ($\theta = 60^\circ$) escogido, de cuyo valor se dimensionó el mecanismo manivela – biela – balancín.

Figura 22. Ángulo recorrido por el balancín respecto de la vertical.



La dimensión de este balancín es de 500 mm o 50 cm.

Los desplazamientos fueron calculados por medio de la síntesis analítica de mecanismos y las transformaciones de Euler cuyas ecuaciones se resolvieron en

el software EES teniendo como parámetros de entrada las revoluciones de la cámara 1, 11.1 RPM o 1.1623 rad/s, y el ángulo barrido por la manivela (360°) arrojando resultados de los desplazamientos y velocidades del balancín y el mecanismo, cada 15° .

Figura 23. Dimensiones del mecanismo manivela- biela- balancín.

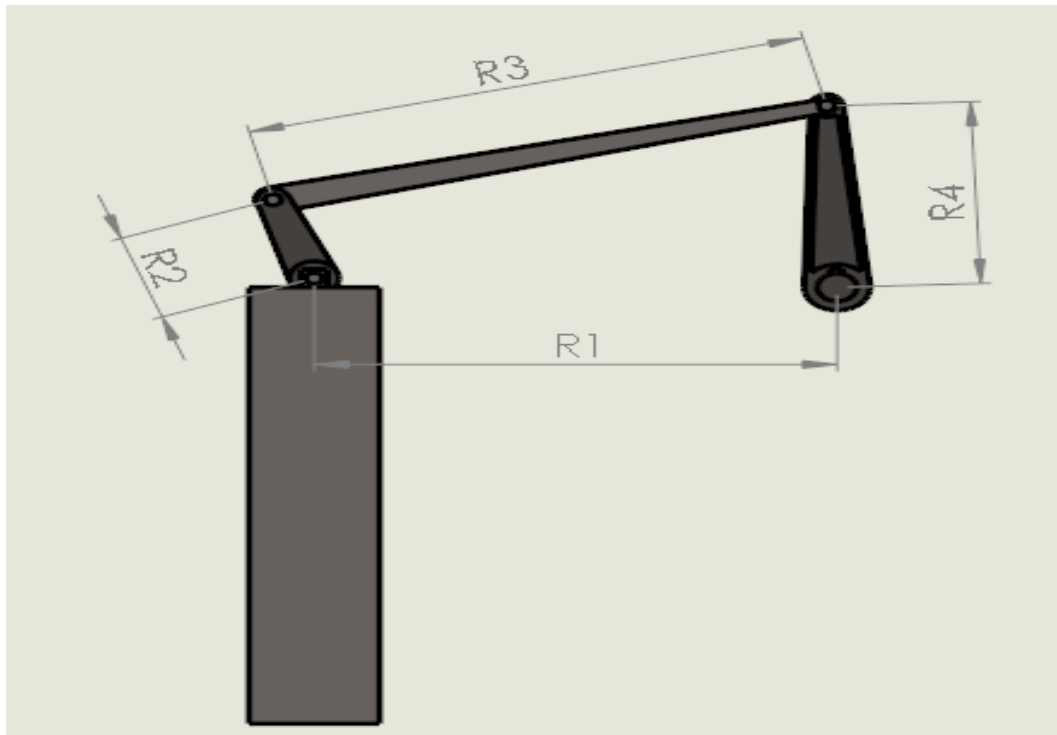


Tabla 16. Resultados de la síntesis del mecanismo.

Barra Fija	R1=1000 mm.
Manivela	R2=230 mm
Biela	R3= 1090 mm
Balancín	R4= 500 mm

Figura 25. Ecuaciones de posición y velocidad del mecanismo de la figura 34.

Analisis de posicion

$$r1 = 1$$

$$r2 = 0.23$$

$$r3 = 1.09$$

$$r4 = 0.5$$

$$\theta_1 = 0$$

$$\omega_1 = 0$$

Parte real

$$-r1 \cdot \cos(\theta_1) - r4 \cdot \cos(\theta_4) + r2 \cdot \cos(\theta_2) + r3 \cdot \cos(\theta_3) = 0$$

Parte Imaginaria

$$-r1 \cdot \sin(\theta_1) - r4 \cdot \sin(\theta_4) + r2 \cdot \sin(\theta_2) + r3 \cdot \sin(\theta_3) = 0$$

Análisis de velocidad

Parte real

$$r1 \cdot \omega_1 \cdot \sin(\theta_1) + r4 \cdot \omega_4 \cdot \sin(\theta_4) - r2 \cdot \omega_2 \cdot \sin(\theta_2) - r3 \cdot \omega_3 \cdot \sin(\theta_3) = 0$$

$$\omega_2 = 11.1 \cdot \frac{\pi}{30}$$

Parte imaginaria

$$-r1 \cdot \omega_1 \cdot \cos(\theta_1) - r4 \cdot \omega_4 \cdot \cos(\theta_4) + r2 \cdot \omega_2 \cdot \cos(\theta_2) + r3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(\theta_3) = 0$$

Figura 24. Gráfica del desplazamiento de la manivela vs el del balancín.

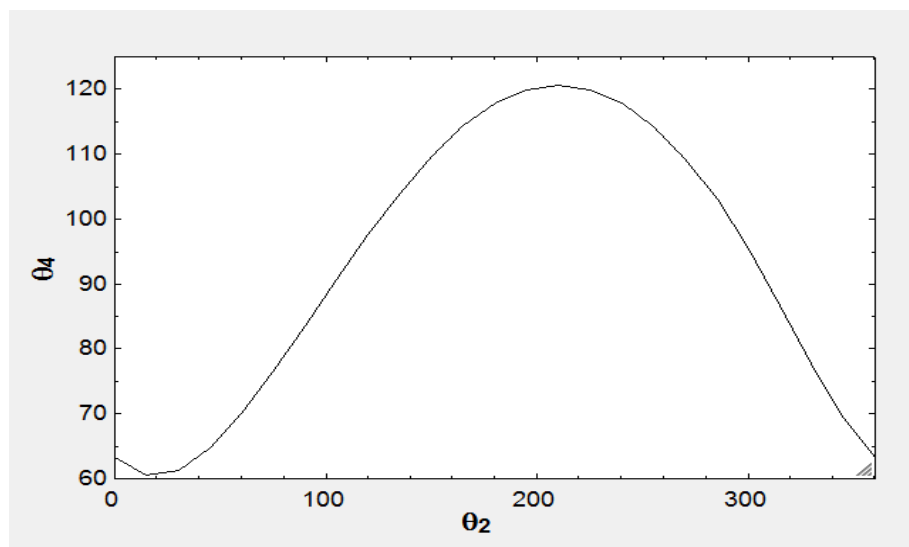


Tabla 17. Resultados de los desplazamientos del balancín.

1.25	1 θ_2	2 θ_4	3 ω_2	4 ω_3	5 ω_4
Run 1	0	63.36	1.162	-0.3472	-0.3472
Run 2	15	60.64	1.162	-0.2703	-0.07459
Run 3	30	61.31	1.162	-0.1834	0.1695
Run 4	45	64.72	1.162	-0.1092	0.3482
Run 5	60	70.02	1.162	-0.0517	0.4629
Run 6	75	76.46	1.162	-0.007032	0.5274
Run 7	90	83.47	1.162	0.02981	0.5542
Run 8	105	90.63	1.162	0.06276	0.5514
Run 9	120	97.59	1.162	0.09445	0.5237
Run 10	135	104.1	1.162	0.1263	0.4737
Run 11	150	109.7	1.162	0.1585	0.4038
Run 12	165	114.4	1.162	0.1898	0.317
Run 13	180	117.9	1.162	0.2174	0.2174
Run 14	195	120	1.162	0.2373	0.1101
Run 15	210	120.7	1.162	0.2453	-0.00001785
Run 16	225	120	1.162	0.2373	-0.1101
Run 17	240	117.9	1.162	0.2098	-0.2194
Run 18	255	114.3	1.162	0.1603	-0.3284
Run 19	270	109.4	1.162	0.08699	-0.4374
Run 20	285	103	1.162	-0.009469	-0.5439
Run 21	300	95.39	1.162	-0.1237	-0.6384
Run 22	315	86.71	1.162	-0.2415	-0.6988
Run 23	330	77.65	1.162	-0.3362	-0.6891
Run 24	345	69.39	1.162	-0.3763	-0.572
Run 25	360	63.36	1.162	-0.3472	-0.3472

El desplazamiento del balancín representado por la variable θ_4 se calcula haciendo la diferencia del valor máximo con el mínimo, por tanto $\theta_4 = 120.7^\circ - 60.64^\circ = 60.06^\circ$. Con este resultado se comprueba que el ángulo asumido para los desplazamientos del balancín fue el correcto y que en balancín hará dicho recorrido.

5.1.2 Análisis cinético. En el análisis cinético se calculan las fuerzas presentes en el mecanismo y en los alerones, cuyas cargas serán transmitidas al eje que

soporta todos los componentes. Como el sistema cambia de posiciones constantemente se escoge como posición crítica de diseño en donde los alerones se encuentran totalmente horizontales, debido a que todas las componentes de aceleración y velocidad son completamente verticales.

Figura 27. Posición de análisis de las cargas.

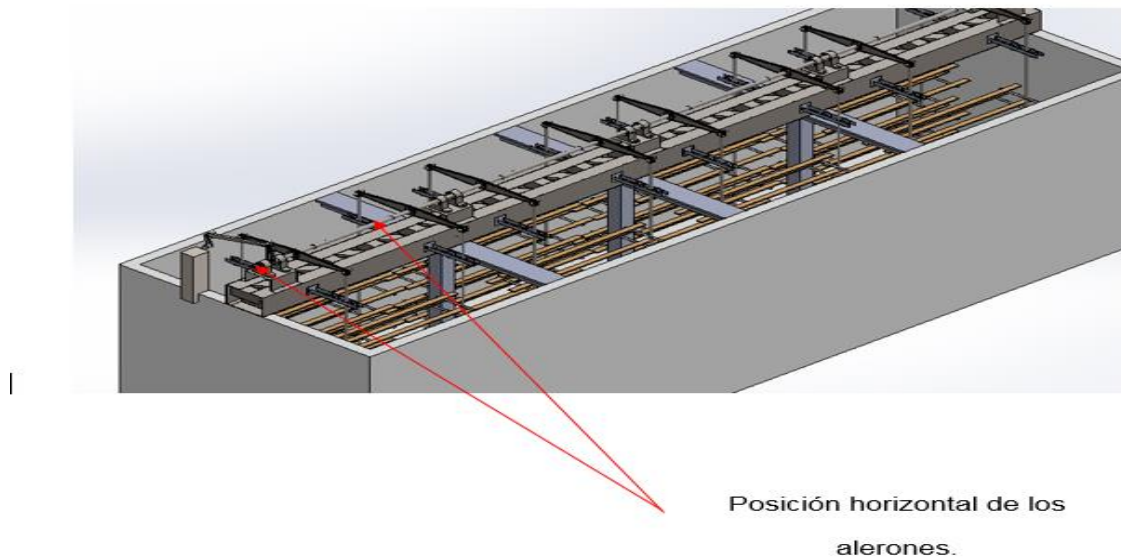


Figura 26. Ensamblaje del alerón con los elementos agitadores.

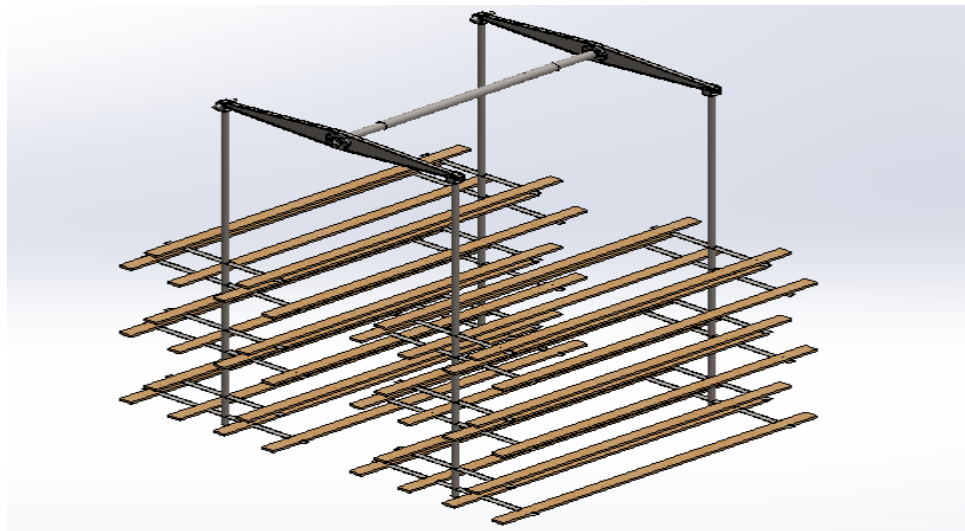


Figura 29. DCL del alerón

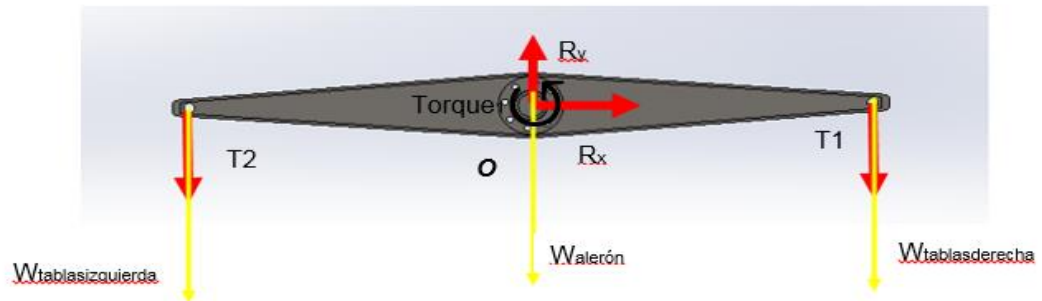
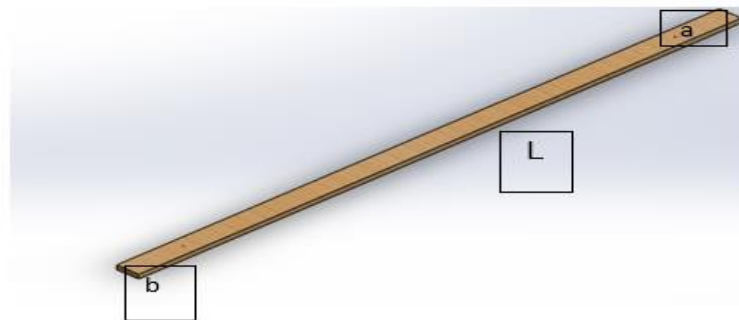


Figura 28. Tabla del sistema de agitación.



a = ancho de la tabla de 100 mm.

b = alto de la tabla de 25 mm.

L = largo de la tabla 2730 mm.

Figura 30. DCL tabla izquierda.

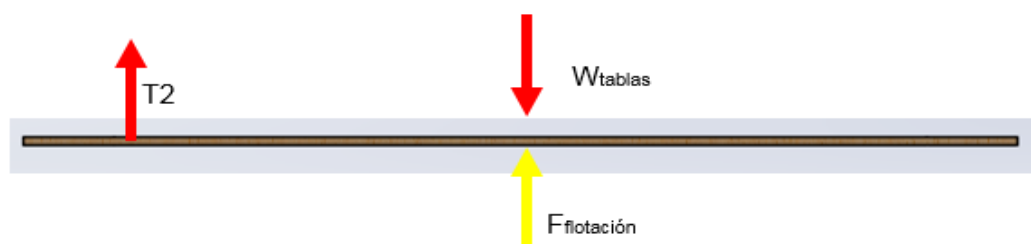


Figura 31. DCL tabla derecha.

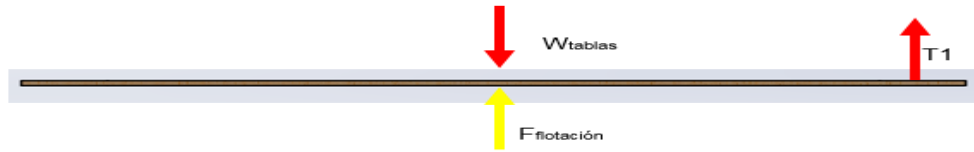


Tabla 18. Resultados obtenidos de los DCL de las figuras 40, 42 y 43.

ECUACIONES DE LOS DCL DEL ALERÓN Y LAS DOS TABLAS			
$P = Torque * \omega_{balancín} \quad (1)$ Sumatoria de fuerzas en Y, DCL tabla derecha: $T_1 - W_{tablas} + F_{flotación} = \frac{m_{tablas}}{2} * (\alpha * r) \quad (2)$ Sumatoria de torques en el alerón, respecto del punto O: $+ \sum M_O = r * (T_2 - T_1) + Torque_1 = I * \alpha + m_{alerón} * \alpha \quad (3)$ Sumatoria de fuerzas en Y, DCL tabla izquierda: $T_1 - W_{tablas} + F_{flotación} = -\frac{m_{tablas}}{2} * (\alpha * r) \quad (4)$ $W_{tablas} = ((\frac{m_{tablas} * 9}{2}) + m_{bajantealagua}) * g \quad (5)$ $F_{flotación} = \rho_{agua} * V_{tablas} * g * \frac{\#_{tablas}}{2} \quad (6)$ $Torque_1 = \frac{Torque}{\#_{alerones}} \quad (7)$			
Variables de entrada			
P	2983	W	Potencia consumida por el agua en la cámara 1
$\omega_{balancín}$	0.6825	rad/s	Velocidad angular del balancín en el instante de la posición crítica
m_{tablas}	1.1	kg	masa de una sola tabla
$m_{bajantealagua}$	77.95357	kg	masa del bajante al agua
ρ_{agua}	1000	kg/m ³	Densidad del agua a 4° y presión atmosférica
V_{tablas}	0.006823	m ³	Volumen de una sola tabla
$\#_{tablas}$	9	-----	# de tablas por cada lado del alerón
g	9.81	m/s ²	aceleración de la gravedad
r	1	m	Radio del alerón
I	9.9	kg*m ²	Momento de Inercia Iyy
$m_{alerón}$	35.4	kg	masa de un solo alerón
#alerones	8	-----	Número de alerones sobre el eje de la cámara 1
Variables de salida			
Torque	4370	N-m	Torque de entrada en el balancín de la cámara 1
$Torque_1$	546.3	N-m	Torque resistivo en cada uno de los alerones
T_1	561.1	N	Fuerza hecha por el bajante derecho al alerón
T_2	463.1	N	Fuerza hecha por el bajante izquierdo al alerón
$F_{flotación}$	301.2	N	Fuerza de flotación hecha por las 9 tablas a cada lado
α	9.893	rad/s	Aceleración angular del balancín en la posición crítica

5.2 DISEÑO MECÁNICO DE LOS COMPONENTES

El floculador está compuesto por componentes mecánicos, como pasadores, para el mecanismo para los bajantes al agua, el tubo del bajante al agua, las barras del mecanismo, el eje que transmite el movimiento al agua, el alerón la viga que soporta los componentes y las uniones soldadas. Estos componentes se diseñaran en los estados de carga máxima y según sean sus cargas el diseño será a fatiga. El material usado para los componentes mecánicos es el acero ASTM A36.

5.2.1 Diseño del mecanismo manivela – biela – balancín. El diseño de este mecanismo se hará por medio del software Ansys, que permite el análisis de todo el conjunto obteniendo los factores de seguridad a fatiga para todas las piezas que lo componen (pasadores y barras). Hechos de acero estructural ASTM A36.

Figura 32. Propiedades del acero estructural ASTM A36.

3	 Structural Steel	 General	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1		
*	Click here to add a new material				
Properties of Outline Row 3: Structural Steel					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	 Density	7850	kg m ⁻³		
3	 Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	 Isotropic Elasticity				
16	 Alternating Stress Mean Stress	 Tabular			
20	 Strain-Life Parameters				
28	 Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa		
29	 Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa		
30	 Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa		
31	 Compressive Ultimate Strength	0	Pa		

Figura 33. Fuerza de gravedad para el análisis del mecanismo con el fin que sean considerados de pesos de los componentes.

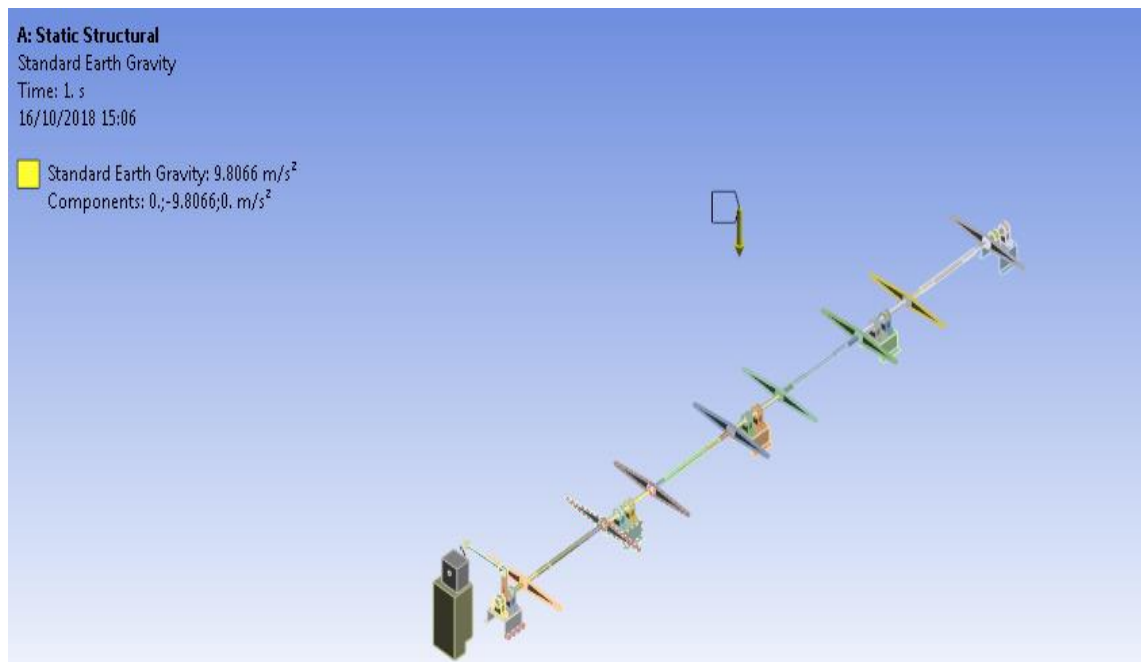


Figura 34. Soportes fijos del mecanismo.

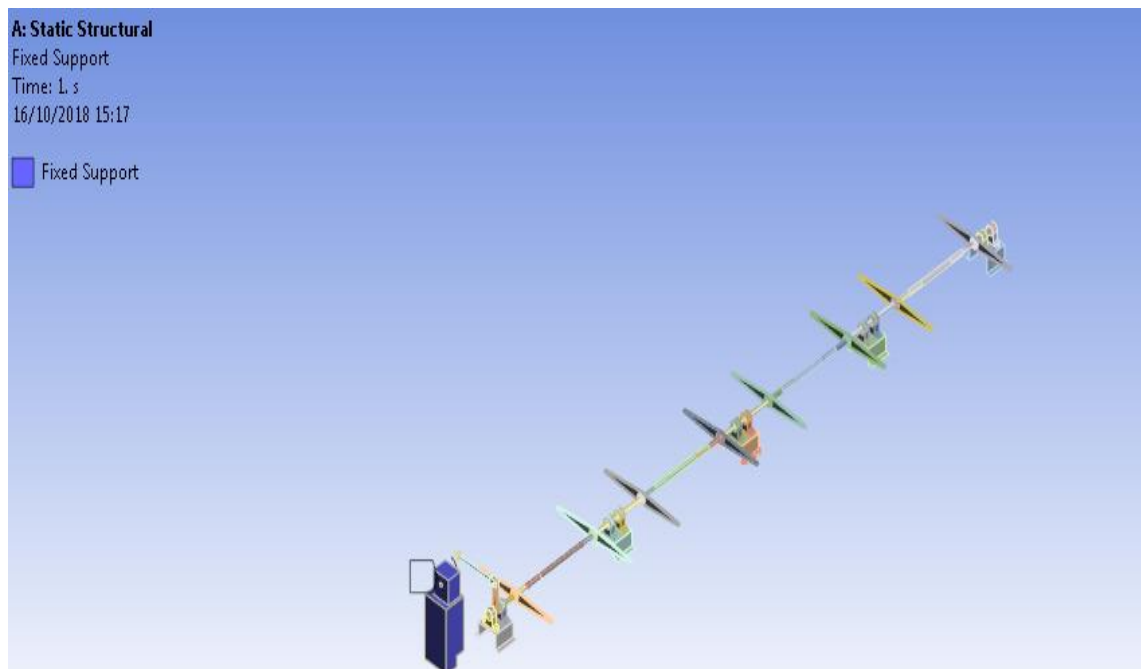


Figura 35. Enmallado y soportes fijos del sistema.

