

**UNIVERSIDAD DE TARAPACÁ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN Y DISEÑO DE UN RECUBRIMIENTO PARA  
FOTORREACTORES RACEWAY UTILIZADOS EN CONDICIONES REALES DE  
OPERACIÓN**

Memoria para optar al Título:  
Ingeniero Civil Mecánico

Alumno:  
Rodrigo Bravo Cortés

Profesora Guía:  
Lorena Cornejo Ponce

Profesor Informante:  
Manuel Fuentes Maya

**Arica-Chile**

**2019**

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres María Cortés Carrasco y Víctor Bravo Ángulo por regalarme la vida, por educarme en este caótico camino que debo comenzar a transitar por mi cuenta; por aconsejarme siempre con una sabiduría extraordinaria y siempre darme apoyo y fortaleza en todos los momentos de mi corta vida.

En segundo lugar, quiero agradecer a Ivannia Bravo Cortés, por acompañarme desde que tengo conciencia, por estar conmigo en la mayoría de mis aventuras, por entregarme esa compañía y amor que solo un hermano puede dar y por ser mi cómplice ante la autoridad de mis padres.

En tercer lugar, quiero agradecer a Elizabeth Rauld Ojeda, por ser mi compañera estos 7 años de trayectoria estudiantil, por estar a mi lado en silencio, en las buenas y no tan buenas, en los viajes interminables y las aventuras hacia los rincones de Sudamérica y la familia Rauld-Ojeda por recibirme en su hogar. Eternamente agradecido.

A mis profesores, ahora un poco más maduro contemplo la calidad de profesionales que son, todas esas conversaciones, historias y vivencias personales las he ido entendiendo a medida que desarrollo mi carrera profesional como ingeniero, Camilo flores, Manuel Fuentes, Lenka Vallejos, Jaime Villanueva, Eliana Ponce.

A los funcionarios del departamento de ingeniería mecánica que me apoyaron en todos los proyectos que quise desarrollar, Daniel Alegría y Carlos Carlitos.

A mis amigos que me acompañaron estos 7 años en todos los momentos que me tocó sortear esta etapa de formación profesional, Jorge Mamani, Daniel Cattán, Hugo Muñoz, Scarlett Meza, Camilo Rodríguez, Jonathan Pinto, Alexander Ávalos, Álvaro Gonzales y Juan Leiva, los guardo con mucho cariño.

Finalmente, agradecer al Laboratorio de Investigaciones Medioambientales de Zonas Áridas (LIMZA) y a SERC Chile por permitirme desarrollar mi memoria de titulación para convertirme finalmente en Ingeniero. Lorena Cornejo, Alejandro Cabrera y a todo el equipo que directa e indirectamente colaboraron para llevar a cabo esta investigación.

## DEDICATORIA

Esta memoria va dedicada a mi abuela, quien surca el infinito del cosmos y más allá de las dimensiones que el humano terrestre puede imaginar, quien aparece en ciertos instantes por mis ojos y mis espacios físicos para recordarme que el tiempo no retrocede y que la vida es aquí y ahora.

Myrian Carrasco Castañeda

27.10.1944 - 12.10.2014

Rodrigo Bravo Cortés

**ESTA TESIS DE PREGRADO SE ENMARCA EN EL PROYECTO FONDECYT**

**INICIACIÓN N°11160680**

**“SOLAR WATER TREATMENT DESIGN AND OPTIMIZATION OF SOLAR  
DETOXIFICATION PLANTS ADAPTED TO ATACAMA DESERT RADIATION  
CONDITION”**

**ARICA 2019**

## RESUMEN

Un equipo fotorreactor tipo “*raceway pond*” es un reactor de mezcla tipo colector solar plano utilizado para mineralizar aguas residuales mediante foto catálisis solar. Se consideran equipos eficientes para mineralizar contaminantes difícilmente tratables por métodos convencionales, sin embargo, al ser equipos tipo estanques poco profundos abiertos, tienden a evaporar reactivos tóxicos hacia el ambiente. El presente informe, presenta dos metodologías para validar el recubrimiento de dos fotorreactores pilotos tipo “*raceway pond*” empleados para tratar aguas residuales tóxicas de la industria textil. La primera metodología, pretende entregar instrucciones para estudiar el comportamiento de la radiación ultravioleta a través de distintos materiales semi transparentes y realizar un modelo comparativo mediante la cuantificación de los datos obtenidos por radiómetros. La segunda metodología, pretende estudiar el comportamiento de la temperatura de operación en los equipos bajo modelos analíticos de transferencia de calor, utilizando el vidrio borosilicato como recubrimiento. En tercer lugar, se realiza un diseño para de recubrimiento para los equipos fotorreactores a fin de poder estudiar su comportamiento con condiciones reales de operación. Finalmente se estiman los costos de adquisición de los distintos elementos que permitan cubrir ambos equipos.

*Palabras claves: Fotorreactor, Raceway pond, Foto catálisis solar, Recubrimiento, Diseño.*

## ABSTRACTS

"raceway pond" type photoreactor equipment is a flat solar collector type mixing reactor used to mineralize wastewater by solar photocatalysis. They are considered efficient equipment to mineralize contaminants that are difficult to treat by conventional methods, however, as they are open, shallow pond-type equipment, they tend to evaporate toxic reagents into the environment. This report presents two methodologies to validate the coating of two pilot "raceway pond" type photoreactors used to treat toxic wastewater from the textile industry. The first methodology aims to provide instructions to study the behavior of ultraviolet radiation through different semi-transparent materials and to carry out a comparative model by quantifying the data obtained by radiometers. The second methodology aims to study the behavior of the operating temperature in the equipment under analytical models of heat transfer, using borosilicate glass as a coating. Third, a coating design is made for the photoreactor equipment in order to study its behavior under real operating conditions. Finally, the acquisition costs of the different elements that allow covering both teams are estimated.

*Keywords: Photoreactor, Raceway pond, Photo solar catalysis, Coating, Design.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

SIMBOLOGÍA .....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
OBJETIVOS .....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
1.    CAPITULO I: MARCO TEÓRICO .....	4
1.1. SISTEMAS DE DEPURACIÓN DE AGUAS .....	4
1.1.1. MÉTODOS DE ELIMINACIÓN DE MATERIA EN SUSPENSIÓN.....	5
1.1.2. MÉTODO DE ELIMINACIÓN DE MATERIA COLOIDAL O DISUELTA .....	6
1.2. AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL.....	7
1.2.1. MÉTODOS DE DEPURACIÓN EN AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL .....	9
1.2.2. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA.....	10
1.2.2.1. OXIDACIÓN AVANZADA MEDIANTE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO Y CATALIZADOR (FENTON).....	11
1.2.2.2. PROCESO FOTO-FENTON.....	12
1.3. FOTORREACTORES EMPLEADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	13
1.3.1. SISTEMA COLECTOR PARABÓLICO .....	14
1.3.2. SISTEMA COLECTOR NO CONCENTRADO.....	14
1.3.3. SISTEMA COLECTOR COMPUESTOS.....	16
1.3.4. FOTORREACTOR TIPO RACEWAY POND.....	17
1.3.4.1. OPERCIÓN RACEWAY POND REACTOR.....	18
1.3.4.2. VARIABLES OPERACIONALES.....	19
1.3.4.2.1. ZONAS DE ESTANCAMIENTO HIDRAULICO .....	19
1.3.4.2.2. TENSION DE CORTE HIDRÁULICO .....	21
1.3.4.2.3. CONSUMO ELÉCTRICO .....	22
1.3.4.3. PARÁMETROS DE DISEÑO .....	23
1.3.4.3.1. GEOMETRÍA DE DISEÑO .....	23
1.3.4.3.2. DEFLECTORES CURVOS DEL EQUIPO .....	24
1.3.4.3.3. EQUIPOS HIDRAULICO DE MEZCLA.....	25
1.4. FOTORREACTOR RACEWAY LIMZA .....	26
1.4.1. CRITERIOS DE DISEÑO .....	27
1.4.2. PARAMETROS HIDRAULICOS DE OPERACIÓN .....	28
1.4.3. CONFIGURACIÓN FINAL EQUIPOS FOTORREACTOR.....	28
1.5. FUNDAMENTOS TÉRMICOS REACTOR RACEWAY .....	30
1.5.1.    BALANCE TÉRMICO FOTORREACTOR .....	31
1.5.1.1.    ENERGÍA ENTRANTE EN EL SISTEMA.....	32
1.5.1.2.    ENERGÍA SALIENTE EN EL SISTEMA .....	32
1.5.1.3.    ECUACIÓN TRANSITORIA DE CALOR EN EL SISTEMA .....	33
1.5.2.    BALANCE TÉRMICO FOTORREACTOR CUBIERTO .....	34
1.5.2.1.    ENERGÍA ENTRANTE EN EL SISTEMA .....	35
1.5.2.2.    ENERGÍA SALIENTE EN EL SISTEMA .....	36
1.5.3.    ECUACIONES DE BALANCE FINAL.....	37
1.5.4.    MODELO NUMÉRICO ECUACIÓN DE BALANCE TÉRMICO .....	40
1.5.4.1.    SUCECIÓN NUMÉRICA DE EULER. ....	41
1.6. VARIABLES MODELO DE TEMPERATURA .....	42
1.6.1. VARIABLES TERMODINÁMICAS .....	42
1.6.3.1. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR .....	42
1.6.2. VARIABLES ÓPTICAS DE LOS CUERPOS.....	46
1.6.2.1. MATERIALES SEMI TRANSPARENTES.....	46

1.6.2.2.	TRANSMISIVIDAD DE UN MATERIAL SEMI TRANSPARENTE.....	47
1.6.2.3.	ABSORTIVIDAD DE UN MATERIAL SEMI TRANSPARENTE .....	49
1.6.2.4.	REFLECTIVIDAD DE UN MATEIRAL SEMI TRANSPARENTE .....	50
1.6.2.5.	EMISIVIDAD DE UN MATERIAL SEMI TRANSPARENTE.....	50
1.6.3.	VARIABLES AMBIENTALES ARICA Y PARINACOTA .....	50
1.6.3.1.	ESTACIONES RADIOMÉTRICAS REGIÓN ARICA Y PARINACOTA ....	52
1.6.3.1.1.	ESTACIÓN UNIVERSIDAD DE TARAPACÁ: .....	52
1.6.3.1.2.	ESTACIÓN QUIBORAX:.....	53
1.6.3.1.3.	ESTACIÓN LAS REJAS:.....	53
1.6.3.2.	EXPLORADOR SOLAR UNIVERSIDAD DE CHILE .....	55
1.6.3.2.1	RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE ARICA-PARINACOTA .....	55
1.6.3.2.2.	COMPARACIÓN RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE U. CHILE Y LIMZA.....	59
1.6.3.2.3.	TEMPERATURA PROMEDIO ARICA Y PARINACOTA .....	59
2.	CAPITULO II: METODOLOGÍA DE ENSAYO.....	62
2.1.	CAMPAÑA DE ADQUISICIÓN DE MATERIALES SEMI TRANSPARENTES .....	63
2.2.	MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA.....	64
2.2.1.	INSTRUMENTACIÓN .....	64
2.2.2.	CONTROL Y PROCESO DE DATOS .....	66
2.3.	METODOLOGÍA DE OPERACIÓN .....	67
2.3.1.	MONTAJE EQUIPO RD01 .....	67
2.3.2.	MONTAJE EQUIPO RD02 .....	68
2.3.2.1.	ESTRUCTURA SOPORTE.....	68
2.3.2.2.	VALIDACIÓN ESTRUCTURA SOPORTE .....	70
2.3.2.2.1.	MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN .....	70
2.3.3.2.	ANÁLISIS ESTRUCTURA SOPORTE.....	73
2.3.3.2.1.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL ANÁLOGO .....	73
2.3.3.2.2.	ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS .....	74
2.3.2.3.	MONTAJE Y POSICIÓN DE MATERIAL DE ENSAYO.....	76
2.4.	METODOLOGÍA DE ENSAYO.....	80
2.4.1.	CUANTIFICACIÓN DE DATOS .....	80
2.4.1.1.	CÁLCULO DEL LA MEDIA MUESTRAL Y LA DESVIACIÓN TÍPICA ....	81
2.4.2.	SELECCIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS.....	82
2.4.	SEGUNDA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	83
2.5.1.	EXPOSICIÓN PROLONGADA A LAS CONDICIONES AMBIENTALES .	83
2.5.1.1.	SIMULADOR DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA .....	83
2.5.1.2.	EXPOSICIÓN A CONDICIONES AMBIENTALES DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	85
3.	CAPITULO III: METODOLOGÍA ANALÍTICA.....	86
3.1.	MATERIALES PARA CUBIERTA DEL EQUIPO .....	86
3.1.1.	ESTIMACIÓN PARÁMETROS ÓPTICO MATERIAL DE RECUBRIMIENTO .	88
3.1.1.1.	TRANSMISIVIDAD VIDRIO BOROSILICATO .....	88
3.1.1.2.	ABSORTIVIDAD VIDRIO BOROSILICATO .....	90
3.1.1.3.	REFLECTIVIDAD VIDRIO BOROSILICATO .....	92
3.1.1.4.	EMISIVIDAD .....	93
3.2.	CÁLCULO DE TRANFERENCIA DE CALOR EN EL SISTEMA.....	94
3.2.1.	TEMPERATURA EQUIPO RT01 .....	94
3.2.1.1.	ETAPA AMBIENTE-VIDRIO BOROSILICATO.....	94
3.2.1.2.	ETAPA VIDRIO BOROSILICATO-FOTORREACOTOR .....	98
3.2.1.3.	RESOLUCIÓN NUMÉRICA .....	102
3.2.1.3.1.	TEMPERATURA DE OPERACIÓN MES DE ENERO .....	103
3.2.1.3.1.	TEMPERATURA DE OPERACIÓN MES DE FEBRERO .....	104
3.2.1.3.2.	TEMPERATURA DE OPERACIÓN MES DE JULIO .....	106
3.2.2.	TEMPERATURA EQUIPO RT02 .....	107
3.2.2.1.	ETAPA AMBIENTE-VIDRIO BOROSILICATO.....	108

3.2.2.2. ETAPA VIDRIO BOROSILICATO-FOTORREACOTOR .....	110
3.2.2.3. SOLUCIÓN NÚMÉRICA .....	114
3.2.2.3.1. TEMPERATURA DE OPERACIÓN MES DE ENERO .....	115
3.2.2.3.2. TEMPERATURA DE OPERACIÓN MES DE FEBRERO .....	116
3.2.2.3.3. TEMPERATURA DE OPERACIÓN MES DE JULIO .....	118
3.2.3. OBSERVACION SOLUCION DE TEMPERATURA.....	119
4. CAPITULO IV: PROPUESTA DE DISEÑO.....	120
4.1. RECUBRIMIENTO FOTORREACTOR A NIVEL SUPERIOR .....	121
4.1.1. MATERIAL DE CONTRUCCIÓN .....	126
4.1.2. VALIDACIÓN ESTRUCTURAL DEL DISEÑO .....	127
4.1.3. PIEZAS DE ACOPLA PARA ENSAYO RÍGIDO.....	129
4.1.4. PIEZAS DE ACOPLA FLEXIBLE .....	129
4.2. PROCEDIMIENTO DE MONTAJE MATERIAL DE ENSAYO .....	130
4.2.1. MONTAJE MATERIAL RÍGIDO.....	130
4.2.2. MONTAJE MATERIAL FLEXIBLE .....	135
5. CAPITULO V: ANÁLISIS ECONOMICO .....	139
5.1. COSTOS DE INVERSIÓN .....	139
5.1.1. MATERIALES DE RECUBRIMIENTO DE EQUIPO .....	139
5.1.2. ESTRUCTURA DE TESTEO .....	140
5.1.3. ELEMENTOS DE ANCLAJE EQUIPO FOTORREACTOR .....	141
5.2. BALANCE FINAL.....	142
5.2.1. COSTOS FIJOS TOTALES.....	142
5.2.2. COSTOS VARIABLES .....	144
6. CONCLUSIONES.....	146
7. REFERENCIAS.....	148
8. ANEXOS .....	157

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN LAS AGUAS RESIDUALES TEXTILES. FUENTE: TINOCO, O. 2011 [7].	8
FIGURA 2. COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO. FUENTE: BLANCO, J. 2005 [31].	14
FIGURA 3. SISTEMA COLECTOR COMPUESTO. FUENTE: JIYUN, Q. 2017 [36].	15
FIGURA 4. SISTEMA COLECTOR COMPUESTO. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	16
FIGURA 5. VISTA SUPERIOR DE UN REACTOR TIPO RACEWAY. FUENTE: RIVAS, G. 2017 [44].	17
FIGURA 6. CONFIGURACIÓN GENERAL DE UN FOTORREACTOR TIPO RACEWAY. FUENTE: CAJAMAR, A. 2016 [51].	19
FIGURA 7. VISTA SUPERIOR FOTORREACTOR TIPO RACEWAY DELIMITADOS CON COTAS DE OPERACIÓN Y DISEÑO. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	24
FIGURA 8. VISTA ISOMÉTRICA FOTORREACTOR TIPO RACEWAY CON DEMARCACIÓN DE DEFLECTORES CURVOS. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	25
FIGURA 9. VISTA ISOMÉTRICA DEL ÁNGULO DE ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN EN PALETAS HIDRÁULICAS CARACTERÍSTICAS DE UN FOTORREACTOR TIPO RACEWAY. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	26
FIGURA 10. VISTA SUPERIOR DE DOS DIFERENTES COMBINACIONES GEOMÉTRICAS PARA UN REACTOR TIPO "RACEWAY POND". FUENTE: VERA, A. 2019 [78].	27
FIGURA 11. CONFIGURACIÓN FINAL EQUIPO FOTORREACTOR TIPO RACEWAY PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	29
FIGURA 12. CONFIGURACIÓN ALTURA Y LARGO DEFINITIVO PARA LOS EQUIPOS FOTORREACTORES RACEWAY. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	29
FIGURA 13. EFECTO DE RADIACIÓN SOLAR COMO MODELO DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA EN UN FOTORREACTOR ABIERTO. FUENTE: PERSONAL.	31
FIGURA 14. DIAGRAMA DE BALANCE DE ENERGÍA EN UN ESTANQUE POCO PROFUNDO. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	34
FIGURA 15. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (K) ENTRE EL MATERIAL SEMI TRANSPARENTE Y EL LÍQUIDO DEL EQUIPO. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	43
FIGURA 16. COMPORTAMIENTO DE LA TRANSMISIVIDAD, ABSORTIVIDAD Y REFLECTIVIDAD EN MATERIALES SEMITRANSSPARENTES. FUENTE: CENGEL, Y, 2011 [90].	47
FIGURA 17. INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN EN UN MEDIO TRANSPARENTE. FUENTE. BECKMAN, A. 2013 [91].	48
FIGURA 18 CINTURÓN SOLAR GEOGRÁFICO ENTRE LAS LATITUDES 40 N° Y 40°S. FUENTE: ENGIMIA, 2018 [93].	51
FIGURA 19. PROMEDIO DEL CICLO DIARIO DE LA RADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL GIH INCIDENTE PARA CADA HORA Y MES. FUENTE: EXPLORADOR SOLAR, 2020 [98].	56
FIGURA 20. RADIACIÓN SOLAR GLOBAL HORIZONTAL INCIDENTE PARA EL ÁREA DE ESTUDIO ENTRE ENERO Y JUNIO. FUENTE: EXPLORADOR SOLAR, 2020 [98].	57
FIGURA 21. RADIACIÓN SOLAR GLOBAL HORIZONTAL INCIDENTE ÁREA DE ESTUDIO ENTRE JULIO Y DICIEMBRE. FUENTE: EXPLORADOR SOLAR, 2020 [98].	57

FIGURA 22. PROMEDIO DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL HORIZONTAL GHI INCIDENTE EN EL ÁREA DE ESTUDIO. FUENTE: EXPLORADOR SOLAR, 2020 [98].	58
FIGURA 23. PROMEDIO DEL CICLO DIARIO DE LA TEMPERATURA (C°) EN LA CIUDAD DE ARICA PARA CADA HORA Y MES. FUENTE: EXPLORADOR SOLAR, 2020 [98].	59
FIGURA 24. TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL ENERO A JUNIO ARICA-PARINACOTA. FUENTE: EXPLORADOR SOLAR, 2020 [98]	60
FIGURA 25. TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL JULIO A DICIEMBRE ARICA-PARINACOTA. FUENTE: EXPLORADOR SOLAR, 2020 [98].	60
FIGURA 26. TEMPERATURA PROMEDIO MENSUAL ÁREA DE ESTUDIO ARICA-PARINACOTA. FUENTE: EXPLORADOR SOLAR, 2020 [98].	62
FIGURA 27. DIMENSIONES RADIÓMETROS KIPP&ZONEN SUB-UVA. FUENTE: KIPP&ZONEN INSTRUCCIÓN DATA.	66
FIGURA 28. HOJA DE DATOS SMART EXPLORER. FUENTE: KIPP&ZONEN MANUAL OPERATION.	66
FIGURA 29. DISPOSICIÓN GENERAL DEL LUGAR GEOGRÁFICO DONDE SE DEBE EMPLAZAR LA INVESTIGACIÓN FUENTE: GOOGLE MAPS.	67
FIGURA 30. VISTA ISOMÉTRICA ESTRUCTURA SOPORTE N°1. FUENTE: PERSONAL.	69
FIGURA 31. VISTA ISOMÉTRICA ESTRUCTURA SOPORTE N°2.FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	70
FIGURA 32. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ELEMENTOS FINITOS POR TENSIÓN ADMISIBLE. FUENTE: PERSONAL.	75
FIGURA 33. DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS SOBRE ESTRUCTURA SOPORTE MEDIANTE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS. FUENTE: PERSONAL.	76
FIGURA 34. VISTA FRONTAL ILUSTRATIVA MATERIAL DE ENSAYO PARA MONTAJE DE ESTRUCTURA SOPORTE. FUENTE: PERSONAL.	77
FIGURA 35. VISTA ISOMÉTRICA MONTAJE DEL MATERIAL DE ENSAYO Y PLACAS DE SUJECIÓN EN ESTRUCTURA SOPORTE. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	78
FIGURA 36. VISTA ISOMÉTRICA MONTAJE DE LOS PERNOS DE SUJECIÓN Y CONFIGURACIÓN FINAL DE LA ESTRUCTURA SOPORTE. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	78
FIGURA 37 . DISTANCIA ENTRE LOS EQUIPOS RD01 Y RD02. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	79
FIGURA 38. COMPORTAMIENTO DE LA TRANSMISIVIDAD VIDRIO BOROSILICATO. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	90
FIGURA 39. COMPORTAMIENTO DE LA ABSORTIVIDAD VIDRIO BOROSILICATO. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	91
FIGURA 40. COMPORTAMIENTO DE LA REFLECTIVIDAD VIDRIO BOROSILICATO. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL	93
FIGURA 41. COMPORTAMIENTO TÉRMICO EQUIPO RT01 MES DE ENERO. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	104
FIGURA 42. RESUMEN GRÁFICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA PARA EL MES DE FEBRERO EN EL EQUIPO RT01. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	106
FIGURA 43. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA PARA EL MES DE JULIO EN EL EQUIPO RT01. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	107
FIGURA 44. RESUMEN GRÁFICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA PARA EL MES DE ENERO EN EL EQUIPO RT02. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.	116

FIGURA 45. RESUMEN GRÁFICO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO PARA EL MES DE FEBRERO EN EL EQUIPO RT02. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ..	118
FIGURA 46. RESUMEN GRÁFICO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO PARA EL MES DE JULIO EN EL EQUIPO RT02. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	119
FIGURA 47. VISTA ISOMÉTRICA DEL FOTORREACTOR TIPO RACEWAY POND PERTENECIENTE AL LIMZA. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	121
FIGURA 48. ACOPLER PARA SUJECIÓN EN PRUEBA DE RECUBRIMIENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	122
FIGURA 49. PIEZA SUPERIOR DE PARA ACOPLER DE SUJECIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	122
FIGURA 50. VISTA LATERAL EQUIPO RD01. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ..	123
FIGURA 51. VISTA LATERAL EQUIPO RD02. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ..	123
FIGURA 52. DIMENSIONES PRINCIPALES PIEZA DE SUJECIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	123
FIGURA 53. VISTA PLANTA DE LAS DIMENSIONES EN LOS ARCOS DE LA DE CIRCUNFERENCIA EN EL FOTORREACTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	124
FIGURA 54. DIMENSIONES GENERALES DE LA PIEZA DE SUJECIÓN SUPERIOR E INFERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	125
FIGURA 55. DIMENSIONES GENERALES PIEZA DE SUJECIÓN LATERAL. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	126
FIGURA 56. RESUMEN ANÁLISIS DE TENSIONES ADMISIBLES POR ELEMENTOS FINITOS PARA LAS PIEZAS DE APOYO PROPUESTAS. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	128
FIGURA 57. RESUMEN DEL ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS POR ELEMENTOS FINITOS PARA LA PIEZA DE APOYO. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	128
FIGURA 58. VISTA PLANTA DE LAS PIEZAS ACOPLADAS AL FOTORREACTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	130
FIGURA 59. VISTA PLANTA DETALLES GENERALES Y DIMENSIONES EN FOTORREACTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	131
FIGURA 60. VISTA PLANTA DIMENSIONES GENERALES PLACA RÍGIDA DE ENSAYO. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	132
FIGURA 61. VISTA ISOMÉTRICA FOTORREACTOR PARA MONTAJE DE MATERIAL DE ENSAYO RÍGIDO. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	133
FIGURA 62. VISTA ISOMÉTRICA MONTAJE DE LAS PLACAS DE APRIETE EN EL FOTORREACTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	133
FIGURA 63. VISTA ISOMÉTRICA MONTAJE DE PERNOS DE SUJECIÓN EN FOTORREACTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	134
FIGURA 64. VISTA ISOMÉTRICA FINAL DEL EQUIPO RECUBIERTO A TOPE CON UNA PLACA TRANSPARENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	134
FIGURA 65. VISTA PLANTA MONTAJE DE PIEZA CENTRAL DE SOPORTE PARA MATERIALES FLEXIBLES DE ENSAYO. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	135
FIGURA 66. VISTA PLANTA DIMENSIONES GENERALES MATERIAL DE ENSAYO FLEXIBLE. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	136
FIGURA 67. VISTA ISOMÉTRICA MONTAJE Y POSICIONAMIENTO MATERIAL FLEXIBLE EN EL FOTORREACTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ..	137
FIGURA 68. VISTA ISOMÉTRICA POSICIONAMIENTO Y MONTAJE DE PLACAS DE APRIETE MATERIAL DE ENSAYO FLEXIBLE. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	137

<b>FIGURA 69. VISTA ISOMÉTRICA MONTAJE Y POSICIONAMIENTO DE PERNOS DE APRIETE PARA MATERIAL DE ENSAYO FLEXIBLE. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.....</b>	<b>138</b>
<b>FIGURA 70. VISTA ISOMÉTRICA FOTORREACTOR TAPADO CON UN MATERIAL DE ENSAYO FLEXIBLE. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL.....</b>	<b>138</b>

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1. MÉTODOS DE ELIMINACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS EN AGUAS RESIDUALES. ....	5
TABLA 2. OPERACIONES UNITARIAS PARA EL TRATAMIENTO DE MATERIAL EN SUSPENSIÓN EN AGUAS RESIDUALES.....	6
TABLA 3. OPERACIONES UNITARIAS PARA EL TRATAMIENTO DE MATERIAL EN COLOIDAL O DISUELTO EN AGUAS RESIDUALES.....	7
TABLA 4. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN. ....	11
TABLA 5. DIMENSIONES FINALES DE DISEÑO DE DOS TIPOS DE FOTORREACTORES TIPO “RACEWAY POND”, PERTENECIENTES AL LIMZA.	27
TABLA 6. CONFIGURACIÓN FLUIDO-DINÁMICA DE TRES FOTORREACTORES “RACEWAY POND” LIMZA. ....	28
TABLA 7. DIMENSIONES BRUTAS PARA EQUIPOS FOTORREACTORES RACEWAY LIMZA.....	29
TABLA 8. CAMBIO DE VARIABLE EN ECUACIONES DE BALANCE COMO MÉTODO DE SIMPLIFICAR CÁLCULOS MATEMÁTICOS.....	38
TABLA 9"CONDUCTIVIDAD TÉRMICA MEDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR FOTORREACTOR .....	44
TABLA 10 RESULTADOS ESTACIÓN RADIOMÉTRICA UNIVERSIDAD DE TARAPACÁ. ....	52
TABLA 11 RESULTADOS ESTACIÓN RADIOMÉTRICA QUIBORAX.....	53
TABLA 12 "RESULTADOS ESTACIÓN RADIOMÉTRICA LAS REJAS. ....	54
TABLA 13. PROMEDIO RADIACIÓN SOLAR GLOBAL INCIDENTE EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	58
TABLA 14. PROMEDIO DE TEMPERATURA AMBIENTAL EN EL ÁREA GEOGRÁFICA DE INTERÉS. ....	61
TABLA 15. INFORMACIÓN TÉCNICA RADIÓMETROS SUB-A KIPP&ZONEN.....	65
TABLA 16. LISTADO DE COMPONENTES ESTRUCTURA SOPORTE.....	70
TABLA 17. COMPARACIÓN GENERAL ENTRE LOS DIFERENTES POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS MÁS EMPLEADOS EN EL DISEÑO POR IMPRESIÓN 3D. ..	72
TABLA 18. DIMENSIONES GENERALES PARA EL MATERIAL DE ENSAYO ADECUADO A LA ESTRUCTURA SOPORTE. ....	77
TABLA 19. CASOS PARA ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO PARA MATERIALES DE ENSAYO. ....	84
TABLA 20. MATERIALES SEMI TRANSPARENTES CANDIDATOS PARA RECUBRIR LOS EQUIPOS FOTORREACTORES TIPO RACEWAY.....	87
TABLA 21. RESULTADO DEL CÁLCULO DE LA TRANSMISIVIDAD PARA EL VIDRIO BOROSILICATO PAR ÁNGULOS DE INCIDENCIA DE 0° A 90°. ....	89
TABLA 22. RESUMEN DE LA ABSORTIVIDAD EN EL VIDRIO BOROSILICATO PARA ÁNGULOS INCIDENTE DE 0° A 90°. ....	90
TABLA 23. RESUMEN DE CÁLCULO DE LA REFLECTIVIDAD VIDRIO BOROSILICATO PARA ÁNGULOS DE INCIDENCIA DE 0° A 90°. ....	92
TABLA 24. EMISIVIDAD MATERIALES EQUIPO FOTORREACTOR RACEWAY. ....	93
TABLA 25. RESUMEN DE VARIABLES VIDRIO BOROSILICATO PARA EL CALOR ACUMULADO EN EL SISTEMA. ....	95
TABLA 26. RESUMEN DE VARIABLES VIDRIO BOROSILICATO PARA EL CALOR ENTRANTE EN EL SISTEMA. ....	96
TABLA 27. RESUMEN DE VARIABLES VIDRIO BOROSILICATO PARA EL CALOR SALIENTE EN EL SISTEMA. ....	97
TABLA 28. RESUMEN DE VARIABLES EN EL FLUIDO PARA EL CALOR ACUMULADO EN EL SISTEMA. ....	98

TABLA 29. RESUMEN DE VARIABLES EN EL FLUIDO DE OPERACIÓN PARA EL CALOR ENTRANTE EN EL SISTEMA.....	99
TABLA 30. RESUMEN DE VARIABLES EN EL FLUIDO DE OPERACIÓN PARA LA ENERGÍA SALIENTE DEL SISTEMA. ....	101
TABLA 31. CAMBIO DE VARIABLE PARA LAS CONSTANTES PARA EL EQUIPO RT01 EN EL MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR. ....	102
TABLA 32. RESUMEN DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN EL EQUIPO RT01 PARA EL MES DE ENERO. ....	103
TABLA 33. RESUMEN DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN EL EQUIPO RT01 PARA EL MES DE FEBRERO.....	105
TABLA 34. RESUMEN DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA PARA EL MES DE JULIO EN EL EQUIPO RT01.....	107
TABLA 35. RESUMEN DE VARIABLES VIDRIO BOROSILICATO PARA EL CALOR ACUMULADO EN EL SISTEMA. ....	108
TABLA 36. RESUMEN DE VARIABLES VIDRIO BOROSILICATO PARA EL CALOR ENTRANTE EN EL SISTEMA. ....	109
TABLA 37. RESUMEN DE VARIABLES VIDRIO BOROSILICATO PARA EL CALOR SALIENTE EN EL SISTEMA. ....	109
TABLA 38. RESUMEN DE VARIABLES EN EL FLUIDO PARA EL CALOR ACUMULADO EN EL SISTEMA. ....	111
TABLA 39. RESUMEN DE VARIABLES EN EL FLUIDO DE OPERACIÓN PARA EL CALOR ENTRANTE EN EL SISTEMA.....	111
TABLA 40. RESUMEN DE VARIABLES EN EL FLUIDO DE OPERACIÓN PARA LA ENERGÍA SALIENTE DEL SISTEMA. ....	112
TABLA 41. CAMBIO DE VARIABLE PARA LAS CONSTANTES PARA EL EQUIPO RT02 EN EL MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR. ....	114
TABLA 42. RESUMEN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO MES DE ENERO PARA EL EQUIPO RT02.....	116
TABLA 43. RESUMEN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO PARA EL MES DE FEBRERO EN EL EQUIPO RT02.....	117
TABLA 44. RESUMEN COMPORTAMIENTO TÉRMICO PARA EL MES DE JULIO EN EL EQUIPO RT02. ....	119
TABLA 45. RESUMEN DIMENSIONES GENERALES PIEZA SOPORTE. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	124
TABLA 46. RESUMEN DIMENSIONES GENERALES PIEZA DE APOYO SUPERIOR E INFERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	125
TABLA 47. RESUMEN GENERAL DIMENSIONES PLACA DE SOPORTE LATERAL MATERIAL FLEXIBLE. FUENTE: ELABORACIÓN PERSONAL. ....	126
TABLA 48. RESUMEN DE COMPONENTES DE ACOPLA PARA MATERIALES DE ENSAYO RÍGIDOS. ....	129
TABLA 49. RESUMEN COMPONENTES DE ACOPLA PARA MATERIALES FLEXIBLES.....	130
TABLA 50. RESUMEN Y DETALLE DE LAS DIMENSIONES DEL EQUIPO CON LAS PLACAS DE SUJECIÓN. ....	131
TABLA 51. DIMENSIONES GENERALES PARA UN MATERIAL DE ENSAYO RÍGIDO. FUENTE; ELABORACIÓN PERSONAL. ....	132
TABLA 52. RESUMEN DIMENSIONES GENERALES MATERIAL DE ENSAYO FLEXIBLE. ....	136
TABLA 53. RESUMEN DE LOS COSTOS FIJOS EN LA ADQUISICIÓN DE MATERIALES PARA LA ESTRUCTURA SOPORTE.....	139
TABLA 54. RESUMEN DE LOS COSTOS VARIABLES EN LA ADQUISICIÓN DE MATERIALES PARA LOS EQUIPOS FOTORREACTORES. ....	140

TABLA 55. COSTOS FIJOS DE ADQUISICIÓN DE MATERIAL PRIMA EN LA IMPRESIÓN DEL COMPONENTE PARA LA ESTRUCTURA SOPORTE. ....	141
TABLA 56. COSTOS DE ADQUISICIÓN EN COMPONENTES NECESARIOS PARA ANCLAR EL MATERIAL DE RECUBRIMIENTO A LA ESTRUCTURA SOPORTE. ....	141
TABLA 57. COSTOS FIJOS DE ADQUISICIÓN DE MATERIAL PRIMA EN LA IMPRESIÓN DE COMPONENTES PARA LOS EQUIPOS FOTORREACTOR. ....	142
TABLA 58. COSTOS DE ADQUISICIÓN EN COMPONENTES NECESARIOS PARA ANCLAR EL MATERIAL DE RECUBRIMIENTO A AL EQUIPO FOTORREACTOR. ....	142
TABLA 59. RESUMEN TOTAL DE LOS COSTOS FIJOS DE INVERSIÓN PARA LA MATERIA PRIMA DE IMPRESIÓN 3D. ....	143
TABLA 60. RESUMEN DE TOTAL DE LOS COSTOS DE ADQUISICIÓN EN COMPONENTES MENORES COMO PERNOS, TUERCAS. ....	143
TABLA 61. RESUMEN DE TOTAL DE LOS COSTOS DE ADQUISICIÓN EN LOS MATERIALES SEMI TRASPARENTES DE PRUEBA. ....	144
TABLA 62. BALANCE FINAL PARA LOS COSTOS DE INVERSIÓN PARA EL PROYECTO DE RECUBRIMIENTO EN EQUIPOS FOTORREACTORES. ....	144
TABLA 63. RESUMEN DE LOS COSTOS VARIABLES DE ADQUISICIÓN EN LOS MATERIALES DE RECUBRIMIENTO PARA LOS EQUIPOS FOTORREACTOR. ....	145
TABLA 64. BALANCE FINAL DE LOS COSTOS DE ADQUISICIÓN E IMPLANTACIÓN PARA CUBRIR LOS EQUIPOS FOTORREACTOR "RACEWAY POND" ....	145

## SIMBOLOGÍA

$Q_{acum}$	=	Energía acumulada fluido[W]
$Q_g/_{acum}$	=	Energía acumulada en el material semi transparente [W]
$Q_{in}$	=	Energía entrante fluido[W]
$Q_g/_{in}$	=	Energía entrante en el material semi transparente [W]
$Q_{out}$	=	Energía saliente fluido[W]
$Q_g/_{out}$	=	Energía saliente material semi transparente [W]
$m_s$	=	Masa fluido [kg]
$C_{ps}$	=	Capacidad calorífica fluido [J/kg K]
$C_{ps}$	=	Capacidad calorífica material semi transparente [J/kg K]
$G$	=	Irradiancia global horizontal [W/m <sup>2</sup> ]
$A_s$	=	Área superficial fluido [m <sup>2</sup> ]
$A_g$	=	Área superficial material semi transparente [m <sup>2</sup> ]
$\alpha_g$	=	Absortividad material semi transparente [--]
$q_{con}$	=	Convección térmica fluido [W]
$q_g/_{con}$	=	Convección térmica material semi transparente [W]
$q_{rad}$	=	Radiación térmica fluido [W]
$q_g/_{rad}$	=	Radiación térmica material semi transparente [W]
$q_{evp}$	=	Evaporación térmica fluido [W]
$h_{s/amb}$	=	Coef. de transferencia de calor fluido-ambiente [W/m <sup>2</sup> K]
$h_{g/s}$	=	Coef. de transferencia de calor material semi transparente-fluido [W/m <sup>2</sup> K]
$h_{evp}$	=	Coef. Intercambio térmico por evaporación [W/m <sup>2</sup> Pa]
$T_s$	=	Temperatura fluido [°C]
$T_g$	=	Temperatura material semi transparente [°C]
$H_s$	=	Altura de operación fluido [m]
$e_g$	=	Espesor material semi transparente [m]
$\rho_s$	=	Densidad fluido [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_g$	=	Densidad material semi transparente [kg/m <sup>3</sup> ]
$T_{amb}$	=	Temperatura ambiente [°C]
$\varepsilon_s$	=	Emisividad fluido [--]
$\varepsilon_g$	=	Emisividad material semi transparente [--]
$\sigma$	=	Cte. Stefan-Boltzmann []
$T_{sky}$	=	Temperatura del cielo [K]
$p'_{amb}$	=	Presión de saturación líquido ambiente [Pa]
$\tau_g$	=	Transmisividad material semi transparente [--]
$\bar{\tau}_g$	=	Transmisividad promedio material semi transparente [--]
$\bar{\alpha}_g$	=	Absortividad promedio material semi transparente [--]
$\bar{\rho}_g$	=	Reflectividad promedio [--]
$\sigma_{adm}$	=	Esfuerzo Admisible de trabajo [kg/cm <sup>2</sup> ]

## INTRODUCCIÓN

El agua es el motor del ecosistema, gracias a ella los recursos naturales enfrentan procesos físicos y químicos que rigen su evolución dentro de un medio [1]. Sin embargo, en los últimos años hemos enfrentado una escasez importante de este recurso hídrico. Principalmente por el uso indiscriminado de sus aguas por parte del creciente sector industrial no regulado, explotando este recurso sin aplicar debidos tratamientos para su mineralización y re utilización. Dentro de este sector productivo se encuentra la industria textil, la cual es responsable del 20% de las aguas residuales a nivel mundial junto con el 10% de las emisiones de carbono [2]. Esta industria se caracteriza por utilizar variedad de tintes y colorantes, en su mayoría altamente resistente a los procesos convencionales de tratamientos de aguas.