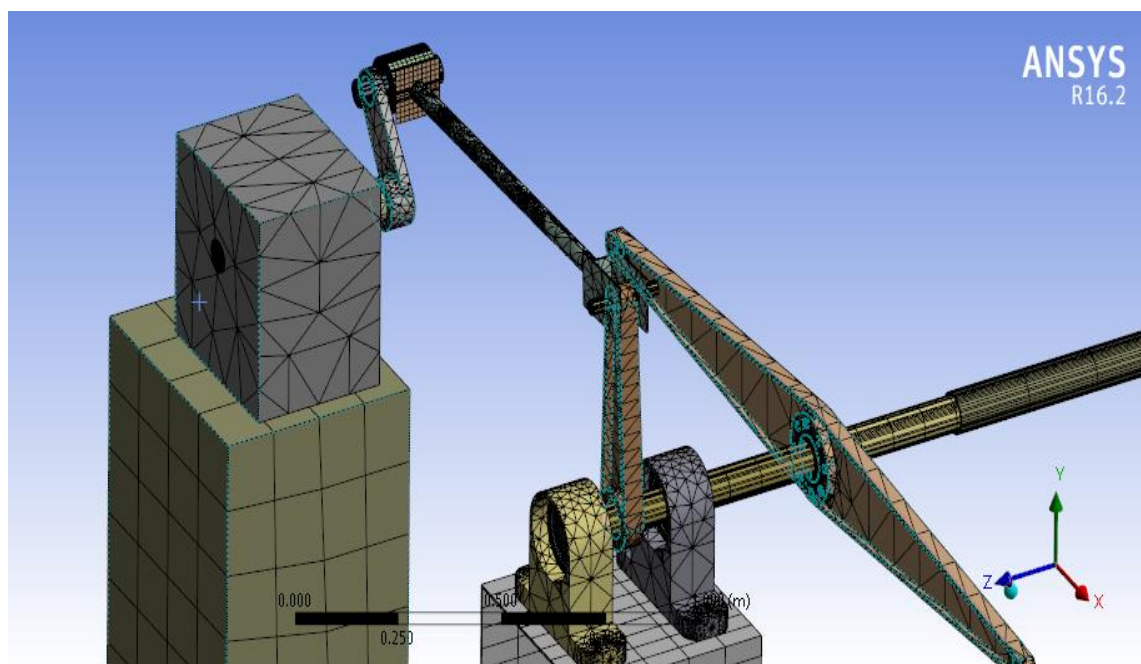
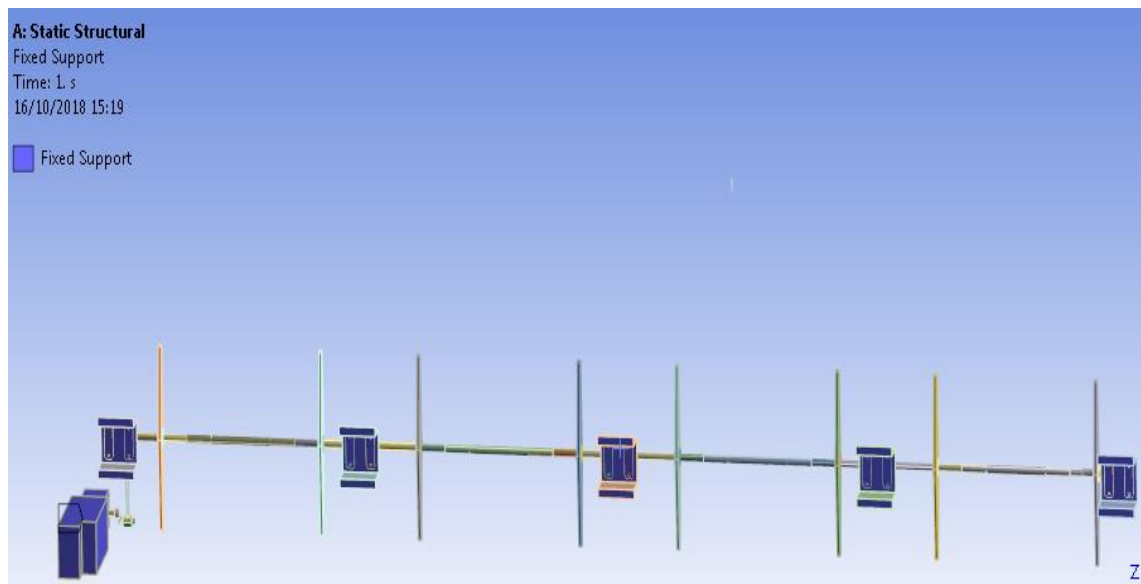


Tabla 19. Cálculo de la fuerza máxima de la manivela.

CÁLCULO DE LA FUERZA CRÍTICA MÁXIMA EN LA MANIVELA			
$P * 745.7 = T * \omega_{PosiciónCrítica}$		$T = F * L$	
Variables de entrada			
$\omega_{PosiciónCrítica}$	1.026	rad/s	Velocidad angular de la manivela en la posición crítica
L	0.23	m	Longitud de la manivela
P	4	HP	Potencia consumida por la cámara de floculación crítica
Variables de salida			
T	2907.21	N-m	Torque transmitido a la manivela
F	12640.05	N	Fuerza que soporta la manivela

La fuerza máxima se obtiene con las rpm mínimas de la cámara 1 que son 9.8 rpm = 1.026 rad/s.

Figura 36. Fuerza máxima sobre la manivela.

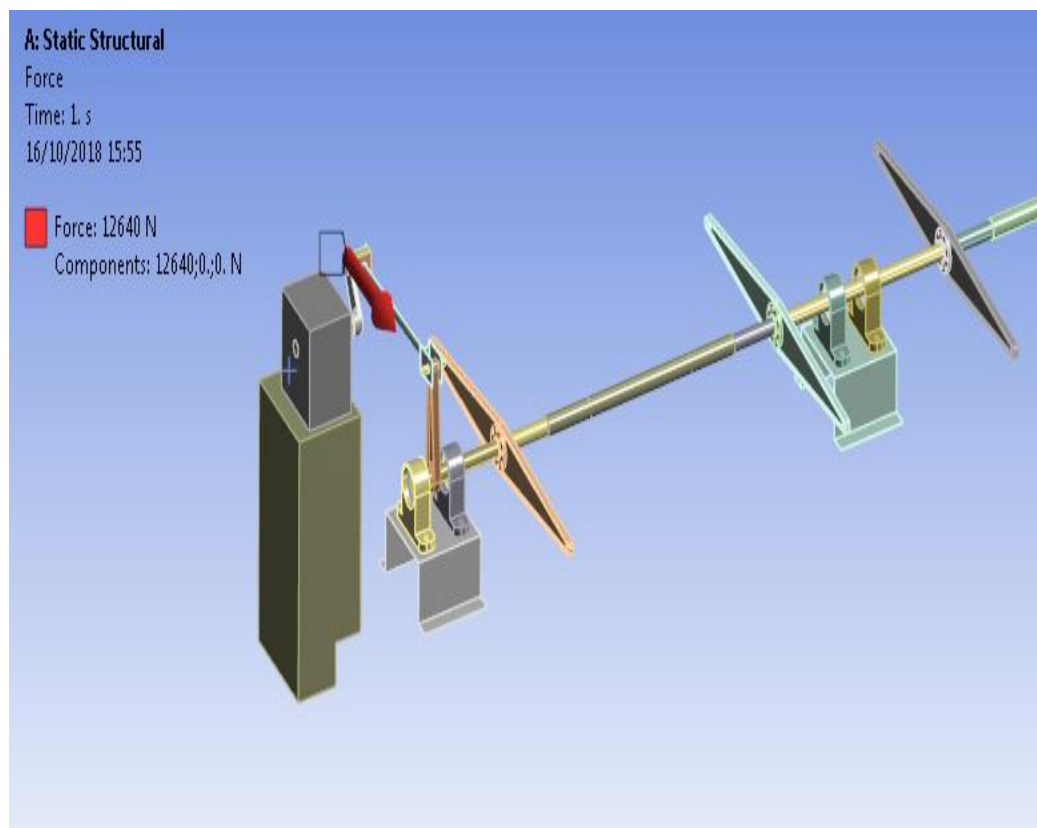


Tabla 20. Cálculo de la fuerza mínima de la manivela.

CÁLCULO DE LA FUERZA CRÍTICA MÍNIMA EN LA MANIVELA			
$P * 745.7 = T * \omega_{PosiciónCrítica}$		$T = F * L$	
Variables de entrada			
$\omega_{PosiciónCrítica}$	1.2	rad/s	Velocidad angular de la manivela en la posición crítica
L	0.23	m	Longitud de la manivela
P	4	HP	Potencia consumida por la cámara de floculación crítica
Variables de salida			
T	2485.67	N-m	Torque transmitido a la manivela
F	10807.25	N	Fuerza mínima que soporta la manivela

La fuerza mínima se obtiene con las rpm máximas de la cámara 1 que son 11.1 rpm = 1.2 rad/s.

Figura 37. Configuración de la herramienta de Fatiga (Fatigue Tool) del software Ansys.

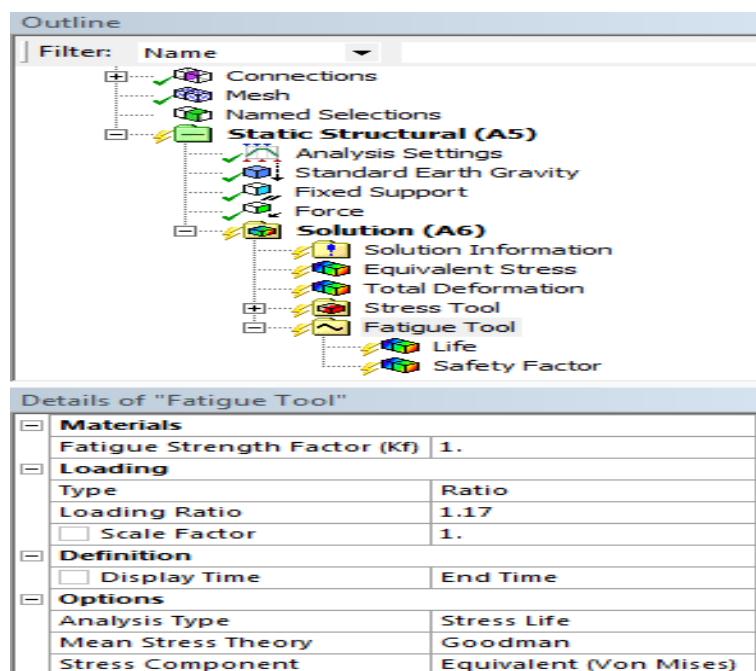
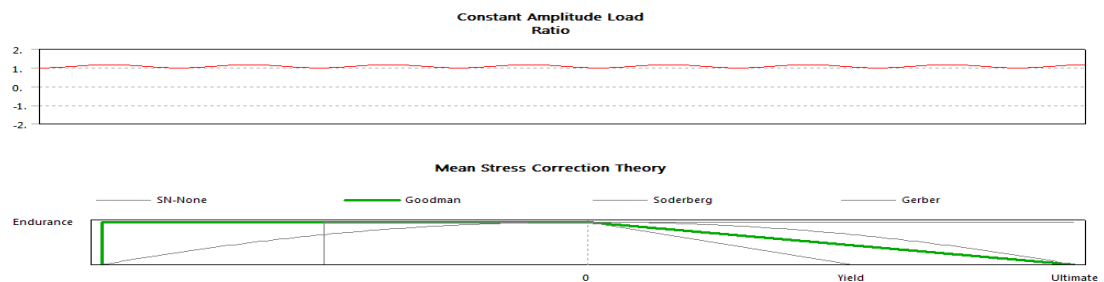
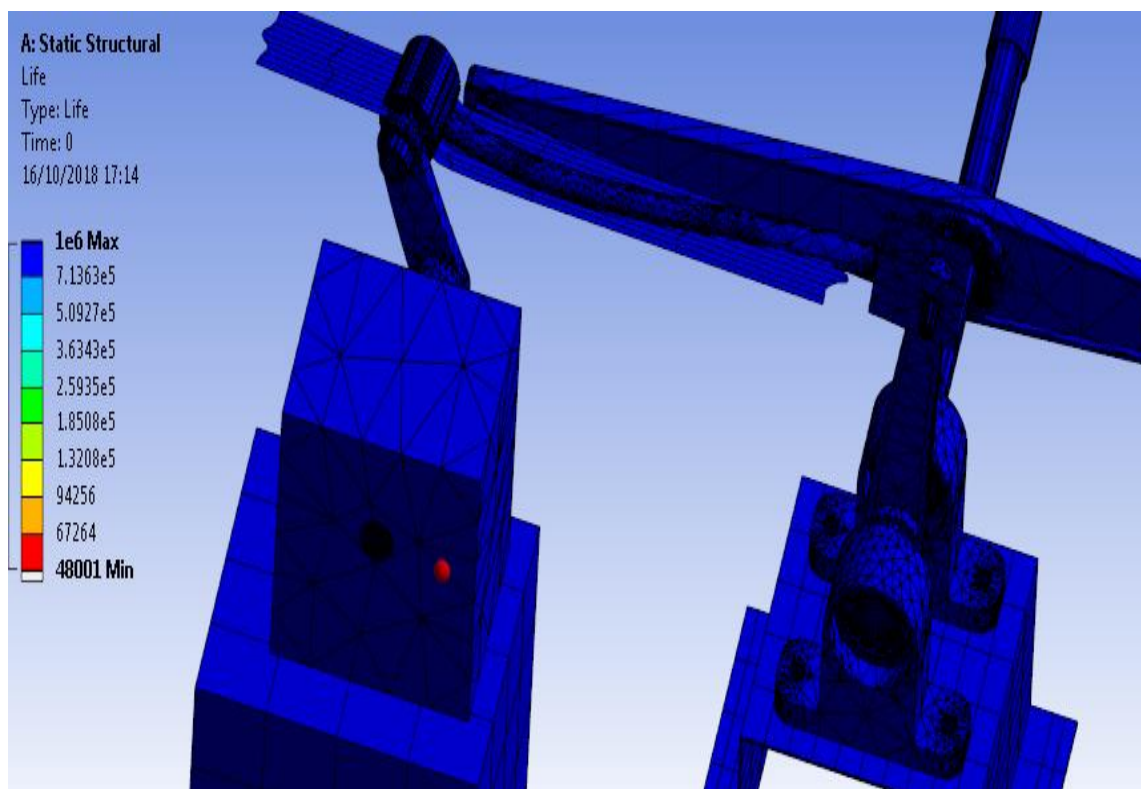
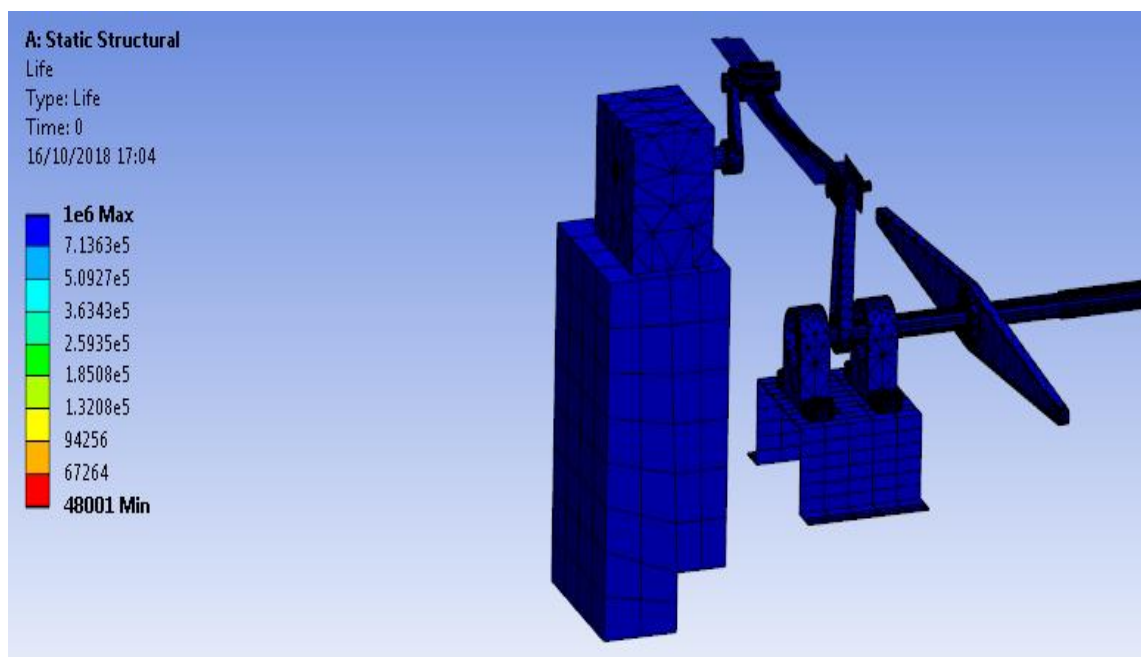
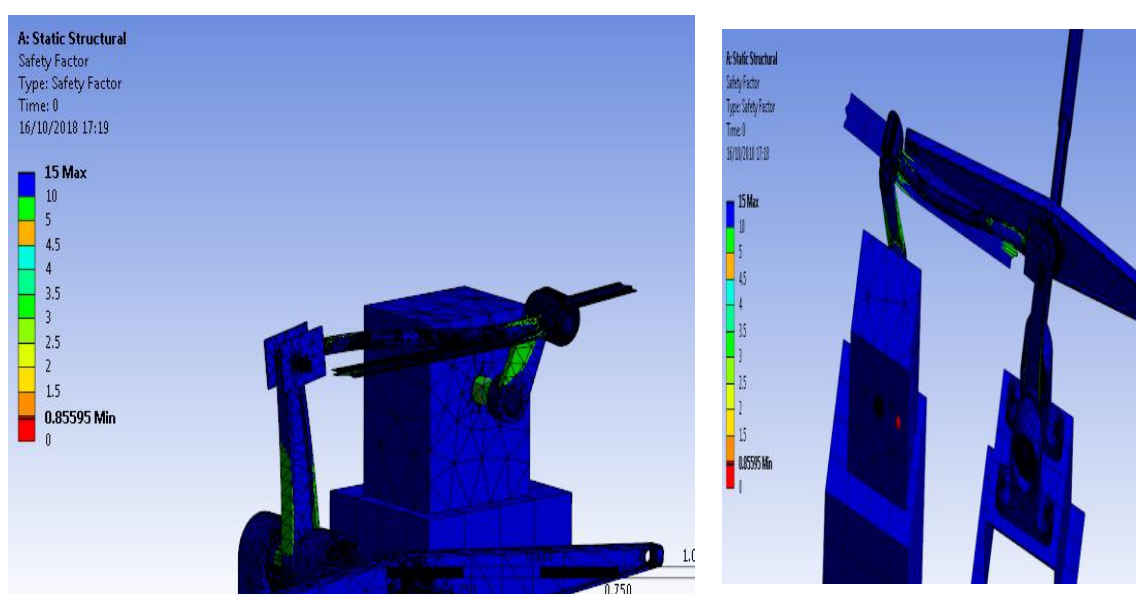


Figura 38. Resultado de la vida del mecanismo.



En el análisis se puede observar que los componentes del mecanismo están diseñados para vida infinita.

Figura 39. Resultados del factor de seguridad a fatiga del mecanismo y sus componentes.



5.2.2 Diseño de la viga que soporta los componentes. Esta viga se diseña bajo carga estática y asumiendo que el peso de todos los componentes se reparte igual en los 5 soportes de las chumaceras.

Tabla 21. Pesos de los componentes que soporta la viga.

PESOS DE LOS COMPONENTES QUE SOPORTA LA VIGA				
COMPONENTE	MASA (Kg)	CANTIDAD	MASA TOTAL (Kg)	PESO (N)
Alerón	35.37	8	282.93	2775.566
Bajante al agua	77.95	16	1247.26	12235.59
Eje de acople a los tubos	25.06	10	250.59	2458.309
Eje de acople entre las chumaceras y los alerones	48.23	3	144.70	1419.463
Tubo	16.97	4	67.87	665.8379
TOTAL			1993.35	19554.77
CARGA PARA CADA SOPORTE				3910.954

Figura 40. Soportes fijos, aceleración de la gravedad para tener en cuenta los propios pesos y fuerzas en cada soporte.

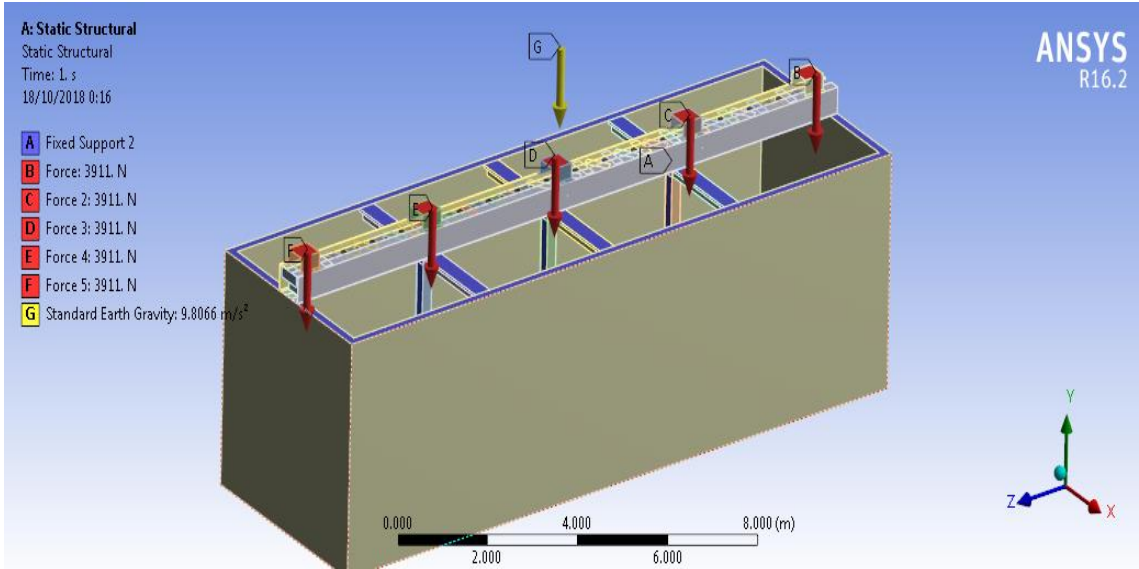
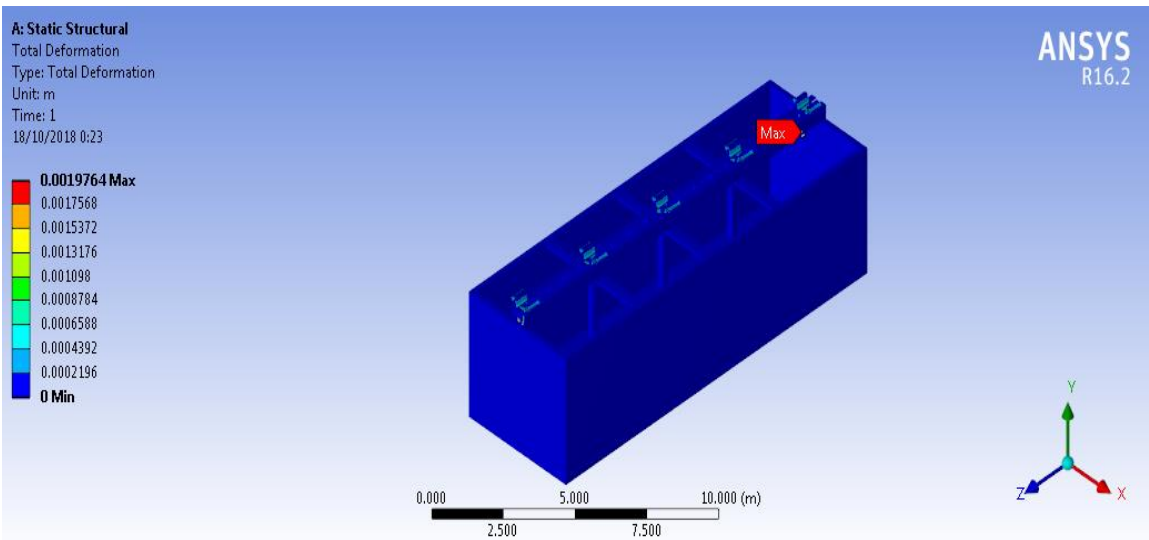
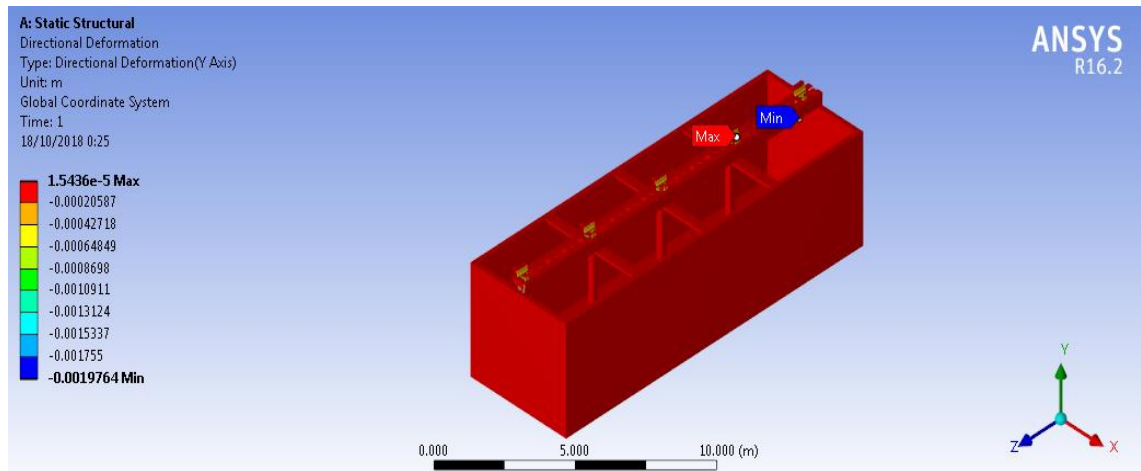


Figura 41. Resultados de las deformaciones totales sobre el conjunto.



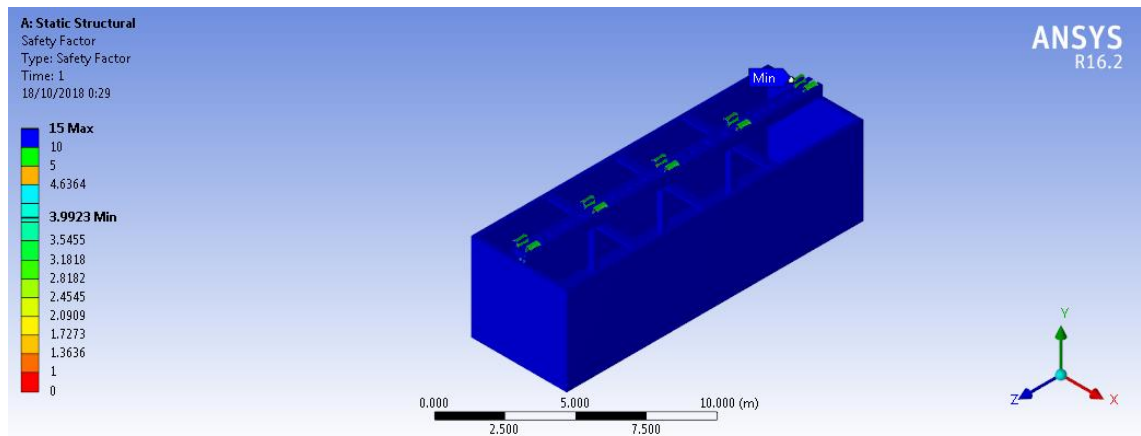
La deformación total del conjunto es de 1.9764 mm, lo cual es mínima en comparación con el tamaño de los componentes.

Figura 42. Resultados de las deformaciones totales sobre el conjunto.



A pesar de que todo el conjunto tiene la máxima deformación en el eje Y esta apenas es 0.015436 mm.

Figura 43. Factor de seguridad estático de todo el conjunto.



Para todo el conjunto se obtiene el mayor factor de seguridad que es de 15, exceptuando ciertas zonas de los soportes de las chumaceras, en las cuales el factor cae a 5.

6. DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL FLOCULADOR

Para la comprobación de que el proceso de diseño consignado en el capítulo 5 fue el adecuado, se realizará un prototipo que cumpla con parámetros similares a los del floculador real, escalando las principales variables utilizando análisis dimensional y comprobando la resistencia del prototipo por medio de los factores de seguridad que garanticen un diseño óptimo.

6.1 SEMEJANZA GEOMÉTRICA

Para la escalización del floculador real al prototipo se definió un factor de escala de longitudes constantes (L_r) de 1:10.