Existe procesos altamente oxidantes para descontaminar aguas difícilmente tratables por métodos convencionales. Estos procesos implican un costo alto en su energía de activación, los que los hace económicamente muy costosos. En los últimos años, se han utilizados combinaciones de procesos altamente oxidantes junto con el uso de energías renovables, como la radiación solar ultravioleta. Para llevar a cabo este proceso, se utilizan equipos especializados en captar la radiación ultravioleta y en mantener condiciones de temperatura ideales denominados fotorreactores, entre ellos el fotorreactor “raceway pond”.

Este fotorreactor es un tipo estanque poco profundo con canales por donde circula el reactivo impulsado por paletas hidráulicas. Dentro de los equipos fotorreactores, es considerado el más económico por su sencillo diseño, sin embargo, presentan un inconveniente sumamente importante al momento de operar, debido a que evaporan gases tóxicos al ambiente por su condición de estanque poco profundo abierto a la atmósfera.

Con la presente investigación, se plantean diferentes métodos experimentales y analíticos que permitan validar el recubrimiento de fotorreactores tipo “*raceway pond*” empleado en el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil bajo condiciones solares del desierto de atacama, manteniendo las condiciones de operación recomendadas.

## **OBJETIVOS**

Proponer metodologías que permitan estudiar, diseñar y validar un recubrimiento para dos equipos fotorreactores pilotos tipo “*raceway pond*” empleados en el tratamiento de aguas residuales tóxicas de la industria textil, teniendo en cuenta la factibilidad económica de las metodologías propuestas.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Proponer un modelo de transferencia de calor que permita evaluar las condiciones operacionales de temperatura en equipos fotorreactores “*raceway pond*” cubierto con materiales semi transparentes.
- Definir una metodología experimental que permita estudiar el comportamiento de la radiación ultravioleta a través de materiales semi transparentes en el ancho de banda de 315 a 400 nm a través de diferentes materiales semi transparentes.
- Estudiar el comportamiento de la temperatura dentro de los equipos fotorreactores “*raceway pond*” cubiertos bajo las condiciones ambientales de características de la zona geográfica de interés.
- Realizar un diseño que permita recubrir equipos fotorreactores “*raceway pond*” pertenecientes al Laboratorio de Investigaciones Medioambientales de Zonas Áridas.
- Estimar costos de implementación en el diseño del recubrimiento basado en las metodologías de investigación y operación.

## **1. CAPITULO I: MARCO TEÓRICO**

### **1.1. SISTEMAS DE DEPURACIÓN DE AGUAS**

La depuración de aguas residuales, consiste principalmente en sistemas que tienen como función descontaminar aguas tóxicas mediante procesos físico-químicos y biológicos. El fin de estas operaciones unitarias es conseguir mineralizar las aguas por completo, para así posteriormente ser devueltas a sus cauces naturales, o ser inyectadas nuevamente a las líneas de procesos.

Las aguas residuales se pueden dividir en dos grandes grupos: aguas residuales domésticas y aguas residuales industriales. Las metodologías de depuración dependen netamente de estos conceptos, ya que las aguas domésticas tienden a ser: aquellas procedentes de zonas de vivienda y de servicios urbanos, generadas principalmente por el metabolismo humano y actividades domésticas; mientras que las aguas industriales son aquellas vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial [3].

Para mineralizar las aguas residuales, se debe tener pleno conocimiento del contaminante a depurar, debido a que, no todos los desechos se caracterizan y comportan de la misma manera. Comprender el tipo de contaminante definirá si el residuo líquido puede ser tratado por métodos destructivos o no destructivos. Un método destructivo tiende a ser la separación química de los elementos contaminantes debido al carácter oxidable de la materia, que en su defecto no es la mineralización completa, sino en muchos casos, la transformación de los contaminantes en sustancias biodegradables [4]. Mientras que los métodos no destructivos, se concentra en descontaminar las aguas por micro organismos biológicos.

Tabla 1. Métodos de eliminación de compuestos orgánicos en aguas residuales.

<b>Métodos no Destructivos</b>	<b>Métodos Destructivos</b>
Adsorción [Carbón activo y otros absorbentes]	Tratamientos biológicos [aerobio y anaerobio]
Desorción [Stripping]	Oxidación química
Extracción en fase líquida con disolventes	Incineración
Tecnología de membrana [Ultrafiltración, nanofiltración]	Oxidación húmeda catalítica Oxidación húmeda supercrítica Procesos avanzados de oxidación

Fuente Elaboración personal.

Aplicar un método u otro, dependerá completamente de la concentración de los contaminantes y de su caudal, principal motivo por el que definir un sistema de depuración universal de aguas residuales resulta un poco complicado. Para entender los conceptos básicos en el tratamiento de aguas, se puede definir que los contaminantes se encuentran en su mayoría como materia en suspensión y material coloidal o disuelta.

### 1.1.1. MÉTODOS DE ELIMINACIÓN DE MATERIA EN SUSPENSIÓN

Las operaciones unitarias empleadas para estos tipos de contaminantes suelen ser las primeras en efectuarse, generalmente se realizan mediante operaciones mecánicas y en muchos casos se utilizan variedades de aditivos químicos. La materia en suspensión, se puede presentar en partículas con tamaños de varios centímetros con alta densidad de concentración, a coloides suspendidos de gran estabilidad y tamaños nanométricos. En la tabla N°2 se nombran las operaciones unitarias comunes en los tratamientos de materia en suspensión, basado en sus características como: tamaño, densidad, forma, concentración, etc.

Tabla 2. Operaciones unitarias para el tratamiento de material en suspensión en aguas residuales.

Operación Unitaria	Características
<b>Desbaste</b>	Se utiliza para eliminar partículas con densidades altas (mientras más alto el tamaño, se considera mejor el rendimiento). Suelen ser tratamientos previos y se caracterizan por ser equipos con rejas constituidas por barras metálicas de 6 o más milímetros.
<b>Sedimentación</b>	Proceso que utiliza la decantación de materia en las concentraciones de las aguas a tratar. Suelen ser acompañadas de un tratamiento de floculación-coagulación para aumentar la densidad de la materia disuelta y así ayudar en la decantación. La materia final se sedimenta en forma de fangos que posteriormente son eliminados.
<b>Filtración</b>	Las aguas a tratar fluyen a través de medios porosos que retienen la materia en suspensión. Se suelen utilizar tierras de diatomeas para filtrar partículas de diferentes tamaños.
<b>Flotación</b>	Genera burbujas de gas que elevan la materia suspendida en el agua a tratar. Generalmente esta debe tener una densidad menor o igual al agua para ser arrastrada por las burbujas, para luego ser eliminada mediante su rebalse en equipos denominados reactores.
<b>Floculación - Coagulación</b>	En su gran mayoría se utiliza para partículas con tamaños de $10^{-6}$ a $10^{-9}$ m. Su proceso consiste en separar suspensiones estables de materia, se utilizan reactivos químicos y es el proceso más utilizado para depurar agua, debido a que interactúa entre coloides y sedimentos.

Fuente: Elaboración personal.

### 1.1.2. MÉTODO DE ELIMINACIÓN DE MATERIA COLOIDAL O DISUELTA

La materia coloidal tiene características y concentraciones muy diversas, presentándose en grandes cantidades de sales inorgánicas disueltas como las salmueras; materias orgánicas biodegradables, como desechos de la industria alimenticia; hasta pequeñas cantidades de metales pesados y pesticidas orgánicos de carácter peligroso [5]. En la tabla N°3 se nombran las operaciones unitarias características para tratar este tipo de contaminantes, en función de su tamaño, densidad y concentración.

*Tabla 3. Operaciones unitarias para el tratamiento de material en coloidal o disuelto en aguas residuales.*

<b>Operación Unitaria</b>	<b>Características</b>
<b>Precipitación</b>	Se utiliza para eliminar sustancias de difícil tratamiento, adicionando reactivos para caracterizarlas y de esa manera lograr su separación. Se presenta en la formación de sales insolubles que, posteriormente son tratadas por métodos de sedimentación o filtración.
<b>Electroquímico</b>	Método que emplea corrientes eléctricas a través de un líquido que contiene un electrolito, provocando reacciones de óxido y reducción. Este proceso elimina en su mayoría los reactivos químicos y fangos activos, con la desventaja que su costo en energía eléctrica es sumamente elevado.
<b>Intercambio Iónico</b>	Al igual que el método de filtración, éste utiliza resinas naturales y artificiales para retener los iones que se presentan en las aguas contaminadas. Generalmente se utiliza para eliminar sales de baja concentración.
<b>Adsorción</b>	Método que utiliza principalmente la captación de sustancias solubles en la superficie de los sólidos contenidos en las aguas contaminadas, es considerada un post tratamiento biológico y se considera un proceso de refinado. Utiliza principalmente carbón activo.
<b>Desinfección</b>	Método utilizado para destruir o inactivar los microorganismos que causan enfermedades. Principalmente se utiliza cloruros de diferentes tipos para neutralizar agentes bacterianos patógenos.

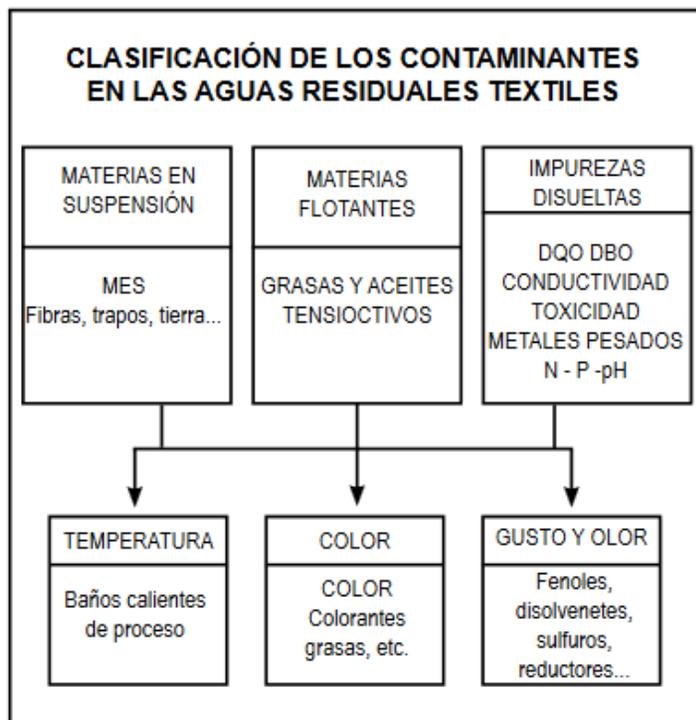
*Fuente: Elaboración personal.*

## **1.2. AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL**

El sector textil forma parte de una cadena productiva encargada de transformar fibras naturales reales y sintéticas en variedades de productos terminados. Dentro de sus actividades está el tratamiento de materias primas como: el lavado, acondicionado e hilado de fibras; fabricación de tejidos y el acabado de tejidos, donde se trabaja con la fabricación y coloración de diferentes prendas como producto terminado [6].

Estas operaciones unitarias, demandan una gran cantidad de agua y productos químicos auxiliares, diariamente la industria textil descarga grandes volúmenes de

aguas residuales. El agua empleada depende del proceso y equipamiento de cada planta, utilizando una amplia variedad de tintes, incluidos ácidos, bases, sales, agentes humedecedores y otros acabados auxiliares [7], por tanto, si se quiere clasificar los contaminantes de las aguas residuales, estos pueden contener cualquiera de estos compuestos o todos ellos a la vez.



*Figura 1. Clasificación de los contaminantes en las aguas residuales textiles. Fuente: Tinoco, O. 2011 [7].*

Cada planta utiliza entre 100 y 150 litros de agua por kilogramo de producto terminado y de 125 a 170 litros en el teñido con colorantes reactivos. Estos procesos dejan en las aguas residuales compuestos como: sales inorgánicas, almidón, peróxidos, EDTA, tensoactivos, enzimas, surfactantes, metales, compuestos orgánicos de variada estructura y colorantes. Estos últimos representan una fracción importante de los residuos textiles (alrededor de un 65%) [6] [8].

Algunas telas se producen con colorantes y pigmentos altamente contaminantes, debido a que, deben ofrecer gran durabilidad y resistir la degradación biológica. Por este motivo es que los métodos de depuración de aguas convencionales no tienen

un gran efecto sobre estos efluentes [9]. Los valores reportados para la demanda química de oxígeno (DQO) son alrededor de 900 a 5000 mg/L y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) con relaciones de biodegradabilidad (DBO<sub>5</sub>/DQO) son inferiores a 0,15 [10] [11]. Por lo tanto, su descarga a cuerpos de aguas sin el tratamiento adecuado, representan un riesgo en la calidad de los recursos hídricos.

La composición molecular de los colorantes en la actualidad es de estructura variada y compleja, la mayoría se considera de origen sintético, altamente resistente a la acción de agentes químicos y poco biodegradables. Alrededor del 65% de los colorantes en uso en la industria textil actual son colorantes reactivos, que se caracterizan por formar una unión éter con la fibra [12], garantizando una mayor duración del color en el tejido.

### **1.2.1. MÉTODOS DE DEPURACIÓN EN AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL**

Diferentes sistemas de tratamiento se han utilizado para la remoción de los colorantes de las aguas residuales textiles. Entre ellos, destacan los procesos fisicoquímicos tales como la ultrafiltración; adsorción y precipitación; intercambio iónico, además de tratamientos biológicos aerobios y anaerobios [13]. La combinación de tratamiento biológicos con la absorción resulta efectiva para la depuración de colorantes, pero generan altos volúmenes de lodos que deben tratarse posteriormente [14], principal razón para emplearlos como pretratamiento. Sin embargo, los tratamientos de remoción de los contaminantes remanentes, resulta en costos adicionales.

Los tratamientos alternativos que han sido objeto de estudio en las últimas décadas son los procesos avanzados de oxidación (PAO). Entre ellos destacan los procesos foto catalíticos homogéneos como el procesos Fenton (F) y foto-Fenton (FF),

demostrando que son altamente eficientes para la degradación de colorantes presentes en aguas residuales de la industria textil [15] [16].

### **1.2.2. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA**

Los procesos avanzados de oxidación se definen como: Aquellos procesos que implican la generación de radicales hidroxilos en cantidad suficiente para interaccionar con los compuestos orgánicos del medio [17]. Son una familia de métodos que aprovechan su elevada capacidad oxidante para degradar el medio contaminante y así conseguir una mineralización completa de las aguas tratadas, o la reducción de su nivel de toxicidad para posteriormente ser enviada a tratamientos terciarios. Dentro de sus usos, se pueden caracterizar los siguientes [18] [19]:

- Eliminar compuestos biorrecalcitrantes y tóxicos
- Aumentar la biodegradabilidad del agua residual antes de aplicar tratamientos biológicos convencionales
- Eliminar la toxicidad de las aguas residuales
- Desinfectar el agua como método alternativo a la cloración

En las últimas décadas estos procesos han ido tomando protagonismo como alternativas eficientes para el tratamiento de aguas tóxicas y no biodegradable, incluyendo orgánicas, inorgánicas, metales y patógenos [20]. La oxidación avanzada compone varias tecnologías basadas en la generación de radicales hidroxilos, estos radicales tienen un alto potencial redox (2,9 eV) y son capaces de destruir y mineralizar componentes altamente estables [21] [22].

Los radicales hidroxilos son generados in situ cuando se combinan varios agentes oxidantes como el ozono, peróxido de hidrógeno, radiación ultravioleta y sales ferrosas [23]. En la tabla N°4 se clasifican los procesos de oxidación avanzada según el aporte energético que requieran.

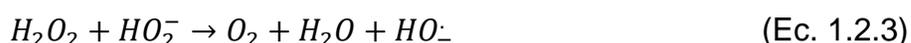
Tabla 4. Clasificación de los procesos avanzados de oxidación.

Procesos Avanzados de Oxidación		
Sin aporte externo de energía	Ozonización en Medio Alcalino	
	Ozonización con Peróxido de Hidrógeno	
	Peróxido de Hidrógeno y Catalizador	
Con aporte externo de energía	Energía Procedente de la Radiación Ultravioleta	Ozonización y Radiación Ultravioleta
		Peróxido de Hidrógeno y Radiación Ultravioleta
		Ozono, Peróxido de Hidrógeno y Radiación Ultravioleta
		Foto-Fenton
	Energía Procedente del Ultrasonido	Ozonización y Ultrasonido
		Peróxido de Hidrógeno y Ultrasonidos
	Electroquímica	Oxidación Electroquímica
		Oxidación Anódica
		Electro-Fenton

Fuente: Rodríguez, A. 2006 [24]

### 1.2.2.1. OXIDACIÓN AVANZADA MEDIANTE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO Y CATALIZADOR (FENTON)

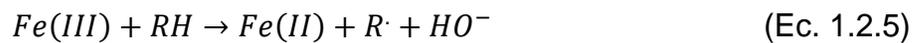
Este proceso se caracteriza por la interacción del hidrógeno y las sales de hierro y es conocido como como proceso Fenton, llamada así por su descubridor en 1894, H.J.H. Fenton [25]. Este proceso se basa en un sistema catalítico homogéneo donde las sales de hierro, habitualmente de  $FeSO_4$  generan radicales hidroxilos cuando interactúan con el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), el mecanismo es el siguiente:



La interacción con la forma reducida del hierro genera en última instancia radicales hidroxilos.



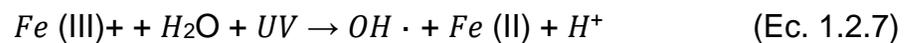
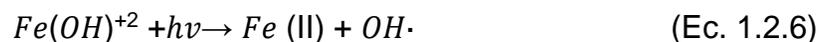
La regeneración de la forma reducida se produce normalmente mediante la intervención de un compuesto orgánico del medio.



En presencia del peróxido, las especies formadas de hierro Fe (II) y hierro Fe (III) generan radicales hidroxilos OH $\cdot$  adicionales, produciendo una oxidación acelerada de las especies orgánicas y, debido a esto, la mayoría de contaminantes orgánicos experimentan una mineralización completa [26].

### 1.2.2.2. PROCESO FOTO-FENTON

Este proceso ocurre cuando los iones de hierro Fe (III) y el peróxido de hidrógeno H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se exponen a la radiación ultravioleta en el ancho de banda de 315 a 400 nm. El peróxido es descompuesto por la actividad foto-catalítica de las sales de hierro, que lleva a la regeneración de los radicales hidroxilos y iones de sales Fe (II).



La luz ultravioleta visible, provoca en el proceso Fenton una aceleración considerable y no genera subproductos como su par no foto-catalítico (Fenton convencional). El foto-Fenton se ha utilizado para oxidar tintes, productos farmacéuticos y herbicidas, además de contaminantes biológicos, incluidos virus y bacterias [27] [28]. El principal desafío de este proceso es mineralizar aguas residuales evitando variar el pH junto con la precipitación del hierro, ya que la efectividad máxima se produce a un pH 3, pero los costos operacionales asociados a la acidificación y posterior neutralización de grandes volúmenes de aguas son considerablemente altos, además de mantener un ambiente estable con una

temperatura de operación no superior a los 50°C, debido a que no se produce la regeneración de hierro Fe (II) en el medio [29].

### 1.3. FOTORREACTORES EMPLEADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los procesos de oxidación avanzada que utiliza la fotocatalisis homogénea (Fenton y foto-Fenton), requieren equipos especialmente diseñados para producir el medio necesario de descontaminación, estos equipos se denominan fotorreactores solares. Los fotorreactores solares, tienen como principal función captar fotones provenientes de la radiación solar (ancho de banda de 315 a 400 nm) y ponerlos a disposición de la solución de reactivo [30]. El modelo matemático principal que rige en un fotorreactor se representa de la siguiente manera.

$$E_{UV,n} = E_{UV,n-1} + \Delta t_n \overline{UV}_{G,n} \left( \frac{A}{V} \right) ; \Delta t_n = t_n - t_{n-1} \quad (\text{Ec. 1.3.1})$$

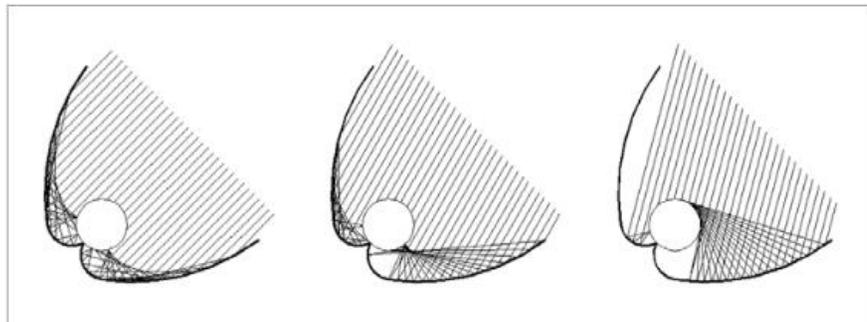
Donde  $E_{UV,n}$  representa la energía acumulada, por unidad de volumen de reactor, para una muestra n del proceso foto catalítico;  $\overline{UV}_{G,n}$  es la radiación medial útil incidente ( $W_{UV}/m^2$ ) sobre la superficie del reactor en el intervalo de tiempo  $\Delta t_n$ , este último representa el intervalo de tiempo entre dos muestras experimentales consecutivas; A la superficie exterior del reactor y V el volumen total del mismo [31].

Los fotorreactores semejan su diseño y operación de forma similar a los colectores solares, con la diferencia que dentro de su circuito no circula un fluido térmico, sino una solución de reactivo dispuesta a ser descontaminada. Se pueden clasificar en tres grandes grupos.

- Colector Cilindro Parabólico (PTC)
- Colectores no concentradores (NCC)
- Colectores parabólicos compuestos (CPC)

### 1.3.1. SISTEMA COLECTOR PARABÓLICO

Este tipo de reactor, consiste en una superficie parabólica reflectante que concentra la radiación solar en un reactor tubular transparente por el cual circula el reactivo. Se posicionan sobre una plataforma que se compone de dos motores controlado por un sistema de seguimiento de dos ejes, los cuales verifican el azimut y la elevación del colector [32]. El factor de concentración del colector es definido por el radio entre el área de apertura y el área de absorción, el área de apertura se define como el área que captan la radiación solar, mientras que el área de absorción se define como la zona que recibe la irradiancia solar. Para la fotocatalisis el factor de concentración se rige entre 5 a 35 soles [33] [34].



*Figura 2. Colector cilindro parabólico. Fuente: Blanco, J. 2005 [31].*

Los sistemas de concentración presentan la ventaja de poseer un área de tubo reactor notablemente menor, lo que significa un circuito más corto para concentrar el reactivo y de esta manera facilita su control. Permite de forma más práctica el uso de catalizadores y al tener un constante régimen turbulento, se evitan sedimentaciones y se produce una homogénea transferencia de masa. Además de no presentar evaporaciones de compuestos volátiles.

### 1.3.2. SISTEMA COLECTOR NO CONCENTRADO

Se caracterizan por ser mecanismos estáticos, por donde circula una película delgada de un flujo reactivo, el cual se somete a fotocatalisis [35]. Generalmente se

orientan hacia el Ecuador con una inclinación siempre influenciada por la latitud geográfica. Estos equipos son de menor costos de fabricación debido a su simplicidad geométrica y sus componentes relativamente sencillos. Esto reduce sustancialmente los costos asociados a gestión de activos en comparación con un equipo concentrado. Como la radiación solar no se concentra, el equipo puede funcionar de manera óptima con la radiación difusa incidente.

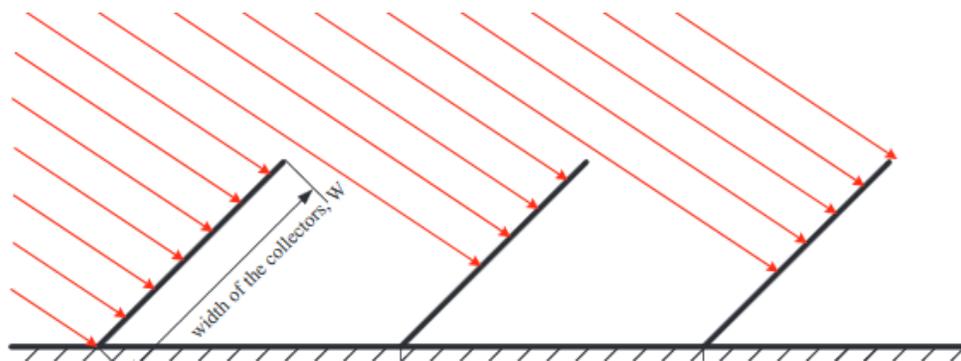


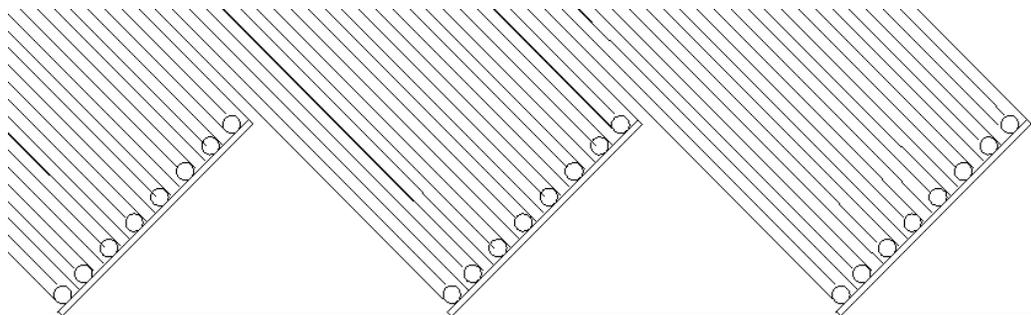
Figura 3. Sistema colector compuesto. Fuente: Jiyun, Q. 2017 [36].

La parte superior puede estar abierta a la atmósfera incrementando aún más la eficiencia de estos colectores, debido a que se disminuye las pérdidas de radiación absorbidas por la cubierta, eliminando la posibilidad de que un fotocatalizador suspendido forme una película opaca en su superficie interna [37] [38]. Sin embargo, al dejar estos equipos abiertos al medioambiente, se pueden producir evaporaciones de elementos químicos o aguas tóxicas perjudiciales para la salud pública.

Estos colectores presentan varias incertidumbres químicas y de resistencia, tanto por estar expuestos a la intemperie como a la radiación ultravioleta. Por lo demás, requieren una superficie captadora de fotones significativamente mayor que su par concentrador, lo que se traduce en una disminución de su eficiencia cuando este se escala a niveles industriales de mayor envergadura [39].

### 1.3.3. SISTEMA COLECTOR COMPUESTOS

Estos sistemas utilizan tubos de vacío por donde circula un flujo reactivo, principalmente combina el sistema de concentración de los sistemas cilindro parabólico, con los sistemas estáticos y planos de los colectores no concentrados. En resumidas palabras, captan mediante una superficie reflectante y estática la radiación ultravioleta [40]. Son diseñados para aprovechar la radiación solar directa como la difusa con una alta eficiencia, sin la necesidad de tener un sistema de seguimiento solar. Sus costos de construcción se consideran relativamente bajos y por su sencillez geométrica y la calidad de sus materiales, consideran costos de mantención relativamente bajos de igual manera. Estos equipos no vaporizan compuestos volátiles ya que se encuentran cubiertos y tampoco el sistema experimenta un sobrecalentamiento del fluido por la disposición aerodinámicas de los tubos colectores de concentrado.



*Figura 4. Sistema colector compuesto. Fuente: Elaboración personal.*

Un parámetro importante para el diseño de un colector compuesto, es el ángulo de aceptación, el cual delimita el rango angular dentro del cual, la incidencia de la radiación es interceptada por el tubo colector. El ángulo oscila entre 60 y 90 grados y permite al equipo captar de manera más eficiente la radiación ultravioleta al inclinarse en función del ángulo solar. Tiene una ventaja adicional de absorber errores tanto de la superficie reflectante como de alineamiento del tubo colector, esto reduce considerablemente costos asociados de operación y mantención [41].

#### 1.3.4. FOTORREACTOR TIPO RACEWAY POND

En los últimos años, existe una tendencia hacia el uso de sistemas de tratamientos más simples y de bajo costo, entre ellos se encuentra el fotorreactor tipo “*raceway pond*”. Este tipo de fotorreactor consiste en una superficie abierta compuesta por canales de baja profundidad, que se encuentran entre conectados por curvas tipo bucles. En estos canales circula un reactivo, el cual es transportado homogéneamente por un equipo hidráulico rotativo. Principalmente se caracterizan por tener un bajo costos de construcción (alrededor de 12 USD/m<sup>2</sup>) y un bajo consumo de energía de operación (alrededor 4 W/m<sup>3</sup>) [42]. Tienen una capacidad de depurar un 19% más de volumen de agua residual en comparación a un equipo CPCs (48 mg/h-m<sup>2</sup> vs 29 mg/h-m<sup>2</sup> considerando una concentración de 5,5 mg Fe/L a 150 mm de profundidad) [43].

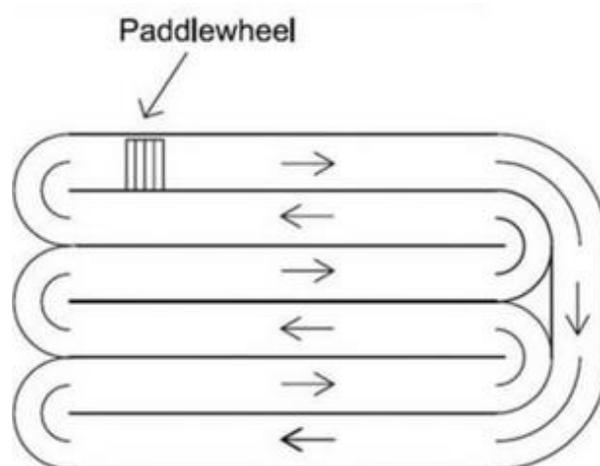


Figura 5. Vista superior de un reactor tipo *raceway*. Fuente: Rivas, G. 2017 [44]

Idealmente fueron diseñado para tratamientos avanzados de oxidación por foto catálisis, sin embargo, son altamente conocidos por ser utilizados en el cultivo de organismos para tratamientos biológicos, siendo el 95% total de todos los fotorreactores tipo “*raceway pond*” utilizados para el cultivo de microalgas en tratamiento de plantas depuradoras [45].

Las ventajas de este tipo de equipo, radica en su capacidad de tratar grandes volúmenes de agua por un bajo costo, sin mencionar que pueden ser reconfigurados con la cantidad de canales que se demanden [46]. Al momento de diseñar y poner en marcha un equipo “*raceway pond*” es necesario conocer ciertos conceptos hidráulicos que permitan una operación óptima del equipo.

#### **1.3.4.1. OPERCIÓN RACEWAY POND REACTOR**

El método de operación de estos sistemas obedece la mecánica de fluido de dos canales abiertos conectados entre sí por curvas y separados por una pared central, principal motivo del nombre “*raceway*” o pista de carreras. Estos equipos usualmente son poco profundos, con una altura de unos 120 a 140 mm. Esta configuración de altura tiende a aprovechar de mejor manera la radiación ultravioleta incidente en el área superficial del equipo [47].

En un reactor “*raceway pond*” particularmente se utiliza un flujo turbulento con una velocidad típica de operación de 0,15 a 0,4 m/s [48]. Esta velocidad de circulación garantiza una mezcla homogénea en todo el equipo, asegurando que la reacción foto-Fenton se produzca para la totalidad del reactivo (POA) y evitando la sedimentación de la materia y la generación de zonas de estancamiento (microalgas) [49].

El equipo puede ser dispuesto de manera superficial, como puede estar dispuesto bajo el nivel de piso. Puede ser construido de concreto, cemento, fibra de vidrio, aunque los más comunes son construidos con PVC impermeable. La elección del material depende de ciertos parámetros operaciones como: el tipo de microalga, el potencial tóxico del contaminante, tipo de tratamiento, concentración del contaminante y la resistencia del material a la degradación de elementos altamente abrasivos [50].

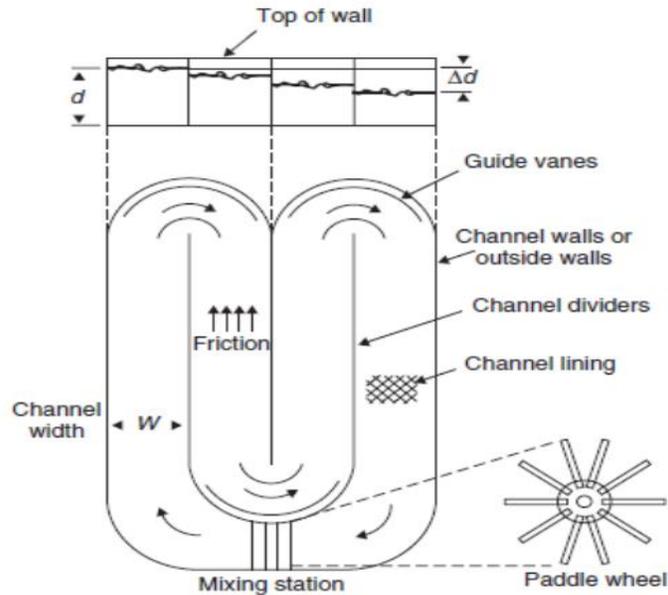


Figura 6. Configuración general de un fotorreactor tipo raceway. Fuente: Cajamar, A. 2016 [51].

La temperatura y la incidencia de luz son prácticamente imposibles de controlar en un estanque abierto, el motivo principal es que las variables dependen completamente de las condiciones ambientales del medio. Una zona con altas temperaturas, puede conducir a evaporaciones de elementos tóxicos y pérdida de  $\text{CO}_2$ , a su vez un lugar demasiado frío puede inhabilitar el crecimiento de la biomasa para el cultivo de microalgas, o inhibir la reacción foto-Fenton por la baja energía de activación en el sistema.

### 1.3.4.2. VARIABLES OPERACIONALES

#### 1.3.4.2.1. ZONAS DE ESTANCAMIENTO HIDRAULICO

Las zonas muertas generalmente se ven completamente influenciadas por la geometría del equipo y el grado de mezcla del mismo [52]. Se consideran consecuencia directa de una mezcla no homogénea, donde el fluido comienza a comportarse de manera propia, generando corrientes de circulación que interfiere unas con otras, no completando así el ciclo de transporte en los canales de operación. Consecuencia directa de este fenómeno, es la sedimentación en los

cultivos, al sedimentarse los cultivos la incidencia de la radiación se ve totalmente inhibida, produciendo la muerte de la biomasa o el cese de las reacciones altamente oxidantes [53].

Estos factores tienen un impacto negativo cuando el fotorreactor opera en sistemas continuos de depuración, se han realizado varios estudios para evitar esta característica hidrodinámica en los equipos, donde la mayoría atribuye este fenómeno a la velocidad del fluido de operación [54] [55]. Caracterizar un fluido en un canal es sumamente difícil, ya que no se conoce el comportamiento real de éste en el medio, sin embargo, mediante estudios de mecánica computacional o CFD por sus siglas en inglés, se han utilizado diferentes parámetros numéricos para evaluar el comportamiento hidrodinámico de la velocidad en equipos “*raceway pond*”, definiendo en la mayoría de éstos que la velocidad de operación siempre debe ser superior a 0,1 m/s. Otro parámetro crítico que se debe considerar es la relación largo y ancho de diseño (L/W), al incrementar el largo y el ancho operacional, aumenta el radio de operación que une los canales. Al aumentar el radio de operación decrece la sedimentación, las zonas de estancamiento y la circulación indebida del fluido, debido a que un aumento de la geometría genera más volumen para el desarrollo del fluido, impidiendo que este comience a tener comportamientos erráticos dentro del flujo en los canales [56].

Ramakant Pandey, propone una relación de largo y ancho de diseño (L/W) entre 6 a 7, con una profundidad de operación entre 50 a 80 mm y una velocidad de mezcla de 20 rpm como modelo de operación óptimo para evitar la sedimentación en equipos “*raceway pond*”. Este efecto de diseño, disminuye los volúmenes muertos en un 54,67% [57]. Sin embargo, Zhang [58] validó el beneficio de los deflectores de flujo curvos de alas posicionados en los extremos de las paredes de separación central, mediante propuestas de diseño, estudiadas con simulaciones numéricas e incluso con pruebas en condiciones ambientales reales. El resultado mostró que el

uso de deflectores laterales, mejora la concentración de biomasa en un 30,11% y a su vez, reduce los volúmenes muertos en un 60,42%. Finalmente, Zhang también concluyó que la implementación de tres deflectores semicirculares y una leve curva al final de la pared central de separación de los canales, conduce a la eliminación total de las zonas muertas [55].

#### **1.3.4.2.2. TENSIÓN DE CORTE HIDRÁULICO**

La tensión de corte, se define como la fuerza por unidad de superficie requerida para mantener una mezcla homogénea constante en la circulación de un fluido [59]. Tomando en cuenta la profundidad de operación, existen tres capas distintas para el desarrollo del flujo en canales abiertos, flujo alto, flujo medio y flujo bajo [60]. Esto puede ser explicado de mejor manera por la correlación entre la tensión de cortante hidráulico y la distribución en la magnitud de la mezcla en el flujo de operación, donde la velocidad del fluido se desarrolla de manera baja o nula en la capa inferior del equipo. Mientras que la zona superficial se encuentra la mayor magnitud de velocidad, generando un grado de incertidumbre en los estados de mezcla cuando no se tiene conocimiento del tipo de tensión de corte hidráulico.

Este efecto puede tener consecuencias negativas cuando la velocidad del flujo aumenta y disminuye de manera intermitente, debido a que no se tiene una correcta homogeneización del flujo de operación, creando zonas de estancamiento o zonas muertas sin incidencia de luz. La tensión de corte hidráulico viene completamente definida según la geometría del equipo, ya que canales angostos conllevan a un desarrollo de la velocidad más controlable y homogéneo en comparación a canales más anchos, sin embargo, a la fecha, aún no se ha encontrado una correlación concreta entre la tensión de cortante hidráulico, la incidencia de la luz y su impacto en las operaciones del equipo [61].

### 1.3.4.2.3. CONSUMO ELÉCTRICO

El consumo de energía se atribuye mayormente a la energía que se necesita para impulsar las paletas hidráulicas [62]. Existen dos estudios fundamentales que han investigado sobre la influencia de estos parámetros en el rendimiento eléctrico de un fotorreactor raceway [63] [64]. Uno de estos, es la optimización en el diseño de los fotorreactores raceway bajo el concepto de estabilización en sus sistemas de mezcla, principalmente atribuida a la tensión de corte, mientras que el otro se dirige principalmente al diseño del componente de las paletas hidráulicas.

El consumo eléctrico de las paletas hidráulicas contribuye aproximadamente un 23% del consumo total de energía eléctrica por parte del equipo. Usualmente, existen dos métodos para calcular consumo de energía en las paletas hidráulicas, uno de ellos es utilizar modelos numéricos para determinar la turbulencia mediante CFD y el segundo método es estimar el consumo de poder mediante métodos análogos como el coeficiente de Manning. El poder requerido por las paletas hidráulicas evidentemente depende de las propiedades hidráulicas del flujo en operación, como la disipación de la turbulencia y el nivel del líquido [65]. La energía demandada por las paletas hidráulicas disminuye cuando la profundidad de operación es baja, debido al menor desplazamiento de masa por unidad de volumen que debe realizar, o en términos físicos el trabajo requerido [66].

La mayoría de las pérdidas energéticas ocurren en las curvas de conexión de los canales en el equipo. Mejorar el diseño de las curvas de conexión reduce drásticamente el consumo de energía, las zonas de estancamiento y mejora considerablemente las condiciones de mezcla. El consumo eléctrico de las paletas hidráulicas también depende de la configuración de éstas, las paletas pueden encontrarse alineadas o intercaladas y su rendimiento se ve totalmente influenciado por estos parámetros de diseño.

Otro importante parámetro que influye en el comportamiento hidrodinámico del equipo y su demanda energética, es la relación del largo y ancho de diseño ( $L/W$ ), el consumo energético disminuye cuando se incrementa la relación largo y ancho de diseño ( $L/W$ ) [67], equipos largos con canales estrechos consumen menos energía para los mismos grados de mezclado. Reducir el poder de consumo de las paletas hidráulicas pueden incluso verse influenciado por los deflectores curvos [68], éstos proporcionan una mejor distribución de la velocidad del líquido en la curvatura del estanque, lo que previene sedimentación al final de la pared central y reduce sustancialmente la pérdida de energía cinética en el fluido y el comportamiento errático en él.

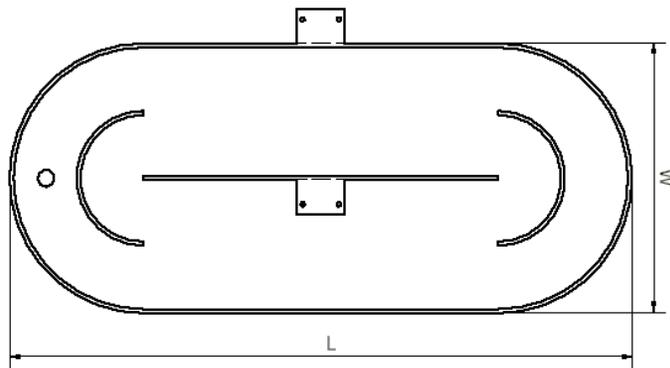
#### **1.3.4.3. PARÁMETROS DE DISEÑO**

Varios parámetros deben considerarse para optimizar un fotorreactor “*raceway pond*”, dentro de estos parámetros, están directamente relacionados la geometría del estanque, su velocidad, la profundidad de operación y la tensión de corte que producen las paletas hidráulicas. Sin embargo, estos estudios están limitados a reactores de baja escala y existe una incertidumbre sobre la influencia de éstos parámetros a escalas industriales. Un óptimo diseño para un fotorreactor tipo *raceway* ofrece una alta productividad y eficacia, junto con un consumo mínimo de energía y acompañado de un bajo costo de construcción [69].

##### **1.3.4.3.1. GEOMETRÍA DE DISEÑO**

Una elección óptima de la relación largo y ancho de diseño ( $L/W$ ) en el canal de operación, es esencial para un óptimo diseño de fotorreactor tipo “*raceway pond*”. Una selección óptima debe permitir que se favorezcan las condiciones hidrodinámicas: buena mezcla, minimización de zonas muertas y mezclas homogéneas con una baja tensión de corte, además de considerar un bajo consumo

de energía. Varios estudios han analizado el efecto de la geometría del estanque en el rendimiento de operación [70] [71]. El valor de la relación largo y ancho de diseño ( $L/W$ ) en el canal de operación, es una indicación importante para su comportamiento hidrodinámico [72]. Cuando esta relación es inferior a ocho, el estanque puede considerarse como un reactor bien mezclado, por el contrario, cuando la proporción es por encima de ocho se comporta como un reactor de flujo poco homogéneo.

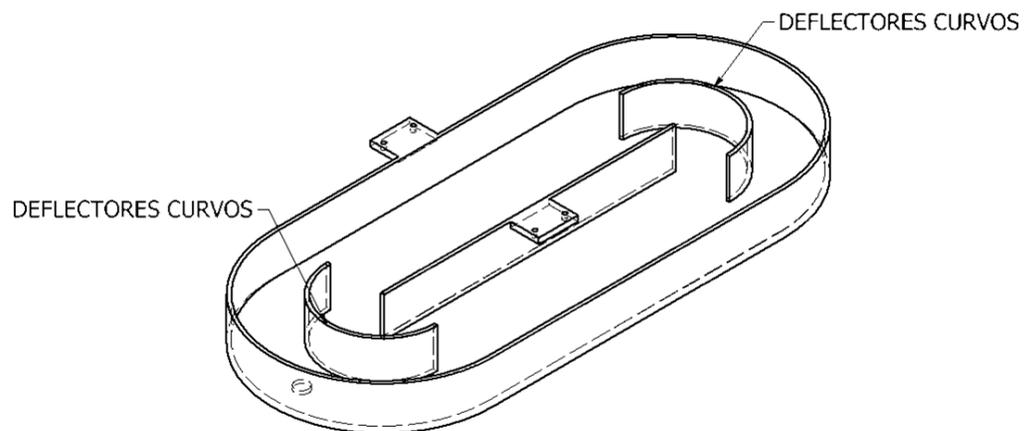


*Figura 7. Vista superior fotorreactor tipo raceway delimitados con cotas de operación y diseño. Fuente: Elaboración personal.*

#### **1.3.4.3.2. DEFLECTORES CURVOS DEL EQUIPO**

El objetivo principal de utilizar uno o varios deflectores de flujos curvos, es superar la zona de estancamiento de las aguas en las curvas circulares de conexión de los canales [73]. Una configuración óptima para el equipo, es diseñar deflectores semicirculares en los extremos de la pared central de división. Varios autores han investigado el impacto de la instalación del deflector en un fotorreactor “*raceway pond*”, basado en la productividad de las microalgas y en los procesos foto-Fenton, además de considerar las propiedades hidrodinámicas junto con las prestaciones del sistema de tratamiento y la energía de consumo [26,43,44]. Sus desventajas fundamentales, son el aumento de los esfuerzos de corte debido a los efectos de

fricción al reducir el área de diseño y consecuentemente aumentando la velocidad de flujo de manera bruta [43].



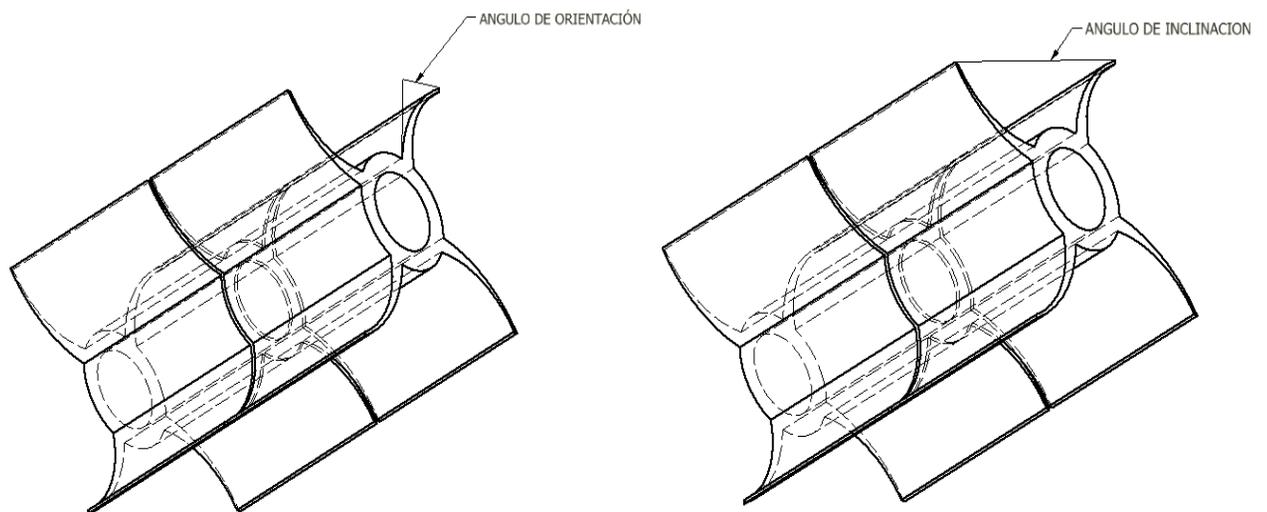
*Figura 8. Vista isométrica fotoreactor tipo raceway con demarcación de deflectores curvos. Fuente: Elaboración personal.*

Sin embargo, de manera contradictoria aumentar el número de deflectores en las curvas lleva a una uniformidad en la velocidad del líquido y a una disminución de la potencia requerida por las paletas hidráulicas [74]. Alargar la pared central también reduce el consumo eléctrico, de hecho, la reducción del ancho de los canales en la curvatura y el ajuste de las paletas hidráulicas en tamaño, conduce a un desarrollo óptimo y satisfactorio del fluido de operación en el equipo [43].

#### **1.3.4.3.3. EQUIPOS HIDRAULICO DE MEZCLA**

Los diseños más comunes para los equipos hidráulicos de mezcla, generalmente se componen por una rueda de paletas. La rueda de paletas es un sistema de agitación mecánica, acoplado a un conjunto motor-eléctrico. Los equipos son típicamente mezclados por una sola rueda de palas, generalmente de ocho palas hidráulicas compuestas por cuchillas planas [51]. La rueda de paletas es considerada el sistema más eficaz y barato en el movimiento interno del flujo en los canales [75]. A modo de optimización, estas paletas pueden diseñarse de varias maneras, tales como

cuchillas zigzags con ángulos rectos, curvadas hacia atrás, dobladas en cruz, curvadas hacia adelante, curvadas hacia atrás y dobladas para trabajar a contra flujo. Finalmente, las paletas pueden estar configuradas para estar alineadas o intercaladas. [76].



*Figura 9. Vista isométrica del ángulo de orientación e inclinación en paletas hidráulicas características de un fotorreactor tipo raceway. Fuente: Elaboración personal.*

#### **1.4. FOTORREACTOR RACEWAY LIMZA**

En las dependencias del Laboratorio de Investigaciones Medioambientales de Zonas Áridas (LIMZA), existen dos equipos tipo fotorreactor raceway construidos y diseñados bajo el marco de una investigación anterior por dos alumnos del Departamento de Ingeniería Mecánica (DIM) de la Universidad de Tarapacá, Arica. Estos equipos se diseñaron utilizando el criterio de un fotorreactor “*raceway pond*” de una pista, compuesta por dos canales con un par de deflectores angulares en sus costados. Su equipo de mezcla se compone por un equipo hidráulico de paletas alineadas. Entre sus diseños, se encuentran diferentes configuraciones geométricas y de operación según los requerimientos de la investigación [77].

### 1.4.1. CRITERIOS DE DISEÑO

El criterio de diseño para los equipos fotorreactores del LIMZA, se basa en una configuración geométrica se basa principalmente en un largo (L), ancho (W) y una altura de operación (h). Para diferenciar el tipo de configuración, se le asignará a cada equipo una etiqueta característica para diferenciarlos entre ellos. Los dos equipos deben configurarse con un largo (L) y un ancho (W) con las mismas medidas, sin embargo, un equipo debe ser configurado con una altura de operación (h) de 50 mm, mientras que el otro equipo debe tener una altura de operación (h) a 100 mm. Para la configuración con una altura de diseño de 50 mm se le asignará la denominación equipo de RT01 y para la configuración de altura de 100 mm, se le asignará la denominación de equipo RT02

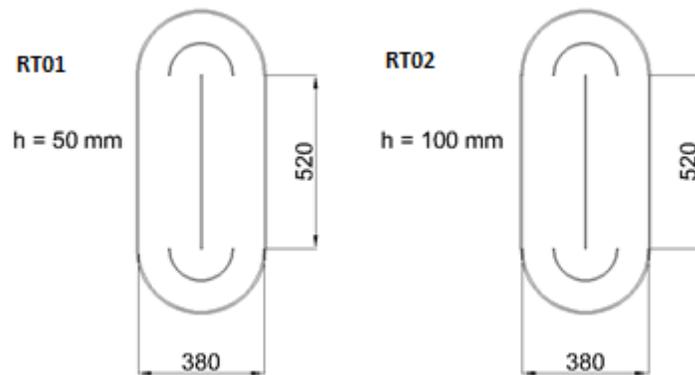


Figura 10. Vista superior de dos diferentes combinaciones geométricas para un reactor tipo “raceway pond”. Fuente: Vera, A. 2019 [78].

El motivo de la configuración geométrica fue principalmente para obtener un volumen de operación de 15 litros para el equipo RT01 y 34 litros para el equipo RT02.

Tabla 5. Dimensiones finales de diseño de dos tipos de fotorreactores tipo “raceway pond”, pertenecientes al LIMZA.

Equipo	Largo [l] [mm]	Ancho [w] [mm]	Profundidad [h] [mm]	Superficie [A] [cm <sup>2</sup> ]	Volumen [V] [cm <sup>3</sup> ]
RT01	520	380	50	3.110	15,551
RT02	520	380	100	3.110	31,101

Fuente: Vera, A. 2019 [78].

### 1.4.2. PARAMETROS HIDRAULICOS DE OPERACIÓN

Los equipos fotorreactores del LIMZA, deben operar con una velocidad de flujo de 0,3 m/s considerando además una temperatura promedio para el fluido de operación igual 20°C. Para caracterizar ciertos parámetros hidráulicos y por la difícil caracterización de los reactivos de operación, se utilizó agua como método de diseño. Bajo estos criterios, se establece el diámetro hidráulico de operación, el régimen de flujo según los criterios del número de Reynolds [79]; la pérdida de carga dentro del sistema y la potencia suministrada por las paletas hidráulicas conectadas a un motorreductor. La configuración utilizada por Vera y Lazo [77] se aprecia en la tabla N°6.

*Tabla 6. Configuración fluido-dinámica de tres fotorreactores “raceway pond” LIMZA.*

<b>Reactor</b>	<b>d<sub>h</sub> (cm)</b>	<b>Re</b>	<b>Δh<sub>f</sub> (cm)</b>	<b>Q (W)</b>
RT01	13,1	30.077	0,14	0,23215
RT02	19,5	44.730	0,08	0,27280

*Fuente. Elaboración personal.*

### 1.4.3. CONFIGURACIÓN FINAL EQUIPOS FOTORREACTOR

La configuración final de los equipos contempla entre sus diferencias geométricas una altura de operación de 50 mm, sin embargo, esta no representa la altura bruta de los equipos. Existe un espacio de 20 mm hacia el tope de ambos equipos y así mismo, no se considera el largo total real del fotorreactor. Es necesario mencionar que el espesor de las planchas de fibra de vidrio es de 6 mm. Las paletas hidráulicas están diseñadas con polímero termoestables de impresión térmica y consideran su posición al centro del canal de operación. En la figura N°11 se aprecia una vista isométrica del equipo según los parámetros definidos por Lazo, N. y Vera, A. [77]

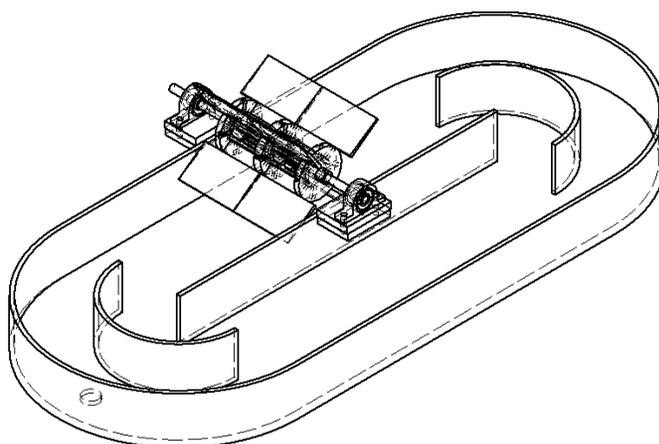


Figura 11. Configuración final equipo fotorreactor tipo raceway para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Fuente: Elaboración personal.

Para fenómenos de transporte (transferencia de energía y calor, transferencia de masa, fluido mecánica, etc.) es necesario conocer las dimensiones brutas de ambos equipos.

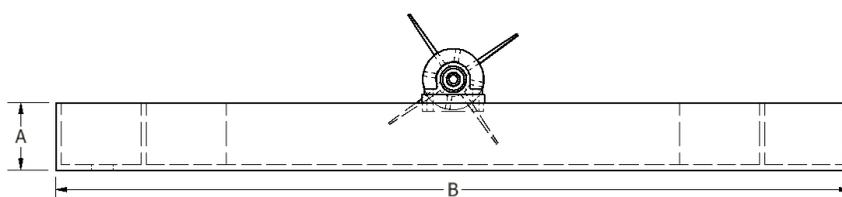


Figura 12. Configuración altura y largo definitivo para los equipos fotorreactores raceway. Fuente: Elaboración personal.

Tabla 7. Dimensiones brutas para equipos fotorreactores raceway LIMZA.

Equipo	Índice	Dimensiones [mm]
RT01	A	76
	B	916
RT02	A	126
	B	916

Fuente: Elaboración personal.

Al definir las dimensiones primitivas de los equipos RT01 y RT02, es posible realizar un modelo de transferencia de calor y energía en el sistema.

## 1.5. FUNDAMENTOS TÉRMICOS REACTOR RACEWAY

Construir o idealizar un modelo térmico para un fotorreactor tipo “*raceway pond*” involucra entender la literatura de la transferencia de calor por radiación solar térmica. Existen varios autores que han estudiado los modelos de balance térmico en fotorreactores [80] [81] [82], sin embargo, la literatura principalmente describe fotorreactores empleados para el cultivo de microalgas.

La transferencia de calor dentro de un fotorreactor tipo “*raceway pond*”, se puede interpretar como las gradientes de temperatura que experimenta un estanque poco profundo. Para estimar un modelo de transporte de calor y masa, es necesario comprender y definir algunos parámetros teóricos.

1. El equipo considera un flujo impulsado por paletas hidráulicas, esta condición de flujo cinético caracteriza la transferencia de calor como un régimen transitorio en un espacio de gradientes de temperatura y energía (agua y ambiente).
2. Como la transferencia de energía es transitoria, ocurren modelos termodinámicos de balance térmico y energético, considerando que el equipo es un reactor de mezcla, rigen el fenómeno de transporte de masa.
3. Un balance térmico de masa implica la transición del volumen en todo el equipo, esta variable considera el flujo de calor homogéneo en toda la geometría del mismo, caracterizando de esta manera un modelo de ecuación unidimensional de transferencia de energía.

En la siguiente ilustración, se aprecian algunos efectos de las variables de temperatura en un estanque, en el cual se puede caracterizar los efectos de la radiación solar y la transferencia de calor en el sistema (Figura N°13).

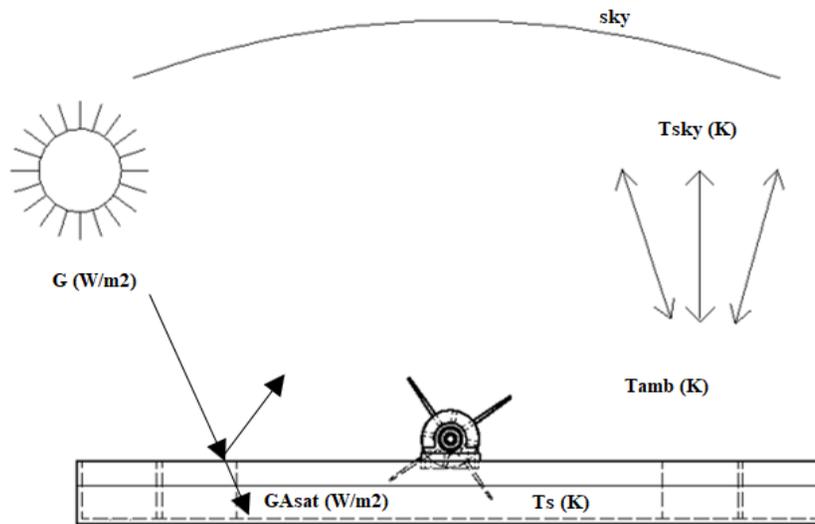


Figura 13. Efecto de radiación solar como modelo de transferencia de energía en un fotorreactor abierto. Fuente: Personal.

### 1.5.1. BALANCE TÉRMICO FOTORREACTOR

Según los principios termodinámicos de balances energéticos, la energía acumulada en el sistema se puede considerar como la energía que entra al medio ( $Q_{in}$ ) y la energía que sale del medio ( $Q_{out}$ ). Este modelo obedece el concepto de conservación de la energía, y el balance se puede interpretar de la siguiente forma (Ec.1.5.1).

$$Q_{acum} = Q_{in} - Q_{out} \quad (\text{Ec. 1.5.1})$$

El calor acumulado  $Q_{acum}$  se puede definir como la capacidad que presenta la materia para transferir energía desde un medio a otro. Este proceso considera la transición del calor respecto al tiempo, de esta manera la temperatura en un cierto instante de operación va a tender a variar (Ec. 1.5.2).

$$m_s c_{ps} \frac{dT_s}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (\text{Ec.1.5.2})$$

La masa característica en el balance ( $m_s$ ), determina que se está produciendo un fenómeno de transporte para todo el medio. Mientras el calor específico ( $c_{ps}$ ), representa la cantidad de energía que requiere el medio para aumentar su

temperatura. La masa se puede interpretar como la densidad del fluido de operación por su área superficial a una profundidad estimada (Ec.3.5.3).

$$m_s c_{pg} \frac{dT_s}{dt} = H_s A_s C_{ps} \rho_s \frac{dT_s}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (\text{Ec. 1.5.3})$$

#### 1.5.1.1. ENERGÍA ENTRANTE EN EL SISTEMA

La radiación solar ( $G$ ) que actúa sobre un cuerpo (sólido o líquido), se interpreta como la capacidad que tiene su superficie ( $A_s$ ) para captar y absorber ( $\alpha_s$ ) la energía incidente ( $\text{W/m}^2$ ) que ingresa al medio. [83] (Ec. 1.5.4).

$$Q_{in} = GA_s \alpha_s \quad (\text{Ec. 1.5.4})$$

#### 1.5.1.2. ENERGÍA SALIENTE EN EL SISTEMA

La interacción entre radiación solar y la superficie del agua va a generar un aumento en la energía interna del fluido, este al encontrarse en contacto con el ambiente, comenzará a enfriarse debido a que el calor se mueve siempre a un medio de menor temperatura ( $q_{con}$ ).

$$q_{con} = h_{s/amb} A_s (T_s - T_{amb}) \quad (\text{Ec. 1.5.5})$$

El término analítico (Ec. 1.5.5) es mejor conocido como la ley de enfriamiento de Newton, donde el coeficiente de intercambio calorífico  $h_{s/amb}$  determina la capacidad de un cuerpo (sólido, líquido o gas) para ceder o ganar energía en un medio [84]. La diferencia de temperatura ( $T_s - T_{amb}$ ), implica la gradiente calorífica que produce el traslado de temperatura de un medio mayor a uno menor. Finalmente ( $A_s$ ) es el área superficial donde incide toda la energía solar.

El líquido al experimentar un aumento de su energía, comenzará a disipar su temperatura mediante radiación térmica ( $q_{rad}$ ). Este fenómeno característico de la transferencia de energía, permite a un cuerpo emitir ( $\epsilon_s$ ) calor como método de

equilibrio térmico sin la necesidad de un medio material de propagación (sólido, líquido o gas).

$$q_{rad} = \varepsilon_s \sigma A_s (T_s^4 - T_{sky}^4) \quad (\text{Ec. 1.5.6})$$

El líquido además experimenta pérdidas por evaporación debido a la transición de estado. Esta variable depende completamente de la presión de saturación del líquido ( $p'_s$ ) y la presión de saturación del ambiente ( $p'_{amb}$ ). Ambas variables dependen del coeficiente de transferencia de calor característico del líquido al momento del cambio de estado ( $h_{evp}$ ).

$$q_{evp} = h_{evp} A_s (p'_s - p'_{amb}) \quad (\text{Ec. 1.5.7})$$

Finalmente, existe un intercambio de energía entre el líquido y las paredes del fotorreactor, el cual se produce por conducción térmica. Sin embargo, el equipo está construido de fibra de vidrio, el cual tiene un coeficiente de conducción térmica de 0,04 (W/m K). Al tener un coeficiente de transferencia de calor por conducción tan bajo, este intercambio de energía se considera despreciable.

### 1.5.1.3. ECUACIÓN TRANSITORIA DE CALOR EN EL SISTEMA

De manera ilustrativa, se muestra el balance final del sistema, considerando las variables de aporte de energía y las variables que influirán a disminuir la transición de esta.

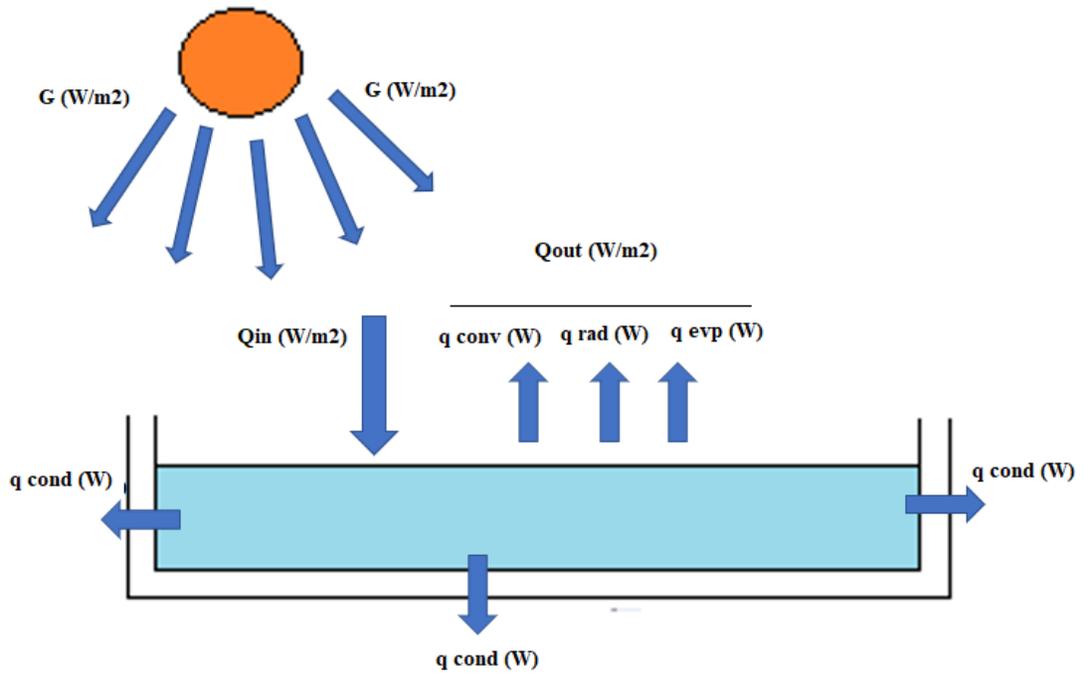


Figura 14. Diagrama de balance de energía en un estanque poco profundo. Fuente: Elaboración personal.

La ecuación que satisface los fenómenos de transferencia de energía para un equipo fotorreactor del tipo estanque poco profundo queda definida de la siguiente forma:

$$h_s A_s C_{ps} \frac{dT_s}{dt} = G A_s \alpha_s - h_{s/amb} A_s (T_s - T_{amb}) - \epsilon_s \sigma A_s (T_s^4 - T_{sky}^4) - h_{evp} A_s (p'_s - p'_{amb})$$

(Ec. 1.5.8)

### 1.5.2. BALANCE TÉRMICO FOTORREACTOR CUBIERTO

Al cerrar el equipo fotorreactor, se puede inferir que éste funcionará como un tipo colector solar, con la diferencia que el fluido dentro del mismo, está siendo impulsado por un equipo hidráulico de mezcla. Caracterizar la transferencia de calor o un balance energético dentro del equipo, se puede definir como un colector solar plano con movimientos cinéticos de energía, por lo tanto, se puede inferir lo siguiente:

1. La cubierta del fotorreactor se considera un material con propiedades ópticas y térmicas similares a la de un colector solar plano.
2. El material de recubrimiento experimentará su propio método de transferencia de energía, el cual será directamente proporcional al intercambio de energía en el fotorreactor.

El principio de transferencia de energía sobre un material semi transparente, se puede inferir de igual manera que el efecto que produce la radiación en un líquido. El material semi transparente experimentara un cambio energético al momento que la radiación ingresa al sistema y se transfiere hacia otro medio. El balance energético se puede interpretar como la energía acumulada  $Q_{g/acum}$  es igual a la energía que entra al sólido  $Q_{g/in}$  y la energía que deja al mismo  $Q_{g/out}$ .

$$Q_{g/acum} = Q_{g/in} - Q_{g/out} \quad (\text{Ec .1.5.9})$$

La transferencia de energía en un sólido semi transparente se caracteriza de forma especial a otros sólidos, debido a que gran parte de la energía incidente abandonará el sistema para ser transferido a otro medio. Esta condición de transporte, se puede expresar como la transición de energía en el sólido semi transparente mientras este abandona el medio, o la cantidad de energía acumulada ( $Q_{g/acum}$ ). La transferencia en el medio, es totalmente influenciada por el espesor del material ( $e_g$ ), el área superficial ( $A_g$ ) por donde incide la radiación solar y la capacidad del material para incrementar su temperatura ( $C_{pg}$ ) [84].

$$Q_{g/acum} = e_g A_g C_{pg} \rho_g \frac{dT_g}{dt} \quad (\text{Ec. 1.5.10})$$

### 1.5.2.1. ENERGÍA ENTRANTE EN EL SISTEMA

Para la energía que ingresa al sistema, rigen las mismas variables ópticas que las de un fluido, es decir, una cantidad importante de la radiación solar será reflejada y

absorbida por el material semi transparente. La radiación solar que ingresa al sistema (G), va a incidir en el área superficial ( $A_g$ ), siendo una parte de esta absorbida por el sólido semi transparente ( $\alpha_g$ ) de igual manera que se describe en el primer balance energético [85].

$$Q_{g/in} = GA_g\alpha_g \quad (\text{Ec. 1.5.11})$$

### 1.5.2.2. ENERGÍA SALIENTE EN EL SISTEMA

La transferencia de calor entre el sólido semi transparente y el ambiente se puede interpretar como conducción térmica, de igual manera que el primer balance. Sin embargo, la conducción térmica entre un fluido (aire) y un sólido (material semi transparente), se considera un fenómeno de transporte por convección, donde actúa la ley de enfriamiento de Newton [86].

$$q_{g/conv} = h_{s/amb}A_s(T_s - T_{amb}) \quad (\text{Ec. 1.5.12})$$

Al cubrir el equipo, se producirá un intercambio térmico entre el material semi transparente y el líquido. Este fenómeno se puede describir de igual manera en base a la ley de enfriamiento de Newton, donde principalmente dependerá del área superficial del material semi transparente ( $A_g$ ) y la capacidad de intercambio térmico entre los dos elementos ( $h_{g/s}$ ).

$$Q_{g/out} = h_{g/s}A_g(T_g - T_s) \quad (\text{Ec. 1.5.13})$$

Finalmente, el incremento de la energía en el material, va a tender a perder calor por radiación térmica, la cual depende de la emisividad propia de material ( $\epsilon_g$ ), su área superficial ( $A_g$ ) y la diferencia de temperatura del medio ambiente ( $T_s^4 - T_{sky}^4$ ).

$$q_{g/rad} = \epsilon_g\sigma A_s(T_s^4 - T_{sky}^4) \quad (\text{Ec. 1.5.14})$$

El balance energético para el material semi cristalino se puede interpretar de la siguiente manera.

$$e_g A_g C_{pg} \frac{dT_g}{dt} = G A_g \alpha_g - h_{g/amb} A_g (T_g - T_{amb}) - \varepsilon_g \sigma A_g (T_g^4 - T_{sky}^4) - h_{g/s} A_g (T_g - T_s)$$

(Ec. 1.5.15)

### 1.5.3. ECUACIONES DE BALANCE FINAL

Los dos balances energéticos son directamente dependientes el uno del otro. Por este motivo, es necesario replantear algunos términos analíticos en base a la necesidad térmica de ambos balances energéticos elementos expuestos al intercambio energético.

1. En primer lugar, la incidencia de la radiación solar debe atravesar el material semi transparente, por lo tanto, la energía transferida al sistema (fotorreactor) es el % de radiación transmitido por el recubrimiento. En pocas palabras, la energía que ingresa al equipo fotorreactor, depende de la transmisividad del material semi transparente

$$Q_{in} = G A_s \alpha_s \tau_g \quad (\text{Ec 1.5.16})$$

2. En segundo lugar, de la misma manera que el material semi transparente produce cambio térmico por convección hacia líquido del fotorreactor, este producirá el mismo efecto térmico sobre el material semi transparente, por lo que debe ser considerado en el balance del fotorreactor.

$$h_{g/s} A_s (T_s - T_g) \quad (\text{Ec 1.5.17})$$

3. En tercer lugar, la presión de evaporación del fluido, se considera la presión ambiental, debido a que el equipo se encuentra abierto en el área donde actúan las paletas hidráulicas de mezcla, por lo que no se considera un sistema presurizado.

4. Finalmente, la radiación térmica que se producirá en el fluido tiene relación directa con el material semi transparente de recubrimiento, por lo tanto, es necesario re definir su expresión analítica en el sistema

$$q_{rad} = \varepsilon_s \sigma A_s (T_g^4 - T_g^4) \quad (\text{Ec 1.5.18})$$

Basado en los fundamentos térmicos de los apartados 1.5.1 y 1.5.2 se definen los balances energéticos finales que describen la transferencia de energía que se produce en un fotorreactor tipo “*raceway pond*” cubierto con un material semi transparente.