Debido a la que las dimensiones del tanque del floculador real son 14.48 (m) de largo, 13.20 (m) de ancho y 4 (m) de profundidad utilizando el factor de escala (L_r) las dimensiones del tanque del prototipo son las siguientes:

Tabla 22. Dimensiones del tanque del prototipo.

DIMENSIONES DEL TANQUE DEL PROTOTIPO			
$L_r = \frac{Longitud\ característica_{real}}{Longitud\ característica_{prototipo}}$		$L_r = 10$	
Variables de entrada			
Longitud característica real	14.48	m	Largo del tanque
Longitud característica real	13.2	m	Ancho del tanque
Longitud característica real	4	m	Profundidad del tanque
Variables de salida			
Longitud característica prototipo	1.448	m	Largo útil del tanque del prototipo
Longitud característica prototipo	1.32	m	Ancho útil del tanque del prototipo
Longitud característica prototipo	0.4	m	Profundidad útil del tanque del prototipo

6.2 SEMEJANZA CINEMÁTICA

Para que se conserven las variables bajo la misma escala se hará la deducción de los parámetros que afectan el funcionamiento del floculador en términos del factor de escala de longitudes constantes. Las variables a escalizar, son: el tiempo de retención hidráulica, la velocidad lineal, la velocidad angular, el gradiente de velocidad, y el caudal.

6.2.1 Número de Froude. Es un número adimensional, que sirve para relacionar las fuerzas de inercia y las de la gravedad sobre un fluido incompresible, estacionario y con superficie libre.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g * L_c}}$$

Donde:

V= Velocidad del flujo.

g= gravedad.

Lc= Longitud característica.

6.2.2 Relación de las velocidades lineales del floculador real (fr) con el prototipo (p). Para hallar dicha relación en términos del factor de escala de longitudes constantes es necesario la igualación de los números de Froude. De la siguiente forma:

$$F_{r \text{ floculador real}} = F_{r \text{ prototipo}} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\frac{V_{fr}}{\sqrt{g * L_{fr}}} = \frac{V_p}{\sqrt{g * L_p}} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\frac{V_{fr}}{\sqrt{L_{fr}}} = \frac{V_p}{\sqrt{L_p}} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$V_{fr} = \frac{V_p * \sqrt{L_{fr}}}{\sqrt{L_p}} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$L_r = \frac{\text{Longitud característica}_{real}}{\text{Longitud característica}_{prototipo}} = \frac{L_{fr}}{L_p} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$V_{fr} = V_p * \sqrt{F_{escala}} \quad \text{Ecuación 11}$$

La relación de velocidades del prototipo con el floculador real, está dada por:

$$V_r = \frac{V_{fr}}{V_p} \quad \text{Ecuación 12}$$

Reemplazando la ecuación 23 en la 22, se tiene:

$$V_r = \sqrt{L_r} \quad \text{Ecuación 13}$$

6.2.3 Relación del tiempo de retención hidráulica del floculador real (fr) con el prototipo (p). Para obtener el tiempo de retención hidráulica equivalente al del floculador real se procede a realizar el análisis dimensional para hallar la relación del mismo con el factor de escala de longitudes constantes (L_r).

Partiendo de la ecuación de velocidad constante:

$$Velocidad = \frac{Longitud}{Tiempo} \quad \text{Ecuación 14}$$

La relación de velocidades constantes es la siguiente:

$$V_r = \frac{L_r}{T_r} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$T_r = \frac{L_r}{V_r} \quad \text{Ecuación 16}$$

Reemplazando la ecuación 24 en la 27, se tiene:

$$T_r = \frac{L_r}{\sqrt{L_r}} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$T_r = \sqrt{L_r} \quad \text{Ecuación 18}$$

Relación de tiempos entre el floculador real y el prototipo:

$$T_r = \frac{T_{fr}}{T_p} \quad \text{Ecuación 18}$$

Reemplazando la ecuación 29 en la 30 se obtiene la relación de tiempos del floculador real y el prototipo en términos del factor de escala de longitudes constantes L_r .

$$T_p = \frac{T_{fr}}{\sqrt{L_r}} \quad \text{Ecuación 19}$$

Tabla 23. Tiempo de retención hidráulica del prototipo.

TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA DEL PROTOTIPO			
$T_p = \frac{T_{fr}}{\sqrt{L_r}}$		$L_r = 10$	
Variables de entrada			
T_{fr}	25	min	Tiempo de retención hidráulica del floculador real
Variables de salida			
T_p	7.90569415	min	Tiempo de retención hidráulica del prototipo

6.2.4 Relación de caudal entre el floculador real (fr) y el prototipo (p). La relación de caudal será obtenida de las ecuaciones antes encontradas, partiendo de la relación de caudal.

$$Q_r = V_r * A_r \quad \text{Ecuación 20}$$

$$A_r = L_r^2 \quad \text{Ecuación 21}$$

Reemplazando la ecuación 24 en la ecuación 32, se tiene:

$$Q_r = L_r^{5/2} \quad \text{Ecuación 22}$$

Relación de los caudales del floculador real (fr) y el prototipo (p):

$$Q_r = \frac{Q_{fr}}{Q_p} \quad \text{Ecuación 23}$$

Reemplazando la ecuación 34 en la 35, se tiene:

$$Q_p = \frac{Q_{fr}}{L_r^{5/2}} \quad \text{Ecuación 24}$$

Tabla 24. Caudal del prototipo

CAUDAL DEL PROTOTIPO			
$Q_P = \frac{Q_{fr}}{L_r^{5/2}}$		$L_r = 10$	
Variables de entrada			
Q_{fr}	510	L/s	Caudal del floculador real
Variables de salida			
Q_p	1.612761607	L/s	Caudal del prototipo

6.2.5 Relación de gradientes entre el floculador real (fr) y el prototipo (p).

Para obtener esta relación, se parte de la formula general de gradiente:

$$G = \sqrt{\frac{\text{Potencia}}{\mu * \text{Volumen}}} \quad \text{Ecuación 25}$$

Para que haya semejanza tanto el gradiente del floculador real como el del prototipo deben ser iguales:

$$G_{fr} = G_p \quad \text{Ecuación 26}$$

Reemplazando la ecuación 47 en la 48, se tiene:

$$\sqrt{\frac{F_{fr} * V_{fr}}{\mu * \text{Volumen}_{fr}}} = \sqrt{\frac{F_p * V_p}{\mu * \text{Volumen}_p}} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\text{Volumen}_r = L_r^3 \quad \text{Ecuación 28}$$

Reemplazando las relaciones 23, 41 y 50 en la ecuación 49, se obtiene la relación de gradientes:

$$G_r = \frac{G_{fr}}{G_p} = L_r^{1/4} \quad \text{Ecuación 28}$$

Tabla 25. Gradientes del prototipo en cada cámara de floculación.

Gradientes	Prototipo	Modelo	Unidad
Primera Cámara (Q)	60.00	33.74	S ⁻¹
	55.00	30.93	
	50.00	28.12	
Segunda Cámara (Q)	40.00	22.49	S ⁻¹
	35.00	19.68	
	30.00	16.87	
Tercera Cámara (Q)	30.00	16.87	S ⁻¹
	25.00	14.06	
	10.00	5.62	

6.2.6 Relación de las velocidades angulares entre el floculador real (fr) y el prototipo. Para conseguir esta relación, se parte de la definición de la aceleración normal.

$$a_n = \omega^2 * r \quad \text{Ecuación 29}$$

Para poder establecer la relación entre el floculador real y el prototipo, ambas aceleraciones, deben ser iguales.

$$a_{n_{fr}} = a_{n_p} \quad \text{Ecuación 30}$$

Relación de radios:

$$L_r = r_r = \frac{r_{fr}}{r_p} \quad \text{Ecuación 31}$$

Reemplazando las ecuaciones 52 y 54 en la 53, se tiene:

$$\omega_p = \omega_{fr} * L_r^{1/2} \quad \text{Ecuación 32}$$

Tabla 26. RPM de los motores del prototipo.

VELOCIDAD DE ROTACIÓN			
$\omega_p = \omega_{fr} * L_r^{1/2}$		$L_r = 10$	
Variables de entrada			
ω_{s1}	11.1	RPM	RPM superior cámara 1
ω_{s2}	8.5	RPM	RPM superior cámara 2
ω_{s3}	7	RPM	RPM superior cámara 3
ω_{m1}	10.5	RPM	RPM media cámara 1
ω_{m2}	7.7	RPM	RPM media cámara 2
ω_{m3}	6.2	RPM	RPM media cámara 3
ω_{I1}	9.8	RPM	RPM inferior cámara 1
ω_{I2}	7	RPM	RPM inferior cámara 2
ω_{I3}	3.4	RPM	RPM inferior cámara 3
Variables de salida			
ω_{s1}	35.10	RPM	RPM superior cámara 1 prototipo
ω_{s2}	26.88	RPM	RPM superior cámara 2 prototipo
ω_{s3}	22.14	RPM	RPM superior cámara 3 prototipo
ω_{m1}	33.20	RPM	RPM media cámara 1 prototipo
ω_{m2}	24.35	RPM	RPM media cámara 2 prototipo
ω_{m3}	19.61	RPM	RPM media cámara 3 prototipo
ω_{I1}	30.99	RPM	RPM inferior cámara 1 prototipo
ω_{I2}	22.14	RPM	RPM inferior cámara 2 prototipo
ω_{I3}	10.75	RPM	RPM inferior cámara 3 prototipo

6.3 DIMENSIONES DEL MECANISMO

Para dimensionar el mecanismo, se utilizará el factor de escala de longitudes contantes (L_r), partiendo de las dimensiones del mecanismo del floculador real.

Tabla 27. Dimensiones del mecanismo del prototipo.

DIMENSIONES DEL TANQUE DEL PROTOTIPO			
$L_r = \frac{Longitud\ característica_{real}}{Longitud\ característica_{prototipo}}$		$L_r = 10$	
Variables de entrada			
Longitud característica real	230	mm	Manivela del floculador real
Longitud característica real	1090	m	Biela del floculador real
Longitud característica real	500	m	Balancín del floculador real
Longitud característica real	1000	m	Barra fija de floculador real
Variables de salida			
Longitud característica prototipo	23	mm	Manivela del prototipo
Longitud característica prototipo	109	mm	Biela del prototipo
Longitud característica prototipo	50	mm	Balancín del prototipo
Longitud característica prototipo	100	mm	Barra fija del prototipo

A pesar de que las dimensiones del mecanismo fueron obtenidas con el mismo factor de escala, por cuestiones de tamaño y facilidad en la construcción se utilizó un factor de escala de 1:4, obteniendo las siguientes dimensiones:

Tabla 28. Dimensiones del mecanismo del prototipo con la escala 1:4.

DIMENSIONES DEL TANQUE DEL PROTOTIPO			
$L_r = \frac{Longitud\ característica_{real}}{Longitud\ característica_{prototipo}}$		$L_r = 4$	
Variables de entrada			
Longitud característica real	230	mm	Manivela del floculador real
Longitud característica real	1090	m	Biela del floculador real
Longitud característica real	500	m	Balancín del floculador real
Longitud característica real	1000	m	Barra fija de floculador real
Variables de salida			
Longitud característica prototipo	57.5	mm	Manivela del prototipo
Longitud característica prototipo	272.5	mm	Biela del prototipo
Longitud característica prototipo	125	mm	Balancín del prototipo
Longitud característica prototipo	250	mm	Barra fija del prototipo

6.4 ENSAMBLE DEL PROTOTIPO DEL FLOCULADOR SOBRE EL TANQUE DEL FLOCULACIÓN

La longitud del eje viene dada por el largo de la cámara de floculación que es de 1.448 m, aunque la longitud del eje sobrepasa la cámara para facilidad de

montaje de los componentes llegando a tener una longitud de 1.65 m y estará soportado por 4 chumaceras de 1", al eje van unidos 8 alerones, al igual que en el floculador real, el mismo sistema de agitación guardadas las proporciones (1:10), el mecanismo manivela – biela – balancín, una viga tipo UPN, que es el elemento rígido sobre el que van soportados los componentes anteriormente nombrados.

Figura 44. Ensamble del eje con la viga y demás componentes mecánicos.

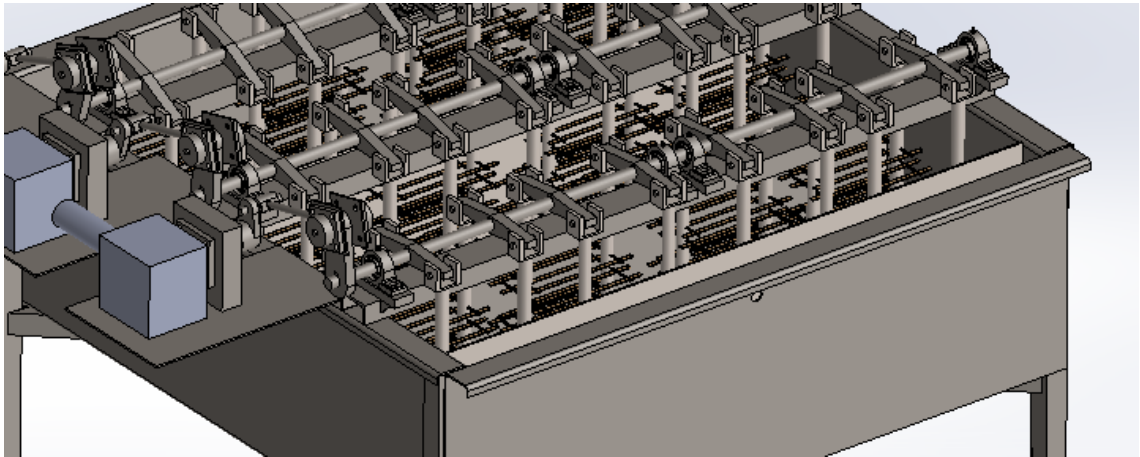
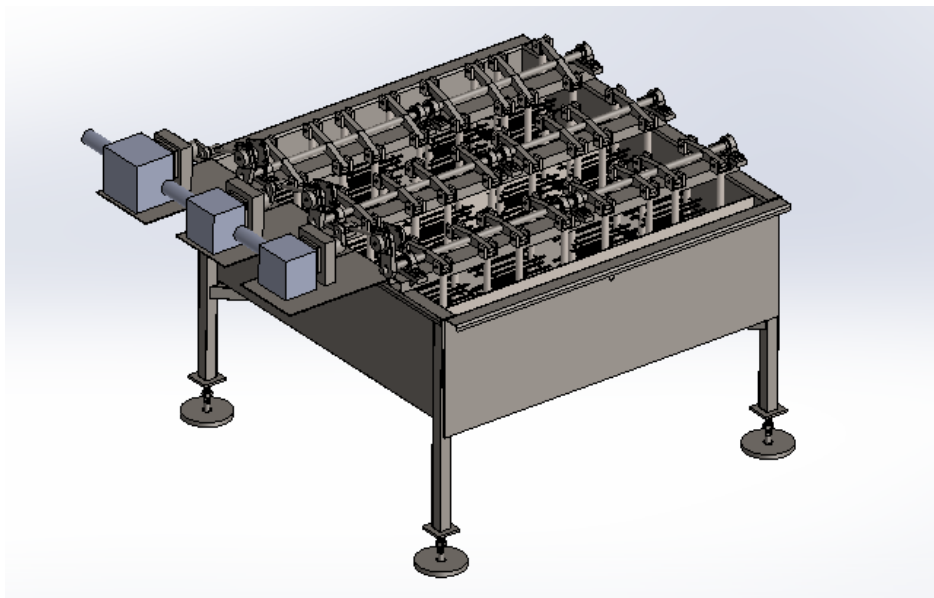


Figura 45. Ensamblaje general del prototipo del floculador sobre el tanque.



6.5 DISEÑO EN DETALLE DE LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO DEL FLOCULADOR

El proceso de diseño será similar al del floculador real, partiendo las medidas escaladas ya obtenidas.

6.5.1 Valor del torque crítico. El valor del torque crítico será obtenido con un valor de potencia fijo, el cual es de 0.33 HP, ya que los valores de potencia para cada cámara son muy pequeños, a pesar de tener incluidos el factor de servicio de 3. Los gradientes de cada cámara, serán los mismos que ya se calcularon anteriormente y el torque crítico será el mayor que salga de la combinación de 0.33 HP con las RPM inferiores en cada cámara.

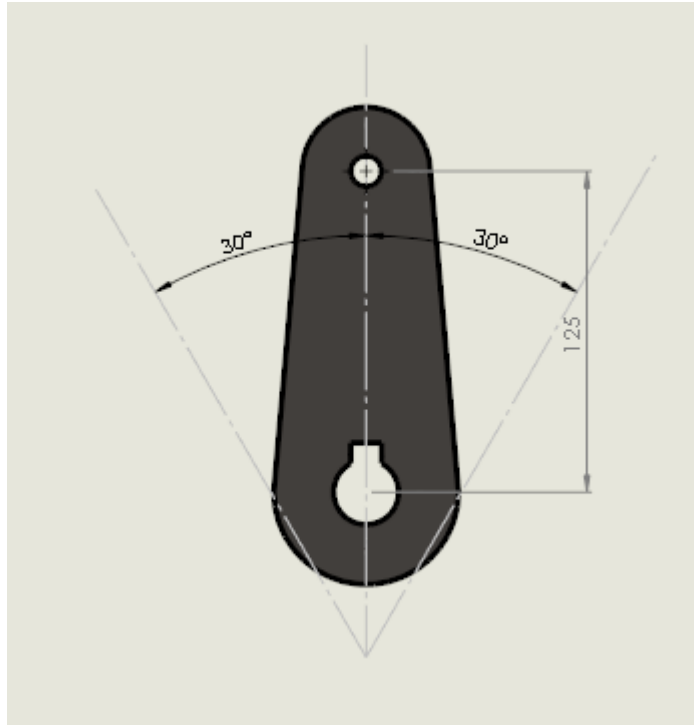
En la tabla 36, se encuentran los valores de potencias de cada cámara y sus respectivas RPM mínimas; de donde se obtiene un torque de 218.56 N-m, dado en la cámara 3; por lo que en adelante se diseñarán y seleccionarán todos los componentes con respecto de la cámara 3 para luego ser replicados a la cámara 1 y 2.

Tabla 29. Valores de torque generados en cada compartimiento del prototipo.

TORQUE GENERADO EN CADA COMPARTIMIENTO			
$TORQUE = \frac{POTENCIA * 745.7}{n * \frac{2 * \pi}{60}}$			
Variables de entrada			
P_{s1}	0.33	HP	Potencia cámara 1
P_{s2}	0.33	HP	Potencia cámara 2
P_{s3}	0.33	HP	Potencia cámara 3
n_{i1}	30.99	RPM	RPM inferior cámara 1
n_{i2}	22.14	RPM	RPM inferior cámara 2
n_{i3}	10.75	RPM	RPM inferior cámara 3
Variables de salida			
$T_{máx1}$	75.83	N-m	Torque máximo cámara 1
$T_{máx2}$	106.16	N-m	Torque máximo cámara 2
$T_{máx3}$	218.56	N-m	Torque máximo cámara 3

6.5.2 Análisis cinemático y cálculo de desplazamientos. En el siguiente análisis se comprobará que el mecanismo escalizado también oscila en un ángulo de $\theta = 60^\circ$.

Figura 46. Ángulo recorrido por el balancín respecto de la vertical.



La dimensión de este balancín es de 125 mm o 12.5 cm.

Los desplazamientos fueron calculados por medio de la síntesis analítica de mecanismos y las transformaciones de Euler cuyas ecuaciones se resolvieron en el software EES teniendo como parámetros de entrada las revoluciones de la cámara 3, 10.75174 RPM o 1.13 rad/s, y el ángulo barrido por la manivela (360 °) arrojando resultados de los desplazamientos y velocidades del balancín y el mecanismo, cada 15°.

Figura 47. Dimensiones del mecanismo manivela – biela – balancín del prototipo.

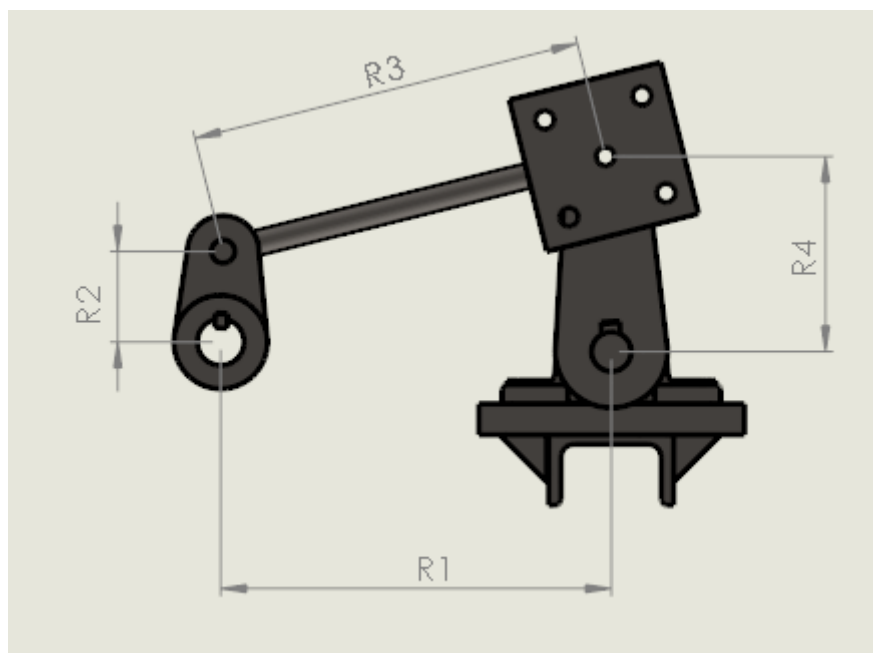


Tabla 30. Resultados de la síntesis.

Barra fija	R1=250 mm.
Manivela	R2= 57.5 mm.
Biela	R3= 272.5
Balancín	R4=125 mm.

Figura 48. Ecuaciones de posición y velocidad del mecanismo de la figura 47

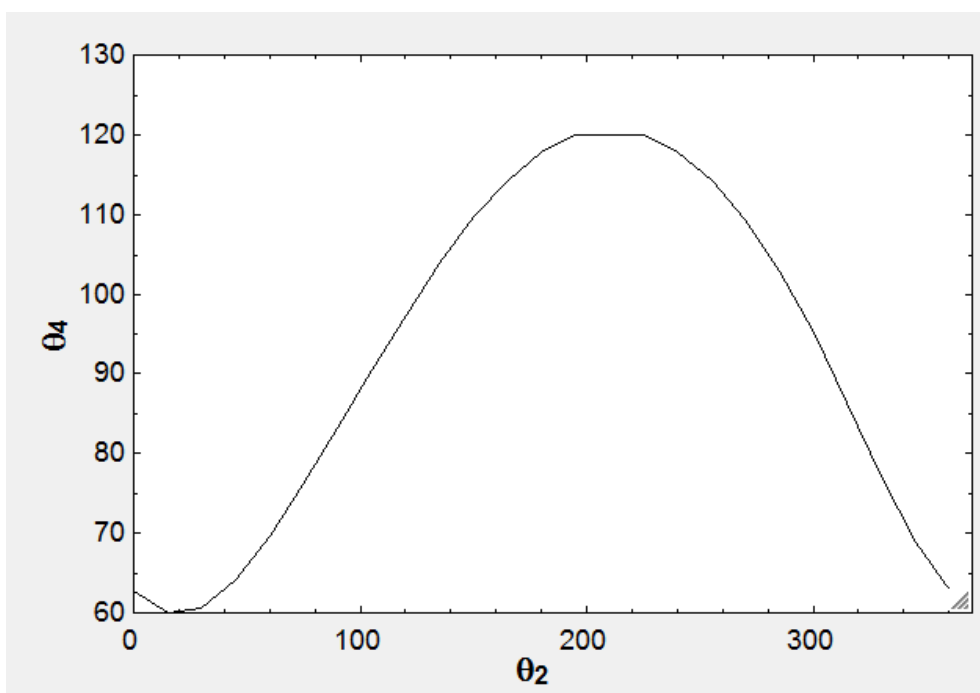


Figura 49. Gráfica del desplazamiento de la manivela vs el del balancín.

"Análisis de posición"

$r_1=0.25$

$r_2=0.058$

$r_3=0.273$

$r_4=0.125$

$\theta_1=0$

$\omega_1=0$

$\alpha_2=0$

"Parte real"

$-r_1 \cos(\theta_1) - r_4 \cos(\theta_4) + r_2 \cos(\theta_2) + r_3 \cos(\theta_3) = 0$

"Parte Imaginaria"

$-r_1 \sin(\theta_1) - r_4 \sin(\theta_4) + r_2 \sin(\theta_2) + r_3 \sin(\theta_3) = 0$

"Análisis de velocidad"

"Parte real"

$r_1 \omega_1 \sin(\theta_1) + r_4 \omega_4 \sin(\theta_4) - r_2 \omega_2 \sin(\theta_2) - r_3 \omega_3 \sin(\theta_3) = 0$

$\omega_2 = 10.75174 \cdot (\pi/30)$

"Parte imaginaria"

$-r_1 \omega_1 \cos(\theta_1) - r_4 \omega_4 \cos(\theta_4) + r_2 \omega_2 \cos(\theta_2) + r_3 \omega_3 \cos(\theta_3) = 0$

Tabla 31. Resultados de los desplazamientos del balancín.

1..25	1	2	3	4	5
	θ_2	θ_4	ω_2	ω_3	ω_4
Run 1	0	62.67	1.126	-0.3401	-0.3401
Run 2	15	59.93	1.126	-0.263	-0.07022
Run 3	30	60.66	1.126	-0.1768	0.1699
Run 4	45	64.16	1.126	-0.1041	0.3443
Run 5	60	69.55	1.126	-0.04822	0.4553
Run 6	75	76.07	1.126	-0.005061	0.5172
Run 7	90	83.17	1.126	0.03046	0.5424
Run 8	105	90.4	1.126	0.06222	0.539
Run 9	120	97.42	1.126	0.09281	0.5115
Run 10	135	103.9	1.126	0.1236	0.4625
Run 11	150	109.7	1.126	0.1549	0.3941
Run 12	165	114.4	1.126	0.1852	0.3092
Run 13	180	117.8	1.126	0.212	0.212
Run 14	195	120	1.126	0.2314	0.1074
Run 15	210	120	1.126	0.2392	-4.168E-08
Run 16	225	120	1.126	0.2314	-0.1074
Run 17	240	117.8	1.126	0.2046	-0.214
Run 18	255	114.3	1.126	0.1562	-0.3205
Run 19	270	109.3	1.126	0.08455	-0.4274
Run 20	285	102.9	1.126	-0.009945	-0.5322
Run 21	300	95.16	1.126	-0.1221	-0.6257
Run 22	315	86.36	1.126	-0.238	-0.6864
Run 23	330	77.18	1.126	-0.3313	-0.678
Run 24	345	68.78	1.126	-0.3701	-0.5629
Run 25	360	62.67	1.126	-0.3401	-0.3401

El desplazamiento del balancín representado por la variable θ_4 se calcula haciendo la diferencia del valor máximo con el mínimo, por tanto $\theta_4 = 120^\circ - 59.93^\circ = 60.07^\circ$. Con este resultado se comprueba que el ángulo asumido para los desplazamientos del balancín fue el correcto y que en balancín hará dicho recorrido.

6.5.3 Análisis cinético. En el análisis cinético se calculan las fuerzas presentes en el mecanismo y en los alerones del prototipo, cuyas cargas serán transmitidas al eje del prototipo que soporta todos los componentes. Como el sistema cambia de posiciones constantemente se escoge como posición crítica de diseño en donde los alerones del prototipo se encuentran totalmente horizontales, debido a que todas las componentes de aceleración y velocidad son completamente verticales.

Figura 50. Posición de análisis de cargas del prototipo.

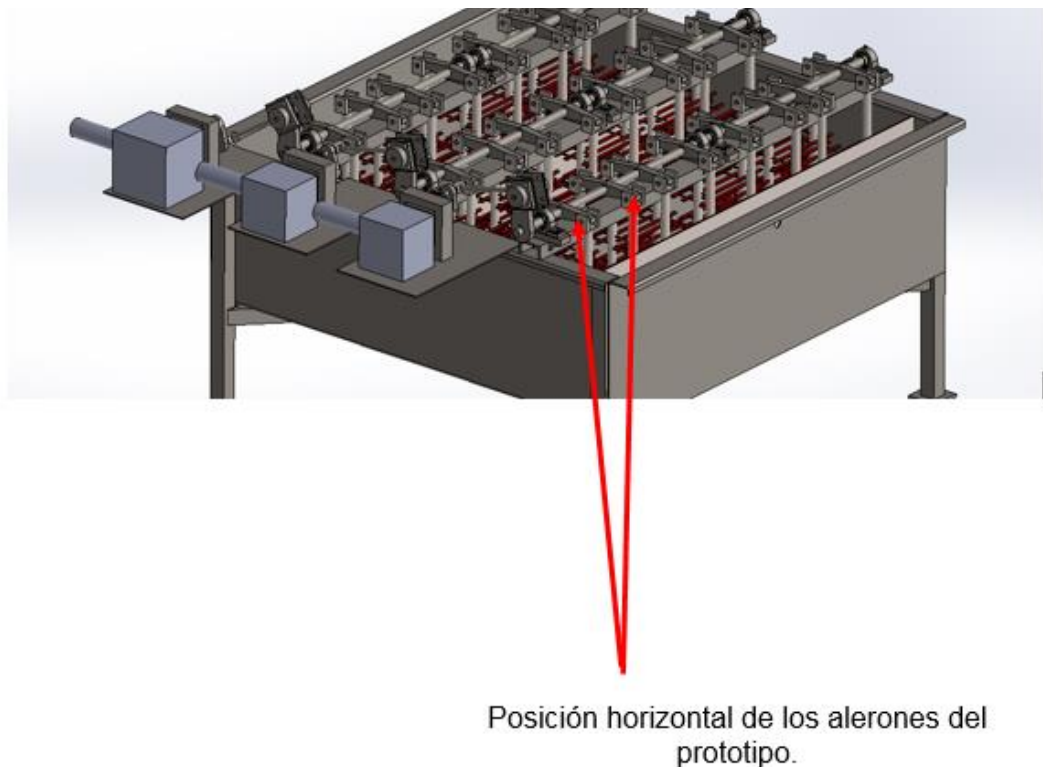


Figura 51. Ensamblaje del alerón con los elementos agitadores del prototipo.

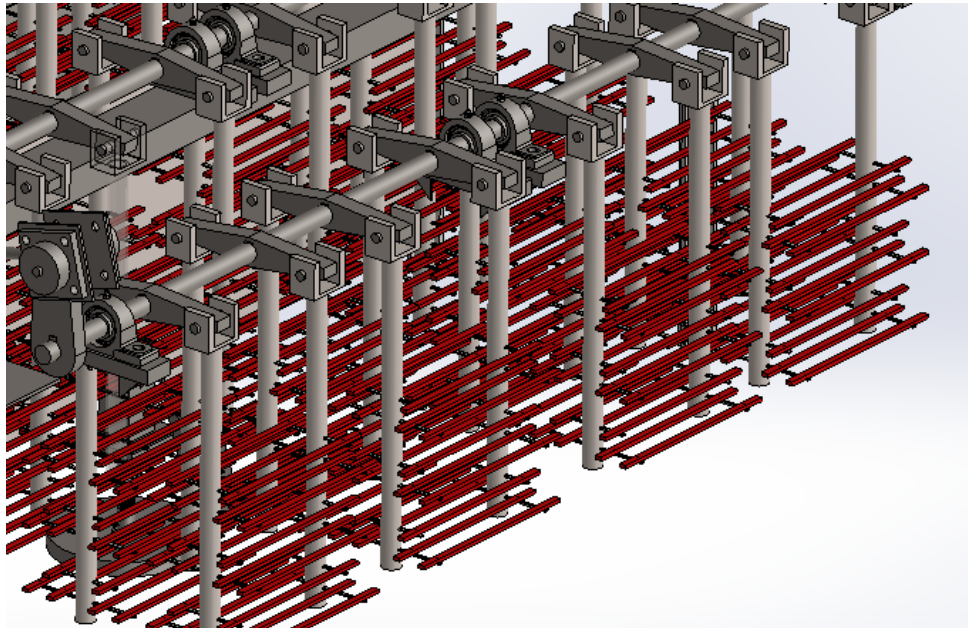


Figura 52. DCL del alerón del prototipo.

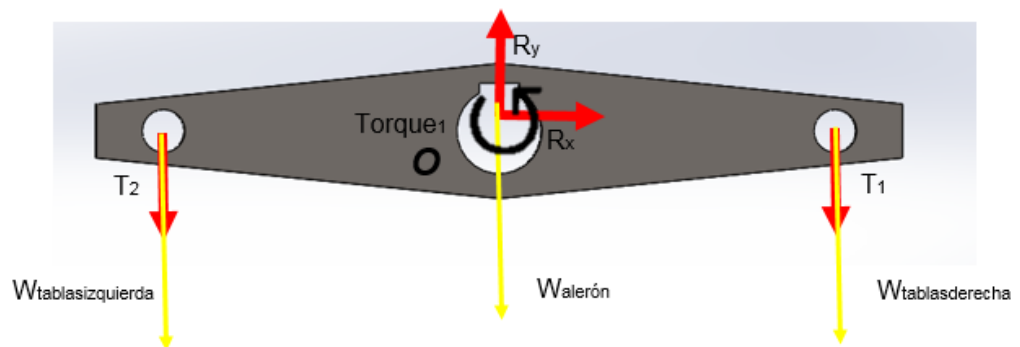


Figura 55. Tabla del sistema de agitación.

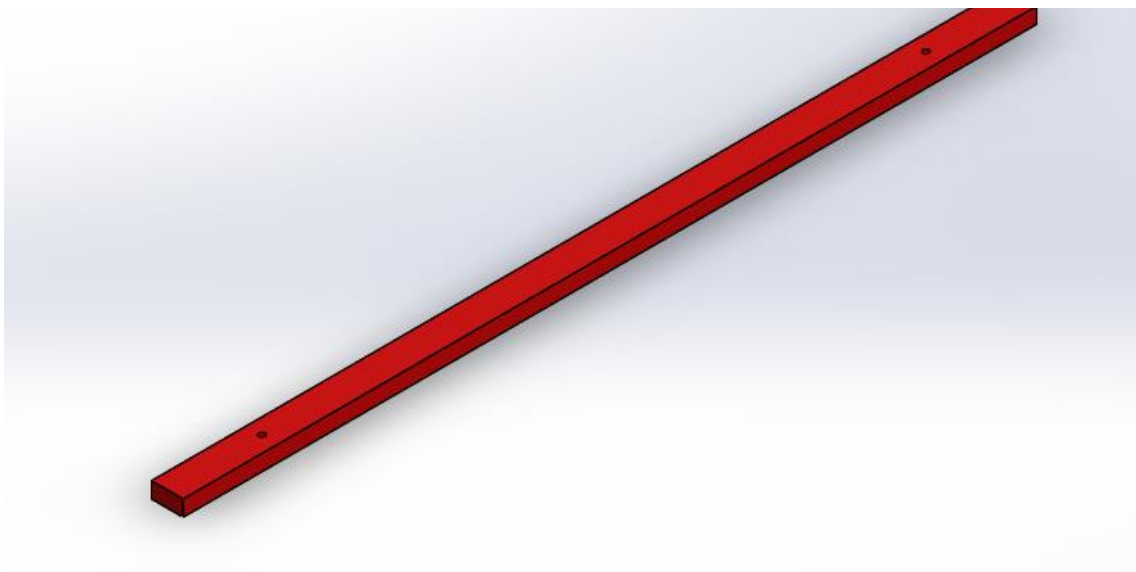


Figura 54. DCL tabla izquierda.

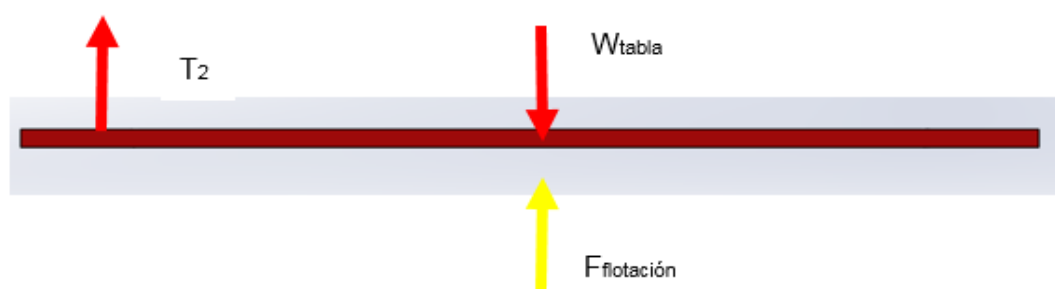


Figura 53. DCL tabla derecha.

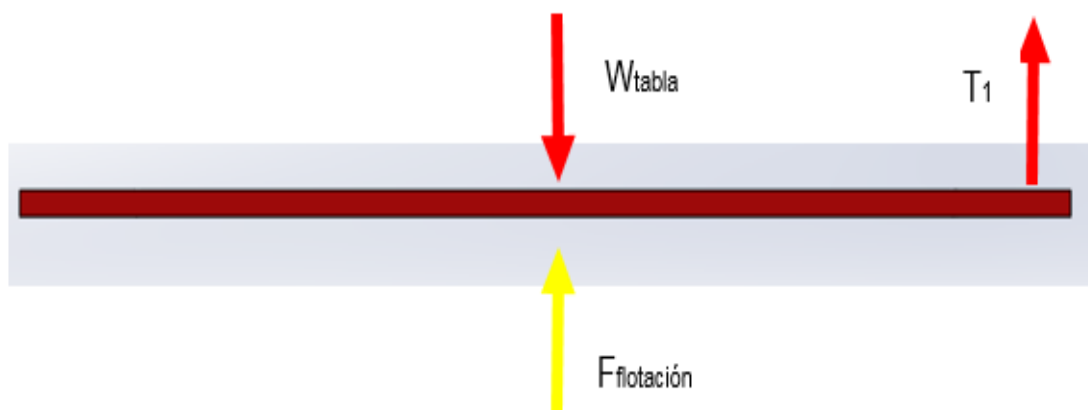


Tabla 32. Resultados obtenidos de los DCL de las figuras 81, 82, 83 y 84.

ECUACIONES DE LOS DCL DEL ALERÓN Y LAS DOS TABLAS DEL PROTOTIPO			
$P = \text{Torque} * \omega_{\text{balancín}} \quad (1)$ Sumatoria de fuerzas en Y, DCL tabla derecha: $T_1 - W_{\text{tablas}} + F_{\text{flotación}} = \frac{m_{\text{tablas}}}{2} * (\alpha * r) \quad (2)$ Sumatoria de torques en el alerón, respecto del punto O: $+ \sum M_O = r * (T_2 - T_1) + \text{Torque}_1 = I * \alpha + m_{\text{alerón}} * \alpha \quad (3)$ Sumatoria de fuerzas en Y, DCL tabla izquierda: $T_1 - W_{\text{tablas}} + F_{\text{flotación}} = -\frac{m_{\text{tablas}}}{2} * (\alpha * r) \quad (4)$ $W_{\text{tablas}} = \left(\frac{m_{\text{tablas}} * 9}{2} \right) + m_{\text{bajantealagua}} * g \quad (5)$ $F_{\text{flotación}} = \rho_{\text{agua}} * V_{\text{tablas}} * g * \frac{\# \text{tablas}}{2} \quad (6)$ $\text{Torque}_1 = \frac{\text{Torque}}{\# \text{alerones}} \quad (7)$			
Variables de entrada			
P	246.1	W	Potencia consumida por el agua en la cámara 1
$\omega_{\text{balancín}}$	0.6679	rad/s	Velocidad angular del balancín en el instante de la posición crítica
m_{tablas}	0.016123	kg	masa de una sola tabla
ρ_{agua}	1000	kg/m ³	Densidad del agua a 4° y presión atmosférica
$m_{\text{bajantealagua}}$	1.4113068	Kg	
V_{tablas}	1.3437*10 ⁻⁴	m ³	Volumen de una sola tabla
$\# \text{tablas}$	9	-----	# de tablas por cada lado del alerón
g	9.81	m/s ²	aceleración de la gravedad
r	0.1	m	Radio del alerón
I	4.8*10 ⁻³	kg*m ²	Momento de Inercia Iy
$m_{\text{alerón}}$	0.1513824	kg	masa de un solo alerón
$\# \text{alerones}$	8	----	Número de alerones sobre el eje de la cámara 1
Variables de salida			
Torque	368.4	N-m	Torque de entrada en el balancín de la cámara 1
Torque_1	46.05	N-m	Torque resistivo en cada uno de los alerones
T_1	10.75	N	Fuerza hecha por el bajante derecho al alerón
T_2	6.495	N	Fuerza hecha por el bajante izquierdo al alerón
$F_{\text{flotación}}$	5.932	N	Fuerza de flotación hecha por las 9 tablas a cada lado
α	293.5	rad/s	Aceleración angular del balancín en la posición crítica

6.6 DISEÑO MECÁNICO DE LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO

El prototipo del floculador está compuesto por componentes mecánicos, como pasadores para el mecanismo, para los bajantes al agua, el tubo del bajante al agua, las barras del mecanismo, el eje que transmite el movimiento al agua, el

alerón, la viga que soporta los componentes y el tanque con sus refuerzos y apoyos . Estos componentes se diseñaran en los estados de carga máxima y según sean sus cargas el diseño será a fatiga. El material usado para los componentes mecánicos es el acero ASTM A36 en la figura 44 se exponen las propiedades de este material.

6.6.1 Diseño del mecanismo manivela – biela – balancín. El diseño de este mecanismo del prototipo se hará por medio del software Ansys, que permite el análisis de todo el conjunto obteniendo los factores de seguridad a fatiga para todas las piezas que lo componen (pasadores y barras). Hechos de acero estructural ASTM A36.

Figura 56. Enmallado para determinar los esfuerzos sobre el mecanismo.

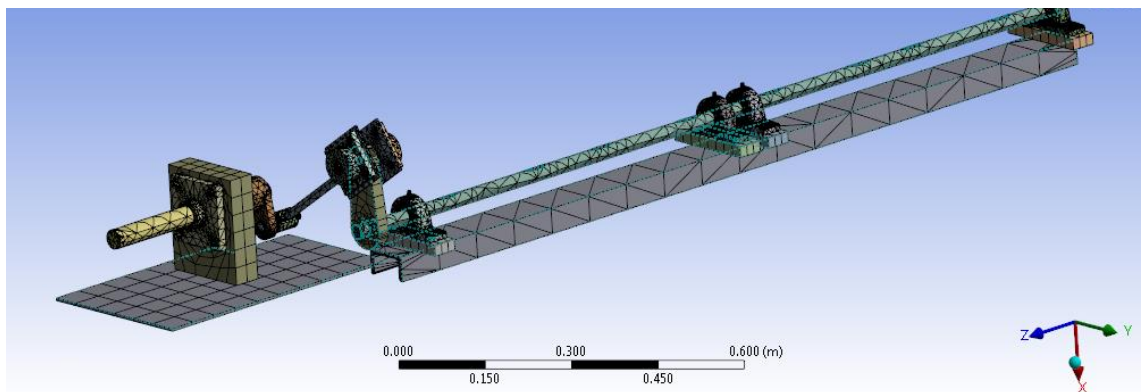


Figura 57. DCL del mecanismo del prototipo.

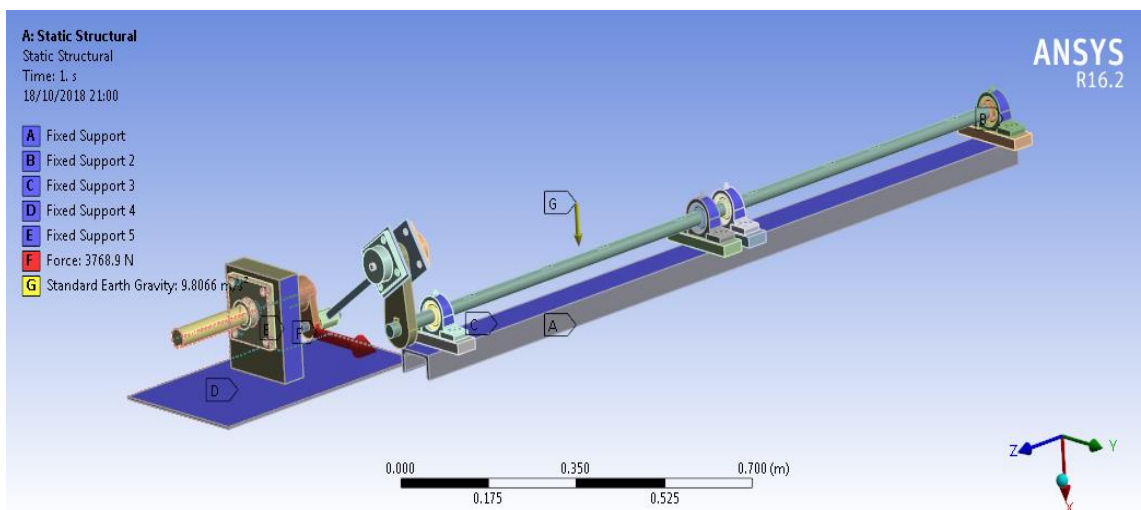


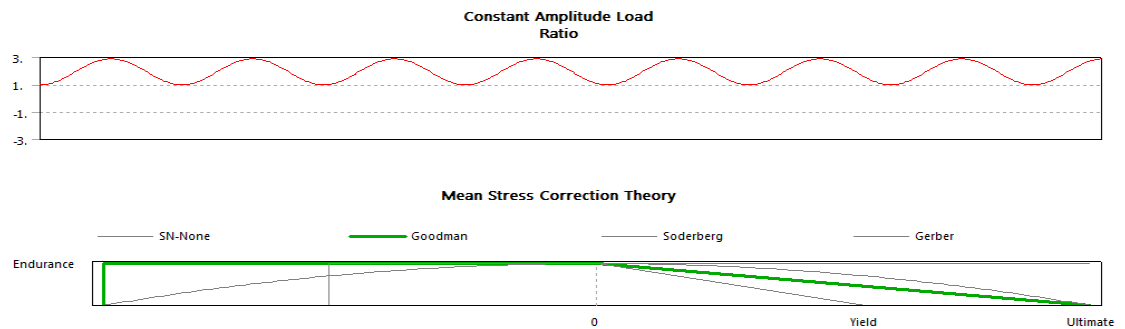
Tabla 33. Cálculo de la fuerza máxima de la manivela.

CÁLCULO DE LA FUERZA CRÍTICA MÁXIMA EN LA MANIVELA DEL PROTOTIPO			
$P * 745.7 = T * \omega_{PosiciónCrítica}$		$T = F * L$	
Variables de entrada			
$\omega_{PosiciónCrítica}$	1.13	rad/s	Velocidad angular de la manivela en la posición crítica
L	0.058	m	Longitud de la manivela del prototipo
P	0.33	HP	Potencia consumida por la cámara de floculación crítica
Variables de salida			
T	218.60	N-m	Torque transmitido a la manivela del prototipo
F	3768.89	N	Fuerza que soporta la manivela del prototipo

Tabla 34. Cálculo de la fuerza mínima de la manivela.

CÁLCULO DE LA FUERZA CRÍTICA MÍNIMA EN LA MANIVELA DEL PROTOTIPO			
$P * 745.7 = T * \omega_{PosiciónCrítica}$		$T = F * L$	
$\omega_{PosiciónCrítica}$	3.25	rad/s	Velocidad angular de la manivela en la posición crítica
L	0.058	m	Longitud de la manivela del prototipo
P	0.33	HP	Potencia consumida por la cámara de floculación crítica
T	75.80	N-m	Torque transmitido a la manivela
F	1306.95	N	Fuerza mínima que soporta la manivela

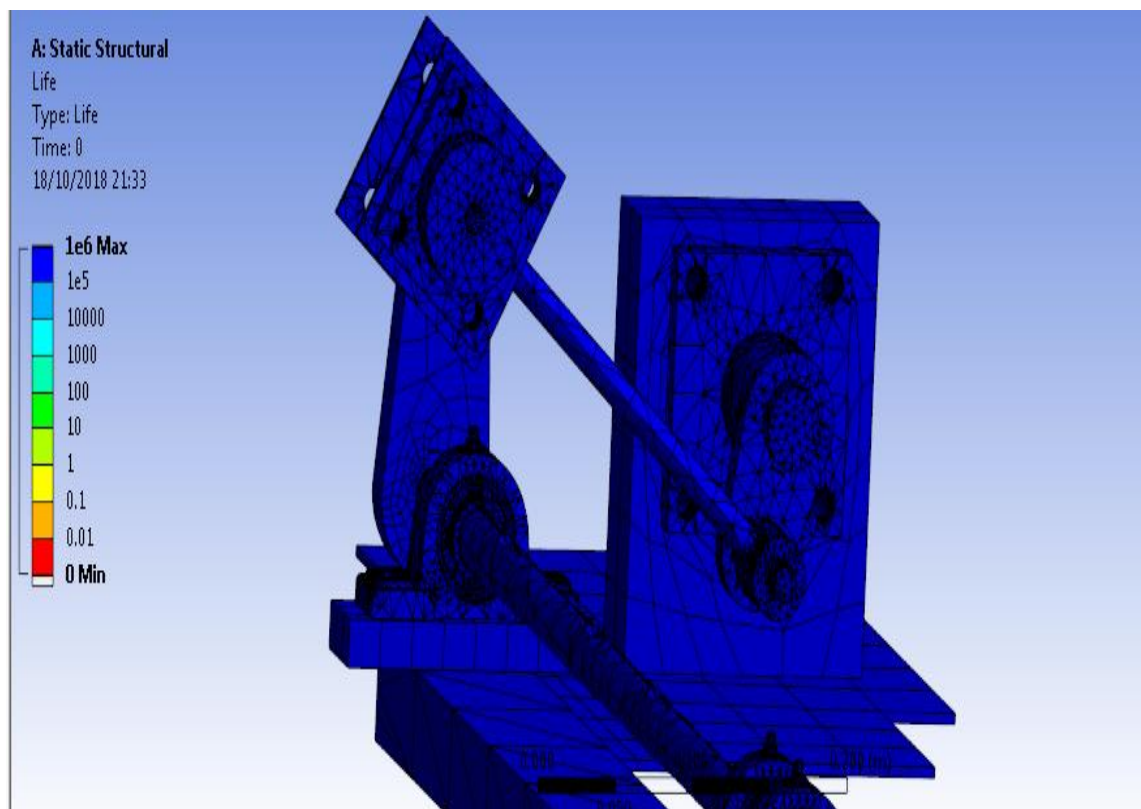
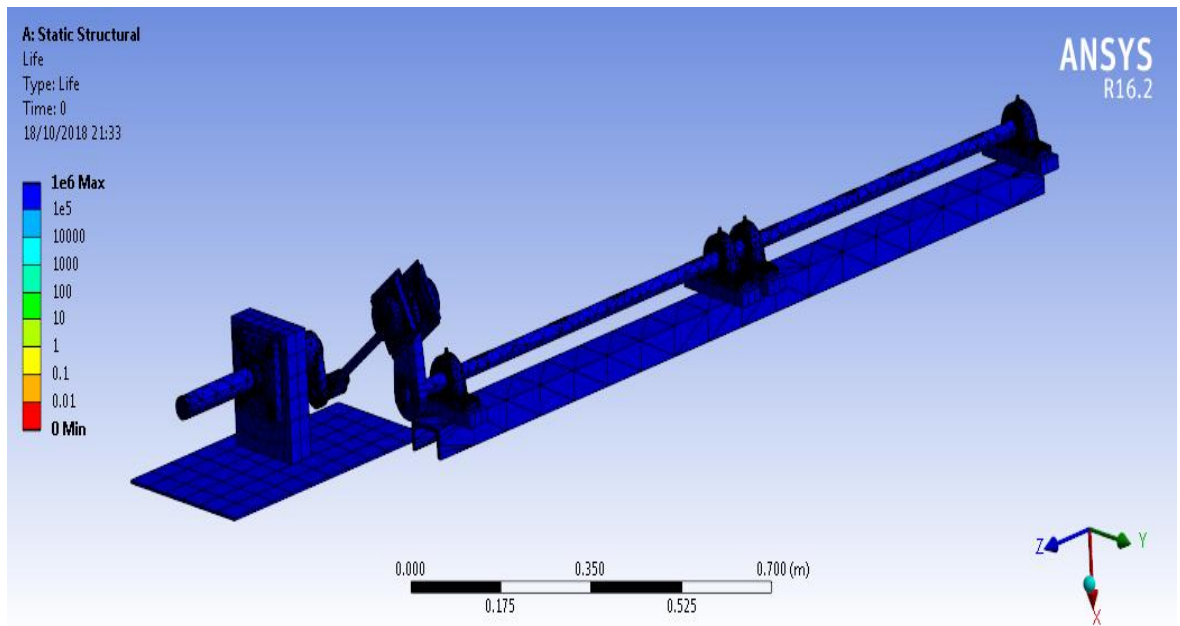
Figura 58. Configuración de la herramienta de fatiga (Fatigue Tool) del software Ansys.



The screenshot shows the Ansys Workbench interface. The tree view on the left shows the hierarchy of the model: Connections, Mesh, Static Structural (A5), Analysis Settings, Fixed Support, Fixed Support 2, Fixed Support 3, Fixed Support 4, Fixed Support 5, Force, Standard Earth Gravity, Solution (A6), Solution Information, Fatigue Tool, Life, and Safety Factor. The details panel on the right shows the configuration for the Fatigue Tool.