Para la primera etapa de transferencia entre el ambiente y material semi transparente, la ecuación final queda definida por ecuación (Ec. 3.5.19).

$$e_g A_g C_{pg} \rho_g \frac{dT_g}{dt} = G A_g \alpha_g - h_{g/amb} A_g (T_g - T_{amb}) - \varepsilon_g \sigma A_g (T_g^4 - T_{sky}^4) - h_{g/s} A_g (T_g - T_s) \quad (\text{Ec. 1.5.19})$$

Mientras que el balance de energía que se produce entre el material semi transparente y el líquido del equipo fotorreactor se define finalmente por la ecuación (Ec. 1.5.20).

$$h_s A_s C_{ps} \rho_s \frac{dT_s}{dt} = G A_s \alpha_s \tau_g - h_{g/s} A_s (T_s - T_g) - \varepsilon_g \sigma A_g (T_g^4 - T_{sky}^4) - h_{evp} A_s (p'_s - p'_{amb}) \quad (\text{Ec. 1.5.20})$$

Amabas son ecuaciones diferenciales de primer orden no lineales, cada una es dependiente de la otra, por lo que se pueden interpretar como un sistema de ecuaciones diferenciales. Para hallar las soluciones generales que satisfacen la familia de curvas, se utiliza un cambio de variables a modo de simplificar cálculos y términos.

*Tabla 8. Cambio de variable en ecuaciones de balance como método de simplificar cálculos matemáticos.*

Variable	Cambio	Variable	Cambio
$dT_g$	$dy$	$GA_s\alpha_s\tau_g$	$B_2$
$dT_s$	$dx$	$h_{g/amb}A_g$	$C_1$
$T_g$	$y$	$h_{g/s}A_g$	$C_2$
$T_s$	$x$	$\varepsilon_g\sigma A_g$	$D_1$
$e_gA_gC_{pg}\rho_g$	$A_1$	$\varepsilon_s\sigma A_s$	$D_2$
$h_sA_sC_{ps}\rho_s$	$A_2$	$h_{s/s}A_s$	$E_1$
$GA_g\alpha_g$	$B_1$	----	----

Fuente: Elaboración personal.

Las ecuaciones de balance se definen según el cambio de variable. Para el balance de energía entre el ambiente y el material semi transparente se define en la ecuación (Ec.1.5.21), mientras que el balance de energía para el reactor cubierto se define en la ecuación (Ec.1.5.22).

$$\frac{A_1 dx}{dt} = [B_1 - C_1(x - T_{amb}) - D_1(x^4 - T_{sky}^4) - E_1(x - y)]$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{1}{A_1} [B_1 - C_1(x(t) - T_{amb}) - D_1(x(t)^4 - T_{sky}^4) - E_1(x(t) - y)] \quad (Ec. 1.5.21)$$

$$A_2 \frac{dy}{dt} = [B_2 - C_2(y - x) - D_2(y^4 - x^4) - E_2]$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1}{A_2} [B_2 - C_2(y(t) - x) - D_2(y(t)^4 - x^4) - E_2] \quad (Ec. 1.5.22)$$

El sistema de balance de energía en función de las ecuaciones diferenciales no lineales de calor se puede describir de la siguiente manera matemática.

$$f(t, x, y) = \begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = \frac{1}{A_1} [B_1 - C_1(x(t) - T_{amb}) - D_1(x(t)^4 - T_{sky}^4) - E_1(x(t) + y)] \\ \frac{dy(t)}{dt} = \frac{1}{A_2} [B_2 - C_2(y(t) - y) - D_2(y(t)^4 - x^4) - E_2] \end{cases}$$

Donde la función  $f(t, x, y)$ , define un sistema de transferencia de calor unidimensional en un equipo fotorreactor cubierto. Analíticamente, es un sistema

bastante complejo de resolver, por este motivo se deben utilizar modelos numéricos para obtener la familia de soluciones.

#### 1.5.4. MODELO NUMÉRICO ECUACIÓN DE BALANCE TÉRMICO

Dentro de los modelos numéricos de resolución para sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales, se encuentra el método de Euler. Este método consiste en aproximar la familia de soluciones hacia la solución general mediante series de iteraciones hasta conseguir la convergencia total del sistema [85]. El modelo se puede interpretar de la siguiente manera, siendo un sistema de dos diferenciales de primer orden:

$$f(t, x, y) = \begin{cases} \frac{dx}{dt} = h(t, x, y) \\ \frac{dy}{dt} = g(t, x, y) \end{cases}$$

Con condiciones de frontera establecidas como  $x(t_0) = x_0$  e  $y(t_0) = y_0$ . Se asume el riesgo que las funciones son suficientemente regulares para que existan únicas soluciones al momento de asignar valores iniciales.

En el caso particular las ecuaciones de calor descritas, estas presentan un comportamiento de gradiente de temperatura y al depender de condiciones iniciales como variables térmicas ambientales, se asume que su comportamiento será acorde al medio de transferencia de energía, comportándose como funciones crecientes y decrecientes.

### 1.5.4.1. SUCECIÓN NUMÉRICA DE EULER.

Se define la sucesión de Euler para n términos de iteración en un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales.

$$\begin{aligned} & \left[ \begin{aligned} x_1(t_1) &\approx x_0(t_0) + \delta_t \frac{dx(t_0)}{dt} = x_0(t_0) + \delta_t f_i(t_0, x(t_0)) \\ y_1(t_1) &\approx y_0(t_0) + \delta_t \frac{dy(t_0)}{dt} = y_0(t_0) + \delta_t f_i(t_0, y(t_0)) \end{aligned} \right] \\ & \\ & \left[ \begin{aligned} x_1(t_2) &\approx x_1(t_1) + \delta_t \frac{dx(t_1)}{dt} = x_1(t_1) + \delta_t f_i(t_1, x(t_1)) \\ y_1(t_2) &\approx y_1(t_1) + \delta_t \frac{dy(t_1)}{dt} = y_1(t_1) + \delta_t f_i(t_1, y(t_1)) \end{aligned} \right] \quad (\text{Ec.1.5.23}) \\ & \quad \quad \quad \vdots \\ & \left[ \begin{aligned} x_1(t_{n+1}) &\approx x_1(t_n) + \delta_t \frac{dx_n}{dt} = x_n(t_n) + \delta_t f_i(t_n, x(t_n)) \\ y_1(t_{n+1}) &\approx y_1(t_n) + \delta_t \frac{dy_n}{dt} = y_n(t_n) + \delta_t f_i(t_n, y(t_n)) \end{aligned} \right] \end{aligned}$$

El algoritmo depende totalmente del número de valores asignados para las iteraciones, de esta manera un número alto de iteraciones disminuirá la incertidumbre de las soluciones. Se define el modelo de paso de iteración para el método de Euler.

$$\delta_t = \frac{t_0 - t_1}{N} \quad (\text{Ec. 1.5.24})$$

Donde N es el total de iteraciones que se quiere implementar para el algoritmo de resolución, mientras que los valores  $t_0 - t_1$  representan las condiciones fronteras de la variable independiente.

Finalmente, se define el modelo de balance con las condiciones iniciales.

$$f(x, y, t) = \begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = \frac{1}{A_1} [B_1 - C_1(x(t) - T_{amb}) - D_1(x(t)^4 - T_{sky}^4) - E_1(x(t) + y)] \\ \frac{dy(t)}{dt} = \frac{1}{A_2} [B_2 - C_2(y(t) - y) - D_2(y(t)^4 - x^4) - E_2] \\ x'(t_0) = x_0 \\ y'(t_0) = y_0 \end{cases}$$

## 1.6. VARIABLES MODELO DE TEMPERATURA

### 1.6.1. VARIABLES TERMODINÁMICAS

Para el desarrollo analítico o numérico del modelo de temperatura, es necesario definir variables termodinámicas propias del balance como, el coeficiente de transferencia de calor ( $h_{ex}$ ) atribuidas a la convección y a la condensación; la temperatura del cielo atribuida a la radiación del cuerpo (fotorreactor) ( $T_{sky}$ ); la presión atmosférica ( $p'_s$ ) y ( $p'_a$ ) atribuidas a la pérdida de calor por evaporación, etc [88].

#### 1.6.3.1. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

##### I. Convección termo solar en materiales semi transparentes

La primera variable para definir es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el material semi transparente de recubrimiento y el ambiente ( $h_{g/amb}$ ). Según la ecuación (Ec. 1.5.12), el coeficiente de transferencia de calor debe ser definido mediante las condiciones ambientales que genera el fluido (aire) en contacto con el material semi transparente.

La cubierta transparente tiene como función principal permitir el paso de la radiación solar, disminuir las pérdidas de calor por convección producidas por el viento y reducir las pérdidas de calor por radiación del absorbedor (radiación infrarroja). La convección sobre la placa semi transparente se considera convección forzada de flujo laminar producida por el viento y considera, además, posibles pérdidas por radiación (Ec.1.5.31).

$$h_{g/amb} = 2.8 + 3.0v \quad (\text{Ec. 1.6.1})$$

La ecuación contempla la velocidad del viento como flujo convectivo de transferencia de calor y este depende de la zona geográfica de acción.

## II. Convección material-fluido de operación

El coeficiente de transferencia de calor que se produce entre los dos sub sistemas (material semi transparente-líquido) se puede interpretar por la siguiente relación matemática.

$$R_{total} = R_{vidrio} + R_{aire} + R_{solución}$$

$$R_{total} = \frac{L}{k_g} + \frac{L}{k_{O_2}} + \frac{L}{k_{H_2O}} \quad (\text{Ec. 1.6.2})$$

Donde (L) se considera como el espesor o profundidad que interviene en la matriz de gradiente de la temperatura en cualquier material y el coeficiente de conductividad térmica (k) característico de cada elemento. Este término matemático representa la resistencia de un material a transferir temperatura hacia otro en contacto directo, basado en la conductividad térmica de ambos materiales. Entre el material semi transparente y el fluido del equipo fotorreactor, existe un espacio de 20 mm donde entre ellos.

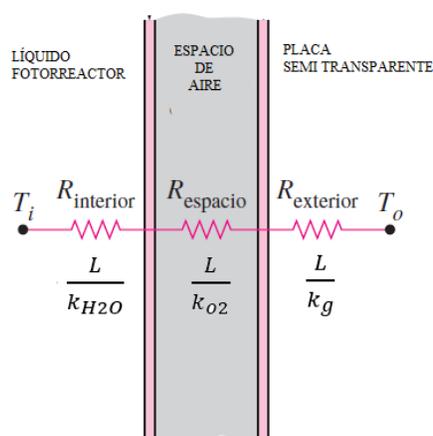


Figura 15. Transferencia de calor por conductividad térmica (k) entre el material semi transparente y el líquido del equipo. Fuente: Elaboración personal.

Para definir el coeficiente de transferencia de calor entre el material semi transparente y el líquido del equipo fotorreactor, se puede interpretar como la inversa de la resistencia total de los elementos sometidos a intercambio térmico.

$$h_{g/s} = \frac{1}{R_{total}} \quad (\text{Ec. 1.6.3})$$

La conductividad térmica (k) viene definida para cada elemento por varios estudios de transferencia térmica de materiales. Sin embargo, para el caso específico del fluido de operación, intervienen diferentes agentes químicos como: sales ferrosas de hierro, peróxido de hidrógeno y colorantes de distintas concentraciones. Al tener distintos agentes químicos dentro de un fluido, se dificulta definir una densidad constante para el fluido de operación y de igual forma sus variables térmicas como la conductividad, calor específico, coeficiente de transferencia térmica. Principal motivo para utilizar agua como fluido de intercambio térmico.

Los coeficientes térmicos definidos para el agua a 20°C y el aire como medio de transporte se definen en la tabla N°9, mientras que la conductividad térmica del material transparente dependerá del desarrollo de esta investigación.

*Tabla 9. Conductividad térmica medio de transferencia de calor fotorreactor*

<b>Medio</b>	<b>Conductividad Térmica [k] (W/m °C)</b>
Material Semi Transparente	-----
Aire	0,025
Agua	0,590

*Fuente: Cengel, Y. 2011 [84].*

### III. Convección por evaporación en el fluido de operación

La evaporación del fluido depende completamente del coeficiente de transferencia de calor ( $h_{eva}$ ) y la presión de saturación del fluido y el ambiente. Estas variables termodinámicas indican la energía necesaria para que el fluido comience a cambiar de fase y transformarse en vapor saturado. La ecuación introducida por Macmillan

[86] define el coeficiente de transferencia de calor para un fluido que experimenta evaporación con la siguiente relación analítica.

$$h_{eva} = 0.036 + 0.25v \quad (\text{Ec. 1.6.4})$$

La expresión analítica (Ec. 1.6.4), relaciona la evaporación del líquido según la mecánica de fluido de las aguas someras que rige en canales abiertos. La relación de la transición de estado con la condición ambiental del viento, describe el intercambio de energía entre los ambos medios.

Como ya se mencionó antes, el sistema no se encuentra presurizado, debido a que donde actúan las paletas hidráulicas se encuentra totalmente abierto al ambiente. De esta manera, se puede relacionar la velocidad del viento como la velocidad del fluido en convección forzada dentro del espacio de 20 mm por donde circula aire. Este se asume que adquiere la velocidad del sistema de mezcla en el equipo.

En cuanto a la presión de saturación ( $P'_s$ ) que determina el cambio de estado el agua, se puede definir por tablas termodinámicas empírica a una temperatura específica. En cambio, para la presión de saturación del ambiente, se puede definir por la siguiente expresión analítica de Anthonie [87] .

$$P'_{amb} = RH 10^{\left(8.07131 + \log\left(\frac{101325}{760}\right)\right) - \frac{1730.63}{233.46 + T}} \quad (\text{Ec. 1.6.5})$$

Esta expresión relaciona la presión de saturación ambiental con la humedad relativa (RH) con la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ).

#### IV. Temperatura del Cielo

La radiación debido a las emisiones atmosféricas se representa mediante la temperatura del cielo equivalente del cielo, la cual representa el intercambio radiativo entre un cuerpo en una posición cualquiera de la tierra y el sol como un cuerpo negro perfecto. Esta expresión analítica se rige por la temperatura

ambiente  $T_a$ , la temperatura de rocío y la cantidad de horas solares después de medianoche [88].

$$T_{sky} = (273.15 + T_a)(0.711 + 0.0056T_{dw} - 7.3 \times 10^{-5}T_{dw}^2 + 0.13\cos(15t_{solar}))^{0.25}$$

(Ec. 1.6.7)

## 1.6.2. VARIABLES ÓPTICAS DE LOS CUERPOS

### 1.6.2.1. MATERIALES SEMI TRANSPARENTES

Los cuerpos semitransparentes experimentan un fenómeno característico con el comportamiento de la luz y la radiación de cualquier tipo. Estos materiales permiten el paso de la energía incidente en forma de radiación, ya sea en menor o mayor cantidad dependiendo de la composición de material. Generalmente estos tipos de sólidos son empleados para procesos termo solares, tanto en la ingeniería térmica como para crear micro ambientes en el caso de los invernaderos, siendo ambos tipos de procesos dependientes de un factor común como lo es el sol.

Todo proceso energético en un universo no se considera un proceso ideal, existen diferentes factores que alteran la transición de la energía. Estos factores se consideran como todos los elementos capaces de disipar la energía en un medio de transporte. Los materiales semitransparentes experimentan tres fenómenos ópticos característicos, la transmisividad, absorptividad y la reflectividad. La transmisividad de un cuerpo se define como la cantidad de energía con la capacidad de atravesar un cuerpo sólido e incidir en otro, en cambio la absorptividad es la capacidad que tiene el cuerpo para quedarse con un porcentaje de esa energía y la reflectividad es el porcentaje de energía que el material refleja hacia otro medio [89].

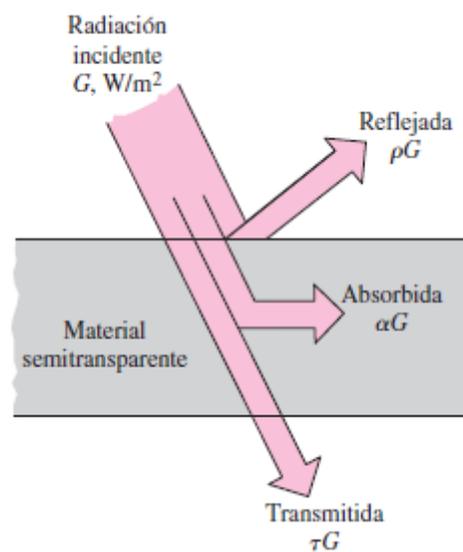


Figura 16. Comportamiento de la transmisividad, absorptividad y reflectividad en materiales semitransparentes. Fuente: Cengel. Y, 2011 [90]

Todas estas variables dependen completamente de la capacidad que tiene un cuerpo para comportarse como un sólido semi transparente. En su mayoría estos sólidos, se componen de polímeros y vidrios, entre ellos comúnmente están los vidrios de borosilicato con bajas concentraciones de hierro, acrílicos, polivinilos de cloruro, polietilenos de alta y baja densidad, policarbonatos, etc. Pueden ser rígidos o flexibles y generalmente llevan aditivos químicos que permiten cumplir aspectos técnicos específicos según su área de desempeño (resistencia a la degradación por radiación ultravioleta, envejecimiento prematuro, resistencia a la humedad, salinidad, pesticidas, químicos).

#### 1.6.2.2. TRANSMISIVIDAD DE UN MATERIAL SEMI TRANSPARENTE

La transmisividad en térmicos analíticos se puede definir como la cantidad de radiación que incide sobre un material y la cantidad de radiación que deja el material luego de experimentar un recorrido a través de él y se obtiene generalmente mediante procesos experimentales.

$$\tau = \frac{I_{irradiada}}{I_{transmitida}} \quad (\text{Ec. 1.6.8})$$

Sin embargo, existen metodologías que permiten calcular la transmisividad de distintos materiales de forma teórica [91], conociendo factores característicos como el índice de refracción ( $I_{\text{index}}$ ) y el coeficiente de extinción ( $K$ ). El índice de refracción se define como la medida en la cual la luz es reducida a pasar por un medio en comparación a otro, mientras que el coeficiente de extinción define la cantidad de radiación que va a extinguir el material antes de abandonar el sólido [92]. La transmisividad teórica de un material se puede definir con la siguiente relación matemática

$$\tau = \tau_a \tau_r \quad (\text{Ec. 1.6.9})$$

Donde  $\tau_r$  se considera la transmisividad inicial no polarizada y  $\tau_a$  se considera la transmisividad absorbida por el material, sólido o el medio.

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left[ \frac{1 - \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)}}{1 + \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)}} + \frac{1 - \frac{\text{tan}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{tan}^2(\theta_2 + \theta_1)}}{1 + \frac{\text{tan}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{tan}^2(\theta_2 + \theta_1)}} \right] \quad (\text{Ec. 1.6.10})$$

$$\tau_a = \exp^{-\frac{KL}{\cos \theta_2}} \quad (\text{Ec. 1.6.11})$$

La transmitancia inicial no polarizada  $\tau_r$  considera el ángulo  $\theta_1$  con el que incide primeramente la radiación solar y el ángulo  $\theta_2$  con el que la radiación abandona el medio.

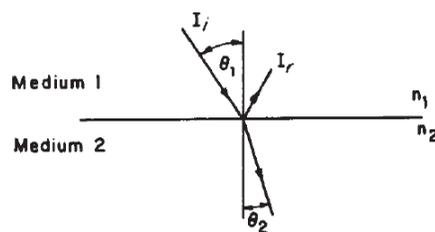


Figura 17. Incidencia de la radiación en un medio transparente. Fuente. Beckman, A. 2013 [91].

Los ángulos de incidencia normal y transmitida entre un medio  $n_1$  y  $n_2$  se puede definir con la siguiente relación matemática

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2 \quad (\text{Ec. 1.6.12})$$

Donde  $n_1$  y  $n_2$  se considera el índice de refracción ( $I_{\text{index}}$ ) para dos medios de propagación en contacto. El ángulo  $\theta_2$  se considera el ángulo zenit que representa el ángulo de incidencia de la radiación con respecto a una superficie horizontal que va desde  $90^\circ$  para el primer rayo de radiación solar incidente sobre una superficie, hasta  $0^\circ$  que representa la perpendicularidad total del sol sobre una superficie horizontal.

Para la transmisividad absorbida,  $L$  representa el espesor del material de recubrimiento y  $K$  el coeficiente de extinción que oscila entre  $4 \text{ m}^{-1}$  para el agua y  $32 \text{ m}^{-1}$  para el vidrio con alto contenido de óxido de hierro.

### 1.6.2.3. ABSORTIVIDAD DE UN MATERIAL SEMI TRANSPARENTE

De la misma manera que la transmisividad, la absortividad de un material puede representarse como la cantidad de radiación solar que ingresa al medio y la cantidad de radiación solar que lo abandona.

$$\alpha = \frac{I_{\text{irradiada}}}{I_{\text{transmitida}}} \quad (\text{Ec. 1.6.13})$$

Sin embargo, también puede ser calculada analíticamente en función de la transmisividad teórica. La absortividad del material se puede representar como la diferencia entre la transmisividad absorbida asumiendo las pérdidas absorbidas en función del tramo de penetración, delimitada por el coeficiente de extinción ( $K$ ) y el espesor ( $e$ ) del vidrio borosilicato

$$\alpha = 1 - \tau_a \quad (\text{Ec. 1.6.14})$$

#### 1.6.2.4. REFLECTIVIDAD DE UN MATEIRAL SEMI TRANSPARENTE

Como los métodos experimentales mencionados anteriormente, la reflectividad también debe ser calculada en condiciones reales de operación.

$$\rho = \frac{I_{irradiada}}{I_{transmitida}} \quad (\text{Ec. 1.6.15})$$

Mientras que la reflectividad, se puede representar como la cantidad de transmisividad total del sistema excluyendo la porción de transmisividad absorbida en el material

$$\rho = \tau_a(1 - \tau_r) \quad (\text{Ec. 1.6.15})$$

#### 1.6.2.5. EMISIVIDAD DE UN MATERIAL SEMI TRANSPARENTE

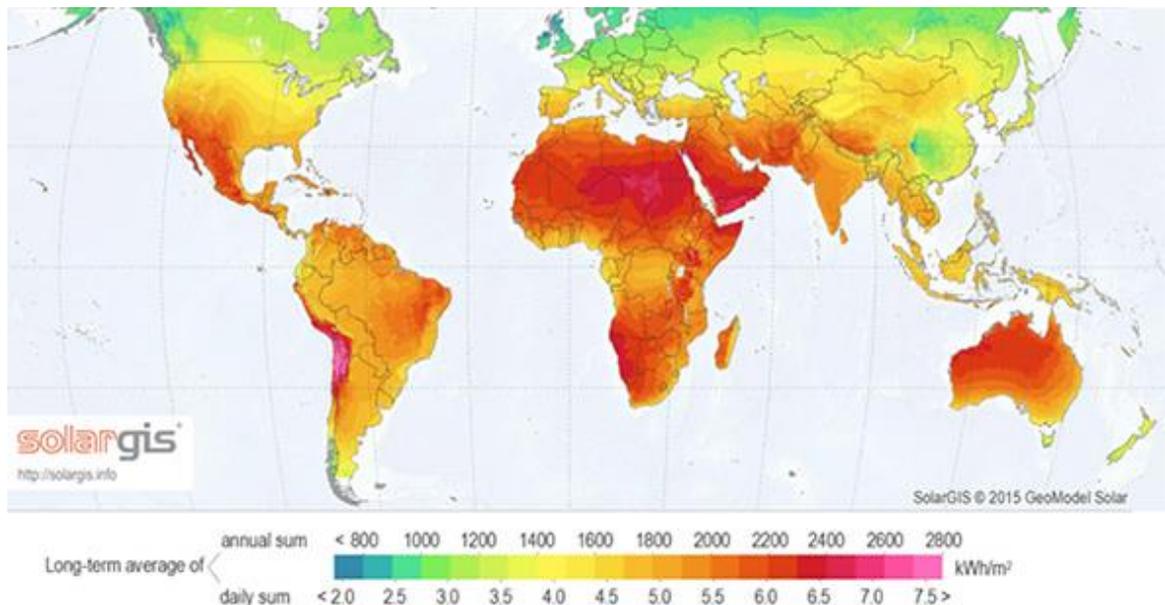
La emisividad se define como la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura y se define de la siguiente manera

$$\varepsilon = \frac{\text{radiación emitida por una superficie}}{\text{radiación emitida si fuera un cuerpo negro}} \quad (\text{Ec. 1.6.16})$$

De acuerdo a la relación definida, la interpretación de la emisividad se realiza bajo campañas experimentales de cada tipo de material. La emisividad de diferentes materiales se puede encontrar in distintas literaturas [84] [91].

#### 1.6.3. VARIABLES AMBIENTALES ARICA Y PARINACOTA

Entre las latitudes 40°N y 40°S se produce un fenómeno denominado el cinturón solar, en esta franja geográfica llega la mayor cantidad de energía solar incidente en el planeta. Este fenómeno se debe principalmente a la inclinación de la tierra, debido a que, en el centro del Ecuador, la energía solar tiende a incidir más directamente que en otras latitudes y longitud de geográfica.



*Figura 18 Cinturón solar geográfico entre las latitudes 40 N° y 40°S. Fuente: Engimía, 2018 [93].*

La región de Arica y Parinacota, concentra una cantidad del recurso solar disponible en Chile, junto con la región de Antofagasta. El motivo principal se debe a dos factores importante, el primero se atribuye a la reducción del grosor de la atmósfera para este sector en particular y el segundo se le atribuye al denominado efecto FOEHN. Este fenómeno impide que la región experimente tiempos prolongados de nubosidad por la altura de su cordillera, que actúa como un obstáculo para cualquier tipo de precipitación y nubosidad [94].

Existe un interés especial por entender e interpretar el comportamiento de la radiación solar en esta zona particular del desierto de Atacama, que según instituciones como SERC Chile presentan unos de los mayores índices de radiación solar del mundo [95]. Durante los meses de diciembre de 2012 a febrero de 2014, el Laboratorio de Investigaciones Medioambientales de Zonas Áridas (LIMZA), llevó a cabo una investigación sobre el recurso presente de la radiación solar que incide en este sector geográfico en particular.

Mediante tres estaciones radiométricas puestas en sectores estratégicos de la región, se llevó a cabo una recopilación sobre la irradiancia global horizontal (GHI);

irradiancia horizontal difusa (DHI); irradiancia normal directa (DNI; temperatura (T); velocidad del viento (WS); dirección del viento (WD) y humedad relativa (RH) emplazadas.

### 1.6.3.1. ESTACIONES RADIOMÉTRICAS REGIÓN ARICA Y PARINACOTA

#### 1.6.3.1.1. ESTACIÓN UNIVERSIDAD DE TARAPACÁ:

Estación emplazada en la institución educativa Universidad de Tarapacá, en las coordenadas 17,47 S y 70,31 W, con una altitud de 9 metros sobre el nivel del mar.

Los resultados de las diferentes lecturas se encuentran en la tabla N°10.

*Tabla 10 Resultados estación radiométrica Universidad de Tarapacá.*

	<b>GHI</b>	<b>DHI</b>	<b>DNI</b>	<b>T°</b>	<b>WS</b>	<b>WD</b>	<b>RH</b>
<b>Unidades Mensuales</b>	(kWh/m <sup>2</sup> día)	(kWh/m <sup>2</sup> mes)	(kWh/m <sup>2</sup> mes)	(°C)	(m/s)	(0-360)	(%)
<b>Unidades Anuales</b>	(kWh/m <sup>2</sup> año)	(kWh/m <sup>2</sup> año)	(kWh/m <sup>2</sup> año)				
<b>2012-2014</b>							
<b>Enero</b>	7,55	2,91	6,39	22,4	1,9	216	45
<b>Febrero</b>	7,61	1,79	7,39	22,2	1,85	219	66
<b>Marzo</b>	5,58	2,65	6,23	21,5	1,6	230	69
<b>Abril</b>	5,99	2,17	6,70	18,9	1,7	205	62
<b>Mayo</b>	3,88	1,48	3,84	18,3	1,4	205	0,3
<b>Junio</b>	3,50	1,47	3,40	16,4	1,3	205	13
<b>Julio</b>	3,61	1,68	3,45	15,6	1,4	214	74
<b>Agosto</b>	4,37	1,87	3,48	16,0	1,7	235	71
<b>Septiembre</b>	5,25	2,23	3,93	16,9	1,8	237	72
<b>Octubre</b>	6,57	2,39	4,94	17,6	2,0	235	69
<b>Noviembre</b>	7,45	2,07	6,53	19,1	2,0	234	67
<b>Diciembre</b>	7,43	2,24	6,37	21,1	1,9	225	56
Promedio Anual	2123	740	1906	18,8	1,7	222	55

*Fuente. Cornejo, L. 2017 [96]*

- Existe un promedio anual de 1.906 kWh/m<sup>2</sup> de radiación global horizontal GHI; 2.013 kWh/m<sup>2</sup> de radiación normal directa DNI y 740 kWh/m<sup>2</sup> de radiación horizontal difusa DHI para este sector geográfico costero.

### 1.6.3.1.2. ESTACIÓN QUIBORAX:

Estación emplazada en el sector geográfico denominado depresión intermedia, en las coordenadas 18,45 S y 69,88 W, con una altitud de 1.678 metros sobre el nivel del mar. Los resultados de las diferentes lecturas se encuentran en la tabla N°11:

*Tabla 11 Resultados estación radiométrica Quiborax.*

	<b>GHI</b>	<b>DHI</b>	<b>DNI</b>	<b>T°</b>	<b>WS</b>	<b>WD</b>	<b>RH</b>
<b>Unidades Mensuales</b>	(kWh/m <sup>2</sup> día)	(kWh/m <sup>2</sup> mes)	(kWh/m <sup>2</sup> mes)	(°C)	(m/s)	(0-360)	(%)
<b>Unidades Anuales</b>	(kWh/m <sup>2</sup> año)	(kWh/m <sup>2</sup> año)	(kWh/m <sup>2</sup> año)				
<b>212-214</b>							
<b>Enero</b>	8,1	2,16	7,61	18,05	1,90	247	59
<b>Febrero</b>	7,96	1,57	9,21	18,02	1,95	267	56
<b>Marzo</b>	7,55	1,42	7,90	19,5	1,80	267	52
<b>Abril</b>	6,9	0,8	8,17	18,6	1,70	231	40
<b>Mayo</b>	5,52	1,06	7,90	18,0	1,60	221	39
<b>Junio</b>	5,03	0,93	8,17	18,9	1,60	204	27
<b>Julio</b>	5,39	0,81	7,90	18,5	1,60	211	25
<b>Agosto</b>	5,39	0,87	7,90	18,1	1,60	219	22
<b>Septiembre</b>	7,3	0,93	8,17	18,9	1,70	228	31
<b>Octubre</b>	7,81	1,55	7,90	18,8	1,80	248	31
<b>Noviembre</b>	8,93	1,20	8,17	17,9	1,90	274	39
<b>Diciembre</b>	8,29	1,16	7,90	18,0	1,70	231	40
<b>Promedio Anual</b>	2560	440	2948	18,5	1,70	237	38

*Fuente: Cornejo, L.2017 [96]*

- Existe un promedio anual de 2.948 kWh/m<sup>2</sup> para la radiación normal directa DNI; 2.560 kWh/m<sup>2</sup> para la radiación global horizontal GHI y 440 kWh/m<sup>2</sup> de radiación horizontal difusa para este sector geográfico en particular.

### 1.6.3.1.3. ESTACIÓN LAS REJAS:

Estación emplazada en pleno altiplano, con condiciones extremas de clima, sus coordenadas son: 18,33 S y 69,47 W, con una altitud de 4931 metros sobre el nivel del mar. Los resultados de las diferentes lecturas se encuentran en la tabla N°12:

Tabla 12 "Resultados estación radiométrica Las Rejas.

	<b>GHI</b>	<b>DHI</b>	<b>DNI</b>	<b>T°</b>	<b>WS</b>	<b>WD</b>	<b>RH</b>
<b>Unidades Mensuales</b>	(kWh/m <sup>2</sup> día)	(kWh/m <sup>2</sup> mes)	(kWh/m <sup>2</sup> mes)	(°C)	(m/s)	(0-360)	(%)
<b>Unidades Anuales</b>	(kWh/m <sup>2</sup> año)	(kWh/m <sup>2</sup> año)	(kWh/m <sup>2</sup> año)				
<b>212-214</b>							
<b>Enero</b>	7,10	2,31	6,45	4,25	3,4	225	63
<b>Febrero</b>	7,23	1,96	7,09	3,95	3,6	242	60
<b>Marzo</b>	6,74	2,32	7,55	3,80	3,3	267	58
<b>Abril</b>	7,20	1,00	10,33	2,30	3,3	271	31
<b>Mayo</b>	5,74	0,94	8,26	1,60	3,2	271	44
<b>Junio</b>	4,87	0,93	7,00	0	3,8	265	45
<b>Julio</b>	5,26	2,13	4,48	0,80	3,4	265	40
<b>Agosto</b>	6,39	0,87	9,06	0,50	3,8	265	26
<b>Septiembre</b>	7,87	0,87	10,70	1,60	4,0	261	24
<b>Octubre</b>	8,23	1,48	9,61	2,70	4,3	268	30
<b>Noviembre</b>	9,07	1,40	10,77	3,50	4,6	271	29
<b>Diciembre</b>	6,71	2,48	5,90	4,70	4,1	228	62
<b>Promedio Anual</b>	2506	569	2957	2,50	3,7	258	43

Fuente: Cornejo, L.2017 [96]

- Existe un promedio anual de 2.957 kWh/m<sup>2</sup> de radiación normal directa DNI; 2.506 kWh/m<sup>2</sup> de radiación global horizontal GHI y 569 kWh/m<sup>2</sup> de radiación horizontal difusa DHI.

El estudio realizado por el LIMZA caracteriza el comportamiento de la radiación solar en la región de Arica-Parinacota para tres zonas geográficas distintas de forma anual y mensual para una cierta cantidad de área de incidencia. Sin embargo, este estudio no entrega las fluctuaciones diarias que experimenta la radiación solar y la temperatura en la región.

Estos parámetros son cruciales para estimar un comportamiento energético del fotorreactor, ya que comprender parámetros máximos y mínimos validará si un recubrimiento es efectivamente factible para el proceso foto-Fenton. Estos datos se encuentran disponible en la base de datos del explorador solar de la Universidad de

Chile (UCH) [97], el cual utiliza algoritmos y datos satelitales para estimar el comportamiento de parámetros solares ambientales en todo el país.

El motivo principal de utilizar estos dos estudios es tener modelos comparativos del comportamiento de la temperatura y la radiación solar, ya que las mediciones del LIMZA vienen directamente de estaciones meteorológicas de la región.

#### **1.6.3.2. EXPLORADOR SOLAR UNIVERSIDAD DE CHILE**

Los parámetros dispuestos en este apartado, se concentran en las coordenadas 17,47 S y 70,31 W a una altura de elevación de 9 m.s.n.m. correspondiente a la estación UTA del LIMZA.

##### **1.6.3.2.1 RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE ARICA-PARINACOTA**

La siguiente figura muestra el ciclo diario y el ciclo anual de la radiación solar global incidente. El eje horizontal indica la hora del día (UTC-3) y el eje vertical indica el mes del año. La escala de colores indica el valor medio de la radiación global incidente ( $W/m^2$ ) para cada hora y mes.

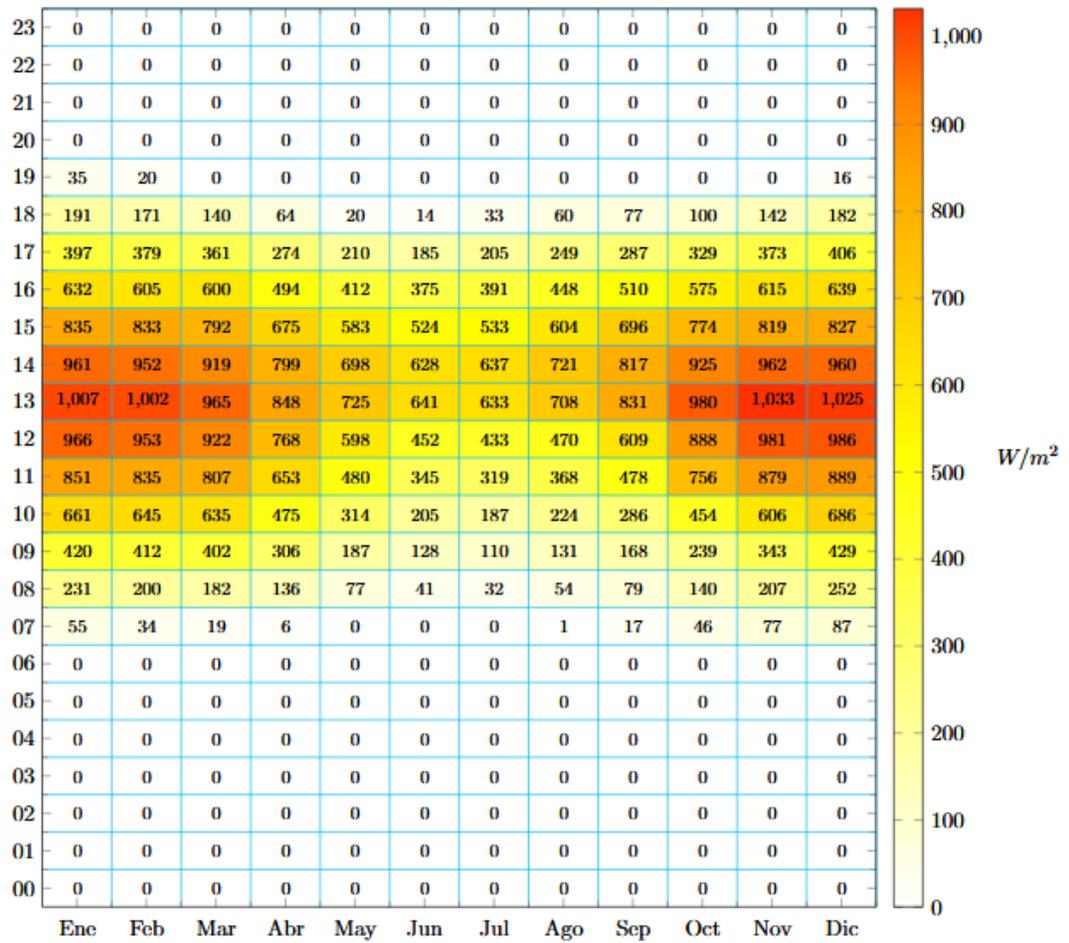


Figura 19. Promedio del ciclo diario de la radiación global horizontal GIH incidente para cada hora y mes. Fuente: Explorador Solar, 2020 [98].

La radiación solar global horizontal (GHI) se compone de radiación solar directa y difusa, la cual incide en un plano horizontal a la superficie y su unidad se expresa en  $W/m^2$  tal como se representa en la Figura N°19 y N°20.

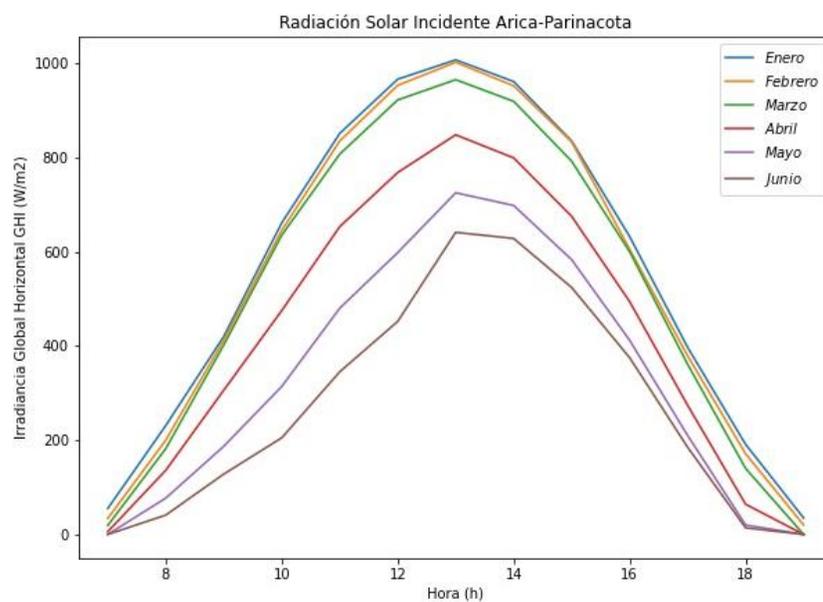


Figura 20. Radiación solar global horizontal incidente para el área de estudio entre enero y junio. Fuente: Explorador solar, 2020 [98]

- Entre los meses de enero y junio el valor más alto registrado se encuentra en enero a las 13 horas con un valor de  $1.007 \text{ W/m}^2$  y un valor mínimo de  $641 \text{ W/m}^2$  registrado para el mes de junio a las 13 horas, con 13 horas de sol para enero-febrero; 12 horas para marzo-abril y 11 horas con junio-julio.

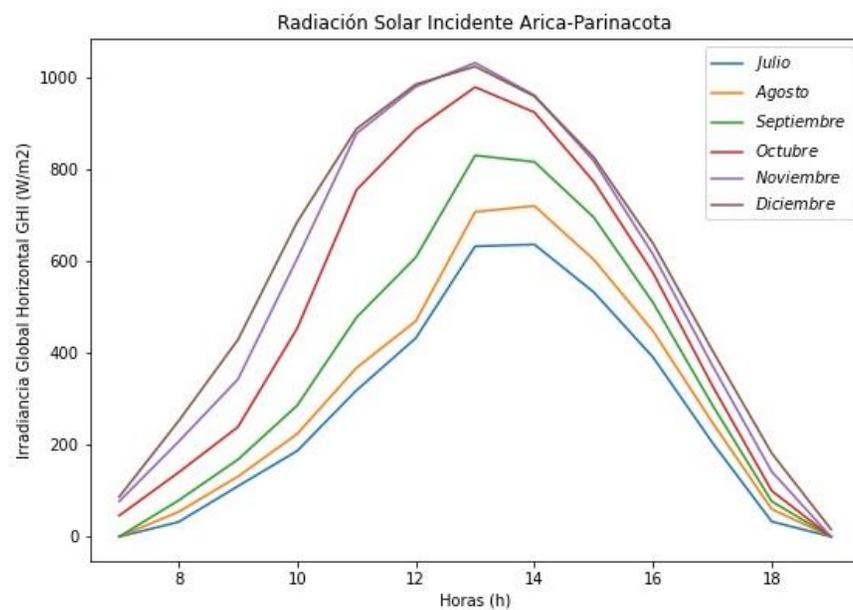


Figura 21. Radiación solar global horizontal incidente área de estudio entre julio y diciembre. Fuente: Explorador solar, 2020 [98].

- Entre los meses de julio y diciembre el valor más alto registrado se encuentra en noviembre a las 13 horas con un valor de  $1.033 \text{ W/m}^2$  y un valor mínimo de  $633 \text{ W/m}^2$  registrado para el mes de julio a las 13 horas, con 11 horas de sol para julio; 12 horas para agosto-noviembre y 11 horas con diciembre.

Para el caso de transferencia de calor en el sistema, se debe utilizar el promedio de la radiación solar global horizontal (directa y difusa) incidente sobre el área del fotorreactor.

Tabla 13. Promedio radiación solar global incidente en el área de estudio.

Mes	Irradiancia Global Horizontal Promedio (W/m <sup>2</sup> )
Enero	603,50
Febrero	586.75
Marzo	562,00
Abril	458.16
Mayo	391.27
Junio	321.27
Julio	319.36
Agosto	336.50
Septiembre	404.58
Octubre	517.16
Noviembre	586.41
Diciembre	568,00

Fuente: Explorador Solar, 2020 [98].

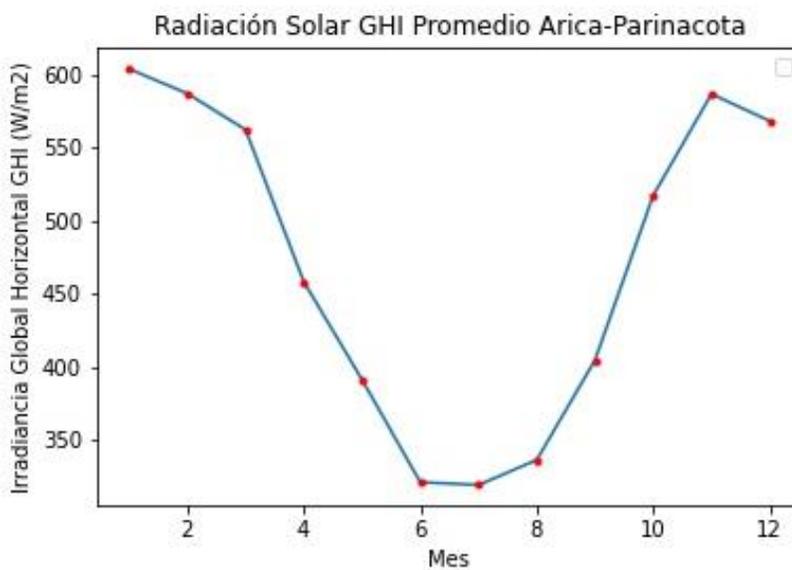


Figura 22. Promedio de radiación solar global horizontal GHI incidente en el área de estudio. Fuente: Explorador solar, 2020 [98].

### 1.6.3.2.2. COMPARACIÓN RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE U. CHILE Y LIMZA

### 1.6.3.2.3. TEMPERATURA PROMEDIO ARICA Y PARINACOTA

La temperatura incidente en las coordenadas ya mencionadas, pueden ser recopiladas de igual manera por las estaciones meteorológicas pertenecientes al LIMZA y de la misma manera para el caso de este estudio no se tuvo acceso a la información empírica para los datos medidos por estas estaciones. De la misma forma se deben utilizar los datos obtenidos por el explorador solar perteneciente a la Universidad de Chile.

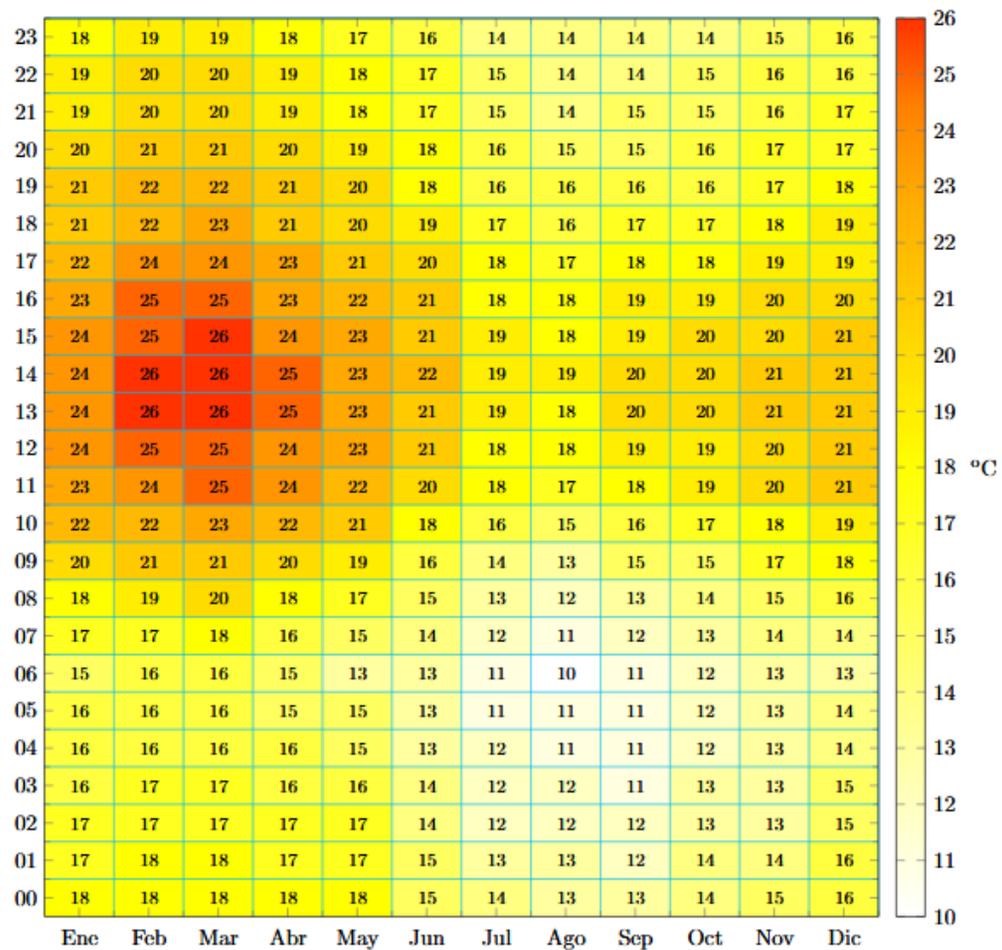


Figura 23. Promedio del ciclo diario de la temperatura (C°) en la ciudad de Arica para cada hora y mes. Fuente: Explorador Solar, 2020 [98].

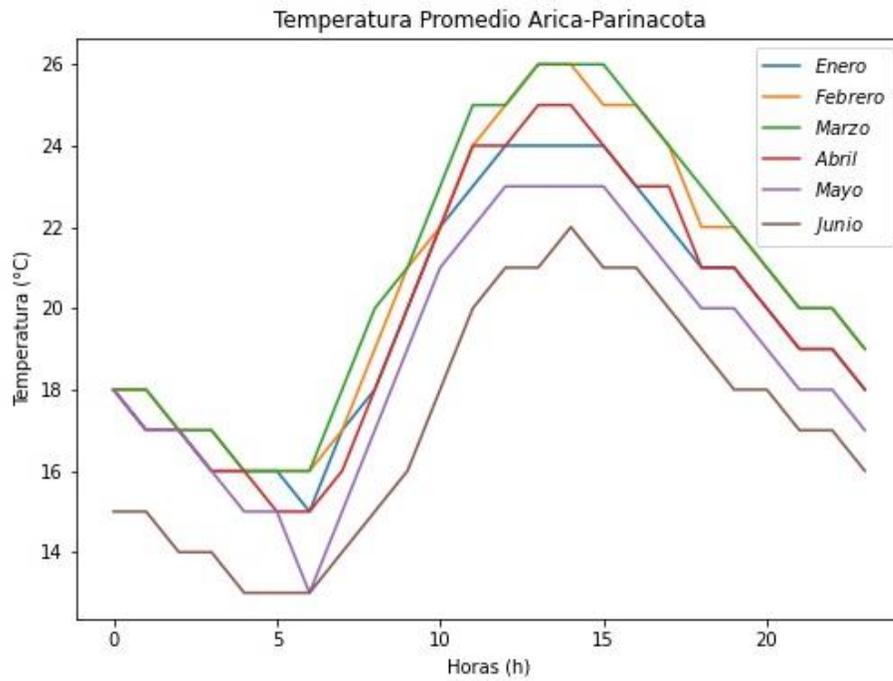


Figura 24. Temperatura promedio ambiental enero a junio Arica-Parinacota. Fuente: Explorador solar, 2020 [98] .

- Entre los meses de enero y junio el valor más alto registrado se encuentra en febrero entre las 13 y las 14 horas con una temperatura de 26°C y un valor mínimo de 13°C entre las 04 y 06 horas registrado para el mes de junio.

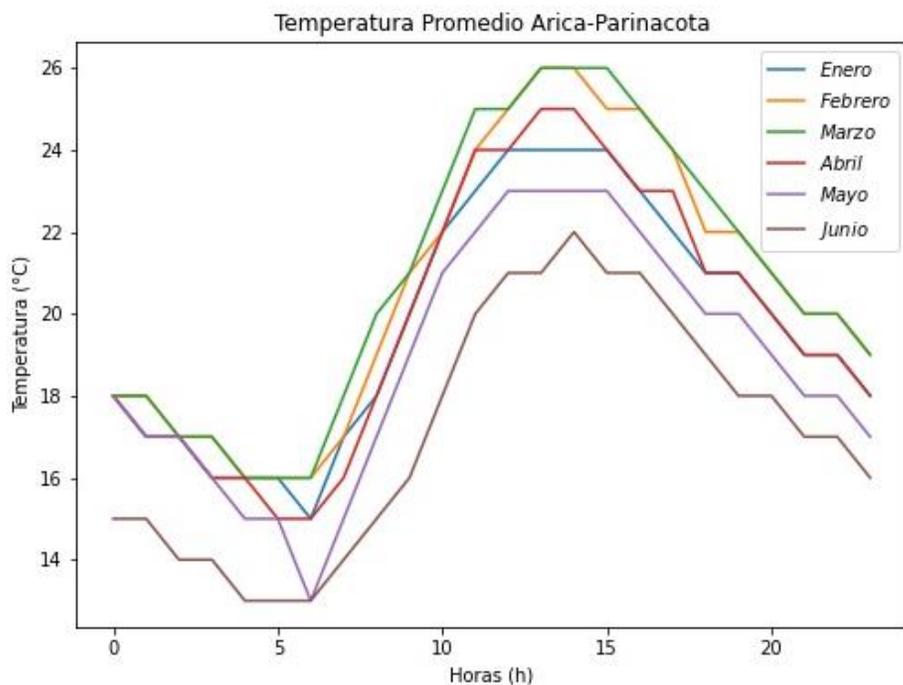


Figura 25. Temperatura promedio ambiental julio a diciembre Arica-Parinacota. Fuente: Explorador solar, 2020 [98].

- Entre los meses de enero y junio el valor más alto registrado se encuentra en febrero entre las 13 y las 14 horas con una temperatura de 26°C y un valor mínimo de 13°C entre las 04 y 06 horas registrado para el mes de junio.

De la misma manera que la radiación solar global horizontal (GHI), es indispensable obtener el promedio mensual de la temperatura ambiental como variable independiente para el modelo de transferencia de calor. Se tiene el promedio anual para el área geográfica de Arica y Parinacota.

*Tabla 14. Promedio de temperatura ambiental en el área geográfica de interés.*

Mes	Temperatura Promedio (°C)
Enero	19.8
Febrero	20.7
Marzo	20.9
Abril	19.8
Mayo	18.8
Junio	17.1
Julio	15.1
Agosto	14.5
Septiembre	15.0
Octubre	15.7
Noviembre	16.6
Diciembre	17.4

Fuente: Explorador solar, 2020 [98].

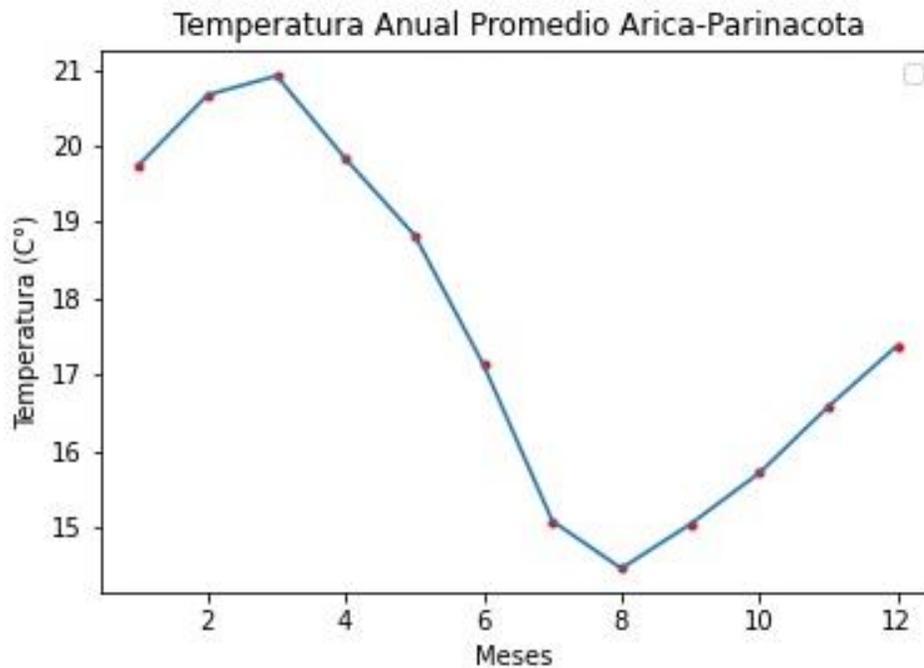


Figura 26. Temperatura promedio mensual área de estudio Arica-Parinacota. Fuente: Explorador solar, 2020 [98].

## 2. CAPITULO II: METODOLOGÍA DE ENSAYO

La presente memoria se enmarca en el proyecto “Solar Water Treatment Design and Optimization of Solar Detoxification Plants Adapted to Atacama Desert Radiation Condition”, FONDECYT INICIACIÓN – N°11160680. Siendo los autores docentes de la Universidad de Tarapacá (UTA) que conforman parte del equipo del Laboratorio de Investigaciones Medioambientales de Zonas Áridas (LIMZA).

La primera etapa de este estudio es entregar criterios para seleccionar diferentes materiales semi transparentes comunes y de bajo costo que puedan ser candidatos a cubrir el fotorreactor. Dentro de estos materiales se debe adquirir un vidrio de borosilicato que se utilizará como modelo de comparación y estudio teórico del comportamiento térmico del equipo.

Una vez definidos los posibles candidatos, se entrega una metodología y criterios para estudiar el porcentaje de radiación ultravioleta que estos materiales permiten transmitir hacia otro medio, incluyendo el vidrio borosilicato. De esta manera se

seleccionan dos posibles candidatos para continuar con una segunda campaña experimental que pretende estudiar su comportamiento bajo condiciones ambientales prolongadas de la ciudad de Arica.

Luego de definir estos criterios experimentales, se realiza el estudio teórico del comportamiento óptico-térmico del vidrio borosilicato para obtener la cantidad de radiación solar térmica que permite transmitir hacia el sistema. Se evalúa el modelo de temperatura propuesto junto con las condiciones ambientales características de la zona de estudio y se define numéricamente la temperatura de operación en los equipos para 3 meses característicos del año.

Al validar el modelo térmico junto con el recubrimiento de borosilicato, se diseñan diferentes elementos y componentes que permitirán cubrir y descubrir los equipos fotorreactores con la finalidad de no modificar de forma permanente los equipos y permitir finalmente que estos operen como fotorreactores parcialmente cubiertos.

Finalmente se estima el costo que implica adquirir los diferentes materiales candidatos, construir una plataforma de prueba y materializar los elementos que permitan adosar el recubrimiento a los equipos fotorreactor en base a los fondos destinados para la investigación.

## **2.1. CAMPAÑA DE ADQUISICIÓN DE MATERIALES SEMI TRANSPARENTES**

En primer lugar, los materiales que se deben emplear para cubrir el fotorreactor deben ser materiales comunes y fácilmente accesibles que cumplan ciertas condiciones en su composición. La segunda condición es que deben ser 6 tipos distintos de materiales, 3 de ellos deben ser de estructura rígida (vidrio, planchas, placas, etc.) y 3 de ellos deben ser de una estructura flexible (rollos de film, plásticos de recubrimiento, lonas, etc.).

La composición de estos debe semejarse a materiales utilizados por la industria agraria (invernaderos) y la industria termo solar (colectores solares). El principal motivo de estas condiciones, es el hecho de que los materiales utilizados para generar condiciones óptimas de transmisión de luz o temperatura tienen un costo elevado de adquisición, además de encontrarse en dimensiones industriales y difícilmente empleados para equipos pilotos.

Los materiales deben ser lo menos opaco posible, deben considerar una geometría manipulable de carácter rectangular con un peso por unidad de área relativamente bajo, para efectos de transporte.

## **2.2. MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA**

Para medir la radiación ultravioleta de un sector geográfico característico, se debe contar con equipos capaces de captar e interpretar esta franja espectral de longitud de onda. Equipos denominados radiómetros, los cuales registran señales de radiación ultravioleta a medida que esta incide en una cúpula de cuarzo, la cual atraviesa un difusor de teflón hasta llegar a un filtro transmisor de longitud de onda corta. Éste simula el efecto que se tiene cuando la radiación ultravioleta incide sobre la piel humana, así descartando cualquier otra longitud de onda en el espectro visible y permitiendo el paso de una mayor cantidad de radiación [99].

### **2.2.1. INSTRUMENTACIÓN**

Para esta investigación, se cuenta con dos radiómetros SUB UV-A proporcionados por Kipp&Zonen, estos miden e interpretan la longitud de onda en el espectro de 315 a 400 nm, correspondientes a la radiación ultravioleta del tipo A. Las características técnicas se detallan en la Tabla N°15.

Tabla 15. Información técnica radiómetros SUB-A Kipp&Zonen.

<b>Rango espectral</b>	315 a 400 nm
<b>Rango de salida típico</b>	0 a 90 W/m <sup>2</sup>
<b>Tiempo de respuesta (95%)</b>	< 0,2 s
<b>Error de linealidad</b>	< 1 %
<b>Respuesta a la temperatura (-40 a +70°C)</b>	< 2 %
<b>Intervalo de temperaturas de funcionamiento</b>	< -40 a +70°C
<b>Tensión de suministro CC</b>	5 a 30 V
<b>Consumo energético</b>	< 55 mW
<b>Salida digital</b>	RS-485, Molbus® RTU
<b>Salida análoga</b>	0 a 1
<b>Peso</b>	600 g

Fuente: Kipp&Zonen datasheet

Este equipo capta la radiación ultravioleta global, la cual se compone por radiación ultravioleta directa y difusa. Una interface inteligente procesa los datos crudos, mediante la variación de voltaje como señal de entrada, las que posteriormente se traducen en radiación UV por unidad de área (W/m<sup>2</sup>). La interface inteligente RS-485 Molbus® almacena los datos obtenidos por un controlador lógico programable (PLC), para luego ser enviados a un dispositivo USB y ser procesador por software de calibración.

El equipo tiene una geometría sencilla, de forma circular con un radio mayor de 150 mm, correspondiente a un sistema parasol diseñado para protegerlo de la exposición prolongada a la radiación solar y condiciones climáticas exteriores. Un radio menor, correspondiente a la cúpula de cuarzo para la recepción de radiación incidente de 50 mm; tiene una altura máxima de 92,5 mm y una altura al parasol de 68 mm.

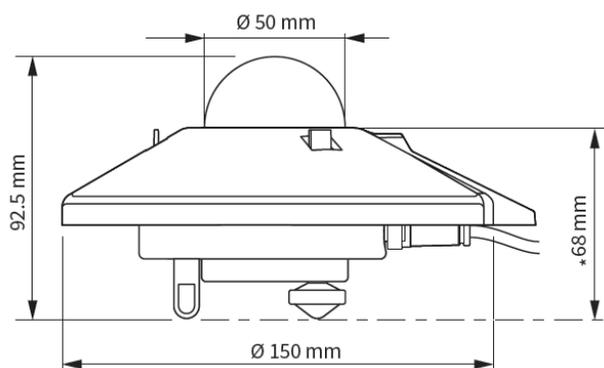


Figura 27. Dimensiones radiómetros Kipp&Zonen SUB-UVA. Fuente: Kipp&Zonen instrucción data.

## 2.2.2. CONTROL Y PROCESO DE DATOS

Para calibrar y procesar la información se usan dos softwares proporcionados por Kipp&Zonen, el primero de ellos denominado “*Smart Explorer*”, el cual se encarga de definir los parámetros para la adquisición de los datos incidentes y su aglomeración en hojas de datos como la que se muestra en la figura N°28.

Date	Time	Channel	Status	Modbus II Serial Nr	Type	Softw. Rel Hardw. ReSensitivity Scalefactor
26/04/2019	09:22:50	1	Ready	10-0003	SMP6-V	V201 V002 14.6652 0.1
26/04/2019	09:22:50	2	Ready	18-0092	DustIQ	V11129 V005 1 0.1
26/04/2019	09:22:50	3	n.a.			
26/04/2019	09:22:50	4	n.a.			
26/04/2019	09:22:50	5	n.a.			
26/04/2019	09:22:50	6	n.a.			
26/04/2019	09:22:50	7	n.a.			
26/04/2019	09:22:50	8	n.a.			
26/04/2019	09:22:50	9	n.a.			
26/04/2019	09:22:50	10	n.a.			

Date	Time	W/m2	Celcius	V	%	%	Celcius	V	N/A	N/A	N/A
26/04/2019	09:22:55	2.3	0	22.9	12.4	100	99.9	-273.15	3.2		
26/04/2019	09:23:00	2.2	0	22.9	12.4	100	99.9	-273.15	3.2		
26/04/2019	09:23:05	2.2	0	22.9	12.4	100	99.9	-273.15	3.2		
26/04/2019	09:23:10	2.2	0	22.9	12.4	100	99.9	-273.15	3.2		
26/04/2019	09:23:15	2.2	0	22.9	12.4	100	99.9	-273.15	3.2		
26/04/2019	09:23:20	8.6	0	22.9	12.4	100	99.9	-273.15	3.2		
26/04/2019	09:23:25	36.3	0	22.9	12.4	100	99.9	-273.15	3.2		
26/04/2019	09:23:30	41.4	0	22.9	12.4	100	99.9	-273.15	3.2		
26/04/2019	09:23:35	32.8	0	22.9	12.4	100	99.9	-273.15	3.2		
26/04/2019	09:23:40	5.7	0	22.9	12.4	100	99.9	-273.15	3.2		
26/04/2019	09:23:45	3.2	0	22.9	12.4	100	99.9	-273.15	3.2		
26/04/2019	09:23:50	3	0	22.9	12.4	100	99.9	-273.15	3.2		

Figura 28. Hoja de datos Smart Explorer. Fuente: Kipp&Zonen Manual Operation.

La adquisición de datos mediante el software “*Smart Explorer*” debe ser complementado con “*Uviator*”. Este software se encarga de ajustar los datos en función del tiempo universal coordinado UTC; condiciones atmosféricas locales; ángulo cenital, columna de ozono y nubosidad, etc. Como la longitud de onda en el rango 315 a 400 nm se considera una señal débil, este software amplifica la señal, disminuyendo así el error sistemático espectral, de esta manera entregar todas las medidas aptas para su análisis sin la necesidad de realizar correcciones matemáticas.

El manual de operaciones recomienda para un espectro de radiación ultravioleta en el rango espectral de 315 a 400 nm utilizar una resolución de 0,1 W/m<sup>2</sup>, debido a

que este espectro de onda es relativamente bajo. Las mediciones se realizan con un intervalo de tiempo de un minuto para cada respuesta de irradiancia solar, recopilando de esta manera cada 60 minutos una totalidad de 3600 muestras, siendo este rango el máximo de recepción muestral del equipo, lo que reduce significativamente la dispersión de los datos al momento de cuantificar un análisis.

### 2.3. METODOLOGÍA DE OPERACIÓN

El lugar geográfico donde se deben realizar las mediciones de radiación ultravioleta, se emplaza en las coordenadas 18,47 de latitud y 70,31 de longitud, ubicadas en la ciudad de Arica, región de Arica y Parinacota.

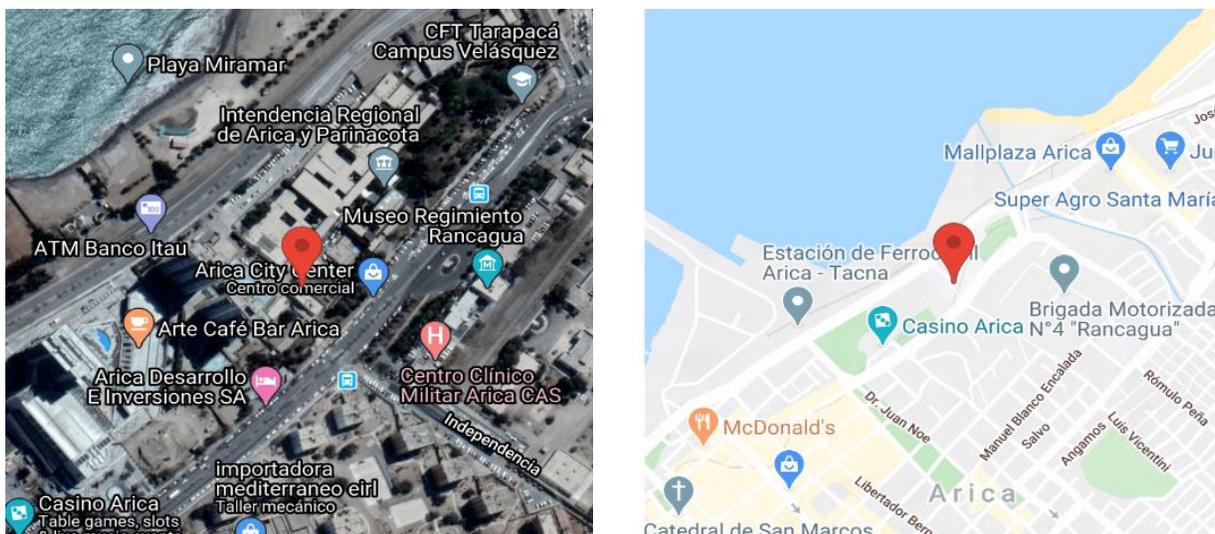


Figura 29. Disposición general del lugar geográfico donde se debe emplazar la investigación Fuente: Google Maps.

En este lugar se encuentra el Laboratorio de Investigaciones Medioambientales de Zonas Áridas (LIMZA) perteneciente a la Universidad de Tarapacá; se pretende utilizar dos radiómetros Kipp&Zonen serie SUB-UVA, los cuales se deben posicionar en la azotea del recinto, el cual se encuentra en una zona con un clima costero húmedo y salino a 9 metros sobre el nivel del mar.

Los equipos se deben posicionar de forma paralela en la dirección que permita el área de implementación, ya sea norte-sur o este-oeste. El primer radiómetro se le asignará la denominación RD01 y el segundo radiómetro se le asignará la denominación RD02. El equipo RD01 tomará mediciones de radiación ultravioleta A de forma normal y técnicamente como lo indica el apartado 2.2; mientras que el equipo RD02 se encargará de recopilar información con una metodología de operación enfocada al estudio de la radiación ultravioleta incidente en diferentes materiales definidos.

### **2.3.1. MONTAJE EQUIPO RD01**

El equipo debe montarse en una superficie totalmente horizontal o en su mayoría nivelada, de preferencia en una plataforma o banco de trabajo. De presentarse una superficie irregular, el equipo cuenta con un nivelador ajustable que se encuentra en uno de sus anclajes; al momento de comenzar a captar radiación ultravioleta, este debe ser conectado de forma remota o vía análoga hacia un “*data logger*”, en este caso, un puerto USB con conexión RS-485 que permita interpretar las señales de radiación ultravioleta como se menciona en el apartado 2.2.

Al momento de posicionar el equipo, es sugerible seguir las recomendaciones que indica BSRN para el correcto uso y mantenimiento de las estaciones radiométricas [100] [101]. Estas recomendaciones deben aplicarse al montar el equipo por primera vez, de forma diaria y lo que dure el tiempo de uso. Las recomendaciones se mencionan a continuación:

- Limpieza de radiómetro con agua destilada
- Eliminación de la condensación en el radiómetro (interior y exterior)
- Comprobación del estado del desecante para absorber la humedad interior
- Comprobando el color y el estado de la termopila
- Comprobación horizontal de los instrumentos montados

- Cableado que conduce desde el instrumento a la adquisición de datos del sistema
- Comprobación de referencia temporal
- Comprobación de seguidores solares
- Comprobación de la banda de sombra del piranómetro para medir radiación solar difusa
- Revise los datos del día anterior

### **2.3.2. MONTAJE EQUIPO RD02**

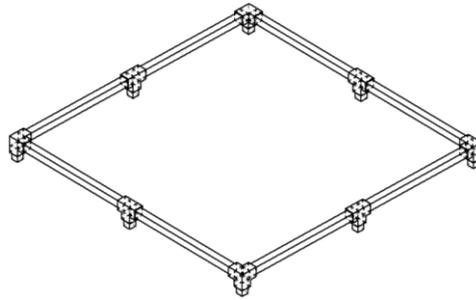
El equipo RD02 debe montarse con una estructura soporte instalada sobre él. De esta forma, posicionar los diferentes materiales destinados a ser sometidos a la radiación ultravioleta característica del área geográfica de estudio.

#### **2.3.2.1. ESTRUCTURA SOPORTE**

Según el manual de operación y montaje para un radiómetro Kipp&Zonen SUB-UVA [102], la distancia mínima entre el radiómetro y cualquier objeto que pueda producir sombra al momento de estar en operación, debe ser mínimo diez veces la altura del objeto en sí. Tomando en cuenta las medidas de la figura N°27, se tienen las siguientes opciones de diseño:

1. Diseñar una estructura desmontable con un radio de distancia de 1000 mm con cuatro columnas principales como lo mencionan las especificaciones entregadas por Kipp&Zonen, conectadas entre sí con cuatro uniones en con dos salidas en forma perpendicular soportada por columnas principales y cuatro uniones con salidas paralelas soportada de igual manera con columnas para evitar el concepto de deflexión en las vigas, las cuales tienen una forma de L para facilitar el anclaje de los materiales. Además de considerar ocho perforaciones roscadas para uniones atornillables M12 con

una profundidad de acople de 50 mm como método de acople de los diferentes materiales rígidos o flexibles a ensayar.



*Figura 30. Vista isométrica estructura soporte N°1. Fuente: Personal.*

Esta estructura tiene un área de 2050x2050 mm, resultando inviable su construcción debido, en primer lugar, a la dificultad para adecuar materiales de ensayo en el área antes mencionada, lo que se traduce en costos y tiempos de operación; en segundo lugar, reduce de manera considerable el espacio de operación; por último, con una estructura de estas dimensiones aumentan los errores de precisión en la construcción y montaje.

2. La segunda estructura, contempla una premisa de diseño de una estructura desmontable, con uniones centrales macizas unidas por vigas en forma de L. Sin embargo, con un área reducida de 180x180 mm con una altura máxima de 110 mm, la cual está diseñada para cubrir el área de operación del equipo de 150 mm de radio dejando una tolerancia de montaje entre el equipo y la estructura de 15 mm. Además de considerar 4 perforaciones roscadas para unión atornillable M10 con una profundidad de acople de 50 mm para la sujeción del material de ensayo a acoplar, ya sea rígido o flexible.

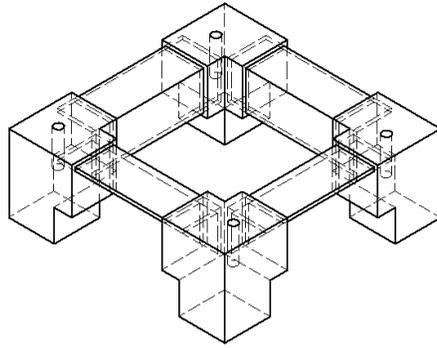


Figura 31. Vista isométrica estructura soporte N°2. Fuente: Elaboración personal.

El área de la estructura N°2 minimiza considerablemente el trabajo de adecuar distintos tipos de materiales para ensayo al área superficial de prueba, además de tener una geometría sencilla con medidas que no superan los 380 mm y fácil de transportar.

### 2.3.2.2. VALIDACIÓN ESTRUCTURA SOPORTE

#### 2.3.2.2.1. MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Bajo el concepto de estructura desmontable, esta se divide en diferentes componentes que encajan entre sí mediante sistemas de acople de ranuras o agujeros. En la tabla N°16 se detallan los componentes que presentan la estructura soporte.

Tabla 16. Listado de componentes estructura soporte.