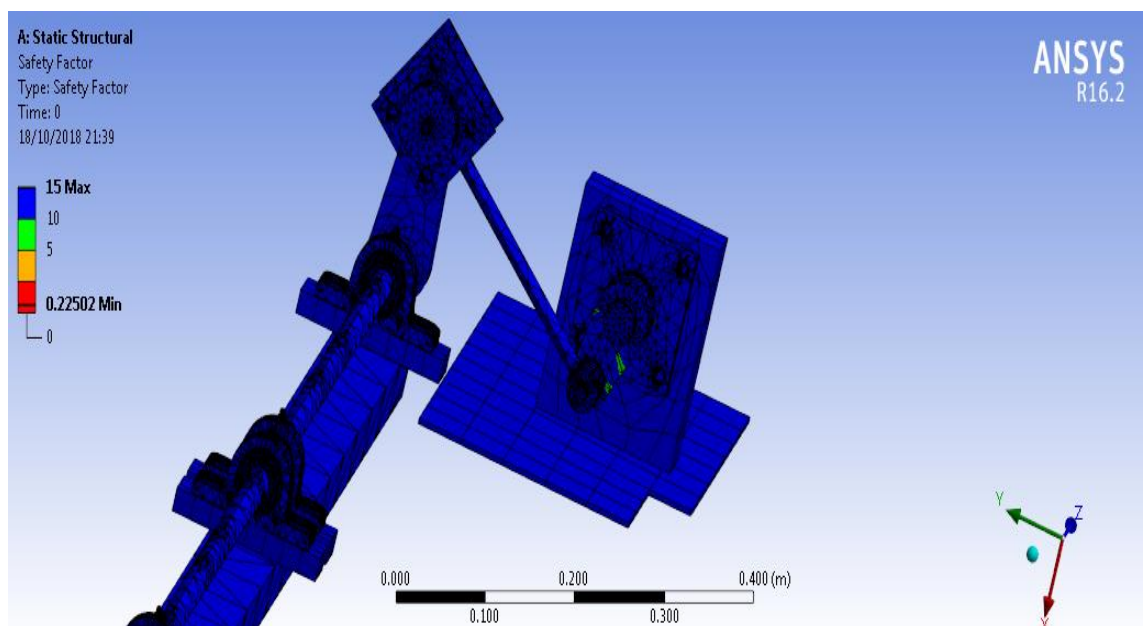
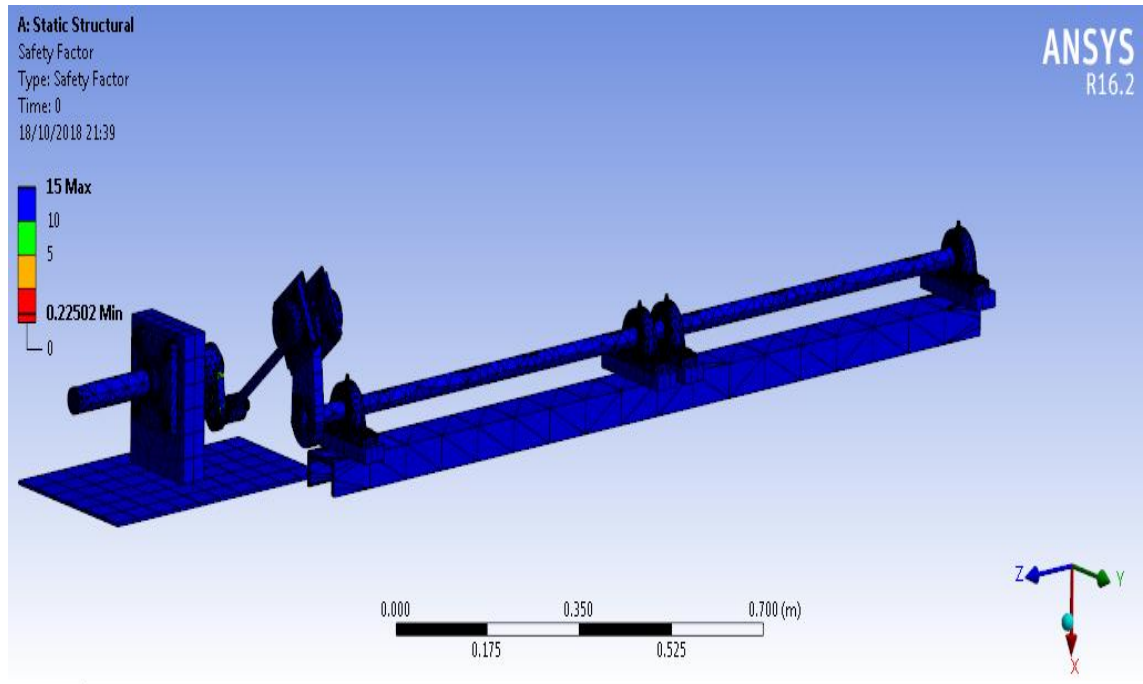
Details of "Fatigue Tool"	
Materials	
Fatigue Strength Factor (Kf)	1.
Loading	
Type	Ratio
Loading Ratio	2.9
☐ Scale Factor	1.
Definition	
☐ Display Time	End Time
Options	
Analysis Type	Stress Life
Mean Stress Theory	Goodman
Stress Component	Equivalent (Von Mises)

Figura 59. Resultado de la vida del mecanismo.



En el análisis se puede observar que los componentes del mecanismo están diseñados para vida infinita.

Figura 60. Resultados del factor de seguridad a fatiga del mecanismo del prototipo y sus componentes.



El resultado del factor de seguridad es óptimo para las cargas que debe soportar el mecanismo.

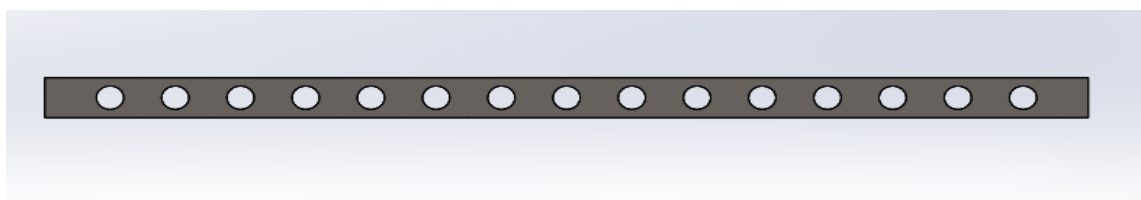
6.6.2 Diseño hidráulico. Está comprendido por la altura de los tabiques que permiten el paso del agua, los agujeros de distribución del agua a la entrada del tanque y la altura del vertedero.

6.6.3 Orificios circulares para la distribución del caudal de entrada al prototipo del floculador. En la tabla 52 se calcula el número de orificios necesarios para distribuir el caudal uniformemente en la primera cámara de floculación, debido a que el resultado es 14.42 orificios, se tomarán 15 de distribución.

Tabla 35. Número de orificios para la distribución del caudal a la entrada del prototipo del floculador.

CÁLCULO DE LOS ORIFICIOS CIRCULARES DE DISTRIBUCIÓN DE CAUDAL EN LA ENTRADA DEL FLOCULADOR			
$G = n \times (4 \times Q \times N / D^2)^{1.5} \times (8 / \mu)^{1/2} \times (D/4)^{-0.67}$			
Variables de entrada			
G	28.12	S ⁻¹	Gradiente inferior en la cámara 1
n	0.013	-----	Número de Manning
Q	0.0016	m ³ /s	Caudal del prototipo
D	0.0381	m	Diámetro de los orificios
γ	998.23	kgf/m ³	Peso específico del agua
μ	0.000103	kgf*s/m ²	Viscosidad dinámica del agua
Variables de salida			
N	14.42	-----	Número de orificios para distribuir el caudal

Figura 61. Platina con los orificios de distribución de caudal.



6.6.4 Tamaño de los orificios en la lámina de paso a la cámara 1 de floculación del prototipo.

Figura 62. Lámina de paso a la cámara de floculación 1.



Tabla 36. Tamaño de los orificios en la lámina de paso a la cámara 1 de floculación.

TAMAÑO DE LOS ORIFICIOS DE LA LÁMINA DE PASO A LA CÁMARA DE FLOCULACIÓN 1			
$G = n \times (\delta/\mu)^{1/2} \times (a \times h / 2h + 2a)^{-0.67} \times (Q/a \times h)^{1.5}$			
Variables de entrada			
G	28.12	S ⁻¹	Gradiente inferior en la cámara 1
n	0.013	-----	Número de Manning
Q	0.0016	m ³ /s	Caudal del prototipo
a	1.448	m	Ancho del tanque
δ	998.23	kgf/m ³	Peso específico del agua
μ	0.000103	kgf*s/m ²	Viscosidad dinámica del agua
Variables de salida			
h	0.015	m	Altura de los orificios de la lámina de paso a la cámara 1 de floculación

7. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES

En el este capítulo se encontraran seleccionados los componentes mecánicos que hacen parte del floculador real como del prototipo y que se consiguen estandarizados en el mercado según sean los parámetros de operación a los que sean sometidos.

7.1 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL FLOCULADOR REAL. Entre los componentes a seleccionar se encuentran las chumaceras que dan soporte a los ejes, los motor -reductores, los variadores de frecuencia para cada motor de la caja reductora.

7.1.1 Chumaceras para los ejes de 3".

Figura 63. DCL de los ejes con las chumaceras, plano X-Y.

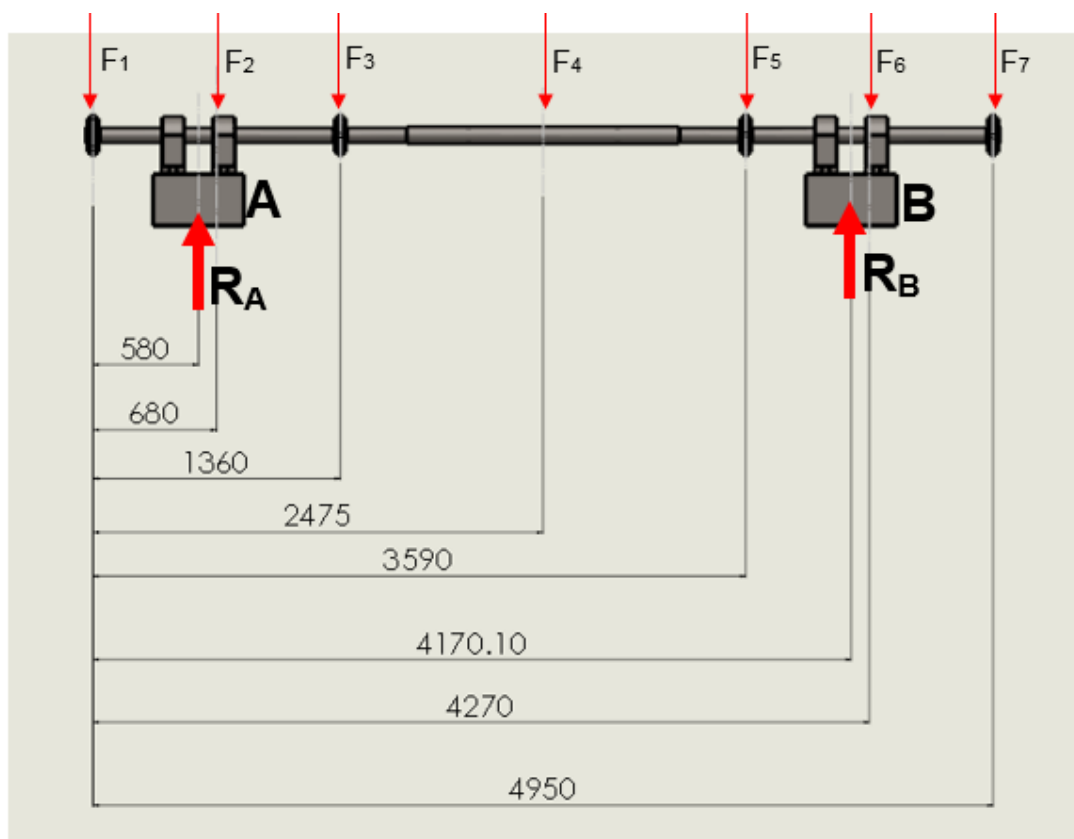


Figura 64. Vista del alerón desde el plano Z-Y.

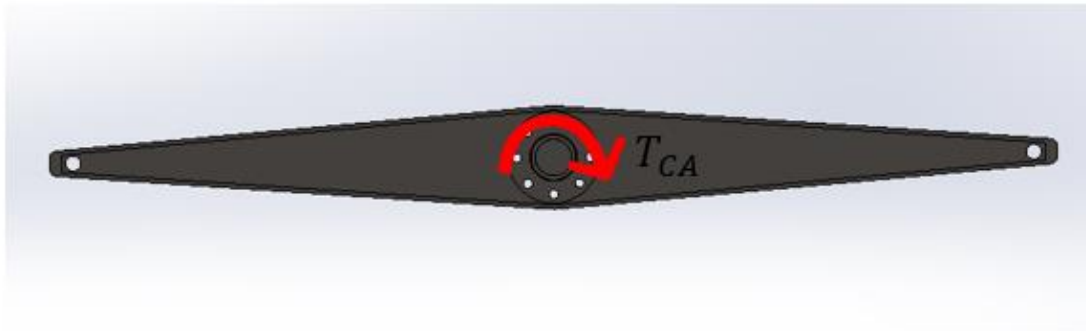


Tabla 37 .Cálculo de las fuerzas que soportan las chumaceras

CÁLCULO DE LA FUERZA QUE SOPORTA CADA UNA DE LAS CHUMACERAS			
$\sum M_A = 0$ $(0.58 * F_1 - 0.18 * F_2 - 0.68 * F_3 - 1.115 * F_4 - 1.115 * F_5 - 3.69 * F_6 - 4.37 * F_7) + 3.59 * R_B - T_{CA} = 0$ $+\uparrow \sum F_Y = 0$ $R_A + R_B - F_1 - F_2 - F_3 - F_4 - F_5 - F_6 - F_7 = 0$ $T_{CA} = \frac{T_{\text{torque transmitido al balancín}}}{8 * 9.81}$			
Variables de entrada			
F_1	35.37	Kgf	Peso del alerón
F_2	48.23	Kgf	Peso del eje de unión entre los alerones
F_3	35.37	Kgf	Peso del alerón
F_4	67.09	Kgf	Peso del tubo y los 2 ejes encamisados
F_5	35.37	Kgf	Peso del alerón
F_6	48.23	Kgf	Peso del eje de unión entre los alerones
F_7	35.37	Kgf	Peso del alerón
$T_{\text{torque transmitido al balancín}}$	4949.88	N-m	Torque máximo transmitido al balancín en la posición crítica
Variables de salida			
R_A	53.45	Kgf	Fuerza que soporta cada chumacera del soporte A
R_B	99.05	Kgf	Fuerza que soporta cada chumacera del soporte B
T_{CA}	63.07	Kgf-m	Torque en cada uno de los 8 alerones

Tabla 38. Cálculo de la capacidad de carga que debe soportar la chumacera seleccionada.

CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE CARGA QUE DEBE SOPORTAR LA CHUMACERA SELECCIONADA			
$P = V * R * 2.2$ $C = P * \frac{F_h}{F_n}$ $L_{10} = 500 * F_h^\rho$ $F_n = \left(\frac{33.3}{n}\right)^\rho$			
Variables de entrada			
V	99.05	Kgf	Reacción en el soporte A
R	1.00	-----	Factor de rotación de pista interna
ρ	3.00	-----	Exponente de vida para rodamientos de bolas
L_{10}	50000	Hr	Vida útil expresada en horas de funcionamiento, para maquinaria que funciona 24 horas continuas
n	9.80	rpm	Velocidad de rotación inferior de la cámara 1 (crítica)
Variables de salida			
P	217.91	Lbf	Carga dinámica equivalente
C	674.07	Lbf	Capacidad de carga dinámica
F_h	4.64	-----	Factor de vida
F_n	1.50	-----	Factor de velocidad

Figura 65. Selección de chumaceras del catálogo del fabricante SKF.

Dimensiones					Capacidad de carga básica	Basic load ratings	Capacidad de carga básica	Designaciones		
d	A	H	H ₁	L	C	C ₀		Unidad de rodamientos	Soporte	Rodamiento
in					lbf	lbf	r/min			
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
2.9375	3.0709	6.9095	3.5	12.0079	16366	11915	2400	SY 2.15/16 DUTF	SY 516 U	YAR 216-215-2F
2.9375	2.8346	6.5354	3.252	10.9843	14905	11016	2600	SY 2.15/16 UTF	SY 515 U	YAR 215-215-2F
2.9528	2.9134	6.5158	3.248	10.8268	14905	11016	2600	SYJ 75 TF	SYJ 515	YAR 215-2F
3	3.0709	6.9095	3.5	12.0079	16366	11915	2400	SY 3. UTF	SY 516 U	YAR 216-300-2F

Fuente: <http://www.skf.com/co/products/bearings-units-housings/bearing-units/ball-bearing-units/y-bearing-plummer-block-units/Y-bearing-plummer-block-units/index.html>

Figura 66. Especificaciones de la chumacera seleccionada.

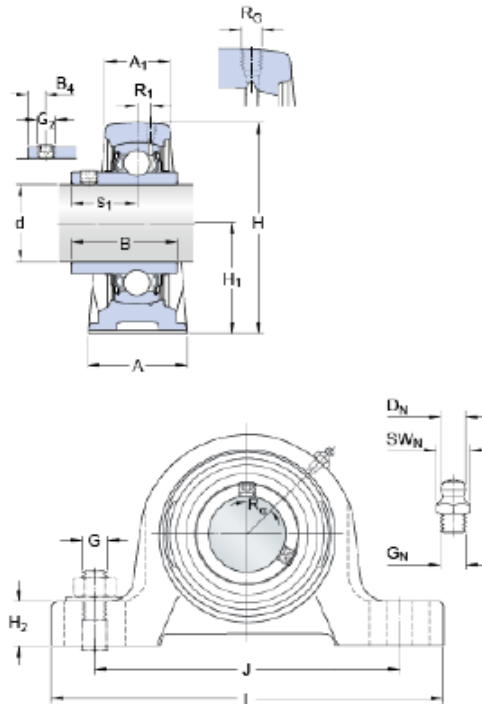
SKF

SY 3. UTF

Material

Cast iron

Dimensiones



d	3	in
A	3.0709	in
A ₁	1.8898	in
B	3.063	in
H	6.9095	in
H ₁	3.5	in
H ₂	1.8701	in
J	8.9961	in
J	max. 9.4882	in
J	min. 8.5039	in
L	12.0079	in
N	1.4961	in
N ₁	1.0039	in
s ₁	1.874	in

Dimensions

B ₄	0.4724	in
----------------	--------	----

Datos del cálculo

Capacidad de carga dinámica básica

C 16366 lbf

Capacidad de carga estática básica

C₀ 11915 lbf

Carga límite de fatiga

P_u 486 lbf

Velocidad límite

2400 r/min

(with shaft tolerance h6)

Fuente: <http://www.skf.com/mx/products/bearings-units-housings/bearing-units/ball-bearing-units/y-bearing-plummer-block-units/Y-bearing-plummer-block-units/index.html?designation=SY%203.%20UTF&unit=imperialUnit>

Se realiza la selección de esta chumacera debido a que la capacidad de carga dinámica que soporta (16366 lbf) es mucho mayor a la solicitada (674.07 lbf).

7.1.2 Chumaceras para las bielas del mecanismo.

Figura 67. DCL de la biela con el pasador.

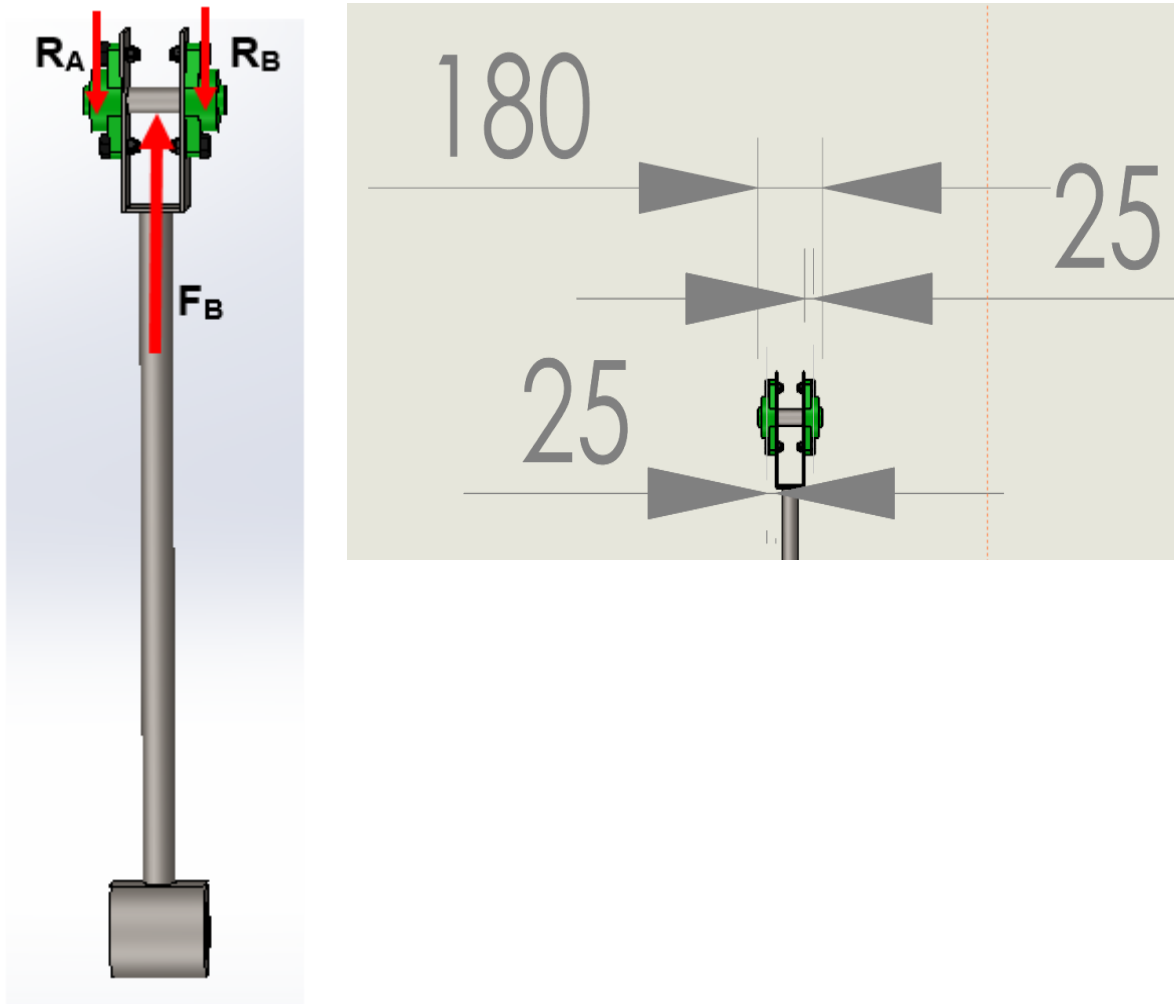


Tabla 40. Cálculo de la fuerza que soporta cada una de las chumaceras que soportan el pasador de la biela.

CÁLCULO DE LA FUERZA QUE SOPORTA CADA UNA DE LAS CHUMACERAS			
$P * 745.7 = T * \omega_{PosiciónCrítica}$		$T = F_B * L$	
$\uparrow \sum M_A = 0$		$+\uparrow \sum F_Y = 0$	
$(0.065 * F_B) - 0.13 * R_B = 0$		$-R_A - R_B + F_B = 0$	
Variables de entrada			
$\omega_{PosiciónCrítica}$	0.18	rad/s	Velocidad angular de la biela en la posición crítica
L	1.06	m	Longitud de la biela
P	4.00	HP	Potencia consumida por la cámara de floculación crítica
Variables de salida			
R _A	7817.00	N	Fuerza que soporta cada chumacera del soporte A
R _B	7817.00	N	Fuerza que soporta cada chumacera del soporte B
F _B	15633	N	Fuerza que transmite la biela a las chumaceras en la posición crítica

Tabla 39. Cálculo de la capacidad de carga que debe soportar la chumacera seleccionada.

CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE CARGA QUE DEBE SOPORTAR LA CHUMACERA			
$P = V * R * 2.2$ $C = P * \frac{F_h}{F_n}$ $L_{10} = 500 * F_h^\rho$ $F_n = \left(\frac{33.3}{n}\right)^\rho$			
Variables de entrada			
V	781.70	Kgf	Reacción en el soporte A
R	1.00	-----	Factor de rotación de pista interna
ρ	3.00	-----	Exponente de vida para rodamientos de bolas
L_{10}	50000	Hr	Vida útil expresada en horas de funcionamiento, para maquinaria que funciona 24 horas continuas
n	9.80	rpm	Velocidad de rotación inferior de la cámara 1 (crítica)
Variables de salida			
P	1719.74	Lbf	Carga dinámica equivalente
C	5319.73	Lbf	Capacidad de carga dinámica
F_h	4.64	-----	Factor de vida
F_n	1.5	-----	Factor de velocidad

Figura 68. Selección de chumaceras del catálogo del fabricante SKF.

Filter criteria
Diámetro del agujero = 1.25

► Producto popular

Dimensiones principales				Capacidad de carga básica		Velocidad límite	Designaciones		
	Altura del soporte	Longitud del soporte	Ancho de la unidad	dinámica	estática		Unidad de rodamientos	Soporte	Rodamiento
d	H	L	T	C	C ₀				
in				lbf		r/min			
									2LPW/SS
1.25	5.563	3.126	1.7008	4384	2518	6300	F2B 104S-TF-AH	F2B 506-AH	YAR 206-104-2F
1.25	5.748	3.2283	1.6102	4384	2518	3800	F2BC 104S-TPZM	F2BC 506	YAR 206-104-2LPW/ZM
1.25	6.126	3.626	1.811	4856	3440	3200	F2BSS 104-YTPSS	F2BSS 507-Y	YAR 207-104-2LPW/SS
1.25	6.1417	3.7795	1.8268	5733	3440	5300	FYTB 1.1/4 TF	FYTB 507 M	YAR 207-104-2F
1.25	5.563	3.126	1.6535	3664	2518	3800	FYTWR 1.1/4 AYTHR	FYTWR 506 Y	YAR 206-104-2RFGR/HV

Fuente: <https://www.skf.com/co/products/bearings-units-housings/bearing-units/ball-bearing-units/y-bearing-flanged-units/y-brg-oval-flanged-units/index.html>

Figura 69. Especificaciones de la chumacera seleccionada.