Componente	Dimensiones [mm]	Cantidad	Observación
Viga lateral de soporte	180x55x55	4	Viga lateral tipo L
Unión lateral principal	110x90x90	4	Unión con 2 conexiones, dos de ellas de ranura tipo L
Placa de anclaje	40x40x3	4	Placas rectangulares para anclaje entre material de ensayo y estructura soporte

Fuente: Elaboración personal.

De esta manera, para la selección del material de construcción, se deben tener en cuenta las siguientes características de los componentes de la estructura soporte.

- El tamaño de los componentes en promedio no superior a los 180 milímetros en cualquiera de las direcciones espaciales
- Su geometría no es compleja y es relativamente básica de materializar
- Esta estructura puede modificarse y adecuarse a cualquier necesidad que el estudio requiera
- Materiales metálicos pueden producir interferencias electromagnéticas y generar ruidos o errores considerable al momento de realizar el testeado
- Material resistente a las condiciones climáticas costeras de la ciudad de Arica, a la degradación por radiación ultravioleta, etc.
- Material con una resistencia mecánica considerable y un peso por unidad de volumen relativamente bajo para no dañar el equipo, en cualquier caso

El material de construcción para la estructura soporte que encaja con estas características son los polímeros termoestables por impresión 3D. Considerando que el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Tarapacá, tiene entre sus instalaciones dispositivos de impresión 3D, además estos polímeros termoestables impresos 3D no experimenta corrosión ni interferencia con los componentes eléctricos del equipo.

Dentro de la variedad de los polímeros termoestables más utilizados y disponibles, se encuentra el acrilonitrilo butadieno estireno o ABS por sus siglas; el ácido poliláctico o PLA por sus siglas y el acrilonitrilo estireno acrilato o ASA por sus siglas. Estos polímeros termoestables presentan propiedades ideales para ser moldeados por impresión 3D con resistencias mecánicas similares debido a su condición termoplástica. Sin embargo, no todos presentan los mismos comportamientos bajo condiciones características de operación. En el caso de este estudio, la exposición

prolongada a la radiación solar del desierto de Atacama será el factor clave al momento de seleccionar el material adecuado de construcción.

En la tabla N°17 se presenta una comparación entre las características principales de estos tres polímeros termoestables [103].

*Tabla 17. Comparación general entre los diferentes polímeros termoplásticos más empleados en el diseño por impresión 3D.*

<b>Polímero</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Resistencia a la tracción ISO527-2</b>	<b>Características</b>
Acrilonitrilo Butadieno Estireno	ABS	32 MPa	Termoplástico resistente al calor y los impactos, buena resistencia a los ataques químicos y a la fatiga. Tiene una tenacidad elevada a las gradientes de temperatura, siendo esta incluso de -40°C. Sin embargo, tiene una baja resistencia a la intemperie, rápido deterioro por radiación ultravioleta. Mayoritariamente utilizado para piezas con un alto módulo de flexión.
Ácido Poliláctico	PLA	27 MPa	Poliéster termoplástico bio compatible con excelentes propiedades mecánicas como la resistencia a la torsión, pero con una resistencia baja al impacto. Generalmente se utiliza en la industria médica como replazante para implante de huesos y para films en la industria textil. Tiene una baja resistencia a las altas temperaturas.
Acrilonitrilo Estireno Acrilato	ASA	40 MPa	Termoplástico utilizado generalmente para condiciones de exterior con una alta resistencia a la degradación por radiación ultravioleta y los productos químicos, conservando sus propiedades mecánicas en condiciones de humedad y agua. Buena resistencia a los golpes, reducción de la deformación y excelente estabilidad dimensional, además de tener una alta resistencia al envejecimiento por calor. Es

---

utilizado de diferentes maneras, desde piezas de construcción hasta equipos de vacío.

---

*Fuente: Elaboración personal.*

El material de construcción para los componentes de la estructura soporte, debe ser de acrilonitrilo estireno acrilato (ASA) o algún termoplástico moldeable que se les asemeje a las condiciones de respuesta térmica y mecánicas en condiciones de intemperie.

### **2.3.3.2. ANÁLISIS ESTRUCTURA SOPORTE**

#### **2.3.3.2.1. ANÁLISIS ESTRUCTURAL ANÁLOGO**

Se considera una viga en L doblemente empotrada en sus esquinas por la condición de estar acoplada a ranuras de encaje dimensional. Considerando las siguientes condiciones de carga

- Suponer que las vigas están sometidas a una carga de 5 kg-f distribuidos linealmente sobre su base superior de 150 mm de largo.
- El método de cálculo será por deformación admisible y flexión máxima.

La deformación admisible en una viga se rige por el momento flector máximo y el momento resistente según las dimensiones de la viga, tal como lo ilustra la ecuación (Ec. 2.3.1.)

$$\sigma_{adm} = \frac{Mf_{máximo}}{W_{resistente}} \quad (\text{Ec. 2.3.1})$$

A su vez el momento flector máximo representa el punto en la estructura donde se produce la máxima deformación por una carga P, como lo ilustra la ecuación (Ec. 2.3.2)

$$Mf_{máx} = \frac{-P}{12} (L^2 - 6Lx + 6x^2) \quad (\text{Ec. 2.3.2})$$

Considerando una carga  $P$  igual a  $0,34 \text{ kg-f/cm}$  con un largo de  $15 \text{ cm}$  y el punto donde ocurre la máxima deformación ( $x$ ) igual a  $L/2$ , reemplazando en la Ec. 2.3.2, el momento flector máximo queda definido de la siguiente forma.

$$Mf_{m\acute{a}x} = 3.1875 \text{ kgf cm}$$

El momento resistente viene definido en función de la geometría de la viga y viene definida de manera empírica por definición de vigas. Siendo ésta para una viga  $L$  de  $55 \times 55 \text{ mm}$  con un espesor de  $2 \text{ mm}$  tiene un momento resistente de  $1,33 \text{ cn}^3$ . De esta manera la deformación máxima permisible se consigue reemplazando el momento flector máximo y el momento resistente en la (Ec. 2.3.1)

$$\sigma_{adm} = 2.396 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

El esfuerzo máximo por el método de deformación admisible es de  $2,4 \text{ kg-f/cm}^2$  o el equivalente a  $0,2396 \text{ MPa}$ , el cual es totalmente menor a los  $400 \text{ kg-f/cm}^2$ . De esta manera la viga soporta un sistema de carga de  $5 \text{ kg-f}$  distribuida en su superficie.

La deflexión máxima admisible se representa en función del módulo de elasticidad del material y su momento de inercia, tal como lo ilustra la (Ec. 2.3.2)

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{PL^4}{384EI} \quad (\text{Ec. 2.3.3})$$

Siendo el módulo de elasticidad para un polímero termoestable ASA de  $25.492 \text{ kg-f/cm}^2$ , mientras que el momento de inercia viene definido empíricamente por concepto de viga en  $L$ , siendo este de  $55 \times 55 \text{ mm}$  con un espesor de  $2 \text{ mm}$  igual a  $1,58 \text{ cm}^4$

$$y_{m\acute{a}x} = 1.1 \times 10^{-3} \text{ cm} = 0,036179 \text{ mm}$$

### 2.3.3.2.2. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

Bajo el concepto de tensiones admisibles de Von Misses [104], se hará un análisis de deformaciones admisibles a la estructura soporte. El material empleado para la

construcción considera un esfuerzo de ruptura de 400 kg-f/cm<sup>2</sup> o 40 Mpa. Mediante el software de simulación y diseño Autodesk Inventor, se hará un análisis de elementos finitos, bajo las siguientes condiciones.

- Se considera el caso de una plancha con un peso de 6 kg-f distribuidos en una superficie lineal de superficial de 150 mm, correspondiente a las vigas empotradas en L
- Se considera un enmallado con un promedio de 82.865 nodos y 51.124, tan como se muestra en la figura N°32.

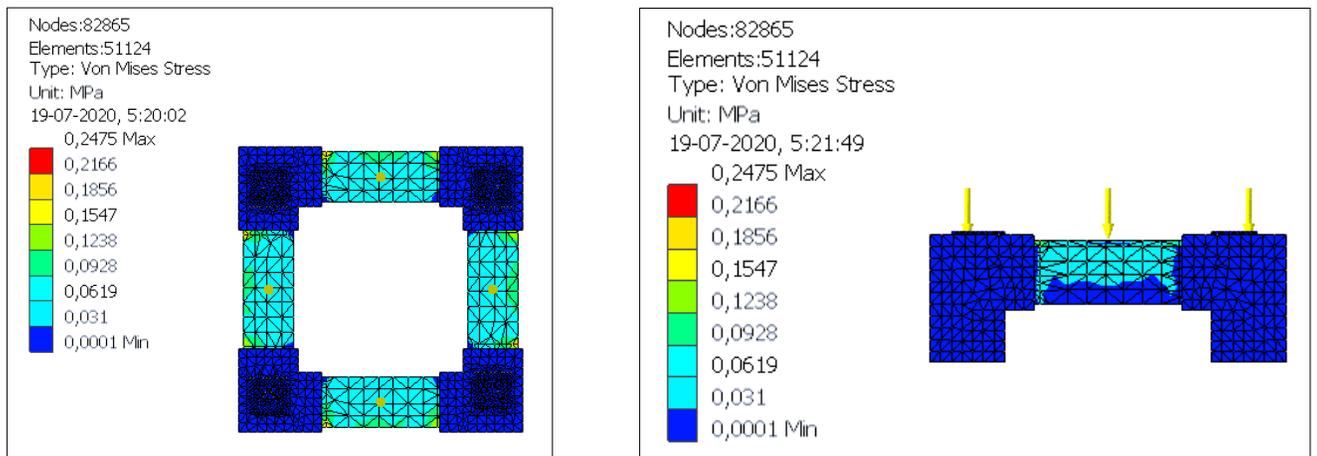
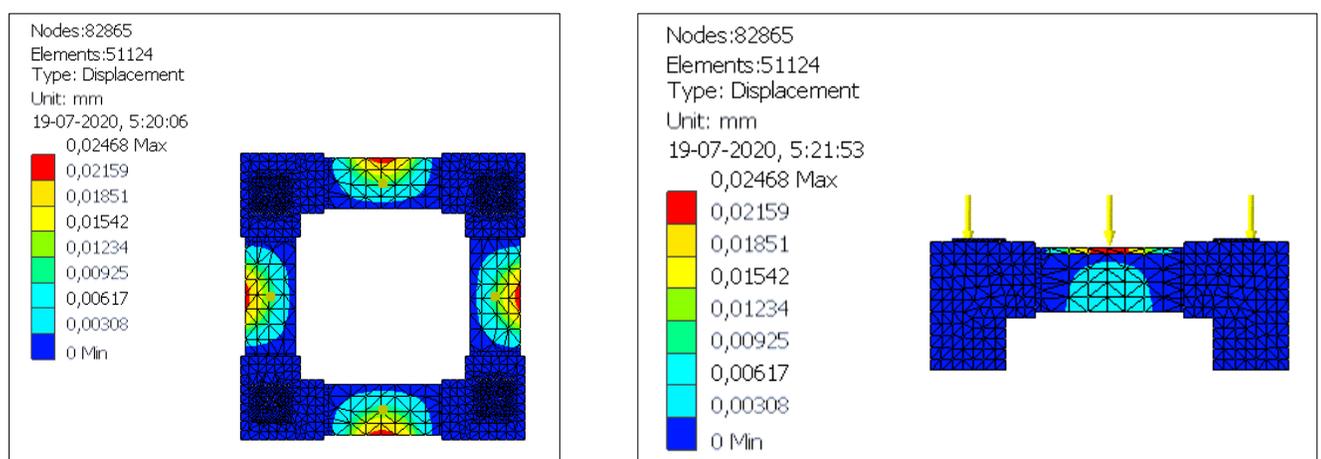


Figura 32. Análisis estructural de elementos finitos por tensión admisible. Fuente: Personal.

- Se observa un esfuerzo máximo de trabajo de 0,2475 Mpa o 2,5 kg-f/cm<sup>2</sup>, el cual es considerablemente inferior al esfuerzo de ruptura de 400 kg-f/cm<sup>2</sup>.



*Figura 33. Desplazamientos máximos sobre estructura soporte mediante análisis de elementos finitos. Fuente: Personal.*

- Se observa un desplazamiento máximo de 0,0245 mm correspondientes a la zona L/2

Al realizar una comparación entre el análisis análogo bajo conceptos de mecánica clásica y resistencia de los materiales, en comparación con el análisis por elementos finitos bajo un software de simulación se tiene que.

- El esfuerzo máximo admisible por el método análogo es de 0,2396 MPa o 2,396 kg-f/cm<sup>2</sup>, mientras que, por análisis de elementos finitos, el esfuerzo admisible máximo es aproximadamente de 0,2475 MPa o 2,475 kg-f/cm<sup>2</sup>.
- La deflexión máxima de la estructura por el método análogo es de 0,011 mm, mientras que, por análisis de elementos finitos, el desplazamiento máximo de la estructura es de 0,0268 mm.
- Los polímeros termoestables moldeados por impresión 3D deben tener un factor de seguridad superior a 7, esta relación entre el esfuerzo máximo de trabajo y el esfuerzo admisible condiciona el diseño como seguro o no seguro. Siendo ambos diseños con factores de seguridad superior a 15, considerados totalmente óptimos y confiables.

### **2.3.2.3. MONTAJE Y POSICIÓN DE MATERIAL DE ENSAYO**

- En primer lugar, el material seleccionado debe adecuarse a la superficie de la estructura soporte, esta tiene un área de 310x310 mm. Debe contar con cuatro perforaciones cerca de sus aristas, de esta manera encajar con los agujeros de la estructura en las columnas de apoyo de la estructura soporte.

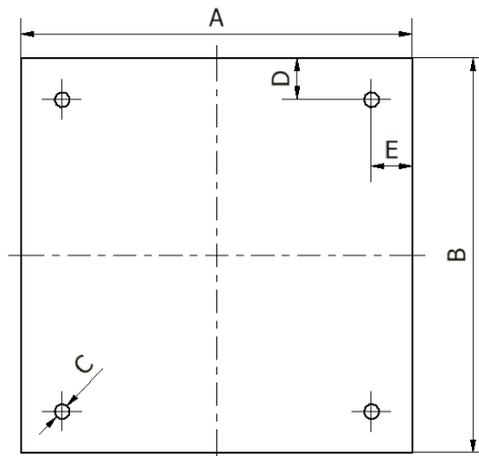


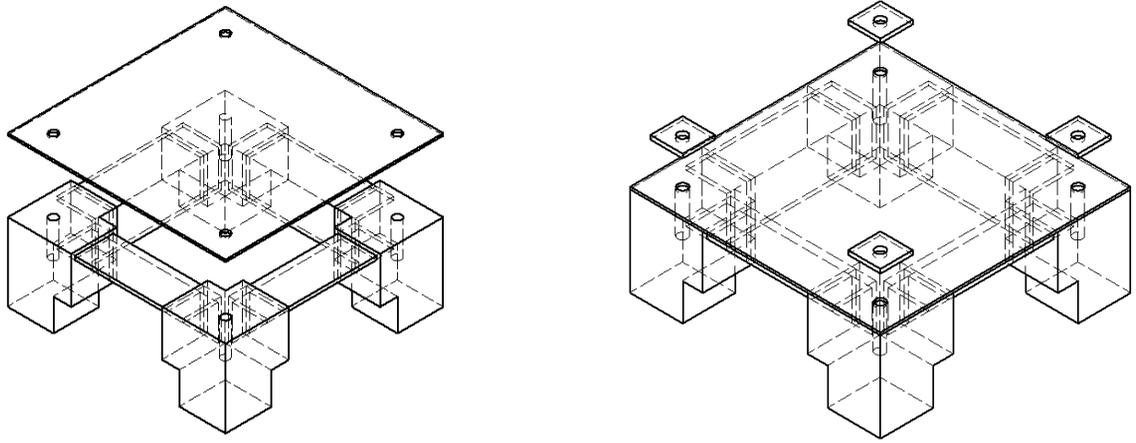
Figura 34. Vista frontal ilustrativa material de ensayo para montaje de estructura soporte. Fuente: Personal.

Tabla 18. Dimensiones generales para el material de ensayo adecuado a la estructura soporte.

Índice	Dimensión [mm]
A	320
B	320
C	12
D	32.5
E	32.5

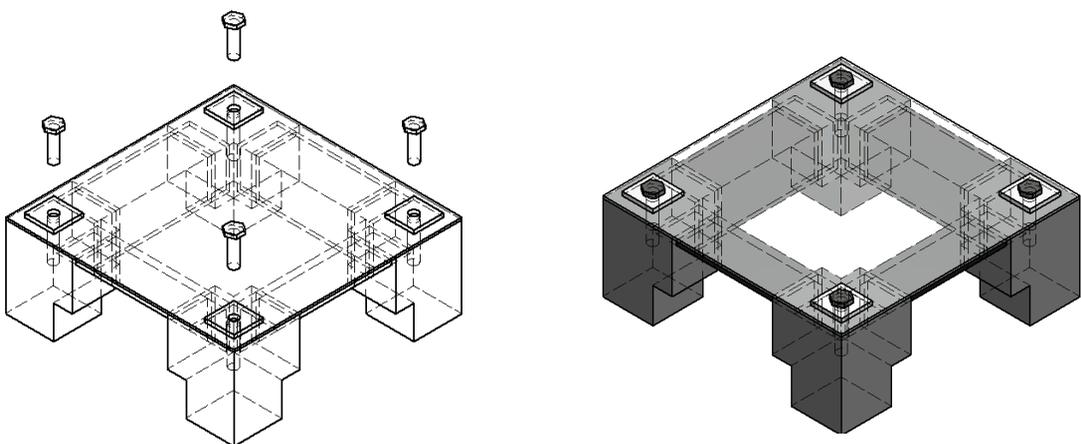
Fuente: Elaboración personal.

- El material debe posicionarse sobre la estructura soporte realizando el encaje en los orificios entre la estructura y el material de ensayo, de esta manera posicionar las placas de sujeción para anclar el material a la estructura.



*Figura 35. Vista isométrica montaje del material de ensayo y placas de sujeción en estructura soporte. Fuente: Elaboración personal.*

- En tercer lugar, se deben posicionar los pernos para realizar el ajuste definitivo en la restricción de los grados de libertad del material de ensayo, de esta forma estar totalmente definido para comenzar a realizar las pruebas de medición. Los pernos deben ser del carácter galvanizado o inoxidable por concepto de humedad salina y oxidación, de medida M12x50 mm de largo, los cuales deben ir atornillados con paso de hilo de 1,75 mm para el ajuste en la estructura soporte.



*Figura 36. Vista isométrica montaje de los pernos de sujeción y configuración final de la estructura soporte. Fuente: Elaboración personal.*

El equipo RD02 junto con la estructura de soporte, debe estar a una distancia paralela al equipo RD01, pero con una separación A, como lo muestra la figura N°36. La distancia mínima parte desde el primer contacto del radio exterior del equipo C, hasta el primer contacto con la estructura soporte.

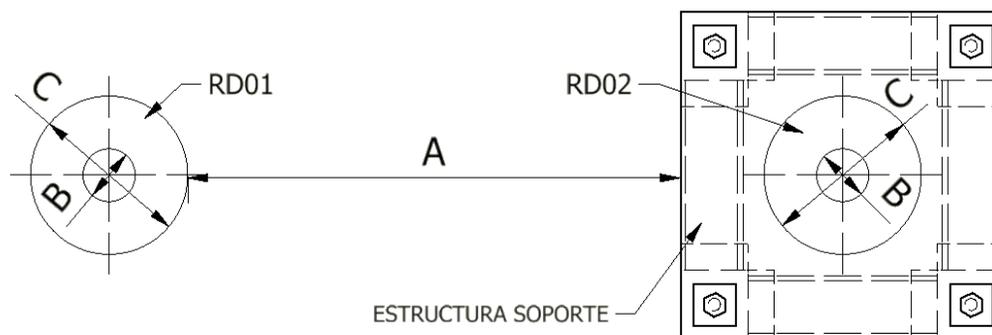


Figura 37 . Distancia entre los equipos RD01 y RD02. Fuente: Elaboración personal.

Las medidas A corresponden a una separación de 1000 mm como mínimo; las medidas B y C corresponden a los radios de los equipos RD01 y RD02, siendo éstas de 50 y 150 mm respectivamente. El equipo RD02 debe montarse en una superficie totalmente horizontal o en su mayoría nivelada, de preferencia en una plataforma o banco de trabajo junto con la estructura soporte posicionada por encima de él. De presentarse una superficie irregular, el equipo cuenta con un nivelador ajustable que se encuentra en uno de sus anclajes.

Al momento de comenzar a captar radiación UV, este debe ser conectado de forma remota o vía análoga hacia un “*data logger*”, en este caso, un puerto USB con conexión RS-485 que permita interpretar la radiación ultravioleta incidente como se menciona en el apartado 2.2.

Al momento de posicionar el equipo, es sugerible seguir las recomendaciones que indica BSRN para el correcto uso y mantenimiento de las estaciones radiométricas.

## **2.4. METODOLOGÍA DE ENSAYO**

El equipo RD01 y RD02 deben iniciar su operación de forma paralela. El registro de la radiación incidente debe cumplir como mínimo seis horas de medición. Como la estructura de soporte no cumple con las condiciones de distancia entre obstáculos como lo indica el manual de operación y montaje de Kipp&Zonen, existe un factor de incertidumbre debido a la sombra que puede producir la estructura al equipo al momento de estar registrando datos de radiación. Debido a este factor de incertidumbre se debe tomar en cuenta las mediciones registradas entre las 10:00 y las 14:00 horas UTC-3, ya que en este intervalo de tiempo el ángulo zenit que proyecta la altura del sol en función de una normal hacia el suelo, produce la menor cantidad de sombra en los objetos.

La metodología antes mencionada debe realizarse de forma diaria para los seis diferentes materiales seleccionados. Al finalizar cada día de ensayo, se debe retirar el material de la plataforma de prueba, utilizar un dispositivo USB para obtener los datos medidos para su proceso y posicionar el nuevo material de ensayo para la siguiente prueba. El material debe retirarse cuando la luz solar haya cesado o a primera hora de la mañana cuando no se tenga registro alguno, el equipo comenzará a registrar medidas al momento de que el primer rayo solar incida sobre él, de esta forma es muy importante realizar el cambio de material sin interferir con la operación.

### **2.4.1. CUANTIFICACIÓN DE DATOS**

El equipo entrega información como la irradiancia global ultravioleta y el registro de la temperatura tal como lo ilustra la figura N°28 del apartado 2.2.2. Sin embargo, tomando en cuenta que deben ser como mínimo cinco horas de medición, con una cantidad de 3.600 muestras por hora, en total se tiene una serie 18.000 muestras. Por este motivo se debe realizar una cuantificación de los datos, Es por esto que

surge la necesidad de cuantificar esta cantidad de muestras para reducirlos a series de datos interpretables bajo diferentes variables como:

- Promedio de radiación ultravioleta incidente separada en horas de medición
- Promedio de la temperatura asociada a la incidencia de la radiación separada en horas de medición
- Definición de puntos máximos y mínimos en la incidencia de la radiación y la temperatura separada en las horas establecidas de medición
- Definición de la dispersión en la población en las muestras de radiación incidente y temperatura separadas en las horas establecidas de medición mediante la desviación estándar.

#### **2.4.1.1. CÁLCULO DEL LA MEDIA MUESTRAL Y LA DESVIACIÓN TÍPICA**

Para una cantidad de 3.600 muestras de datos entregadas por hora de medición, se debe calcular el promedio muestral de los datos obtenidos con la relación matemática de la (Ec. 2.4.1)

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{Ec. 2.4.1})$$

Donde N representa la cantidad de datos obtenidos, siendo éste de 3.600 casos y  $X_i$  cada caso individual de la radiación en función de la energía incidente por unidad de área ( $W/m^2$ ). De igual manera se debe cuantificar el promedio de la temperatura correlativa por cada caso de muestra incidente, así se tiene el valor característico que más se repite dentro de la serie de datos.

La desviación típica o estándar representa que tan agrupados se encuentran los datos de muestras en relación al promedio, de esta manera una desviación típica alta dará la condición que las muestras de radiación y temperatura se encuentra alejadas del promedio de muestra y se debe prestar atención al momento de definir

el parámetro de la radiación ultravioleta y la temperatura incidente. La relación matemática que describe esta condición se representa en la (Ec. 2.4.2).

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Ec. 2.4.2})$$

Donde: N representa el número total de muestras agrupadas en una hora de medición con un total de 3.600 datos;  $X_i$  representa cada caso individual de la radiación en función de la energía incidente por unidad de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) y  $\bar{x}$  representan el promedio característico del total de las muestras representado por la (Ec. 2.4.1)

Definidos los parámetros presentados por las ecuaciones (Ec. 2.4.1) y (Ec. 2.4.1), es necesario tener una cuantificación de estas muestras para las siguientes condiciones:

- Establecer la cuantificación de las muestras correspondiente a las 10:00 horas; 11:00 horas; 12:00 horas; 13:00 horas y 14:00 horas para la radiación ultravioleta y temperatura incidente en el equipo RD01 y RD02
- Agrupar la cuantificación de las muestras en una comparación gráfica de dispersión, teniendo como variable dependiente la radiación ultravioleta y la temperatura característica a la muestra de radiación como energía incidente por unidad de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) y como variable dependiente las cinco horas (h) de medición por día para el equipo RD01 y RD02

## **2.4.2. SELECCIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS**

Para una correcta interpretación de los datos cuantificados, es necesario realizar una comparación entre las muestras del equipo RD01 y RD02, de esta manera dimensionar las diferencias que existen entre la irradiancia directa medida sobre una superficie y la irradiancia directa a través de los seis materiales propuestos.

Para esto, es necesario calcular el porcentaje de error porcentual absoluto medio o MAPE por sus siglas en inglés, el cual interpreta la diferencia porcentual entre una serie de datos reales con una serie de datos pronosticados. Siendo la radiación ultravioleta incidente los datos reales y la radiación ultravioleta a través de los materiales de ensayo los datos pronosticados, representados en la (Ec. 2.4.3)

$$MAPE = 100 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\bar{x}_{it} - \bar{x}_{jt}}{\bar{x}_{it}} \right| \quad (\text{Ec. 2.4.3})$$

Siendo el promedio total de muestra del equipo RD01 representado como  $\bar{x}_{it}$  y el promedio total de muestra del equipo RD02 representado como  $\bar{x}_{jt}$  y N el número total de muestras para ambos equipos, siendo ésta de 18.000 datos de muestreo. Bajo esta metodología de selección e interpretación de datos, se deben seleccionar dos de los seis materiales que presenten el error porcentual más bajo. Estos materiales deberán ser sometidos a una segunda campaña experimental que definirá otras propiedades de los materiales requeridas por el estudio.

## **2.4. SEGUNDA CAMPAÑA EXPERIMENTAL**

### **2.5.1. EXPOSICIÓN PROLONGADA A LAS CONDICIONES AMBIENTALES**

#### **2.5.1.1. SIMULADOR DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA**

Para el caso de este estudio se deben verificar el comportamiento de los dos materiales seleccionados en el apartado 4.4.2 con condiciones características de la región de Arica y Parinacota. Según el apartado 1.6 del recurso solar disponible en la región, se seleccionarán cuatro casos.

Tabla 19. Casos para análisis del comportamiento para materiales de ensayo.

Caso	Mes	GHI kWh/m <sup>2</sup> día	T°C
1	Febrero	7,61	22,2
2	Junio	3,50	16,4
3	Septiembre	5,25	16,9
4	Abril	5,99	18,9

Fuente: Elaboración personal.

El primer caso representa la máxima lectura de la radiación global horizontal incidente registrada en el área geográfica costera de la ciudad de Arica; el segundo caso corresponde a la mínima lectura registrada para la radiación global horizontal incidente; el tercer caso representa la estación de transición de invierno a verano en el hemisferio sur y para el cuarto caso, este representa la estación de transición de verano a invierno para el hemisferio sur.

Existen diferentes estándares de medición como lo son la norma ASTM D4329 para pruebas en materiales plásticos; ASTM D5208 para la foto degradabilidad de los materiales plásticos; ASTM G151 para materiales no metálicos; ASTM G154 para testeos generales en materiales, etc. El común denominador de estos estándares es evaluar la degradación y el comportamiento del material bajo las condiciones de la radiación ultravioleta, ya sea plástico, vidrio, no metálico o ensayos generales. De esta manera, los materiales seleccionados bajo los criterios del apartado 4.4.2 deben ser estudiados bajo las siguientes condiciones junto con los cuatro casos previstos por la tabla N°19:

1. El material debe tener 8 horas de exposición prolongada a la radiación ultravioleta durante una semana de medición
2. El material debe tener 4 horas de exposición a un sistema de condensación con agua blanda o destilada durante una semana de medición

3. El material debe tener una exposición prolongada en una posición horizontal por una semana de medición y en una posición vertical por la misma cantidad de tiempo. Con un total días de exposición para testeo

#### **2.5.1.2. EXPOSICIÓN A CONDICIONES AMBIENTALES DEL ÁREA DE ESTUDIO**

Si bien un simulador solar entrega condiciones ideales para evaluar el comportamiento de los materiales de ensayo, este no cuenta con la incertidumbre ambiental del área de estudio como lo es, la salinidad del aire, la humedad en condición de área costera, etc. Por este motivo se debe contrastar los resultados entregados por el simulador solar con las condiciones características del área donde se emplazará el estudio. De esta manera, los dos materiales seleccionados en el apartado 4.4.2 deben someterse a una exposición prolongada de 15 días cada uno a la radiación ultravioleta bajo la metodología del apartado 4.

Para contrastar los resultados obtenidos mediante el simulador solar y la exposición a las condiciones ambientales, es necesario definir los siguientes parámetros.

- Variabilidad en la radiación ultravioleta incidente en ambos materiales en función de su exposición a las condiciones del medio. Para ésto solo es necesario recurrir a la metodología del apartado 4.4.1.
- Comportamiento fisicoquímico de los materiales como presencia de grietas, degradación u opacidad del material. El cual se validará mediante registro visuales y comparaciones entre el día uno de exposición al día 15.
- Comportamientos ambientales como condensación y humedad en el material que afecten la transmisividad de la radiación ultravioleta, etc.

### **3. CAPITULO III: METODOLOGÍA ANALÍTICA**

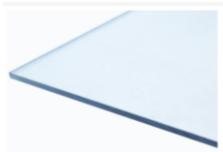
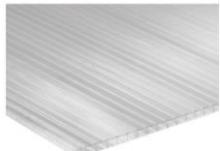
#### **3.1. MATERIALES PARA CUBIERTA DEL EQUIPO**

Para la adquisición de los materiales a ensayar, se realizó una investigación en el mercado de la industria de la construcción, de esta manera poder indagar en diferentes materiales transparentes y semitransparentes. Según los criterios de búsqueda y selección descritas en el apartado 4.1, se realizó la adquisición de los siguientes materiales:

1. Polietileno de baja densidad como papel film utilizado en la industria del embalaje y la protección de objetos
2. Polietileno común como nailon de cubrimiento para usos impermeables o variados
3. Policloruro de vinilo como papel transparente adhesivo como método de protección en ventanas y cristales
4. Acrílico transparente en forma de calamina que permite el traspaso de la luz en techumbres
5. Vidrio pyrex o vidrio borosilicato
6. Policarbonato alveolar en forma de placa utilizada para luces led

A continuación, en la tabla N°20 se resumen algunos detalles de los materiales seleccionados.

Tabla 20. Materiales semi transparentes candidatos para recubrir los equipos fotorreactores tipo raceway.

Material	Dimensiones (m)	Peso (kg)	Cantidad	Ilustración
Polietileno de baja densidad	10x0.49x0.254	1,0	01	
Polietileno	0.5x2x0.1	0,38	03	
Policloruro de vinilo	2x0.49x0.25	0,23	01	
Acrílico	2.5x0.9x0.04	1,50	03	
Vidrio pírex	1.5x0.5x0.03	0,51	03	
Polycarbonato alveolar	2.9x1.05x0.04	5,00	03	

Fuente: Elaboración personal.

La composición de estos materiales, es comúnmente utilizada por la industria termo solar y la industria de los invernaderos, con la única diferencia que no se conoce con exactitud los aditivos químicos que componen la estructura molecular. Esta composición va directamente ligada a parámetros operacionales como temperatura y luz (luz ultravioleta, luz visible, luz infrarroja).

La temperatura de operación se encuentra ligada de manera directa a la cantidad de radiación que permiten transmitir estos materiales. Sin embargo, sin ensayos

experimentales de su comportamiento frente a las condiciones de radiación, no es posible conocer el comportamiento de la temperatura en el fotorreactor.

Para estimar este parámetro de operación, dentro de los materiales seleccionados se encuentra el vidrio pyrex o vidrio borosilicato. Este material es altamente usado en componentes de uso doméstico, termo solares y químicos, por su excelente comportamiento con el calor y su elección debe al motivo de que sus parámetros ópticos se encuentran definidos por varios autores [91] [105]. Por este motivo, se utilizará el vidrio borosilicato para definir la factibilidad de la temperatura de operación del fotorreactor en condiciones semi herméticas, a modo de obtener parámetros de comparación con los materiales que deben ser expuestos a condiciones experimentales.

### **3.1.1. ESTIMACIÓN PARÁMETROS ÓPTICO MATERIAL DE RECUBRIMIENTO**

Para el cálculo de las variables ópticas del vidrio borosilicato, se definen las siguientes variables.

- Angulo se incidencia de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  con un intervalo de paso de  $5^\circ$
- El índice de reflectividad para el vidrio borosilicato se considera de 1,517
- El coeficiente de extinción para el vidrio borosilicato es igual a  $K= 16$
- El espesor de la placa se considera de 3 mm

#### **3.1.1.1. TRANSMISIVIDAD VIDRIO BOROSILICATO**

Para el cálculo de la transmisividad del vidrio borosilicato, se definen las siguientes variables.

Para el cálculo del ángulo transmitido,  $n_1$  que se considera aire como medio de propagación igual a  $n_2$  se considera el vidrio borosilicato como medio igual a 1,517.

$$\theta_2 = \arcsen\left(\frac{1.517 \operatorname{sen}5}{1}\right) = 3.29$$

- Cálculo de la transmisividad polarizada

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left[ \frac{1 - \frac{\operatorname{sen}^2(3.29 - 5)}{\operatorname{sen}^2(3.29 + 5)}}{1 + \frac{\operatorname{sen}^2(3.29 - 5)}{\operatorname{sen}^2(3.29 + 5)}} + \frac{1 - \frac{\tan^2(3.29 - 5)}{\tan^2(3.29 + 5)}}{1 + \frac{\tan^2(3.29 - 5)}{\tan^2(3.29 + 5)}} \right] = 0.919$$

- Cálculo de la transmisividad absorbida

$$\tau_a = \exp^{-\frac{16.1 * 0.03}{\cos 3.29}} = 0.952$$

La transmisividad del vidrio borosilicato para un ángulo de 5° con respecto a la normal imaginaria a una superficie horizontal queda definida como.

$$\tau = 0.952 * 0.919 = 0.875$$

Se repite el mismo procedimiento para los ángulos de incidencia de 10° a 90°, los resultados se ilustran en la tabla N°21.

*Tabla 21. Resultado del cálculo de la transmisividad para el vidrio borosilicato por ángulos de incidencia de 0° a 90°.*

Ángulo zenit $\theta_1$	Ángulo transmitido $\theta_2$	$\tau_r$	$\tau_a$	$\tau$	Ángulo zenit $\theta_1$	Ángulo transmitido $\theta_2$	$\tau_r$	$\tau_a$	$\tau$
<b>0</b>	0	1	0,952	0,952	<b>50</b>	31,40	0,903	0,944	0,853
<b>5</b>	3,29	0,919	0,952	0,875	<b>55</b>	33,86	0,884	0,943	0,834
<b>10</b>	6,78	0,930	0,952	0,885	<b>60</b>	36,09	0,855	0,941	0,805
<b>15</b>	10,14	0,929	0,952	0,885	<b>65</b>	38,06	0,808	0,940	0,760
<b>20</b>	13,45	0,929	0,951	0,884	<b>70</b>	39,73	0,735	0,939	0,690
<b>25</b>	16,70	0,929	0,950	0,883	<b>75</b>	41,07	0,623	0,937	0,585
<b>30</b>	19,88	0,927	0,949	0,881	<b>80</b>	42,06	0,462	0,937	0,433
<b>35</b>	22,96	0,925	0,948	0,878	<b>85</b>	42,66	0,249	0,936	0,233
<b>40</b>	25,92	0,921	0,947	0,873	<b>90</b>	42,86	0	0,936	0
45	28,75	0,946	0,053		--	----	--	----	--

Fuente: Elaboración personal.

- Se ilustra gráficamente la transmisividad del vidrio borosilicato

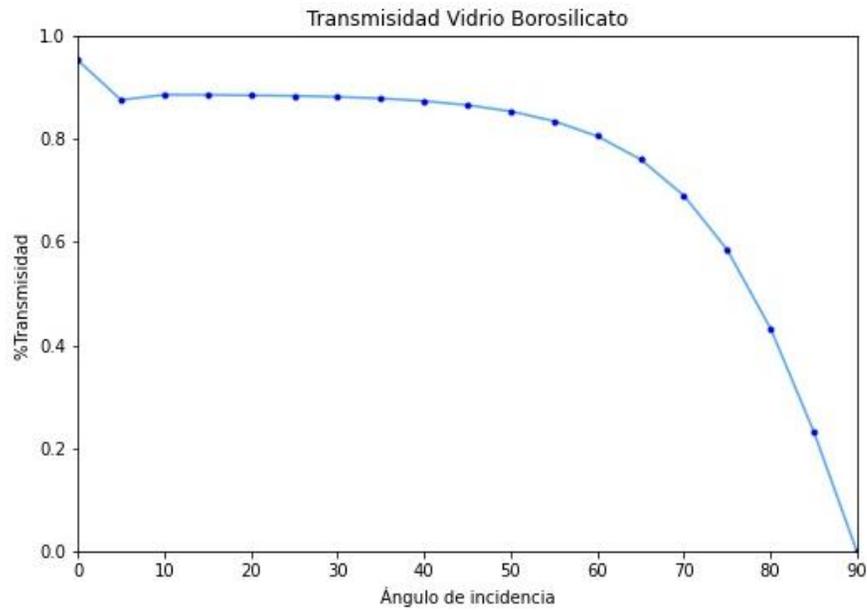


Figura 38. Comportamiento de la transmisividad vidrio borosilicato. Fuente: Elaboración personal.