SKF

FYTB 1.1/4 TF

Compliance with standard

ISO

Material del soporte

Fundición

Sealing solution

Standard seals with
additional fingers

Dimensiones

The image contains three technical drawings of the FYTB 1.1/4 TF bearing unit. The top left drawing is a front view showing dimensions: A, A₁, A₃ H14, B₄, G₂, D_{b1}, d, s₁, B, d₁ H11, D_{b2}, G, and T. The top right drawing is a side view showing dimensions: R₁, R₂, and A₅. The bottom left drawing is a detail view of a seal showing dimensions: D_N, SW_N, and G_N. The bottom right drawing is a cross-sectional view of the bearing showing dimensions: N, N₄, J, H, and J₀.

d	1.25	in
d ₁	≈ 1.815	in
D _a	3.5	in
D _{b1}	3.4646	in
D _{b2}	3.7795	in
A	1.3583	in
A ₁	0.5118	in
A ₃	0.126	in
A ₅	0.9646	in
B	1.689	in
B ₄	0.2362	in
J	5.1181	in
H	6.1417	in

cálculo

de carga dinámica básica

C 5733 lbf

de carga estática básica

C₀ 3440 lbf

de fatiga

P_u 147 lbf

límite

5300 r/min

ncia de eje h6)

Fuente: <https://www.skf.com/co/products/bearings-units-housings/bearing-units/ball-bearing-units/y-bearing-flanged-units/y-brg-oval-flanged-units/index.html?designation=FYTWR%201.1/4%20AYTHR&unit=imperialUnit>

Se realiza la selección de esta chumacera debido a que la capacidad de carga dinámica que soporta (5733 lbf) es mucho mayor a la solicitada (5319.73 lbf).

7.1.3 Motorreductores de cada cámara.

La selección de los motorreductores de cada cámara es independiente de la crítica debido a que los compartimientos son independientes, sin embargo los parámetros de selección son la potencia consumida por cada cámara y las menores rpm que en cada una se necesiten, tal como se muestra en la Tabla 63.

Tabla 41. Cálculo de los torques requeridos por cada uno de los motorreductores.

CÁLCULO DE LOS TORQUES REQUERIDOS POR CADA UNO DE LOS MOTORREDUCTORES			
$P * 745.7 = T * \omega_{\text{mínima de cada cámara}}$			
Variables de entrada			
P_1	2982.80	W	Potencia consumida por la cámara 1
P_2	1342.26	W	Potencia consumida por la cámara 2
P_3	745.70	W	Potencia consumida por la cámara 3
ω_1	1.03	rad/s	Velocidad angular mínima de la cámara 1
ω_2	0.73	rad/s	Velocidad angular mínima de la cámara 2
ω_3	0.36	rad/s	Velocidad angular mínima de la cámara 3
Variables de salida			
T_1	2906.49	N.m	Torque requerido por el motorreductor de la cámara 1
T_2	1831.09	N.m	Torque requerido por el motorreductor de la cámara 2
T_3	2094.39	N.m	Torque requerido por el motorreductor de la cámara 3

Figura 70. Motorreductor de la cámara 1.

TÑO RED	n_2	M_2	η	$i_{\text{trans.}}$	F_s	Codigo	
	[1/min]	[Nm]	[-]	[-]	[-]	Equipo	
	Kw / Hp 4.92 / 6.6 - Frame - Polos 112 - 4						
SG07	28.87	1318.49	81	60.28	2.9	2307	G0H A18
	26.35	1444.26	81	66.03	2.6	2307	G0I A18
	24.11	1578.56	81	72.17	2.4	2307	G0J A18
	21.96	1732.76	81	79.22	2.2	2307	G0K A18
	19.94	1601.93	68	87.24	2.4	2307	K0E A18
	16.96	1884.34	68	102.62	2.0	2307	K0F A18
	15.85	2016.37	68	109.81	1.9	2307	K0G A18
	14.43	2213.58	68	120.55	1.7	2307	K0H A18
	13.18	2424.93	68	132.06	1.6	2307	K0I A18
	12.05	2650.42	68	144.34	1.4	2307	K0J A18
	10.98	2909.33	68	158.44	1.3	2307	K0K A18
	9.95	3209.74	68	174.80	1.2	2307	K0L A18
	8.49	3762.63	68	204.91	1.0	2307	K0M A18

Fuente: http://www.ramfe.com.co/productos_muestra.php?item=193

Figura 71. Motorreductor de la cámara 2.

TÑO RED	n_2	M_2	η	$i_{trans.}$	F_s	Codigo	
	[1/min]	[Nm]	[-]	[-]	[-]	Equipo	
Kw / Hp 2.2 / 3 - Frame - Polos 90 - 4							
SG06	17.96	783.78	67	95.10	2.9	2306	K0GA15
	16.31	862.82	67	104.69	2.7	2306	K0HA15
	14.76	953.56	67	115.70	2.4	2306	K0I A15
	14.11	937.93	63	121.03	2.5	2306	M0GA15
	12.82	1032.56	63	133.24	2.2	2306	M0HA15
	11.60	1141.20	63	147.26	2.0	2306	M0I A15
	10.45	1267.21	63	163.52	1.8	2306	M0J A15
	8.83	1499.16	63	193.45	1.5	2306	M0KA15
	7.71	1717.08	63	221.57	1.3	2306	M0LA15
	7.29	1814.80	63	234.18	1.3	2306	M0MA15
	6.81	1913.36	62	250.88	1.2	2306	M0NA15
	6.15	2082.77	61	277.57	1.1	2306	M0OA15
	5.52	2244.98	59	309.33	1.0	2306	M0P A15
	4.99	2355.88	56	342.00	1.0	2306	N0OA15

Fuente: http://www.ramfe.com.co/productos_muestra.php?item=193

Figura 72. Motorreductor de la cámara 3.

TÑO RED		n_2 [1/min]	M_2 [Nm]	η [-]	$i_{trans.}$ [-]	F_s [-]	Codigo Equipo	
		Kw / Hp 1.5 / 2 - Frame - Polos 90 - 4						
06 SG07		3.97	1877.72	52	428.53	1.2	2306	N0Q A13
		7.22	1250.72	63	235.60	3.0	2307	M0L A13
		6.16	1466.15	63	276.18	2.6	2307	M0M A13
		5.39	1647.73	62	315.39	2.3	2307	M0N A13
		5.11	1737.38	62	332.55	2.2	2307	M0O A13
		4.79	1822.90	61	354.64	2.1	2307	M0P A13
		4.35	1943.26	59	390.87	2.0	2307	M0Q A13
		3.92	2084.54	57	434.00	1.8	2307	M0R A13
		3.50	2253.37	55	486.21	1.7	2307	M0S A13
		3.42	2303.38	55	497.00	1.6	2307	N0R A13
	3.05	2486.64	53	556.79	1.5	2307	N0S A13	

Fuente: http://www.ramfe.com.co/productos_muestra.php?item=193

7.2 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO DEL FLOCULADOR. Entre los componentes a seleccionar se encuentran las chumaceras que dan soporte a los ejes, los motor -reductores, los variadores de frecuencia para cada motor de la caja reductora y la bomba hidráulica.

7.2.1 Chumaceras para los ejes de 1".

Figura 73. DCL de los ejes con las chumaceras, plano X-Y

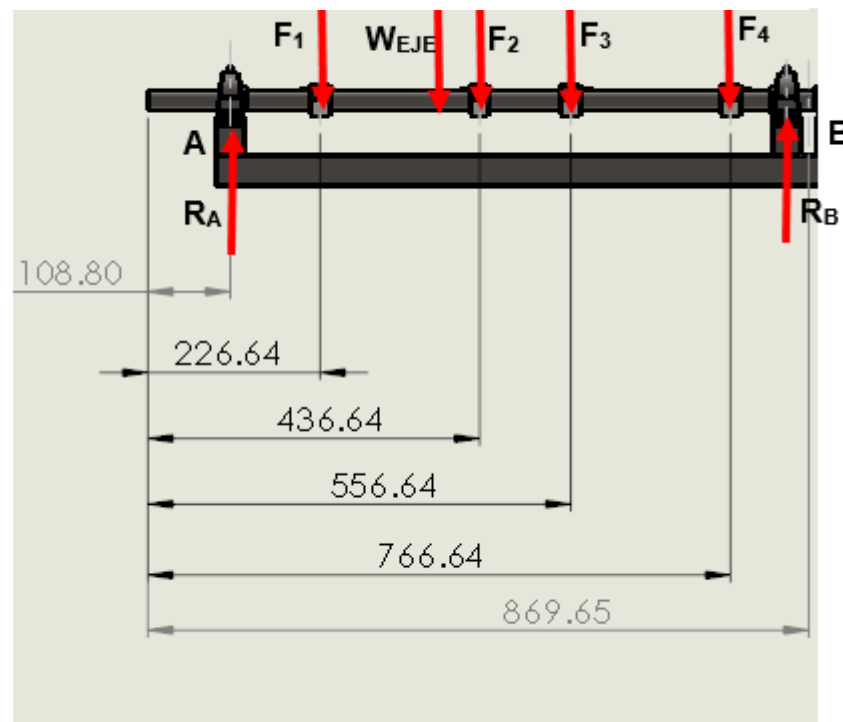


Figura 74. DCL de los ejes con las chumaceras, plano X-Z

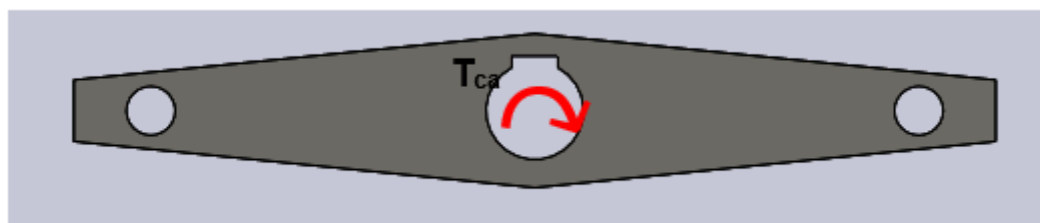


Tabla 42. Cálculo de la fuerza que soporta cada una de las 4 chumaceras que soportan el eje.

CÁLCULO DE LA FUERZA QUE SOPORTA CADA UNA DE LAS CHUMACERAS			
$\sum M_A = 0$ $(0.11784 * F_1 - 0.435 * W_{EJE} - 0.328 * F_2 - 0.45 * F_3 - 0.66 * F_4) + 0.74 * R_B - T_{CA} = 0$ $+\uparrow \sum F_Y = 0$ $R_A + R_B - F_1 - F_2 - F_3 - F_4 = 0$ $T_{CA} = \frac{T_{\text{torque transmitido al balancin}}}{8 * 9.81}$			
Variables de entrada			
F_1	1.184	Kgf	Peso del alerón
F_2	1.184	Kgf	Peso del alerón
F_3	1.184	Kgf	Peso del alerón
F_4	1.184		Peso del alerón
W_{eje}	6.431	Kgf	Peso del eje
$T_{\text{torque transmitido al balacin}}$	46.050	N-m	Torque máximo transmitido al balancin en la posición crítica
Variables de salida			
R_A	3.35	Kgf	Fuerza que soporta cada chumacera del soporte A
R_B	-0.98	Kgf	Fuerza que soporta cada chumacera del soporte B
T_{CA}	0.59	Kgf-m	Torque en cada uno de los 8 alerones

Tabla 43. Cálculo de la capacidad de carga que debe soportar la chumacera seleccionada.

CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE CARGA QUE DEBE SOPORTAR LA CHUMACERA SELECCIONADA			
$P = V * R * 2.2 \quad C = P * \frac{F_h}{F_n} \quad L_{10} = 500 * F_h^\rho \quad F_n = \left(\frac{33.3}{n}\right)^\rho$			
Variables de entrada			
V	3.35	Kgf	Reacción en el soporte A
R	1.00	-----	Factor de rotación de pista interna
ρ	3.00	-----	Exponente de vida para rodamientos de bolas
L_{10}	15000	Hr	Vida útil expresada en horas de funcionamiento, para maquinaria de 8 horas de trabajo diario no siempre utilizadas al máximo
n	10.75	rpm	Velocidad de rotación inferior de la cámara 3 (crítica)
Variables de salida			
P	7.37	Lbf	Carga dinámica equivalente
C	15.70	Lbf	Capacidad de carga dinámica
F_h	3.11	-----	Factor de vida
F_n	1.46	-----	Factor de velocidad

Figura 75. Selección de chumaceras del catálogo del fabricante SKF.

Dimension filters

Diámetro del agujero:

≤ d ≤

Exacto :
d = 1

Distancia entre los tornillos de fijación:

≤ J ≤

Exacto :
J =

Filter criteria
Diámetro del agujero = 1

▶ Producto popular

Fuente: <https://www.skf.com/mx/products/bearings-units-housings/bearing-units/ball-bearing-units/y-bearing-plummer-block-units/Y-bearing-plummer-block-units/index.html>

Figura 76. Especificaciones de la chumacera seleccionada.

SKF

P2BC 100-TPSS

Compliance with standard

Not standardized

Material

Composite for the SKF
Food Line

Sealing solution

Gutter seals

Dimensiones

Dimensions

d	1	in
A	1.4173	in
A ₁	1.4173	in
A ₅	2.4646	in
B	1.3425	in
H	2.8543	in
H ₁	1.437	in
H ₂	0.6693	in
J	4.1339	in
N ₁	max. 4.252	in
J	min. 4.0157	in
L	5.5906	in

d ₁	≈	1.3283	in
D _a		2.4409	in
H _a		0.2362	in
B ₄		0.1968	in

Datos del cálculo

Capacidad de carga dinámica básica

C 2675 lbf

Capacidad de carga estática básica

C₀ 1754 lbf

Carga límite de fatiga

P_u 75 lbf

Velocidad límite

4300 r/min

with shaft tolerance h6

Fuente:<https://www.skf.com/mx/products/bearings-units-housings/bearing-units/ball-bearing-units/y-bearing-plummer-block-units/Y-bearing-plummer-block-units/index.html?designation=P2BC%20100-TPSS&unit=imperialUnit>

Se realiza la selección de esta chumacera debido a que la capacidad de carga dinámica que soporta (2675 lbf) es mucho mayor a la solicitada (15.7 lbf).

7.2.2 Chumaceras para las bielas del mecanismo.

Figura 77. DCL de la biela con el pasador.

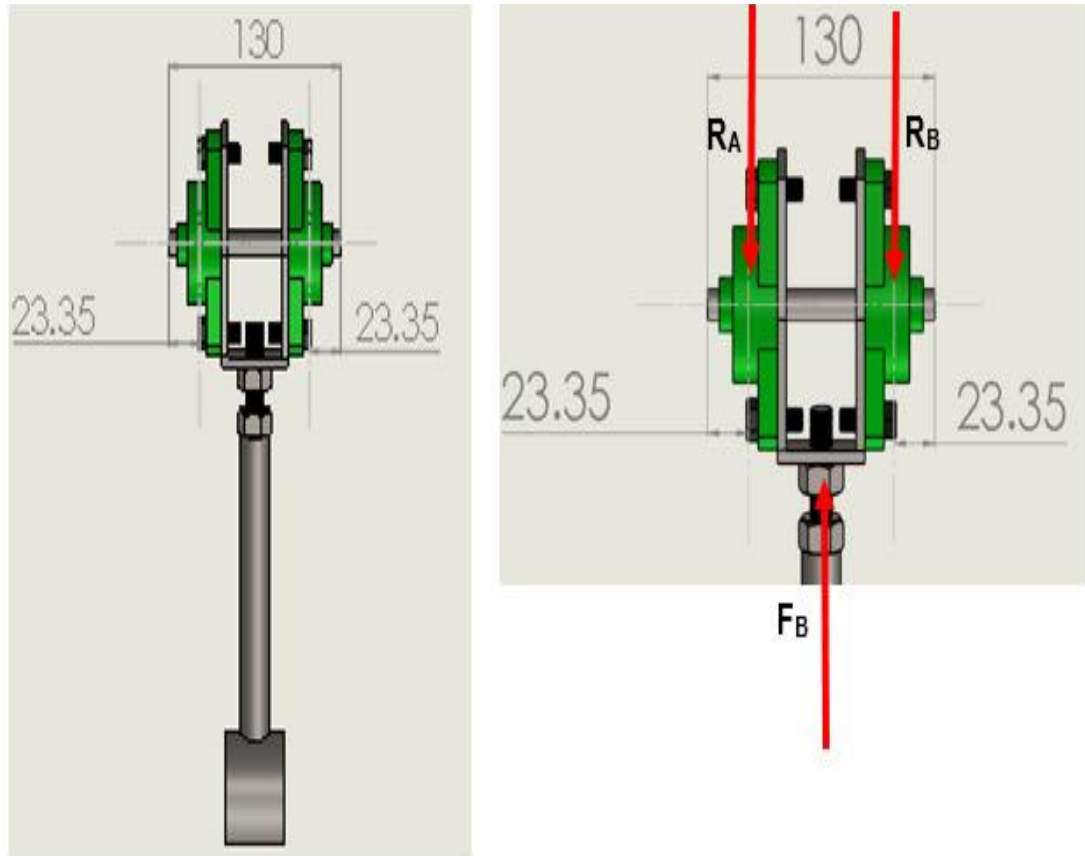


Tabla 45. Cálculo de la fuerza que soporta cada una de las chumaceras que sostienen el pasador de biela.

CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE CARGA QUE DEBE SOPORTAR LA			
$P = V * R * 2.2$ $C = P * \frac{F_h}{F_n}$ $L_{10} = 500 * F_h^\rho$ $F_n = \left(\frac{33.3}{n}\right)^\rho$			
Variables de entrada			
V	241.79	Kgf	Reacción en el soporte A
R	1.00	-----	Factor de rotación de pista interna
ρ	3.00	-----	Exponente de vida para rodamientos de bolas
L_{10}	15000	Hr	Vida útil expresada en horas de funcionamiento, para maquinaria de 8 horas de trabajo diario no siempre utilizadas al máximo
n	10.75	rpm	Velocidad de rotación inferior de la cámara 3 (crítica)
Variables de salida			
P	531.90	Lbf	Carga dinámica equivalente
C	1134.00	Lbf	Capacidad de carga dinámica
F_h	3.11	-----	Factor de vida
F_n	1.46	-----	Factor de velocidad

Tabla 44. Cálculo de la capacidad de carga que debe soportar la chumacera seleccionada.

CÁLCULO DE LA FUERZA QUE SOPORTA CADA UNA DE LAS CHUMACERAS			
$P * 745.7 = T * \omega_{PosiciónCrítica}$ $\sum M_A = 0$ $(0.04165 * F_B) - 0.0833 * R_B = 0$ $T = F_B * L$ $+\uparrow \sum F_Y = 0$ $-R_A - R_B + F_B = 0$			
Variables de entrada			
$\omega_{PosiciónCrítica}$	0.19	rad/s	Velocidad angular de la biela en la posición crítica
L	0.273	m	Longitud de la biela
P	0.33	HP	Potencia consumida por la cámara de floculación crítica
Variables de salida			
R_A	2372.00	N	Fuerza que soporta cada chumacera del soporte A
R_B	2372.00	N	Fuerza que soporta cada chumacera del soporte B
F_B	4744	N	Fuerza que transmite la biela a las chumaceras en la posición crítica
T	1295.00	N-M	Torque transmitido a la biela en la posición crítica

Figura 78. Selección de chumaceras del catálogo del fabricante SKF.

Dimensiones principales	Dimensions principales	Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Velocidad límite	Designaciones		
		Altura del soporte	Longitud del soporte	Ancho de la unidad	dinámica	estática		Unidad de rodamientos	Soporte	Rodamiento
d	J	H	L	T	C	C ₀				
in	in	in			lbf		r/min			
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
0.4724	3.0118	3.878	2.2441	1.2953	2149	1068	9500	FYTB 12 TF	FYTB 503 M	YAR 203/12-2F
0.4724	2.4803	3.189	2.3228	0.7047	2149	1068	9500	PFT 12 TF	PFT 40	YAR 203/12-2F
0.5	3	3.874	2.374	1.5394	2149	1068	9500	► F2B 008-FM	F2B 503	YET 203-008

Fuente: <https://www.skf.com/mx/products/bearings-units-housings/bearing-units/ball-bearing-units/y-bearing-flanged-units/y-brg-oval-flanged-units/index.html>

Figura 79. Especificaciones de la chumacera seleccionada.



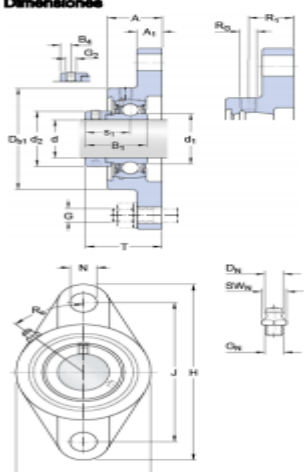
► F2B 008-FM
Producto popular

Compliance with standard: North American standard

Material del soporte: Cast iron

Sealing solution: Standard seals

Dimensiones



d	0.5	in
d ₁	0.9528	in
d ₂	1.0709	in
D _{b1}	2.374	in
A	0.9449	in
A ₁	0.437	in
B ₁	1.126	in
B ₄	0.187	in
J	3	in
H	3.874	in
L	2.374	in
N	0.4374	in
s ₁	0.8701	in
T	1.5394	in

Orificio roscado

R _G	1/4-28 UNF	
R ₁	0.7087	in
R _α	45	°

Datos del cálculo

Capacidad de carga dinámica básica	C	2149	lbf
Capacidad de carga estática básica	C ₀	1068	lbf
Carga límite de fatiga	P _u	45	lbf
Velocidad límite		9500	r/min
(with shaft tolerance h6)			

Fuente: <https://www.skf.com/mx/products/bearings-units-housings/bearing-units/ball-bearing-units/y-bearing-flanged-units/y-brg-oval-flanged-units/index.html?designation=F2B%20008-FM&unit=imperialUnit>

Se realiza la selección de esta chumacera debido a que la capacidad dinámica que soporta es de (2149 lbf) es mucho mayor a la solicitada (1134 lbf).

7.2.3 Motorreductores de cada cámara. La selección de los motorreductores de cada cámara se hizo para las rpm mínimas de las mismas con una potencia base de 0.33 HP.

Tabla 46. Cálculo de la capacidad de carga que debe soportar la chumacera seleccionada.

CÁLCULO DE LOS TORQUES REQUERIDOS POR CADA UNO DE LOS			
$P * 745.7 = T * \omega_{\text{mínima de cada cámara}}$			
Variables de entrada			
P ₁	0.33	HP	Potencia consumida por la cámara 1
P ₂	0.33	HP	Potencia consumida por la cámara 2
P ₃	0.33	HP	Potencia consumida por la cámara 3
ω ₁	3.25	rad/s	Velocidad angular mínima de la cámara 1
ω ₂	2.31	rad/s	Velocidad angular mínima de la cámara 2
ω ₃	1.11	rad/s	Velocidad angular mínima de la cámara 3
Variables de salida			
T ₁	75.74	N.m	Torque requerido por el motorreductor de la cámara 1
T ₂	106.48	N.m	Torque requerido por el motorreductor de la cámara 2
T ₃	221.50	N.m	Torque requerido por el motorreductor de la cámara 3

Figura 80. Selección de los motorreductores del prototipo para cada una de las 3 cámaras

FECHA: 11/09/2018

ATN: SERGIO DANIEL OBANDO
 EMPRESA: ACUEDUCTO METRO. B/NGA
 TELÉFONO: _____
 E-MAIL: _____
 CIUDAD: B/NGA



INDUSTRIAS RAMFE S.A.S.
 860.069.344 - 6
 Carrera 69 N° 17A-96 Bogotá Colombia
 PBX: (57-1) 745 0808 Fax: (57-1) 292 6129
www.ramfe.com.co ventas@ramfe.com.co

Ítem	Referencia	Descripción	Eje de salida	Motor		Rel.	Vel. de salida N2 (rpm)	Par de salida M2 (Nm)
				Pot. HP (KW)	Vel. rpm			
3	SG02-242-54-4071-V1	MOTORREDUCTOR HELICOIDALSINFIN CORONA	HUECO 30mm ANCLAJE BRIDA	0.5	1680	54	31	85
2	SG02-242-73-4074-V1	MOTORREDUCTOR HELICOIDALSINFIN CORONA	HUECO 30mm ANCLAJE BRIDA	0.75	1860	73	23	139
1	SG03-242-158-4074-V1	MOTORREDUCTOR HELICOIDALSINFIN CORONA	HUECO 30mm ANCLAJE BRIDA	0.75	1680	158	10.5	325

Representante de ventas:

Carlos Leguizamón
carlos.leguizamon@ramfe.com.co Cel: 310 - 2319488

Siendo el de la cámara 1 el ítem 3, el de la 2 el ítem 2 y el ítem 1 para la cámara 3.

En el Anexo F. se encuentran consignados la selección de las chumaceras para los tubos bajantes al agua del floculador real, así como los variadores de frecuencia del mismo. También está la selección de las chumaceras para los bajantes al agua del prototipo, los variadores de frecuencia para cada motor y la selección de la moto bomba hidráulica.

7.3 PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Tabla 47. Presupuesto de construcción del prototipo.

PRESUPUESTO DEL PROTOTIPO			
COMPONENTE	CANTIDAD	COSTO POR UNIDAD	COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN
Alerones	24	100000	2400000
Bajantes al agua	48	70000	3360000
Cuñas para los alerones	24	12000	288000
Chumaceras para los bajantes	96	23000	2208000
Pasadores de los bajantes al agua	48	15000	720000
Eje de 1"	3	150000	450000
Chumaceras para soportar los ejes de 1"	12	35000	420000
Tanque del prototipo	1	1600000	1600000
Variadores de frecuencia CFW100 WEG	3	426000	1278000
Tablero electrico	1	600000	600000
Láminas para los tabiques	2	300000	600000
Lámina para el vertedero	1	300000	300000
Tablas para agitar el agua en acrílico	432	7000	3024000
Mecanismo manivela - biela - balancin	3	700000	2100000
Bomba hidráulica	1	300000	300000
Motor - reductor cámaras 1 y 2	2	1300000	2600000
Motor - reductor cámara 3	1	1650000	1650000
Cable trifasico 14x3 20 metros	20	2500	50000
Láminas de soporte para los motores	3	30000	90000
Bolsa de tornillos de 1/8" para las tablas	2	7000	14000
Bolsa de tuercas de 1/8" para las tablas	2	5000	10000
Bolsa de tornillos de 3/8" para anclar los motores	1	12000	12000
Bolsa de tuercas de 3/8" para anclar los motores	1	8000	8000
Tubería y accesorios	1	60000	60000
TOTAL			24,142,000

El presupuesto adjunto en la tabla 47 fue asumido en su totalidad por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga amb S.A E.S.P.

8. DISEÑO DE LA CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DEL PROTOTIPO

8.1 Diseño de la construcción

En este capítulo se encuentran consignados los procesos que se le realizaron a las piezas que componen el prototipo así como las pruebas para comprobar su funcionalidad.

Las distintas operaciones que se le realizaron a las piezas se encuentran codificadas en la tabla 48 y se escogerán las operaciones que le fueron realizadas para su ensamblaje definitivo.

Tabla 48. Operaciones que se le realizaron a las piezas que componen el prototipo.

# DE OPERACIÓN	OPERACIÓN
1	Fresado
2	Roscado
3	Taladrado
4	Corte
5	Pulido
6	Doblado
7	Pintura anticorrosiva
8	Soldadura
9	Torneado
10	Galvanizado

Tabla 50. Operaciones realizadas al tanque del prototipo.

PIEZA (TANQUE DEL PROTOTIPO)	OPERACIONES									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ángulos para sostener los tabiques				X	X		X	X		
Lámina doblada				X	X	X	X	X		
Tapa 1				X	X	X	X	X		
Tapa2				X	X	X	X	X		
Agujeros de entrada y salida del agua				X	X		X	X		
										

Tabla 49. Operaciones realizadas a los alerones.

PIEZA (ALERONES)	OPERACIONES									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Alerones				X	X		X	X		X
										

Tabla 51. Operaciones realizadas a las bielas del mecanismo

PIEZA (BIELAS DEL MECANISMO)	OPERACIONES									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bielas del mecanismo	X	X	X	X	X		X	X	X	X
										

Tabla 52. Operaciones realizadas a las manivelas del prototipo

PIEZA (MANIVELAS DEL MECANISMO)	OPERACIONES									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Manivelas del mecanismo	X	X	X	X	X		X		X	X
										

Tabla 53. Operaciones realizadas a los balancines del mecanismo

PIEZA (BALANCINES DEL MECANISMO)	OPERACIONES									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Balancines del mecanismo	X	X	X	X	X		X		X	X
										

8.2 Pruebas del prototipo

Las primeras pruebas que realizaron fueron las de jarras, que consisten en emular la agitación de las paletas del sistema reciprocante en vasos precipitados de un litro con una única paleta de eje vertical, corroborando que con los gradientes que se diseñaron tanto el prototipo como el equipo real producen formación de floc durante el tiempo de retención escalado y asumido respectivamente.

Los gradientes de las cámaras son traducidos en cualquier sistema de floculación como rpm, y para relacionar los gradientes del sistema reciprocante con rpm en las jarras del equipo de jarras, se hace por medio de la siguiente ecuación:

$$RPM = 3 * G^{0.8} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde G sería el gradiente aplicado en la planta.

Equipo utilizado para la realización de las pruebas de jarras:

Figura 81. Equipo de jarras de la planta la Flora del amb.

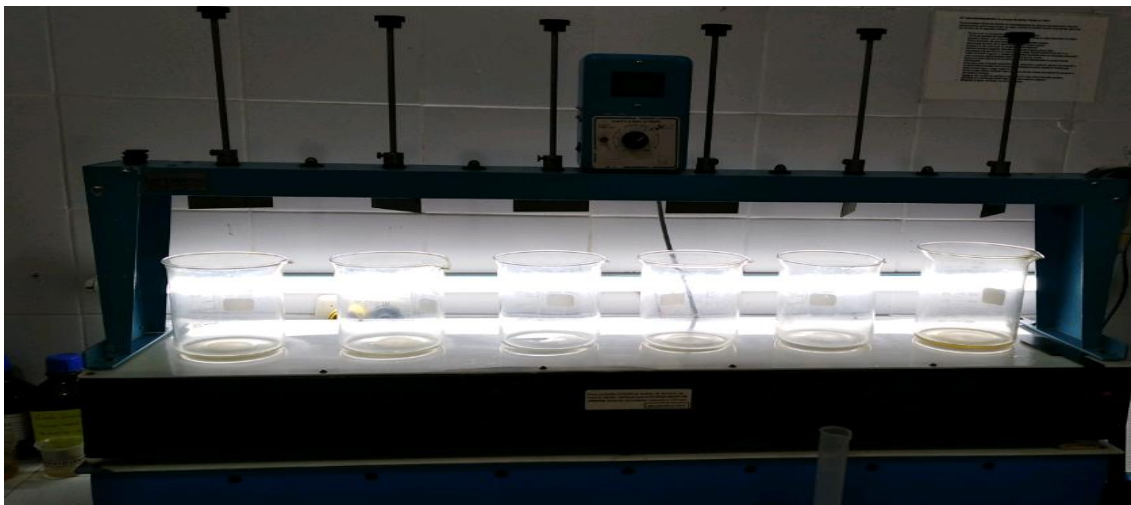


Figura 82. Colorímetro digital de la planta la Flora del amb.



Figura 83. Turbidímetro digital de la planta la Flora del amb



Procedimiento para realizar prueba:

Figura 84. Sección antes de la coagulación en la canaleta Parshall.

1. Se toma una muestra de agua cruda, antes de la fase de coagulación.



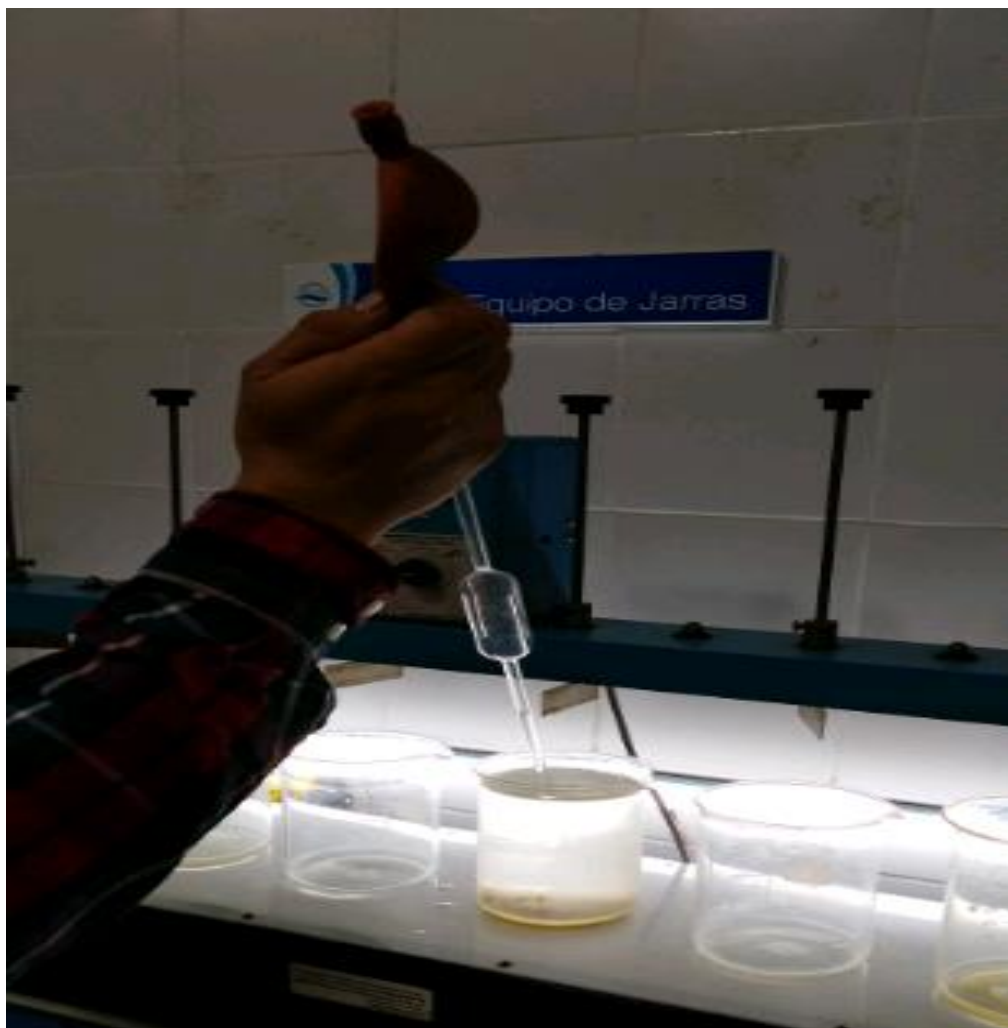
2. Se mide la turbiedad usando el turbidímetro y el color usando el colorímetro de la muestra de agua cruda.
3. Se realiza el ensayo usando los gradientes calculados para cada compartimiento del equipo real asignando a cada gradiente o rpm equivalente un tiempo de 5 minutos por cámara, obteniendo así un total de 15 minutos, tiempo actual de retención de la planta. Para el prototipo se hace de la misma forma, con la diferencia que el tiempo entre cámara y cámara es de 2.66 minutos para completar así 8 minutos, tiempo obtenido del escalamiento del tiempo de retención de floculación si el sistema actual fuese recíprocante (25 minutos).
4. Se deja sedimentar en ambos casos 15 minutos, al completar los 8 o 15 minutos de agitación según sean las rpm del prototipo o del equipo real.

Figura 85. Jarra después de simulada la agitación cámara a cámara.



5. Se toma una muestra de agua de 50 ml con la pipeta volumétrica provista de aspirador de la jarra analizada, para medir turbiedad y color nuevamente.

Figura 86. Toma de muestra de la jarra del agua sedimentada.



Ensayo # 1: Prueba del 24 de Octubre de 2018:

Agua Cruda:

- **Turbiedad:** 32.8 UNT
- **Color:** 286 UPC
- **Químico a dosificar:** Sulfato Líquido

Tabla 54. Gradientes equivalentes para las pruebas de jarras.

PRUEBA DEL 24 DE OCTUBRE CON LOS GRADIENTES DEL EQUIPO REAL			
$RPM = 3 * G^{0.8}$ $G_{PROMSUPERIOR} = \frac{G_{S1} + G_{S2} + G_{S3}}{3}$ $G_{PROMMEDIO} = \frac{G_{M1} + G_{M2} + G_{M3}}{3}$ $G_{PROMINFERIOR} = \frac{G_{I1} + G_{I2} + G_{I3}}{3}$			
Variables de entrada			
G_{S1}	60	s^{-1}	Gradiente superior cámara 1
G_{S2}	40	s^{-1}	Gradiente superior cámara 2
G_{S3}	30	s^{-1}	Gradiente superior cámara 3
G_{M1}	55	s^{-1}	Gradiente medio cámara 1
G_{M2}	35	s^{-1}	Gradiente medio cámara 2
G_{M3}	25	s^{-1}	Gradiente medio cámara 3
G_{I1}	50	s^{-1}	Gradiente inferior cámara 1
G_{I2}	30	s^{-1}	Gradiente inferior cámara 2
G_{I3}	10	s^{-1}	Gradiente inferior cámara 3
Variables de salida			
G_{S1}	79.4	RPM	RPM superior cámara 1
G_{S2}	57.4	RPM	RPM superior cámara 2
G_{S3}	45.6	RPM	RPM superior cámara 3
G_{M1}	74.0	RPM	RPM medio cámara 1
G_{M2}	51.6	RPM	RPM medio cámara 2
G_{M3}	39.4	RPM	RPM medio cámara 3
G_{I1}	68.6	RPM	RPM inferior cámara 1
G_{I2}	45.6	RPM	RPM inferior cámara 2
G_{I3}	18.9	RPM	RPM inferior cámara 3
$G_{PROMSUPERIOR}$	60.8	RPM	RPM promedio de los gradientes superiores
$G_{PROMMEDIO}$	55.0	RPM	RPM promedio de los gradientes medios
$G_{PROMINFERIOR}$	44.4	RPM	RPM promedio de los gradientes inferiores

Tabla 56. Prueba con los gradientes superiores.

PRUEBA DE JARRAS CON LOS GRADIENTES SUPERIORES	EQUIPO REAL	PLANTA
RPM	79 - 55 - 46	40
TIEMPO DE MEZCLA (min)	5 - 5 - 5	15
TIEMPO DE SEDIMENTACIÓN (min)	15	15
TURBIEDAD (UNT)	0.62	3
COLOR (UPC)	1	0.99

Tabla 55. Prueba con los gradientes medios.

PRUEBA DE JARRAS CON LOS GRADIENTES MEDIOS	EQUIPO REAL	PLANTA
RPM	74 - 52 - 39	40
TIEMPO DE MEZCLA (min)	5 - 5 - 5	15
TIEMPO DE SEDIMENTACIÓN (min)	15	15
TURBIEDAD (UNT)	0.71	3
COLOR (UPC)	4	0.99

Tabla 57. Prueba con los gradientes inferiores.

PRUEBA DE JARRAS CON LOS GRADIENTES INFERIORES	EQUIPO REAL	PLANTA
RPM	68 - 46 - 19	40
TIEMPO DE MEZCLA (min)	5 - 5 - 5	15
TIEMPO DE SEDIMENTACIÓN (min)	15	15
TURBIEDAD (UNT)	0.78	3
COLOR (UPC)	5	0.99

Tabla 58. Prueba con el gradiente promedio superior.

PRUEBA DE JARRAS CON EL GRADIENTE PROMEDIO SUPERIOR	EQUIPO REAL	PLANTA
RPM	61	40
TIEMPO DE MEZCLA (min)	5 - 5 - 5	15
TIEMPO DE SEDIMENTACIÓN (min)	15	15
TURBIEDAD (UNT)	0.46	3
COLOR (UPC)	0	0.99

Tabla 59. Prueba con el gradiente promedio medio.

PRUEBA DE JARRAS CON EL GRADIENTE PROMEDIO MEDIO	EQUIPO REAL	PLANTA
RPM	55	40
TIEMPO DE MEZCLA (min)	5 - 5 - 5	15
TIEMPO DE SEDIMENTACIÓN (min)	15	15
TURBIEDAD (UNT)	0.82	3
COLOR (UPC)	4	0.99

Tabla 60. Prueba con el gradiente promedio inferior.

PRUEBA DE JARRAS CON EL GRADIENTE PROMEDIO INFERIOR	EQUIPO REAL	PLANTA
RPM	44	40
TIEMPO DE MEZCLA (min)	5 - 5 - 5	15
TIEMPO DE SEDIMENTACIÓN (min)	15	15
TURBIEDAD (UNT)	1.54	3
COLOR (UPC)	11	0.99

Tabla 61. Combinaciones de RPM para la figuras 148.

COMBINACIÓN	RPM
1	79 - 55 - 46
2	74 - 52 - 39
3	68 - 46 - 19
4	61
5	55
6	44
7	40
8	32.8

Figura 87. Gráfico de la turbiedad vs los gradientes equivalentes en RPM.

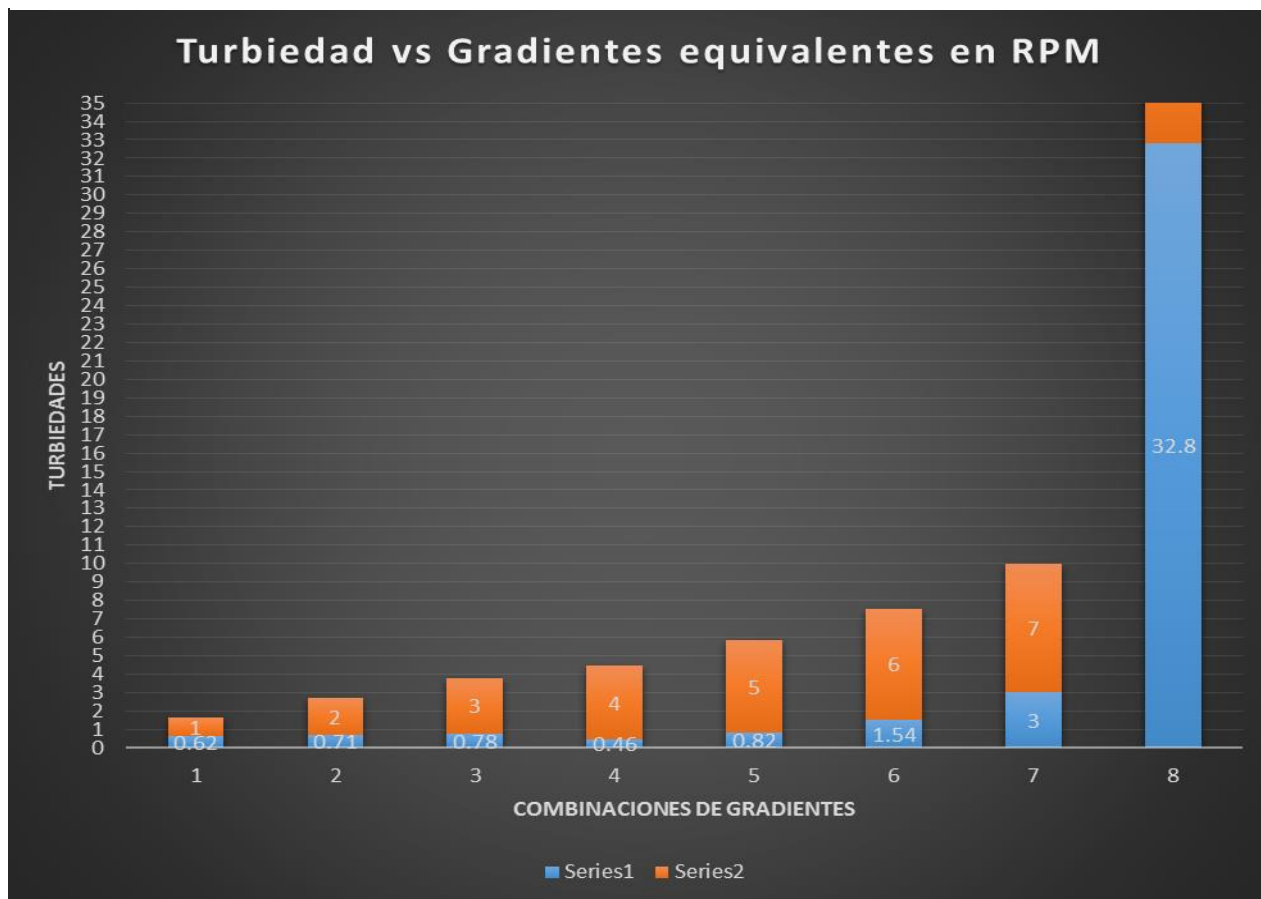
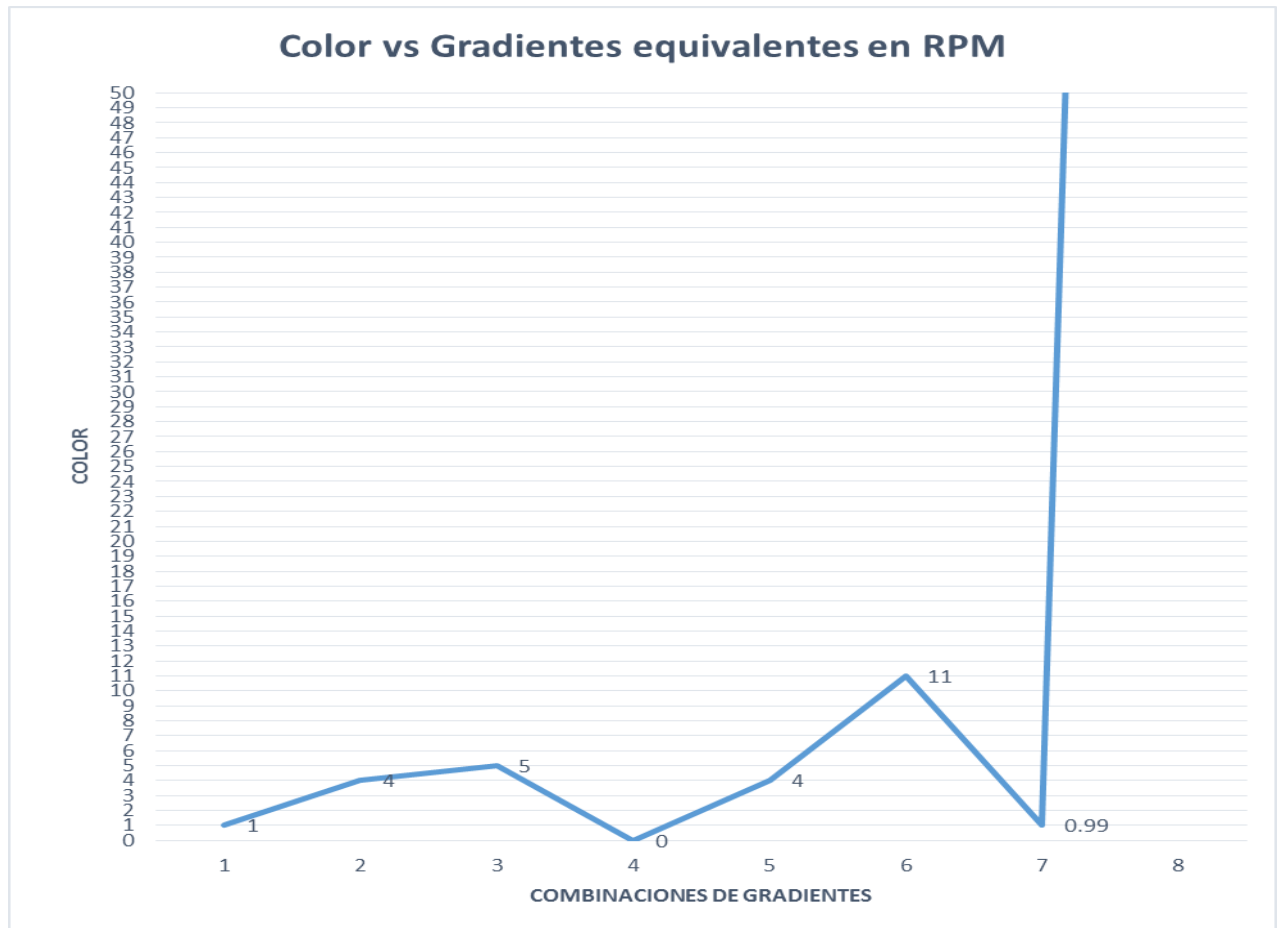


Tabla 62. Combinaciones de RPM para la figuras 149.

COMBINACIÓN	RPM
1	79 - 55 - 46
2	74 - 52 - 39
3	68 - 46 - 19
4	61
5	55
6	44
7	40
8	286

Figura 88. Gráfico del color vs los gradientes equivalentes en RPM.



Ensayo # 2: Prueba del 31 de Octubre de 2018:

Agua Cruda:

- **Turbiedad:** 7.57 UNT
- **Color:** 68 UPC

➤ **Químico a dosificar:** Sulfato líquido

Tabla 63. Combinaciones entre los gradientes superiores, medios e inferiores para las figuras 150 y 151.

GRADIENTE	TURBIEDAD (NTU)	COLOR (UPC)
79 - 57 - 39	0.68	6
79 - 57 - 19	0.88	9
74 - 52 - 19	0.62	6
74 - 57 - 46	0.45	4
68 - 57 - 46	1.83	15
79 - 52 - 19	0.8	7
68 - 52 - 46	0.38	7
40 (PLANTA)	1	9

Figura 89. Gráfico de la turbiedad vs los gradientes equivalentes en RPM.

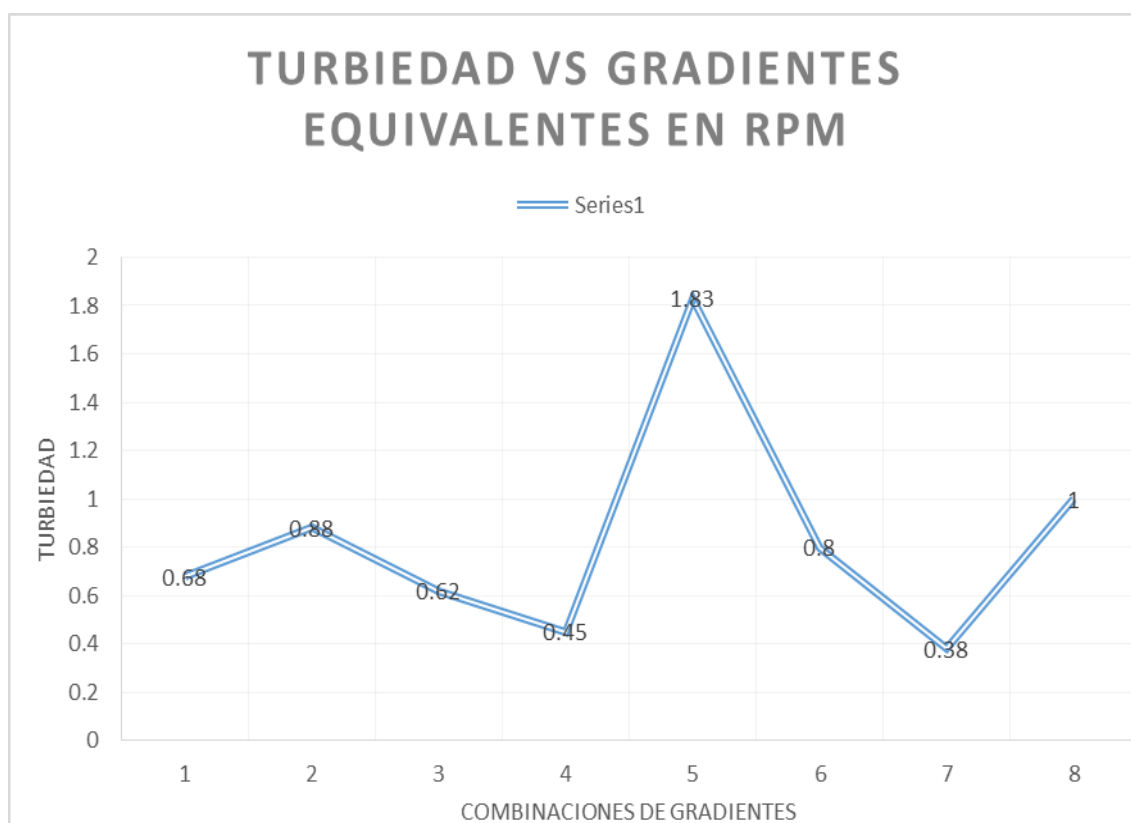
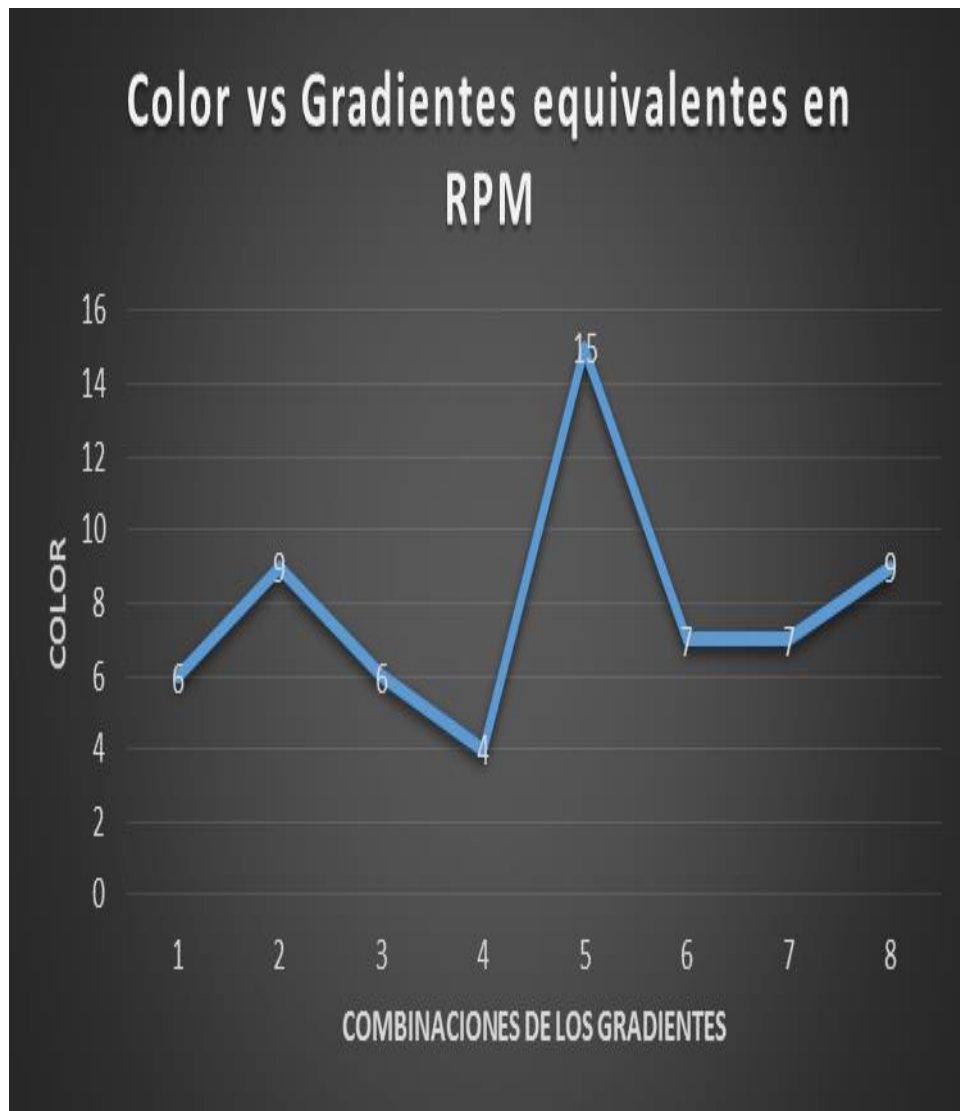


Figura 90. Gráfico del Color vs los gradientes equivalentes en RPM.