- Se define la transmisividad promedio del vidrio borosilicato utilizando la relación matemática cuantitativa descrita en el apartado 4.4.1.

$$\bar{\tau} = \sum_{N=1}^{19} \frac{\tau}{N} = 0.74$$

### 3.1.1.2. ABSORTIVIDAD VIDRIO BOROSILICATO

El cálculo de la absorptividad depende principalmente de la transmisividad del vidrio borosilicato. Para un ángulo de incidencia 0° se define la absorptividad como

$$\alpha_{0^\circ} = 1 - 0.952 = 0.047$$

Se repite el mismo procedimiento de cálculo para los ángulos siguiente de 5° a 90° y se ilustra el resultado en la tabla N°22

Tabla 22. Resumen de la absorptividad en el vidrio borosilicato para ángulos incidente de 0° a 90°.

Ángulo zenit $\theta_1$	Ángulo transmitido $\theta_2$	$\tau_a$	$\alpha$	Ángulo zenit $\theta_1$	Ángulo transmitido $\theta_2$	$\tau_a$	$\alpha$
0	0	0,952	0,047	50	31,40	0,944	0,055
5	3,29	0,952	0,047	55	33,86	0,943	0,056
10	6,78	0,952	0,047	60	36,09	0,941	0,058
15	10,14	0,952	0,047	65	38,06	0,940	0,059
20	13,45	0,951	0,048	70	39,73	0,939	0,060
25	16,70	0,950	0,049	75	41,07	0,937	0,062
30	19,88	0,949	0,050	80	42,06	0,937	0,062
35	22,96	0,948	0,051	85	42,66	0,936	0,063
40	25,92	0,947	0,052	90	42,86	0,936	0,063
45	28,75	0,946	0,053	--	---	---	---

Fuente: Elaboración personal.

- Se ilustra gráficamente la absorptividad del vidrio borosilicato

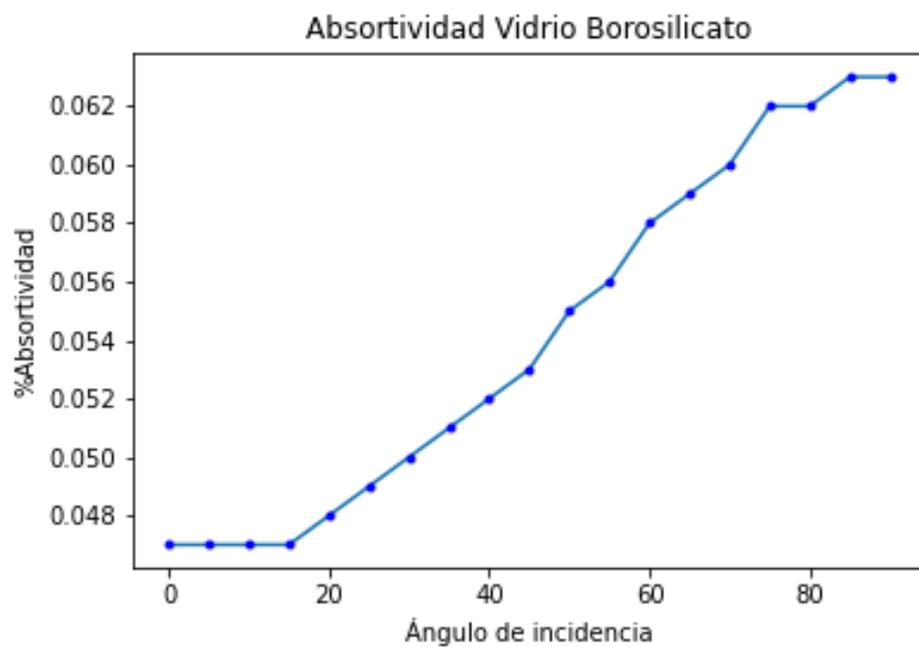


Figura 39. Comportamiento de la absorptividad vidrio borosilicato. Fuente: Elaboración personal.

- Se estima la absorptividad promedio del vidrio borosilicato

$$\bar{\alpha} = \sum_{N=1}^{19} \frac{\alpha}{N} = 0.055$$

### 3.1.1.3. REFLECTIVIDAD VIDRIO BOROSILICATO

En cuanto a la reflectividad, esta viene completamente definida por la transmisividad no polarizada y el ángulo de incidencia solar. Se estima el cálculo de la reflectividad para un ángulo de incidencia de 5°.

$$\rho_{5^\circ} = 0,952 (1 - 0,919) = 0,077$$

Se repite el mismo procedimiento de cálculo para los ángulos de incidencia de 10° a 90° y se ilustran en la tabla N°23.

Tabla 23. Resumen de cálculo de la reflectividad vidrio borosilicato para ángulos de incidencia de 0° a 90°.

Ángulo zenit $\theta_1$	Ángulo transmitido $\theta_2$	$\tau_r$	$\tau_a$	$\rho$	Ángulo o zenit $\theta_1$	Ángulo transmitido $\theta_2$	$\tau_r$	$\tau_a$	$\rho$
<b>0</b>	0	1,000	0,952	0	<b>50</b>	31,40	0,903	0,944	0,091
<b>5</b>	3,29	0,919	0,952	0,077	<b>55</b>	33,86	0,884	0,943	0,108
<b>10</b>	6,78	0,930	0,952	0,066	<b>60</b>	36,09	0,855	0,941	0,136
<b>15</b>	10,14	0,929	0,952	0,066	<b>65</b>	38,06	0,808	0,940	0,180
<b>20</b>	13,45	0,929	0,951	0,066	<b>70</b>	39,73	0,735	0,939	0,248
<b>25</b>	16,70	0,929	0,950	0,067	<b>75</b>	41,07	0,623	0,937	0,352
<b>30</b>	19,88	0,927	0,949	0,068	<b>80</b>	42,06	0,462	0,937	0,503
<b>35</b>	22,96	0,925	0,948	0,070	<b>85</b>	42,66	0,249	0,936	0,703
<b>40</b>	25,92	0,921	0,947	0,074	<b>90</b>	42,86	0	0,936	0,936
<b>45</b>	28,75	0,914	0,946	0,080	--	----	--	----	----

Fuente: Elaboración Personal.

- Se ilustra gráficamente la reflectividad del vidrio borosilicato

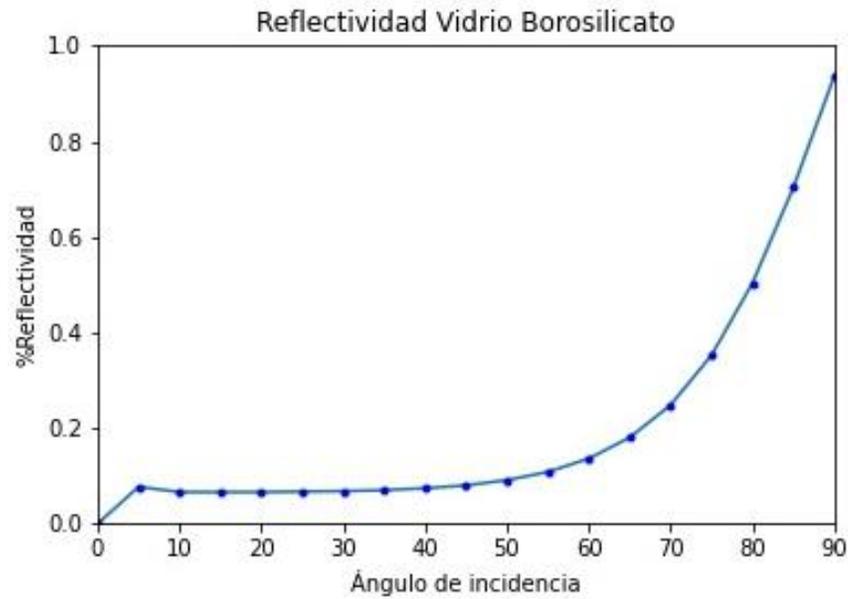


Figura 40. Comportamiento de la reflectividad vidrio borosilicato. Fuente: Elaboración personal

- Se estima la reflectividad promedio para el vidrio borosilicato.

$$\bar{\rho} = \sum_{N=1}^{19} \frac{\tau \rho}{N} = 0.21$$

#### 3.1.1.4. EMISIVIDAD

La emisividad de estos materiales y del agua se encuentran disponible en la literatura “Solar Engineering of Thermal Processes, Duffe, J & William, B [91].

Tabla 24. Emisividad materiales equipo fotorreactor Raceway.

Material	$\epsilon$
Vidrio pyrex	0.85
Agua	0.92

Fuente: William, B. 2013 [91].

## **3.2. CÁLCULO DE TRANFERENCIA DE CALOR EN EL SISTEMA**

Se define la temperatura de operación para tres casos en particular de operación.

1. El primer caso de operación pretende estudiar el comportamiento de la temperatura para el mes de enero. Este mes presenta el promedio diario más alto de irradiancia global horizontal incidente en el área geográfica de estudio.
2. El segundo caso de operación pretende estudiar el comportamiento de la temperatura para el mes de febrero. Este mes presenta el promedio diario de temperatura ambiente más alto en el área geográfica de estudio.
3. El tercer caso de operación pretende estudiar el comportamiento de la temperatura para el mes de julio. Este mes presenta el promedio diario más bajo de irradiancia global horizontal para el área geográfica de estudio.

La elección de estos tres modos de operación, pretende establecer parámetros máximos y mínimos en la operación de los equipos bajo las condiciones climáticas de la ciudad de Arica.

El cálculo analítico será dividido en dos etapas. La primera etapa de cálculo corresponde al comportamiento de la temperatura entre el ambiente y el vidrio borosilicato. La segunda etapa corresponde al comportamiento de la temperatura entre el vidrio borosilicato y el fluido del equipo, esta última etapa definirá en su totalidad la temperatura de operación del fotorreactor.

### **3.2.1. TEMPERATURA EQUIPO RT01**

#### **3.2.1.1. ETAPA AMBIENTE-VIDRIO BOROSILICATO**

- I. Cálculo de la energía acumulada.

En la tabla N°25 se aginan valores propios a las variables independiente de la ecuación analítica del calor acumulado ( $Q_{acum}$ ). El área superficial del vidrio

borosilicato, se define en función del área del fotorreactor descrita en el apartado 1.4. Mientras que la densidad ( $\rho_g$ ), y la capacidad calorífica se pueden consultar en Anexos.

Tabla 25. Resumen de variables vidrio borosilicato para el calor acumulado en el sistema.

Variable	Nomenclatura	Ambiente Vidrio borosilicato	Unidad
Área superficial	$A_g$	0,342	[m <sup>2</sup> ]
Densidad Vidrio	$\rho_g$	2230	[kg/m <sup>3</sup> ]
Calor Especifico	$C_{pg}$	720	J/kg K
Espesor Vidrio	$e_g$	0,003	[m]

Fuente: Elaboración personal.

#### 1. Cálculo del calor acumulado en el sistema

$$Q_{acum} = 0,342 * 2230 * 720 * 0,003 \frac{dT_g}{dt} \quad (1.1)$$

$$Q_{acum} = 1647,35 \frac{dT_g}{dt} \quad (1.2)$$

#### II. Cálculo de la energía entrante en el sistema

En la tabla N°26 se asignan valores propios a las variables independientes de la ecuación analítica del calor entrante en el sistema  $Q_{in}$ . La radiación solar incidente (G) es totalmente dependiente del ángulo zenit y este varía con las horas de sol. A modo de disminuir el error de cálculo, para cada hora de operación se utiliza la irradiancia solar global horizontal correspondiente descrita en el apartado 1.6.3. La absorptividad promedio ( $\bar{\alpha}_g$ ) está definida en el apartado 3.1.1.

Tabla 26. Resumen de variables vidrio borosilicato para el calor entrante en el sistema.

Variable	Nomenclatura	Ambiente Vidrio borosilicato	Unidad
Radiación solar global horizontal	$G$	$G(t)$	$[W/m^2]$
Absortividad Vidrio	$\bar{\alpha}_g$	0,055	----

Fuente: Elaboración personal.

## 2. Cálculo de la energía entrante en el sistema

$$Q_{in} = 0,342 * 0,055G(t) \quad (1.3)$$

$$Q_{in} = 0,01881G(t) \quad (1.4)$$

## III. Cálculo de la energía saliente en el sistema

En la tabla N°27 se asignan valores propios a las variables independientes de la ecuación de la energía saliente en el sistema ( $Q_{out}$ ).

- En primer lugar, se debe calcular el coeficiente de transferencia de calor entre el ambiente y el vidrio borosilicato.

$$h_{g/amb} = 2,8 + 3,0 * 1,7 = \left( \frac{W}{m^2 K} \right) \quad (1.5)$$

$$h_{g/amb} = 12,4 \left( \frac{W}{m^2 K} \right) \quad (1.6)$$

- En segundo lugar, se calculará el coeficiente de transferencia de calor entre el vidrio borosilicato y el fluido del fotorreactor.

$$h_{g/s} = \frac{1}{\left( \frac{0.003}{1} + \frac{0.02}{1} + \frac{0.05}{1} \right)} \quad (1.7)$$

$$\left( \frac{0.003}{1,14} + \frac{0.02}{0,025} + \frac{0.05}{0,59} \right)$$

$$h_{g/s} = 1,127 \left( \frac{W}{m^2 K} \right) \quad (1.8)$$

- La temperatura del cielo ( $T_{sky}$ ) depende completamente de la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), por lo tanto, para el modelo de cálculo la temperatura del cielo será calculada en función de la temperatura ambiente. Ver anexo 1 y 2.

Tabla 27. Resumen de variables vidrio borosilicato para el calor saliente en el sistema.

Variable	Nomenclatura	Ambiente Vidrio borosilicato	Unidad
Coeficiente TC Ambiente-Vidrio	$h_{g/s}$	1,127	W/m <sup>2</sup> K
Coeficiente TC Ambiente-Vidrio	$h_{g/amb}$	12,4	W/m <sup>2</sup> K
Emisividad Vidrio	$\epsilon_g$	0,85	----
Temperatura del cielo	$T_{sky}$	$T_{sky}(t)$	K
Steffa-Boltzman	$\sigma$	$5,6704 \times 10^{-8}$	W/m <sup>2</sup> k <sup>4</sup>
Temperatura Ambiente	$T_{amb}$	$T_{amb}(t)$	K

Fuente: Elaboración personal.

- Cálculo de la transferencia de calor por conducción entre el vidrio y el ambiente.

$$q_{(1)conv} = 0,342 * 12.4 (T_g - T_{amb}) \quad (1.9)$$

$$q_{(1)conv} = 4,2408 (T_g - T_{amb}) \quad (1.10)$$

- Cálculo de la transferencia de calor por radiación solar.

$$q_{rad} = 0,85 * 0,342 * 5,6704 \times 10^{-8} (T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (1.11)$$

$$q_{rad} = 1.6403 \times 10^{-8} (T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (1.12)$$

- Cálculo de la transferencia de calor por convección entre el vidrio borosilicato y el fotorreactor

$$q_{(2)conv} = 1,127 * 0,342 (T_g - T_s) \quad (1.13)$$

$$q_{(2)conv} = 0,3854 (T_g - T_s) \quad (1.14)$$

6. Se define el calor saliente del sistema ( $Q_{out}$ ).

$$Q_{out} = 4,2408(T_g - T_{amb}) + 1,6484 \times 10^{-8}(T_g^4 - T_{sky}^4) + 0,3854(T_g - T_s) \quad (1.15)$$

El balance total para el sistema asignando las variables independientes queda definido de la siguiente manera:

$$1647,35 \frac{dT_g}{dt} = 0,01881G(t) - 4,2408(T_g - T_{amb}) + 1,6484 \times 10^{-8}(T_g^4 - T_{sky}^4) + 0,3854(T_g - T_s) \quad (1.16)$$

### 3.2.1.2. ETAPA VIDRIO BOROSILICATO-FOTORREACTOR

I. Cálculo de la energía acumulada transitoria de calor en el sistema.

En la tabla N°28 se aginan valores propios a las variables independiente de la ecuación analítica del calor acumulado ( $Q_{acum}$ ). El área superficial del vidrio borosilicato, se define en función del área del fotorreactor descrita en el apartado 1.4. Mientras que la densidad ( $\rho_g$ ),

Tabla 28. Resumen de variables en el fluido para el calor acumulado en el sistema.

Variable	Nomenclatura	Borosilicato Fotorreactor	Unidad
Área superficial	$A_s$	0,342	[m <sup>2</sup> ]
Densidad	$\rho_s$	1000	[kg/m <sup>3</sup> ]
Calor Especifico	$C_{ps}$	4180	J/kg K
Altura de operación	$H_g$	0,05	[m]

Fuente: Elaboración personal.

1. Cálculo de calor acumulado en el sistema

$$Q_{acum} = 0,342 * 1000 * 4180 * 0,05 \frac{dT_s}{dt} \quad (1.17)$$

$$Q_{acum} = 71478 \frac{dT_s}{dt} \quad (1.18)$$

#### IV. Cálculo de la energía entrante en el sistema.

En la tabla N°29 se asignan valores propios a las variables dependientes para la energía entrante en el sistema ( $Q_{in}$ ). La absorptividad ( $\bar{\alpha}_s$ ) y la transmisividad ( $\bar{t}_s$ ) están definidas según el apartado 3.1.1. Para la radiación solar global horizontal, al igual que la primera etapa de cálculo (ambiente-vidrio borosilicato), la radiación ( $G$ ) es totalmente dependiente del ángulo zenit y este depende de las horas de sol.

Tabla 29. Resumen de variables en el fluido de operación para el calor entrante en el sistema.

Variable	Nomenclatura	Ambiente Vidrio borosilicato	Unidad
Radiación solar global horizontal	$G$	$G(t)$	[W/m <sup>2</sup> ]
Absortividad Fluido	$\bar{\alpha}_s$	0,57	----
Transmisividad Vidrio	$\bar{t}_s$	0,74	----

Fuente: Elaboración personal.

#### 2. Cálculo del calor entrante en el sistema

$$Q_{in} = 0,57 * 0,740 * 0,342G(t) \quad (1.19)$$

$$Q_{in} = 0,14425G(t) \quad (1.20)$$

#### III. Cálculo de la energía saliente en el sistema.

En la tabla N°30 se asignan valores a las variables independientes para la energía saliente del sistema ( $Q_{out}$ ).

- En primer lugar, se debe calcular el coeficiente de transferencia de calor por evaporación descrito en el apartado 1.6.1.

$$h_{eva} = 0,036 + 0,25 * 1.7 \left( \frac{W}{m^2 K} \right) \quad (1.21)$$

$$h_{eva} = 0,786 \left( \frac{W}{m^2 K} \right) \quad (1.22)$$

- En segundo lugar, se define la presión de saturación del agua mediante tablas empíricas termodinámicas (ver anexo). La presión de saturación de agua a 20°C se define de la siguiente manera.

$$P'_s = 23392 Pa \quad (1.23)$$

Para la presión de saturación del ambiente, se define la temperatura inicial del agua ( $T = 20^\circ C$ ) a una elevación de 9 m.s.n.m. La humedad relativa será el promedio de mensual para los 3 casos de estudio (apartado 1.6.3).

- a) Para una humedad relativa promedio en el mes de enero del 45%.

$$P'_{(E,amb)} = 45 * 10^{\left(8.07131 + \log\left(\frac{101325}{760}\right)\right) - \frac{1730.63}{233.46 + 19.8}} Pa \quad (1.24)$$

$$P'_{(E,amb)} = 65824.9 Pa \quad (1.25)$$

- b) Para una humedad relativa promedio en el mes de febrero del 66%

$$P'_{(F,amb)} = 66 * 10^{\left(8.07131 + \log\left(\frac{101325}{760}\right)\right) - \frac{1730.63}{233.46 + 20.7}} Pa \quad (1.26)$$

$$P'_{(F,amb)} = 102239.6 Pa \quad (1.27)$$

- c) Para una humedad relativa promedio en el mes de julio del 73%

$$P'_{(J,amb)} = 74 * 10^{\left(8.07131 + \log\left(\frac{101325}{760}\right)\right) - \frac{1730.63}{233.46 + 15.1}} Pa \quad (1.28)$$

$$P'_{(J,amb)} = 301577.80 Pa \quad (1.27)$$

Tabla 30. Resumen de variables en el fluido de operación para la energía saliente del sistema.

Variable	Nomenclatura	Vidrio borosilicato Fotorreactor	Unidad
Coeficiente TC vidrio-fluido	$h_{s/g}$	1,127	W/m <sup>2</sup> K
Emisividad del fluido	$\varepsilon_g$	0,92	----
Steffa-Boltzman	$\sigma$	$5,6704 \times 10^{-8}$	W/m <sup>2</sup> k <sup>4</sup>
Presión de saturación agua	$P'_s$	2504,17	Pa
Coeficiente TC vidrio-fluido	$h_{eva}$	0,786	W/m <sup>2</sup> K

Fuente: Elaboración propia.

1. Se define la transferencia de calor por conducción entre el vidrio borosilicato y el fluido de operación.

$$q_{conv} = 0,342 * 1,127 (T_s - T_g) \quad (1.28)$$

$$q_{conv} = 0,3854(T_s - T_g) \quad (1.29)$$

2. Se define la transferencia de calor por evaporación en el sistema.

$$q_{eva} = 0,342 * 0,786 (2504.17 - P'_{amb}) \quad (1.30)$$

$$q_{eva} = 0,2688 (2504.17 - P'_{amb}) \quad (1.31)$$

3. Se define la transferencia de calor por radiación térmica en el fluido de operación.

$$q_{rad} = 0,342 * 0,92 * 5,6704 \times 10^{-8} (T_s^4 - T_g^4) \quad (1.32)$$

$$q_{rad} = 1,7841 \times 10^{-8} (T_s^4 - T_g^4) \quad (1.33)$$

4. Se define la ecuación final para la energía saliente

$$Q_{out} = 0,3854(T_s - T_g) + 1,7841 \times 10^{-8} (T_s^4 - T_g^4) + q_{eva} = 0,2688 (P'_s - P'_{amb}) \quad (1.34)$$

Finalmente, la ecuación de balance de energía para el fluido de operación en el fotorreactor, queda definida de la siguiente manera.

$$71478 \frac{dT_s}{dt} = 0,14425G(t) - 0,3854(T_s - T_g) - 1,7841 \times 10^{-8}(T_s^4 - T_g^4) - 0,2688 (P'_s - P'_{amb}) \quad (1.35)$$

### 3.2.1.3. RESOLUCIÓN NUMÉRICA

A modo de simplificar el cálculo, se le asignará una variable a cada constante en los modelos térmicos descritos.

Tabla 31. Cambio de variable para las constantes para el equipo RT01 en el modelo de transferencia de calor.

Variable	Valor	Cambio	Variable	Valor	Cambio
$dT_g$	----	$dy$	$GA_s\alpha_s\tau_g$	$G_2(t)$	$B_2$
$dT_s$	----	$dx$	$h_{g/amb}A_g$	4,2408	$C_1$
$T_g$	----	$y$	$h_{g/s}A_g$	0,3854	$C_2$
$T_s$	----	$x$	$\varepsilon_g\sigma A_g$	$1,7841 \times 10^{-8}$	$D_1$
$e_gA_gC_{pg}\rho_g$	1647,35	$A_1$	$\varepsilon_g\sigma A_g$	$1,7841 \times 10^{-8}$	$D_2$
$H_sA_sC_{ps}\rho_s$	71512,20	$A_2$	$h_{s/g}A_s$	0,3854	$E_2$
$GA_g\alpha_g$	$G_1(t)$	$B_1$	----	----	----

Fuente: Elaboración personal.

En el apartado 1.5.3 se define la ecuación diferencial que rige el comportamiento de la temperatura en el equipo.

$$f(t, x, y) = \begin{cases} x'(t) = \frac{1}{1647.34} [G_1(t) - 4.2408(x(t) - T_{amb}) - 1.7841 \times 10^{-8}(x(t)^4 - T_{sky}^4) - 0.3854(x(t) + y)] \\ y'(t) = \frac{1}{71512.20} [G_2(t) - 0.3854(y(t) - x) - 1.7841 \times 10^{-8}(y(t)^4 - x^4) - E_1] \\ x'_0(t) = x_0 \\ y'_0(t) = y_0 \end{cases}$$

Se definen las condiciones de fronteras para los casos de estudio de interés. Los métodos serán desarrollados por el algoritmo numérico de Euler.

El criterio en la definición de las condiciones de frontera se asume como.

- Equilibrio térmico entre la temperatura ambiental y el vidrio borosilicato como condición inicial de operación.
- Fluido de operación a 20°C como condición inicial de vertido, sin embargo, el desarrollo del fluido influirá en su temperatura a medida que se produzca un equilibrio térmico.

### 3.2.1.3.1. TEMPERATURA DE OPERACIÓN MES DE ENERO

Las condiciones iniciales se definen para las 6:00 como temperatura promedio en el mes de enero en la ciudad de Arica.

$$f(t, x, y) = \begin{cases} x' = g(t, x, y) \\ y' = h(t, x, y) \\ x_0(0) = 15 \\ y_0(0) = 20 \end{cases}$$

- Se considera un tiempo de operación de 24 horas como modelo promedio. Se calcula el paso de iteración por cada una hora de operación.

$$\delta_t = \frac{24 - 0}{1} = 24$$

- Se define el algoritmo de iteración principal para las 24 soluciones del sistema.

$$\left[ \begin{array}{l} x_1(t_1) \approx 15 + 24 \left[ \frac{1}{1647.34} [G_1(t) - 4.2408(15 - T_{amb}) - 1.7841x10^{-8}(15^4 - T_{sky}^4) - 0.3854(15 - 20)] \right] \\ y_1(t_1) \approx 20 + 24 \left[ \frac{1}{71512.20} [G_2(t) - 0.3854(20 - 15) - 1.7841x10^{-8}(15^4 - 20^4) + 17065.72] \right] \end{array} \right]$$

- Mediante el algoritmo se define la temperatura del equipo para 24 horas de operación.

*Tabla 32. Resumen del comportamiento de la temperatura en el equipo RT01 para el mes de enero.*

Horas de operación (h)	Horas UTC-3	Temperatura Operación (C°)	Horas de operación (h)	Horas UTC-3	Temperatura Operación (C°)
1	7:00	27,7557	13	19:00	31,7492
2	8:00	28,8124	14	20:00	30,7379
3	9:00	30,8734	15	21:00	29,7379
4	10:00	32,9510	16	22:00	29,7379
5	11:00	34,0123	17	23:00	28,7379
6	12:00	35,0494	18	0:00	28,7379
7	13:00	35,0626	19	1:00	27,7379
8	14:00	35,0478	20	2:00	27,7379
9	15:00	35,0071	21	3:00	26,7379
10	16:00	33,9417	22	4:00	26,7379
11	17:00	32,8659	23	5:00	26,7379
12	18:00	31,7995	24	6:00	25,7379

Fuente: Elaboración personal.

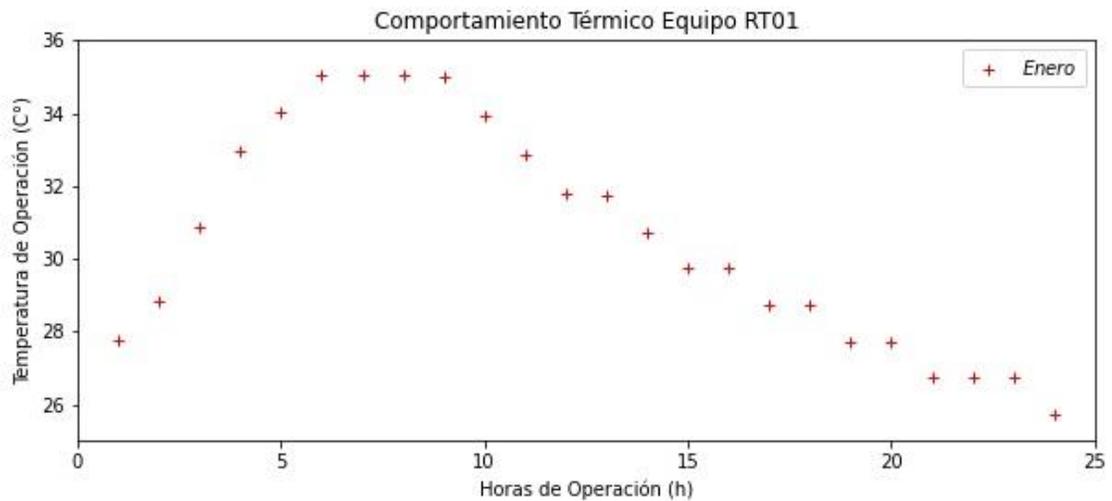


Figura 41. Comportamiento térmico equipo RT01 mes de enero. Fuente: Elaboración personal.

### 3.2.1.3.1. TEMPERATURA DE OPERACIÓN MES DE FEBRERO

Las condiciones iniciales se definen para las 6:00 como temperatura promedio en el mes de febrero en la ciudad de Arica.

$$f(t, x, y) = \begin{cases} x' = g(t, x, y) \\ y' = h(t, x, y) \\ x_0(0) = 16 \\ y_0(0) = 20 \end{cases}$$

- Se considera un tiempo de operación de 24 horas como modelo promedio.

Se calcula el paso de iteración por cada una hora de operación.

$$\delta_t = \frac{24 - 0}{1} = 24$$

- Se define el algoritmo de iteración principal para las 24 soluciones del sistema.

$$\left[ \begin{array}{l} x_1(t_1) \approx 16 + 24 \left[ \frac{1}{1647.34} [G_1(t) - 4.2408(16 - T_{amb}) - 1.7841x10^{-8}(16^4 - T_{sky}^4) - 0.3854(16 - 20)] \right] \\ y_1(t_1) \approx 20 + 24 \left[ \frac{1}{71512.20} [G_2(t) - 0.3854(20 - 16) - 1.7841x10^{-8}(16^4 - 20^4) + 26854.43] \right] \end{array} \right]$$

- Mediante el algoritmo se define la temperatura del equipo para 24 horas de operación

Tabla 33. Resumen del comportamiento de la temperatura en el equipo RT01 para el mes de febrero.

Horas de operación (h)	Horas UTC-3	Temperatura Operación (C°)	Horas de operación (h)	Horas UTC-3	Temperatura Operación (C°)
1	7:00	31,0341	13	19:00	36,0295
2	8:00	33,0876	14	20:00	35,0231
3	9:00	35,1559	15	21:00	34,0231
4	10:00	36,2310	16	22:00	34,0231
5	11:00	38,2923	17	23:00	33,0231
6	12:00	39,3303	18	0:00	32,0231
7	13:00	40,3461	19	1:00	32,0231
8	14:00	40,3300	20	2:00	31,0231
9	15:00	39,2916	21	3:00	31,0231
10	16:00	39,2181	22	4:00	30,0231
11	17:00	38,1452	23	5:00	30,0231
12	18:00	36,0782	24	6:00	30,0231

Fuente: Elaboración personal.

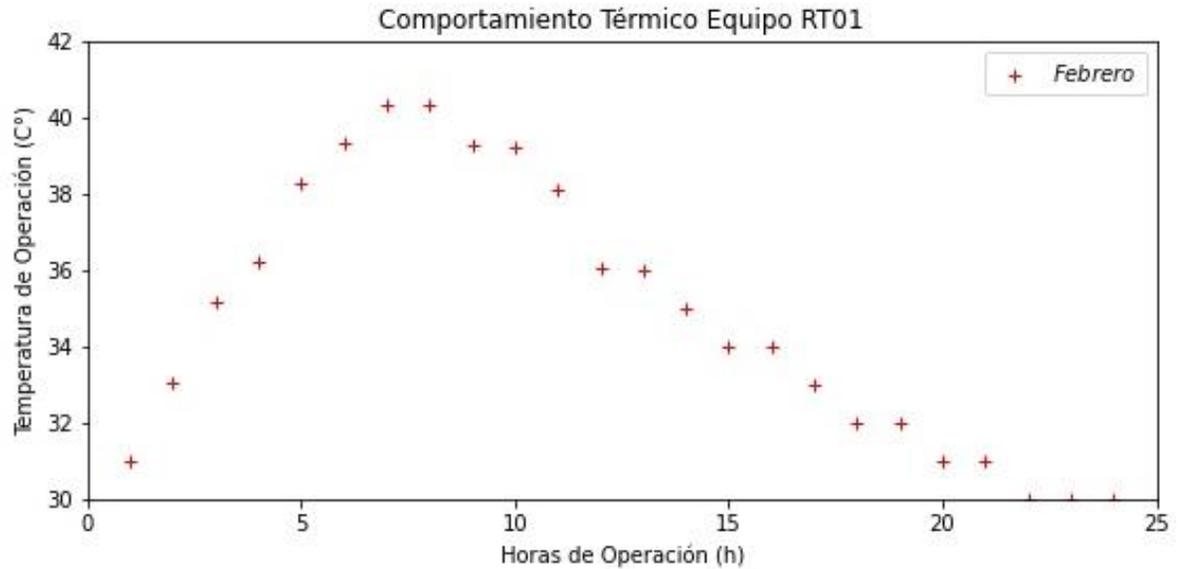


Figura 42. Resumen gráfico del comportamiento de la temperatura para el mes de febrero en el equipo RT01. Fuente: Elaboración personal.

### 3.2.1.3.2. TEMPERATURA DE OPERACIÓN MES DE JULIO

Las condiciones iniciales se definen para las 6:00 como temperatura promedio en el mes de julio en la ciudad de Arica.

$$f(t, x, y) = \begin{cases} x' = g(t, x, y) \\ y' = h(t, x, y) \\ x_0(0) = 11 \\ y_0(0) = 15 \end{cases}$$

- Se considera un tiempo de operación de 24 horas como modelo promedio. Se calcula el paso de iteración por cada una hora de operación.

$$\delta_t = \frac{24 - 0}{1} = 24$$

- Se define el algoritmo de iteración principal para las 24 soluciones del sistema.

$$\begin{bmatrix} x_1(t_1) \approx 11 + 24 \left[ \frac{1}{1647.34} [G_1(t) - 4.2408(11 - T_{amb}) - 1.7841 \times 10^{-8}(11^4 - T_{sky}^4) - 0.3854(11 - 20)] \right] \\ y_1(t_1) \approx 20 + 24 \left[ \frac{1}{71512.20} [G_2(t) - 0.3854(15 - 11) - 1.7841 \times 10^{-8}(15^4 - 11^4) + 20751.26] \right] \end{bmatrix}$$

- Mediante el algoritmo se define la temperatura del equipo para 24 horas de operación

Tabla 34. Resumen del comportamiento de la temperatura para el mes de julio en el equipo RT01.

Horas de operación (h)	Horas UTC-3	Temperatura Operación (C°)	Horas de operación (h)	Horas UTC-3	Temperatura Operación (C°)
1	7:00	21,9749	13	19:00	25,9748
2	8:00	22,9852	14	20:00	25,9748
3	9:00	24,0103	15	21:00	24,9748
4	10:00	26,0351	16	22:00	24,9748
5	11:00	28,0777	17	23:00	23,9748
6	12:00	28,1144	18	0:00	23,9748
7	13:00	29,1789	19	1:00	22,9748
8	14:00	29,1802	20	2:00	21,9749
9	15:00	29,1467	21	3:00	21,9749
10	16:00	28,1009	22	4:00	21,9749
11	17:00	28,0409	23	5:00	20,9749
12	18:00	26,9855	24	6:00	20,9749

Fuente: Elaboración personal.

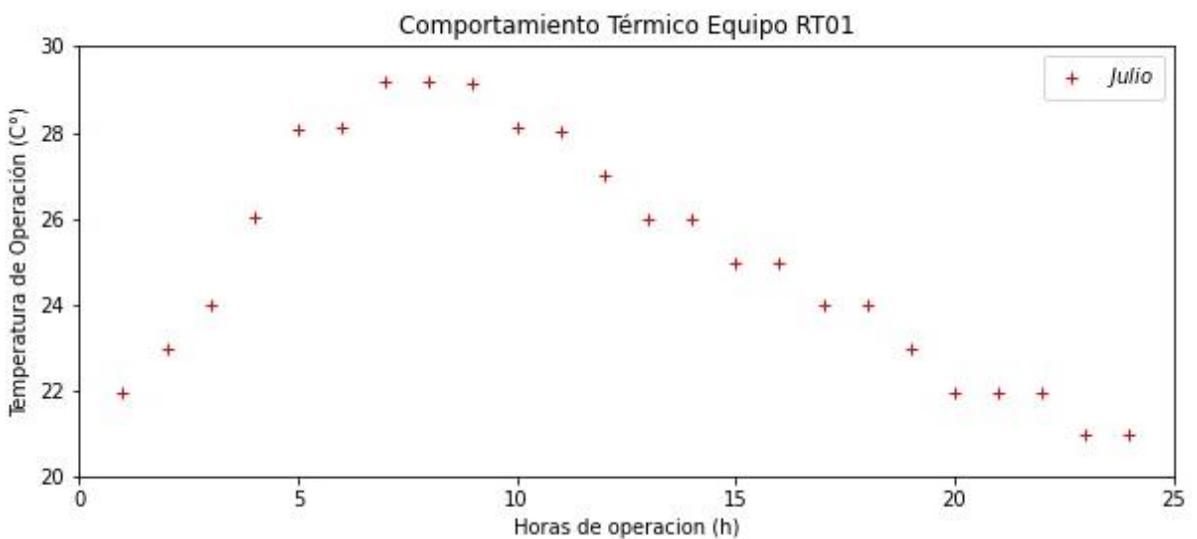


Figura 43. Comportamiento de la temperatura para el mes de julio en el equipo RT01. Fuente: Elaboración personal.