Ensayo # 3: Prueba del 25 de Octubre de 2018:

Agua Cruda:

- **Turbiedad: 26 UNT**
- **Color: 235**

- **Químico a dosificar:** Sulfato líquido y PAC (Policloruro de aluminio).

Tabla 64. Gradientes del prototipo equivalentes en las pruebas de jarras.

PRUEBA DEL 25 DE OCTUBRE CON LOS GRADIENTES DEL PROTOTIPO			
$G_{PROMSUPERIOR} = \frac{G_{S1} + G_{S2} + G_{S3}}{3}$ $G_{PROMMEDIO} = \frac{G_{M1} + G_{M2} + G_{M3}}{3}$ $RPM = 3 * G^{0.8}$ $G_{PROMINFERIOR} = \frac{G_{I1} + G_{I2} + G_{I3}}{3}$			
Variables de entrada			
G_{S1}	33.7	s^{-1}	Gradiente superior cámara 1
G_{S2}	22.5	s^{-1}	Gradiente superior cámara 2
G_{S3}	16.9	s^{-1}	Gradiente superior cámara 3
G_{M1}	30.93	s^{-1}	Gradiente medio cámara 1
G_{M2}	19.68	s^{-1}	Gradiente medio cámara 2
G_{M3}	14.06	s^{-1}	Gradiente medio cámara 3
G_{I1}	28.12	s^{-1}	Gradiente inferior cámara 1
G_{I2}	16.87	s^{-1}	Gradiente inferior cámara 2
G_{I3}	5.62	s^{-1}	Gradiente inferior cámara 3
Variables de salida			
G_{S1}	50.0	RPM	RPM superior cámara 1
G_{S2}	36.2	RPM	RPM superior cámara 2
G_{S3}	28.8	RPM	RPM superior cámara 3
G_{M1}	46.7	RPM	RPM medio cámara 1
G_{M2}	32.5	RPM	RPM medio cámara 2
G_{M3}	24.9	RPM	RPM medio cámara 3
G_{I1}	43.3	RPM	RPM inferior cámara 1
G_{I2}	28.8	RPM	RPM inferior cámara 2
G_{I3}	11.9	RPM	RPM inferior cámara 3
$G_{PROMSUPERIOR}$	38.3	RPM	RPM promedio de los gradientes superiores
$G_{PROMMEDIO}$	34.7	RPM	RPM promedio de los gradientes medios
$G_{PROMINFERIOR}$	28.0	RPM	RPM promedio de los gradientes inferiores

Tabla 65. Prueba con los gradientes superiores del prototipo.

PRUEBA DE JARRAS CON LOS GRADIENTES SUPERIORES	PROTOTIPO	PLANTA
RPM	50 - 36.2 - 28.76	40
TIEMPO DE MEZCLA (min)	2.66 - 2.66 - 2.66	15
TIEMPO DE SEDIMENTACIÓN (min)	15	15
TURBIEDAD (UNT)	3.02	3
COLOR (UPC)	15	26

Tabla 66. Prueba con los gradientes medios del prototipo.

PRUEBA DE JARRAS CON LOS GRADIENTES MEDIOS	PROTOTIPO	PLANTA
RPM	46.7 - 32.5 - 24.9	40
TIEMPO DE MEZCLA (min)	2.66 - 2.66 - 2.66	15
TIEMPO DE SEDIMENTACIÓN (min)	15	15
TURBIEDAD (UNT)	1.67	3
COLOR (UPC)	16	26

Tabla 67. Prueba con los gradientes inferiores del prototipo.

PRUEBA DE JARRAS CON LOS GRADIENTES INFERIORES	PROTOTIPO	PLANTA
RPM	43.3 - 28.8 - 11.9	40
TIEMPO DE MEZCLA (min)	2.66 - 2.66 - 2.66	15
TIEMPO DE SEDIMENTACIÓN (min)	15	15
TURBIEDAD (UNT)	2.1	3
COLOR (UPC)	21	26

Las pruebas con las rpm equivalentes de los gradientes promedio no se realizaron, debido a que estas están por debajo de las de planta que son 40 RPM.

Tabla 68. Combinaciones de RPM para la figuras 152.

COMBINACIÓN	RPM
1	50 - 36.2 - 28.76
2	46.7 - 32.5 - 24.9
3	43.3 - 28.8 - 11.9
4	40
5	26

Figura 91. Gráfico de la turbiedad vs los gradientes equivalentes del prototipo en RPM.

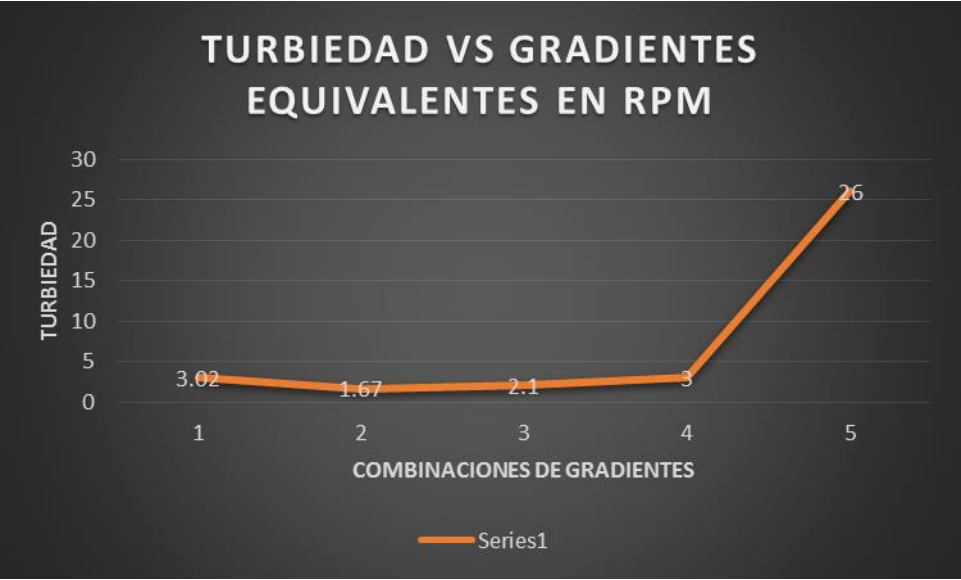
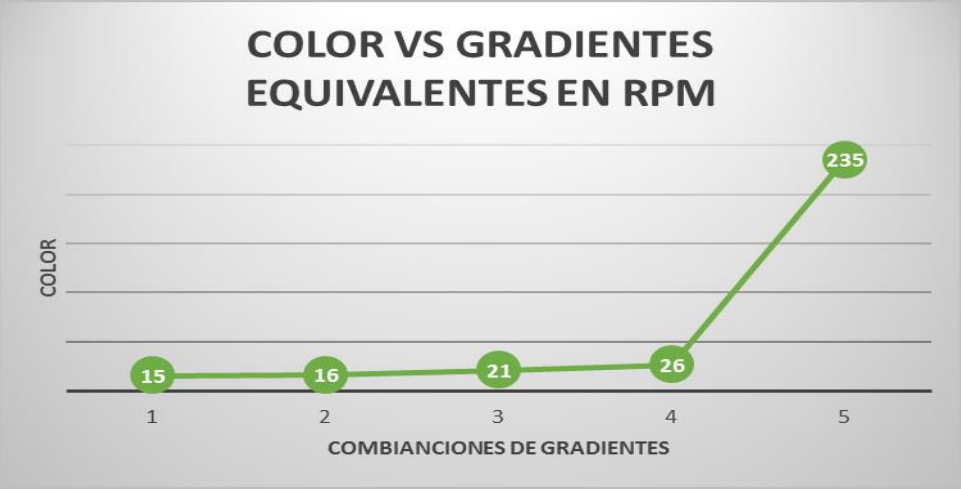


Figura 92. Combinaciones de RPM del prototipo para la figuras 153.

COMBINACIÓN	RPM
1	50 - 36.2 - 28.76
2	46.7 - 32.5 - 24.9
3	43.3 - 28.8 - 11.9
4	40
5	235

Figura 93. Gráfico del color vs los gradientes equivalentes del prototipo en RPM.



Ensayo # 4: Prueba del 26 de Octubre de 2018:

Agua Cruda:

- **Turbiedad:** 13.8 UNT
- **Color:** 163 UPC
- **Químico a dosificar:** Sulfato Líquido

Tabla 69. Combinaciones de RPM del prototipo para la figuras 153.

	GRADIENTE	TURBIEDAD (NTU)	COLOR (UPC)
1	50 - 36.2 - 11.9	2.83	26
2	46.7 - 32.5 - 11.9	2.31	19
3	50 - 28.8 - 11.9	2.57	21
4	46.7 - 36.2 - 28.7	0.92	13
5	46.7 - 28.8 - 11.9	2.29	39
6	43.3 - 36.2 - 28.8	2.27	21
7	43.3 - 32.5 - 24.9	2.08	22
8	43.3 - 32.5 - 28.8	2.34	21
9	40 (PLANTA)	3	26

Figura 94. Gráfico de la turbiedad vs los gradientes equivalentes del prototipo en RPM.

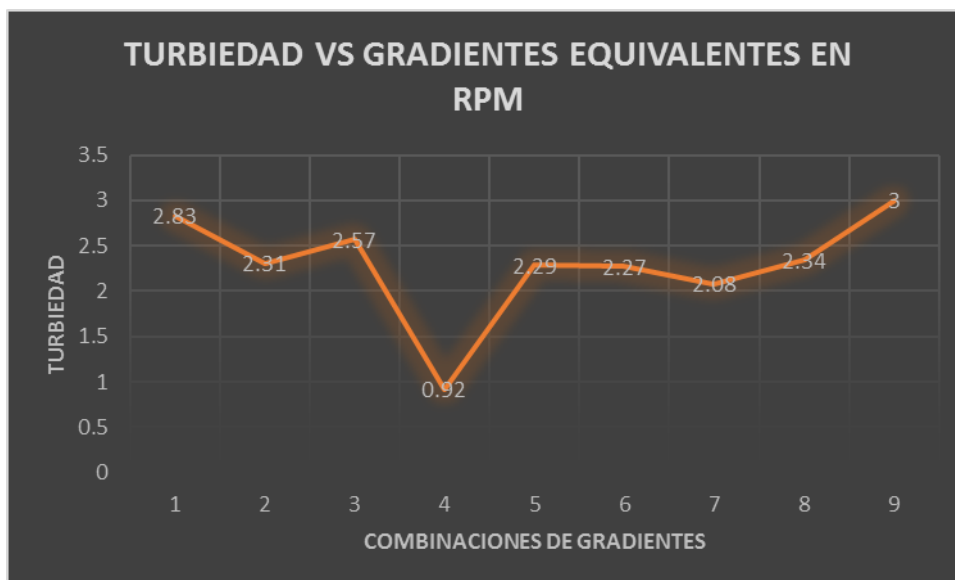
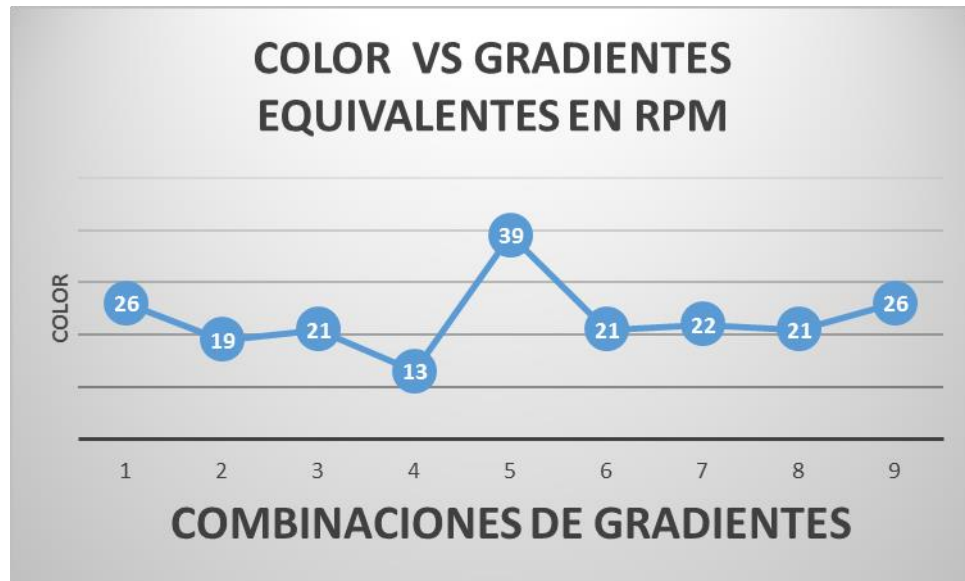


Figura 95. Gráfico del color vs los gradientes equivalentes del prototipo en RPM.



Ensayo # 5:

20 de Abril de 2019.

Este ensayo consiste en realizar pruebas al prototipo construido, con todos sus subsistemas funcionando, para al final de la tercera cámara obtener una muestra de agua floculada en un vaso precipitado de 1 L y posterior a esta obtención dejar que sedimente durante 15 minutos junto con una muestra de agua floculada por el sistema actual (eje rotatorio horizontal).

En el momento de la realización de las pruebas las condiciones de entrada y salida del agua del prototipo no eran las adecuadas, por lo que no ocurrió formación de floc, y por inspección visual de los vasos precipitados se determinó que era relevante la medición de turbiedad y color posteriores a la sedimentación.

A pesar de haber formación de floc dentro del tanque del prototipo, este no es consistente y por tanto se rompe.

Con el funcionamiento del prototipo se corrobora que el diseño mecánico y selección de equipos fue la correcta.

Al 13 de Mayo de 2019 la modificación de los diámetros de entrada y salida del prototipo no habían sido modificados; 1 ¼" y 2" respectivamente; por lo que en común acuerdo se decidió dar por terminado el proyecto, con la posibilidad de realizar las mejoras pertinentes para obtener al final de la cámara # 3 una muestra con floc consistente que permita que el mismo sedimento.

Figura 96. Montaje del prototipo.



Figura 97. Toma de muestra del agua floculada de la cámara 3.



Figura 98. Muestras de agua floculada.



Muestra 1, agua tomada del final de las cámaras del sistema actual, muestra 2, muestra tomada del final de las cámaras del prototipo.

Figura 99. Sistema de agitación del prototipo en funcionamiento.



Figura 100. Sistema de tubería con válvula reguladora de caudal a la entrada.



Figura 101. Moto bomba succionando agua coagulada, justo antes de la entrada a los floculadores actuales (sistema de eje rotatorio horizontal).



Figura 102. Salida del agua del prototipo.



Figura 103. Acta de entrega del prototipo.



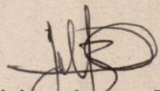
ACTA DE ENTREGA DEL PROTOTIPO CORRESPONDIENTE AL PROYECTO DE GRADO TITULADO: "DISEÑO Y SUPERVISIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE FLOCULACIÓN PARA LA PLANTA LA FLORA DEL ACUEDUCTO DE BUCARAMANGA"

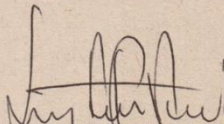
Bucaramanga, 13 de Mayo de 2019

Entre los suscritos Jolman Lozano Pico Codirector del proyecto de grado y Jefe del Área Electromecánica del amb S.A ESP identificado con cédula de ciudadanía 91288583 y el estudiante Sergio Daniel Obando Pérez identificado con cedula de ciudadanía 1098759818 de Bucaramanga y código de estudiante 2120496 se realiza la presente acta donde se hace entrega del prototipo de un sistema de floculación recíprocante, diseñado, probado y supervisado en su construcción por el estudiante en mención.

Con los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, se llegó a la conclusión que se deben cambiar los diámetros tanto de entrada del agua como de salida en las tuberías del prototipo, para que no haya rompimiento del floc, pues con los diámetros actuales, había rotura del floc en la última cámara.

A la fecha de la presente acta, no se ha podido realizar dicho cambio por parte del amb por cuestiones ajenas al proyecto, y para efectos del cumplimiento del calendario académico se llega a común acuerdo entre las partes de dar por terminado el proyecto para que el estudiante pueda realizar la entrega del libro de proyecto de grado, con la posibilidad de realizar los cambios pertinentes y pruebas posteriormente en fecha que se concertará entre las partes.


Jolman Lozano Pico
Jefe del Área Electromecánica
Codirector Proyecto de Grado


Sergio Daniel Obando Pérez
Estudiante de Ingeniería Mecánica

Acueducto Metropolitano de Bucaramanga
Diagonal 32 No. 30A - 51 Parque del Agua | PBX: (7) 6320220 - Call Center (7) 6322000 | NIT. 890.200.162-2 | www.amb.com.co | B/manga - Colombia

9. MANUAL DEL EQUIPO REAL Y EL PROTOTIPO

Este equipo y prototipo contiene elementos que si bien están seleccionados y diseñados para condiciones de operación difíciles, como lo son la exposición directa al sol al agua, y su trabajo como tal en un medio húmedo, requieren de ciertas labores sencillas de mantenimiento que prolongaran la vida útil de sus componentes.

Dichas labores son: lubricación, inspección, limpieza y ajuste.

- **Lubricación:** es quizá la labor más importante, porque de esta, en gran medida depende la durabilidad de los componentes. En el sistema de floculación recíprocante los elementos que necesitan una lubricación constante son: las chumaceras, las cajas reductoras de velocidad de los motores eléctricos y rodamientos.

Para las chumaceras y rodamientos la lubricación debe hacerse a las 720 horas de lubricación por medio de las graseras que estas poseen, para la caja reductora debe hacerse según la recomendación del fabricante de la caja, normalmente los aceites usados son ISO VG 220* o 320 y se realiza el respectivo cambio según las horas de operación que esté operando el aparato y si el aceite es sintético o mineral, recomendando para este caso un aceite sintético, debido a que mantienen mejor sus propiedades lubricadoras.

- **Inspección:** la inspección puede ser visual, de contacto rápido con los elementos para verificar su temperatura u auditiva. Con la inspección visual se deben lograr captar componentes que tengan movimientos inusuales, desgastes prematuros, piezas sueltas, pedazos de piezas rotas aceite lubricante por fuera de las carcasas, suciedad y todo aquello que por medio de una observación se pueda diagnosticar. El contacto rápido o el acercamiento prudente a algún elemento que genere calor permite intuir que la lubricación es nula o muy pobre y que es mejor detener la operación de la máquina. Por último con la inspección auditiva

se quieren llegar a sentir ruidos extraños ajenos al normal funcionamiento del equipo.

- Limpieza: la limpieza de los componentes debe estar enfocada a retirar la suciedad u obstrucciones que impidan el normal funcionamiento de la máquina. El componente con el cual se debe tener buena limpieza es el ventilador del motor eléctrico para que realice una refrigeración correcta además de evitar que haya un fallo propio que dañe algún álabe del mismo o lo empiece a detener progresivamente.
- Ajuste: el ajuste de los componentes consiste en el apriete, alineación y cambio defectuosos. Los elementos a ajustar, son los prisioneros de los alerones, todos los tornillos que sujetan a las chumaceras, los prisioneros que alinean los pasadores de los balancines, y los que sujetan el mecanismo, las tuercas que sujetan los tornillos de las distintas tablas cuyos aprietes deben darse, cuando se vacíen por completo los tanques de floculación en cuyo caso también debe aprovecharse para reemplazar las tablas que estén partidas total o parcialmente.

*Aceite ISO VG 220: este es el aceite recomendado por el fabricante de las cajas reductoras cuyo homólogo en la nomenclatura SAE por las propiedades de viscosidad es el SAE 85W90, lubricante que fue utilizado para iniciar el trabajo de las cajas el día 16/04/2019.

Las 3 cajas reductoras de las cámaras consumen cada una 1/3 de galón de este aceite.

10. CONCLUSIONES

- De acuerdo con la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander hubo aporte a la misma al diseñar un prototipo, construirlo y además diseñar el equipo real que trabajaría en la planta. Lo cual le permite al amb S.A ESP evaluar su proceso de floculación, mejorarlo o cambiarlo por una floculación recíproca, esto con el fin de ejecutar de la mejor manera el patrimonio público y mantener o continuar con la misma calidad de agua que procesa la Planta La Flora.
- Se cumplió con el objetivo de construir un prototipo cuya capacidad es de 1.6 l/s que soporta satisfactoriamente las cargas para las que se diseñó, a pesar que no hubo formación de floc debido a los diámetros de entrada y salida del prototipo. Además se diseñó un equipo para la planta con capacidad para 510 l/s por tanque que reemplazaría el sistema actual.
- El prototipo necesita ser sometido a más pruebas para descartar que el sistema no es el adecuado para el agua que trata La Planta La Flora, debido a que este veredicto está ligado al cambio de los diámetros de entrada y salida.
- Por medio de las pruebas se pudo determinar:
 - Que es indispensable el cambio de entrada del agua de $\frac{1}{2}$ "a $1 \frac{1}{4}$ "y el de salida de $\frac{3}{4}$ "a 2" para obtener formación de floc.
 - Que la turbiedad para el agua floculada debe ser ≤ 3 y el color debe ser ≤ 10 , para que la calidad del agua se mantenga, de lo contrario hay que dosificar más químico al agua para lograr mayor consistencia en el floc.
 - Que los gradientes superiores, medios y promedio superior son los que mejores resultados dan a la hora de disminuir la turbiedad.
 - Que cuando la turbiedad y color del agua son altos los gradientes de agitación deben ser bajos o medios.
 - Que el color del agua es un atributo del agua más difícil de remover que la turbiedad.

- Que la combinación de sulfato líquido con PAC no es conveniente cuando hay turbiedades y colores altos para el agua de la Planta la Flora.
 - Las turbiedades de la Planta la Flora no alcanzan los valores de 4000 NTU debido a la flora y fauna del lecho del río, sin embargo los diseños soportan este valor de turbiedades
- El proceso de diseño mecánico de ingeniería manual por el uso de los métodos convencionales de cálculo al que se le adiciona la comprobación por software de simulación es factible. Con Solidworks se crean los modelos CAD con las dimensiones establecidas previamente y Ansys comprueba estas geometrías proporcionando factores de seguridad óptimos. Dichos procedimientos y análisis, se validaron con la construcción del prototipo el cuál soportó las cargas de fatiga anteriormente calculadas.
 - A pesar de los errores cometidos en la fabricación estos son corregibles y permiten acercar al estudiante con los procesos e inconvenientes que acarrea la construcción, el diseño y selección de componentes que son comerciales.
 - La floculación es un proceso que se ve afectado por factores medio ambientales propios del lugar de donde se capta el agua, es por ello que por temporadas no sea necesaria la floculación, esto sin restarle importancia al proceso o al sistema mecánico que realice la agitación.

BIBLIOGRAFIA

ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua Tomo 1. Bogotá: McGraw-Hill, 2000.

BEER, Ferdinand P; E. RUSSELL, Johnston; CORNWELL, PHILLIP. MECÁNICA VECTORIAL PARA INGENIEROS Dinámica. México. 9 ed. McGraw-Hill, 2010.

CENGEL, YUNUS y CIMBALA, JOHN M. MECÁNICA DE FLUIDOS Fundamentos y Aplicaciones. México. McGraw-Hill, 2006.

DNBRIDA. Catálogo de bridas. Internet. (<http://www.dnbrida.com/index.php>)

GERDAU CORSA. Catálogo de perfiles de vigas en acero. Internet. (<https://www.gerdau.com/gerdaucorsa/es/home>)

HAMROCK, Bernard J; JACOBSON, Bo O y SCHMID, Steven R. Elementos de Máquinas. México. McGraw-Hill, 1999.

INDUSTRIAS RAMFE. Catálogo de motorreductores. Internet (<http://www.ramfe.com.co/productos.php>)

MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Resolución 0330. Bogotá D.C: El ministerio. 2017. 182 p.

NORTON, Robert L. DISEÑO DE MAQUINARIA Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. 4 ed. México. McGraw-Hill, 2009.

NTN corporation. Catálogo de rodamientos. Internet (<http://www.ntnamericas.com/es/website/documents/brochures-and-literature/catalogs/bearing-units%202400-IX.pdf>)

PARRA MELO, Anderson y HERRERA DELGADO, Juan Sebastián. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA PILOTO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EN EL LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil, 2006. 107 p.

RITCHER, Carlos A. Curso sobre tecnología de Tratamiento del agua para países en desarrollo. Lima, 1-16 Dic. 1977.15 p.

RITCHER, Carlos A. Curso sobre tecnología de Tratamiento del agua para países en desarrollo. Lima, 1-16 Dic. 1977.15 p.

RODAVIGO. Catálogo de chavetas. Internet. (<https://rodavigo.net/>)

TECNITUBERIAS. Tuberías en acero. Internet. (http://www.tecnituberias.com/Spanish/Casing_files/TABLA%20ESPECIFICACION%20TUBERIA.pdf)

WEG. Catálogo de variadores de frecuencia. Internet. (<https://www.weg.net/institutional/VE/es/>)