### 3.2.2. TEMPERATURA EQUIPO RT02

Estimar la temperatura del equipo RT02 puede ser un poco más sencillo de interpretar, debido a que las variables operaciones de balance energético rigen de igual manera que para el equipo RT01. Con la única diferencia que éste tiene una altura de operación de 100 mm de profundidad.

### 3.2.2.1. ETAPA AMBIENTE-VIDRIO BOROSILICATO

#### I. Cálculo de la energía acumulada

En la tabla N°35 se asignan valores propios a las variables independiente de la ecuación analítica del calor acumulado ( $Q_{acum}$ ) para el equipo RT02. Se asignan los mismos valores que para el primer equipo.

*Tabla 35. Resumen de variables vidrio borosilicato para el calor acumulado en el sistema.*

Variable	Nomenclatura	Ambiente Vidrio borosilicato	Unidad
Área superficial	$A_g$	0.342	[m <sup>2</sup> ]
Densidad Vidrio	$\rho_g$	2230	[kg/m <sup>3</sup> ]
Calor Especifico	$C_{pg}$	720	J/kg K
Espesor Vidrio	$e_g$	0.003	[m]

*Fuente: Elaboración personal.*

#### 7. Cálculo del calor acumulado en el sistema.

$$Q_{acum} = 0.342 * 2230 * 720 * 0.003 \frac{dT_g}{dt} \quad (2.1)$$

$$Q_{acum} = 1647.35 \frac{dT_g}{dt} \quad (2.2)$$

#### II. Cálculo de la energía entrante en el sistema

En la tabla N°36 se asignan los valores propios para las variables operaciones del calor entrante en el equipo RT02.

Tabla 36. Resumen de variables vidrio borosilicato para el calor entrante en el sistema.

Variable	Nomenclatura	Ambiente Vidrio borosilicato	Unidad
Radiación solar global horizontal	$G$	$G(t)$	$[W/m^2]$
Absortividad Vidrio	$\bar{\alpha}_g$	0.055	----

Fuente: Elaboración personal.

### 8. Cálculo de la energía entrante en el sistema

$$Q_{in} = 0.342 * 0.055G(t) \quad (2.3)$$

$$Q_{in} = 0.01881G(t) \quad (2.4)$$

### III. Cálculo de la energía saliente en el sistema

En la tabla N°37 se asignan valores propios a las variables independientes de la ecuación de la energía saliente en el sistema ( $Q_{out}$ ) para el equipo RT02. Las variables operaciones que actúan fueron calculadas en el apartado 3.2.1, debido a que son las mismas que rigen en el sistema.

Tabla 37. Resumen de variables vidrio borosilicato para el calor saliente en el sistema.

Variable	Nomenclatura	Ambiente Vidrio borosilicato	Unidad
Coeficiente TC Ambiente-Vidrio	$h_{g/s}$	1.127	$W/m^2 K$
Coeficiente TC Ambiente-Vidrio	$h_{g/amb}$	12.4	$W/m^2 K$
Emisividad Vidrio	$\varepsilon_g$	0.85	----
Temperatura del cielo	$T_{sky}$	$T_{sky}(t)$	K
Steffa-Boltzman	$\sigma$	$5.6704 \times 10^{-8}$	$W/m^2 k^4$
Temperatura Ambiente	$T_{amb}$	$T_{amb}(t)$	K

Fuente: Elaboración personal.

### 9. Transferencia de calor por conducción entre el vidrio y el ambiente.

$$q_{(1)conv} = 0.342 * 12.4 (T_g - T_{amb}) \quad (2.5)$$

$$q_{(1)conv} = 4.2408 (T_g - T_{amb}) \quad (2.6)$$

10. Transferencia de calor por radiación solar.

$$q_{rad} = 0.85 * 0.342 * 5.6704x10^{-8}(T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (2.7)$$

$$q_{rad} = 1.6403x10^{-8}(T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (2.8)$$

11. Transferencia de calor por convección entre el vidrio borosilicato y el fotorreactor

$$q_{(2)conv} = 1.127 * 0.342 (T_g - T_s) \quad (2.9)$$

$$q_{(2)conv} = 0.3854 (T_g - T_s) \quad (2.10)$$

12. Se define el calor saliente del sistema ( $Q_{out}$ ) para el equipo RT02.

$$Q_{out} = 4.2408(T_g - T_{amb}) + 1.6484x10^{-8}(T_g^4 - T_{sky}^4) + 0.3854(T_g - T_s) \quad (2.11)$$

- Balance final para la etapa vidrio borosilicato-ambiente para el equipo RT02

$$1647.35 \frac{dT_g}{dt} = 0.01881G(t) - 4.2408(T_g - T_{amb}) + 1.6484x10^{-8}(T_g^4 - T_{sky}^4) + 0.3854(T_g - T_s) \quad (2.12)$$

### 3.2.2.2. ETAPA VIDRIO BOROSILICATO-FOTORREACOTOR

I. Cálculo de la energía acumulada transitoria de calor en el sistema.

En la tabla N°38 se aginan valores propios a las variables independiente de la ecuación analítica del calor acumulado ( $Q_{acum}$ ) para el equipo RT02. Las variables operacionales que actúan en el balance no varían del equipo RT01, con la excepción de que la altura de operación del líquido de operación tiene un aumento de 50 mm.

Tabla 38. Resumen de variables en el fluido para el calor acumulado en el sistema.

Variable	Nomenclatura	Borosilicato Fotorreactor	Unidad
Área superficial	$A_s$	0.342	[m <sup>2</sup> ]
Densidad	$\rho_s$	1000	[kg/m <sup>3</sup> ]
Calor Especifico	$C_{ps}$	4180	J/kg K
Altura de operación	$H_g$	0.1	[m]

Fuente: Elaboración personal.

### 3. Cálculo de calor acumulado en el sistema

$$Q_{acum} = 0.342 * 1000 * 4180 * 0.1 \frac{dT_s}{dt} \quad (2.13)$$

$$Q_{acum} = 142956 \frac{dT_s}{dt} \quad (2.14)$$

### III. Cálculo de la energía entrante en el sistema.

En la tabla N°39 se asignan valores propios a las variables dependientes para la energía entrante en el sistema ( $Q_{in}$ ) para el equipo RT02.

Tabla 39. Resumen de variables en el fluido de operación para el calor entrante en el sistema.

Variable	Nomenclatura	Ambiente Vidrio borosilicato	Unidad
Radiación solar global horizontal	$G$	G(t)	[W/m <sup>2</sup> ]
Absortividad Fluido	$\bar{\alpha}_s$	0.57	----
Transmisividad Vidrio	$\bar{\tau}_s$	0.74	----

Fuente: Elaboración personal.

### 4. Cálculo del calor entrante en el sistema

$$Q_{in} = 0,57 * 0,740 * 0,342G(t) \quad (2.15)$$

$$Q_{in} = 0,14425G(t) \quad (2.16)$$

### III. Cálculo de la energía saliente en el sistema.

En la tabla N°40 se asignan valores a las variables independientes para la energía saliente del sistema ( $Q_{out}$ ).

- Para la presión de saturación en el ambiente, se define de igual manera que en el apartado 5.2.1.

d) Humedad relativa promedio en el mes de enero del 45%.

$$P'_{(E,amb)} = 45 * 10^{\left(8.07131 + \log\left(\frac{101325}{760}\right)\right) - \frac{1730.63}{233.46 + 19.8}} Pa \quad (2.17)$$

$$P'_{(E,amb)} = 65824.9 Pa \quad (2.18)$$

e) Humedad relativa promedio en el mes de febrero del 66%

$$P'_{(F,amb)} = 66 * 10^{\left(8.07131 + \log\left(\frac{101325}{760}\right)\right) - \frac{1730.63}{233.46 + 20.7}} Pa \quad (2.19)$$

$$P'_{(F,amb)} = 102239.6 Pa \quad (2.20)$$

f) Humedad relativa promedio en el mes de julio del 73%

$$P'_{(J,amb)} = 74 * 10^{\left(8.07131 + \log\left(\frac{101325}{760}\right)\right) - \frac{1730.63}{233.46 + 15.1}} Pa \quad (2.21)$$

$$P'_{(J,amb)} = 301577.80 Pa \quad (2.22)$$

Tabla 40. Resumen de variables en el fluido de operación para la energía saliente del sistema.

Variable	Nomenclatura	Vidrio borosilicato Fotorreactor	Unidad
Coeficiente TC vidrio-fluido	$h_{s/g}$	1.127	W/m <sup>2</sup> K
Emisividad del fluido	$\varepsilon_g$	0.92	----
Steffa-Boltzman	$\sigma$	$5.6704 \times 10^{-8}$	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
Presión de saturación agua	$P'_s$	23392	Pa
Coeficiente TC vidrio-fluido	$h_{eva}$	0.786	W/m <sup>2</sup> K

Fuente: Elaboración propia.

5. Transferencia de calor por conducción entre el vidrio borosilicato y el fluido de operación.

$$q_{conv} = 0.342 * 1.127 (T_s - T_g) \quad (2.23)$$

$$q_{conv} = 0.3854(T_s - T_g) \quad (2.24)$$

6. Transferencia de calor por evaporación en el sistema.

$$q_{eva} = 0.342 * 0.786 (2504.17 - P'_{amb}) \quad (2.25)$$

$$q_{eva} = 0.2688 (2504.17 - P'_{amb}) \quad (2.26)$$

7. Transferencia de calor por radiación térmica en el fluido de operación.

$$q_{rad} = 0.342 * 0.92 * 5.6704 \times 10^{-8} (T_s^4 - T_g^4) \quad (2.27)$$

$$q_{rad} = 1.7841 \times 10^{-8} (T_s^4 - T_g^4) \quad (2.28)$$

8. Se define la ecuación final para la energía saliente

$$Q_{out} = 0.3854(T_s - T_g) + 1.7841 \times 10^{-8} (T_s^4 - T_g^4) + q_{eva} = 0.2688 (P'_s - P'_{amb}) \quad (2.29)$$

Ecuación final de balance de energía equipo RT02:

$$142956 \frac{dT_s}{dt} = 0.14425G(t) - 0.3854(T_s - T_g) - 1.7841 \times 10^{-8} (T_s^4 - T_g^4) - 0.2688 (P'_s - P'_{amb}) \quad (2.30)$$

### 3.2.2.3. SOLUCIÓN NÚMÉRICA

Se asigna el cambio de variable para las ecuaciones de balance de energía en el equipo RT02.

Tabla 41. Cambio de variable para las constantes para el equipo RT02 en el modelo de transferencia de calor.

Variable	Valor	Cambio	Variable	Valor	Cambio
$dT_g$	----	$dy$	$GA_s\alpha_s\tau_g$	$G_2(t)$	$B_2$
$dT_s$	----	$dx$	$h_{g/amb}A_g$	4.2408	$C_1$
$T_g$	----	$y$	$h_{g/s}A_g$	0.3854	$C_2$
$T_s$	----	$x$	$\varepsilon_g\sigma A_g$	$1.7841x10^{-8}$	$D_1$
$e_gA_gC_{pg}\rho_g$	1647.35	$A_1$	$\varepsilon_g\sigma A_g$	$1.7841x10^{-8}$	$D_2$
$H_sA_sC_{ps}\rho_s$	142956.00	$A_2$	$h_{s/g}A_s$	0.3854	$E_2$
$GA_g\alpha_g$	$G_1(t)$	$B_1$	----	----	----

Fuente: Elaboración personal.

Se define el sistema de ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de la temperatura en el equipo RT02.

$$f(t, x, y) = \begin{cases} x'(t) = \frac{1}{1647.34} [G_1(t) - 4.2408(x(t) - T_{amb}) - 1.7841x10^{-8}(x(t)^4 - T_{sky}^4) - 0.3854(x(t) + y)] \\ y'(t) = \frac{1}{142956} [G_2(t) - 0.3854(y(t) - x) - 1.7841x10^{-8}(y(t)^4 - x^4) - E_1] \\ x'(t) = x_0 \\ y'(t) = y_0 \end{cases}$$

Se definen las condiciones de fronteras para los casos de estudio de interés. Los métodos serán desarrollados por el algoritmo numérico de Euler.

El criterio para definir las condiciones de frontera se asume igual para el equipo RT01.

- Equilibrio térmico entre la temperatura ambiental y el vidrio borosilicato como condición inicial de operación.

- Fluido de operación a 20°C como condición inicial de vertido, sin embargo, el desarrollo del fluido influirá en su temperatura a medida que se produzca un equilibrio térmico.

### 3.2.2.3.1. TEMPERATURA DE OPERACIÓN MES DE ENERO

- Condiciones iniciales de operación asignadas para las 6:00 horas UTC-3

$$f(t, x, y) = \begin{cases} x' = g(t, x, y) \\ y' = h(t, x, y) \\ x_0(0) = 15 \\ y_0(0) = 20 \end{cases}$$

- Se considera un tiempo de operación de 24 horas como modelo promedio.  
Se calcula el paso de iteración por cada una hora de operación.

$$\delta_t = \frac{24 - 0}{1} = 24$$

- Se define el algoritmo de iteración principal para las 24 soluciones del sistema.

$$\left[ \begin{array}{l} x_1(t_1) \approx 15 + 24 \left[ \frac{1}{1647.34} [G_1(t) - 4.2408(15 - T_{amb}) - 1.7841x10^{-8}(15^4 - T_{sky}^4) - 0.3854(15 - 20)] \right] \\ y_1(t_1) \approx 20 + 24 \left[ \frac{1}{142956} [G_2(t) - 0.3854(20 - 15) - 1.7841x10^{-8}(20^4 - 15^4) + 17065.72] \right] \end{array} \right]$$

- Mediante el algoritmo se define la temperatura del equipo para 24 horas de operación

Tabla 42. Resumen del comportamiento térmico mes de enero para el equipo RT02.

Horas de operación (h)	Horas UTC-3	Temperatura Operación (C°)	Horas de operación (h)	Horas UTC-3	Temperatura Operación (C°)
1	7:00	24,891	13	19:00	28,885
2	8:00	25,943	14	20:00	27,875
3	9:00	28,000	15	21:00	26,875
4	10:00	30,072	16	22:00	26,875
5	11:00	31,128	17	23:00	25,875
6	12:00	32,163	18	0:00	25,875
7	13:00	32,175	19	1:00	24,875
8	14:00	32,161	20	2:00	24,875
9	15:00	32,124	21	3:00	23,875
10	16:00	31,063	22	4:00	23,875
11	17:00	29,993	23	5:00	23,875
12	18:00	28,932	24	6:00	22,875

Fuente: Elaboración personal.

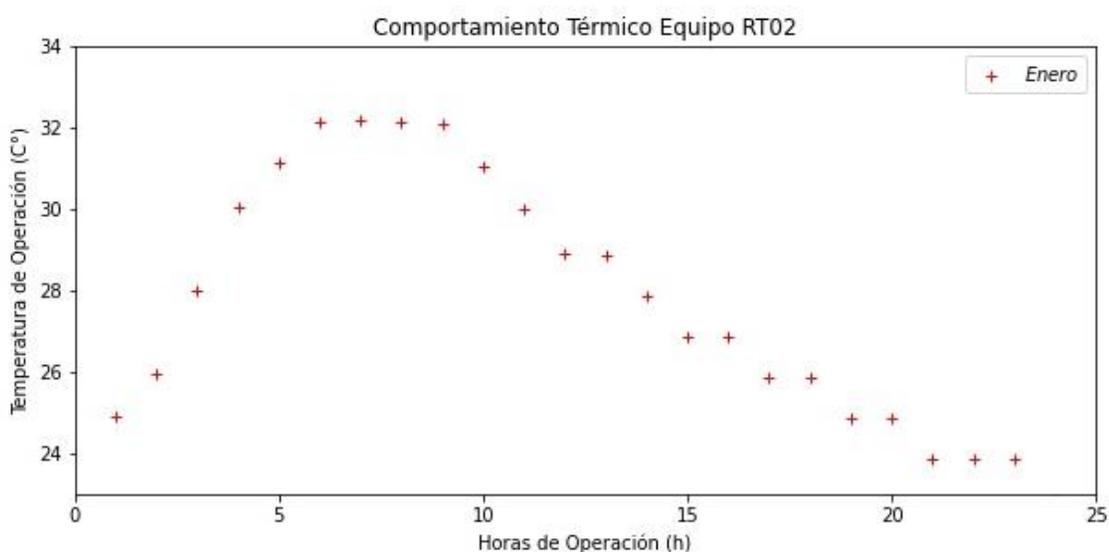


Figura 44. Resumen gráfico del comportamiento de la temperatura para el mes de enero en el equipo RT02. Fuente: Elaboración personal.

### 3.2.2.3.2. TEMPERATURA DE OPERACIÓN MES DE FEBRERO

Las condiciones iniciales se definen para las 6:00 como temperatura promedio en el mes de febrero en la ciudad de Arica.

$$f(t, x, y) = \begin{cases} x' = g(t, x, y) \\ y' = h(t, x, y) \\ x_0(0) = 16 \\ y_0(0) = 20 \end{cases}$$

- Se considera un tiempo de operación de 24 horas como modelo promedio.  
Se calcula el paso de iteración por cada una hora de operación.

$$\delta_t = \frac{24 - 0}{1} = 24$$

- Se define el algoritmo de iteración principal para las 24 soluciones del sistema.

$$\left[ \begin{array}{l} x_1(t_1) \approx 16 + 24 \left[ \frac{1}{1647.34} [G_1(t) - 4.2408(16 - T_{amb}) - 1.7841 \times 10^{-8} (16^4 - T_{sky}^4) - 0.3854(16 - 20)] \right] \\ y_1(t_1) \approx 20 + 24 \left[ \frac{1}{142956} [G_2(t) - 0.3854(20 - 16) - 1.7841 \times 10^{-8} (20^4 - 16^4) + 26854.42] \right] \end{array} \right]$$

- Mediante el algoritmo se define la temperatura del equipo para 24 horas de operación.

Tabla 43. Resumen del comportamiento térmico para el mes de febrero en el equipo RT02.

Horas de operación (h)	Horas UTC-3	Temperatura Operación (C°)	Horas de operación (h)	Horas UTC-3	Temperatura Operación (C°)
1	7:00	22,690	13	19:00	28,158
2	8:00	24,787	14	20:00	26,744
3	9:00	27,246	15	21:00	25,689
4	10:00	28,833	16	22:00	25,689
5	11:00	31,476	17	23:00	24,689
6	12:00	32,999	18	0:00	23,689
7	13:00	34,324	19	1:00	23,689
8	14:00	34,457	20	2:00	22,689
9	15:00	33,317	21	3:00	22,689
10	16:00	32,986	22	4:00	21,689
11	17:00	31,355	23	5:00	21,689
12	18:00	28,731	24	6:00	21,689

Fuente: Elaboración personal.

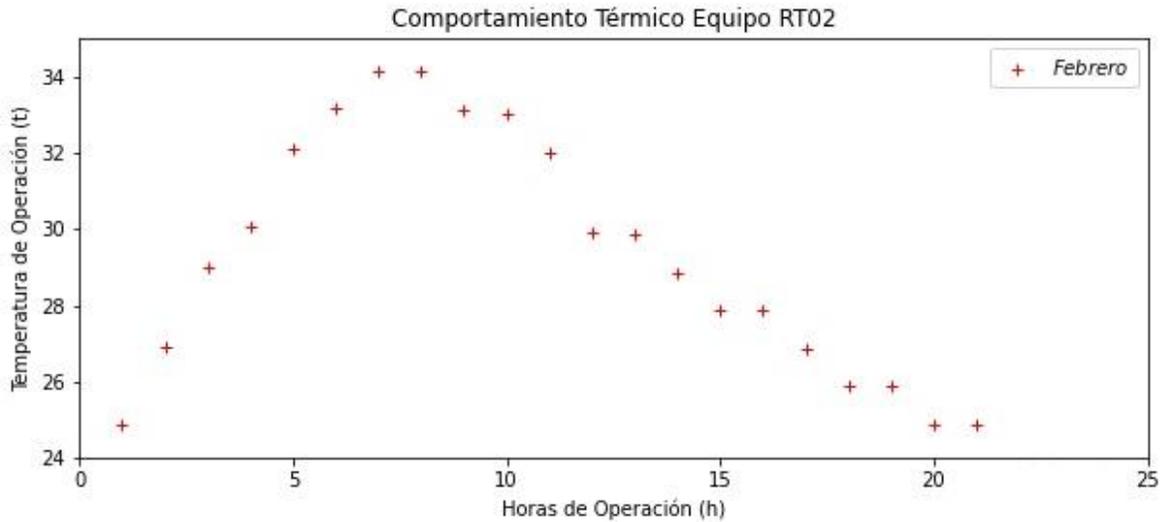


Figura 45. Resumen gráfico del comportamiento térmico para el mes de febrero en el equipo RT02. Fuente: Elaboración personal.

### 3.2.2.3.3. TEMPERATURA DE OPERACIÓN MES DE JULIO

Las condiciones iniciales se definen para las 6:00 como temperatura promedio en el mes de julio en la ciudad de Arica.

$$f(t, x, y) = \begin{cases} x' = g(t, x, y) \\ y' = h(t, x, y) \\ x_0(0) = 11 \\ y_0(0) = 15 \end{cases}$$

- Se considera un tiempo de operación de 24 horas como modelo promedio.

Se calcula el paso de iteración por cada una hora de operación.

$$\delta_t = \frac{24 - 1}{1} = 24$$

- Se define el algoritmo de iteración principal para las 24 soluciones del sistema.

$$\begin{bmatrix} x_1(t_1) \approx 11 + 24 \left[ \frac{1}{1647.34} [G_1(t) - 4.2408(11 - T_{amb}) - 1.7841 \times 10^{-8}(11^4 - T_{sky}^4) - 0.3854(11 - 15)] \right] \\ y_1(t_1) \approx 15 + 24 \left[ \frac{1}{142956} [G_2(t) - 0.3854(15 - 15) - 1.7841 \times 10^{-8}(15^4 - 11^4) + 20751.25] \right] \end{bmatrix}$$

- Mediante el algoritmo se define la temperatura del equipo para 24 horas de operación.

Tabla 44. Resumen comportamiento térmico para el mes de julio en el equipo RT02.

Horas de operación (h)	Horas UTC-3	Temperatura Operación (C°)	Horas de operación (h)	Horas UTC-3	Temperatura Operación (C°)
1	7:00	17,689	13	19:00	21,779
2	8:00	18,690	14	20:00	21,689
3	9:00	19,779	15	21:00	20,689
4	10:00	21,995	16	22:00	20,689
5	11:00	24,209	17	23:00	19,689
6	12:00	24,573	18	0:00	19,689
7	13:00	25,890	19	1:00	18,689
8	14:00	26,438	20	2:00	17,689
9	15:00	26,447	21	3:00	17,689
10	16:00	25,159	22	4:00	17,689
11	17:00	24,765	23	5:00	16,689
12	18:00	23,251	24	6:00	16,689

Fuente: elaboración personal.

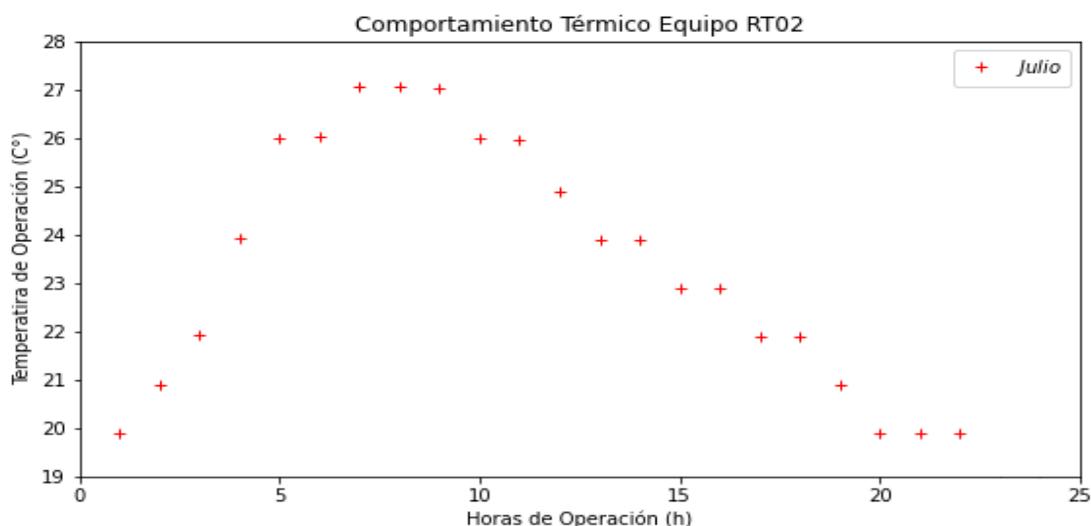


Figura 46. Resumen gráfico del comportamiento térmico para el mes de julio en el equipo RT02. Fuente: Elaboración personal.

### 3.2.3. OBSERVACION SOLUCION DE TEMPERATURA

Para el caso del equipo RT01 se observa una temperatura de operación máxima para el mes de febrero de más de 40°C, en comparación con el mes de enero donde se registra la mayor cantidad de radiación solar incidente por metro cuadrado, con una temperatura de operación para el equipo de más de 35°C. Para el mes de julio,

se observa una temperatura máxima de operación de más de 29°C aún con el registro de la radiación solar incidente más baja del año y con temperaturas de alrededor de 15°C.

Para el caso del equipo RT02, se observan menores temperaturas que en el equipo RT01, siendo la máxima temperatura de operación para el mes de enero de superior a los 32°C, mientras que, para el mes de febrero con la temperatura ambiental más alta registrada, se observa una temperatura de operación de 34°C. Para el mes de julio, se observa una temperatura máxima de operación superior a los 26°C.

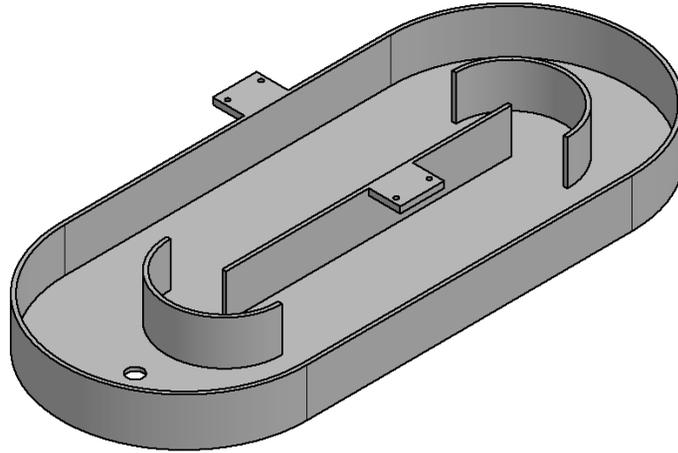
Finalmente, las temperaturas de operación para los equipos RT01 y RT02 no superan los 50°C de operación en ninguno de los 2 casos dispuestos de máxima radiación solar incidente y máxima temperatura ambiente. A su vez, la temperatura para estos equipos para el caso 3 con la radiación solar mínima anual registrada y temperaturas ambientales alrededor de los 15°C, la temperatura no supera los 26°C. De esta manera es posible efectuar un recubrimiento preliminar para los equipos fotorreactor “raceway pond”.

#### **4. CAPITULO IV: PROPUESTA DE DISEÑO**

Para cubrir los equipos RT01 y RT02 implica realizar una serie de modificaciones técnicas a los equipos ya antes descritos, para esto se abordarán una serie de condiciones para plantear este rediseño.

Las principales premisas para abordar diferentes propuestas de diseño son:

- Acople de material de ensayo flexible o rígido, considerando elementos geométricos como el peso por unidad de área y espesor unitario
- Modificaciones físicas significativas que puedan interferir con el proceso fotoquímico del equipo
- Amortiguar impactos económicos asociados a las intervenciones.



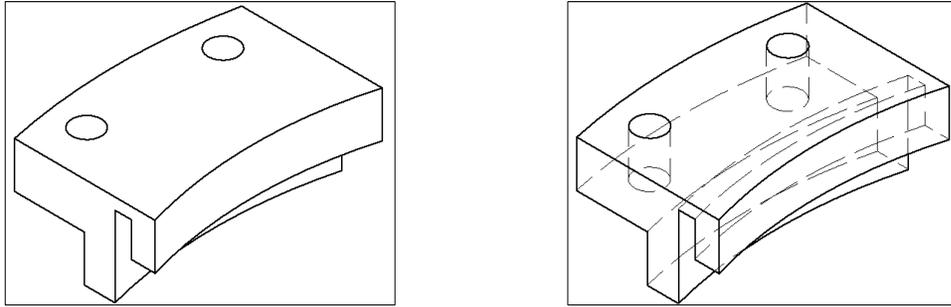
*Figura 47. Vista isométrica del fotorreactor tipo Raceway Pond perteneciente al LIMZA. Fuente: Elaboración personal.*

Para la propuesta de cubierta, es necesario plantear la idea de cubrir el fotorreactor a tope, dejando un mínimo de espacio de contacto entre el reactivo y el medio.

#### **4.1. RECUBRIMIENTO FOTORREACTOR A NIVEL SUPERIOR**

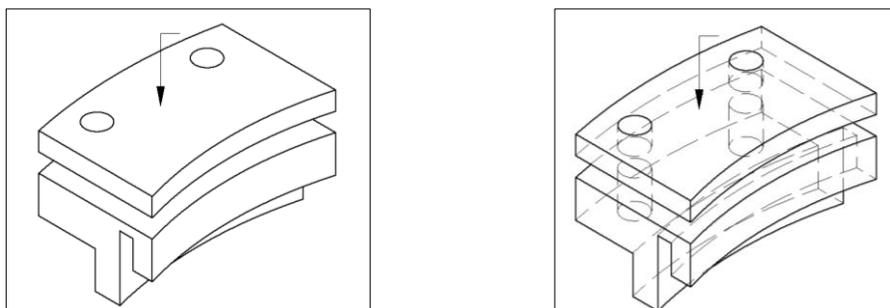
Para recubrir el fotorreactor en su tope, se debe considerar un tipo de elemento de sujeción que permita posicionar en su superficie un material tipo plancha de carácter rígido o flexible. Este tipo de componente debe restringir los grados de movimiento del material de ensayo, con lo que se busca su total anclaje en la parte superior del equipo. Sin embargo y como se menciona en los criterios de diseño del apartado 1.4, existe un espacio de 20 mm entre la altura de operación del reactivo y el tope del fotorreactor, por lo que adosar placas laterales en forma de L como elemento de soporte, involucraría perforar las paredes laterales del fotorreactor con un espacio totalmente limitado para posicionar algún elemento pasador, sin mencionar la modificación física de un equipo que trabaja con efluentes contaminados que circulan constantemente por los canales de operación.

De esta manera el elemento de sujeción a diseñar será del tipo L con la condición de que su acople al equipo pueda ser removible. El diseño de la pieza tipo L se presenta en la figura N°48.



*Figura 48. Acoples para sujeción en prueba de recubrimiento. Fuente: elaboración personal.*

Este acople de sujeción, está diseñado para ser posicionado en la semi circunferencia que une los canales de operación del fotorreactor mediante una ranura en forma de arco; tiene dos orificios para anclar el material de ensayo mediante otra pieza posicionada en su área superficial, simulando una pieza completa tipo prensa. Los pasadores en los orificios se encargan de restringir los grados de libertad que pudiesen producirse en el material a acoplar finalmente, ya sea rígido o flexible.



*Figura 49. pieza superior de para acople de sujeción. Fuente: Elaboración personal.*

La ranura en forma de arco, permite que la pieza pueda ser desmontada de la estructura principal del equipo. Esta ranura tiene un espacio de montaje de 7 mm con una tolerancia de 0,50 mm, para de esta manera tener un ajuste adecuado y evitar desplazamientos dentro del acople. La pieza debe suplir dos necesidades principales de altura, una de ellas es de 76 mm para los equipos RD01 y RD03; la segunda es de 126 mm para el equipo RD02 detallados en el apartado 1.4.

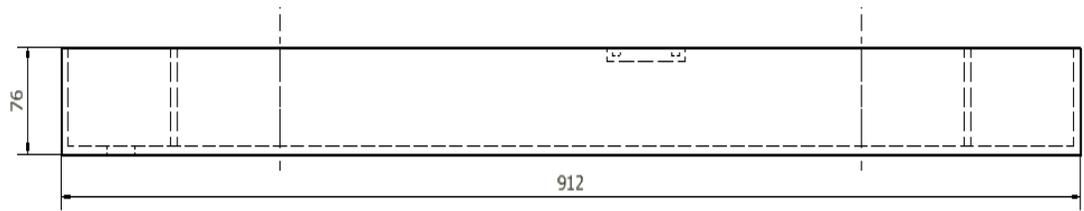


Figura 50. Vista lateral equipo RD01. Fuente: Elaboración propia.

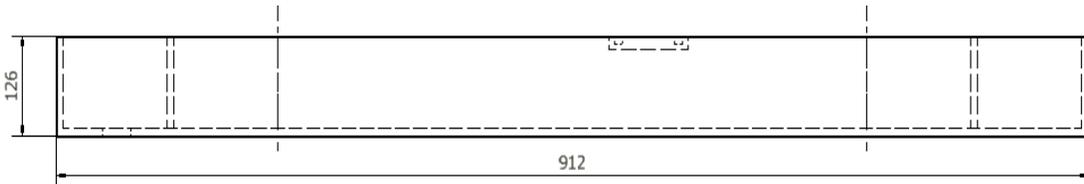


Figura 51. Vista lateral equipo RD02. Fuente: Elaboración propia.

La altura de diseño interior debe ser de 20 mm, debido a que el reactivo circulante es altamente oxidante, mientras que la altura exterior será de 40 mm para asegurar un correcto acople en las paredes internas y externas del equipo, esto obedece la premisa del desplazamiento por momento; si la altura de acople es menor, se necesita una menor fuerza para desplazarla de su eje, mientras que, con una altura mayor, se hace necesario ejercer mayores solicitaciones para desacoplarla de la ranura. Esta altura tiene un resalte sobre 5 mm donde debe posicionarse el material de ensayo.

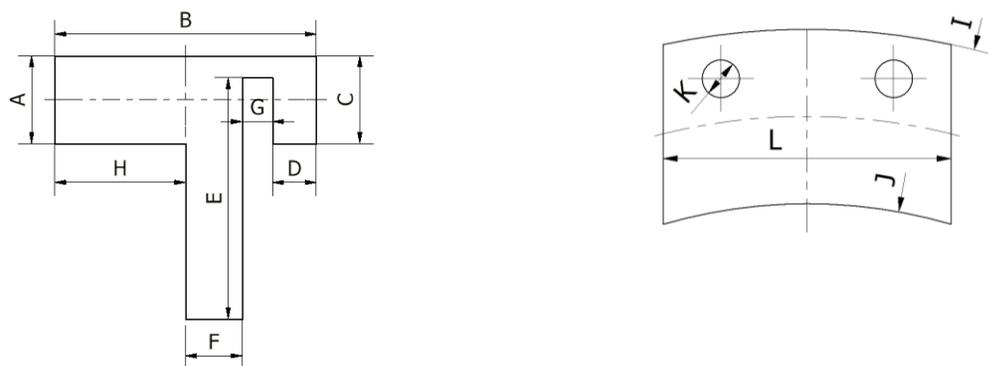


Figura 52. Dimensiones principales pieza de sujeción. Fuente: Elaboración personal.

Tabla 45. Resumen dimensiones generales pieza soporte. Fuente: Elaboración personal.

Índice	Dimensión (mm)	Índice	Dimensión (mm)
A	20	G	7-0,50
B	60	H	30
C	25	I	240
D	10	J	180
E	40	K	13
F	13	L	100

Los orificios están diseñados con un diámetro de 13 mm para pernos M12 o ½ pulgada, permitiendo una tolerancia de 0,5 mm para el paso y el ajuste de este tipo de pasador. La pieza se compone por dos arcos principales circunscritos en un radio exterior de 240 mm y radio interior 180 mm, obedeciendo a los arcos geométricos característicos del reactor.

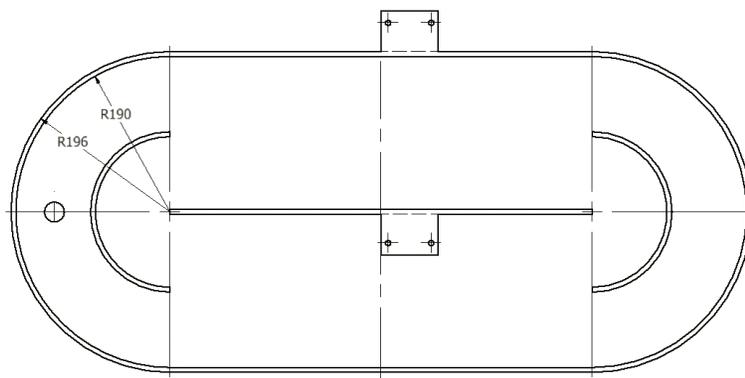


Figura 53. Vista planta de las dimensiones en los arcos de la de circunferencia en el fotorreactor. Fuente: Elaboración personal.

Esta pieza debe ir posicionada sobre el eje central horizontal del reactor junto con dos piezas más de las mismas características, las cuales deben ir posicionadas en el espacio superior e inferior donde comienza la semicircunferencia, para establecer tres puntos de apoyo al momento de posicionar el material de ensayo. Las piezas de acople superior e inferior, si bien obedecen la misma geometría, tiene variaciones en largo de sus arcos, ya que para diseñar estos acoples se trabajó directamente con la semicircunferencia que une los canales principales de operación, sin embargo, obedecen a las mismas dimensiones de radio.

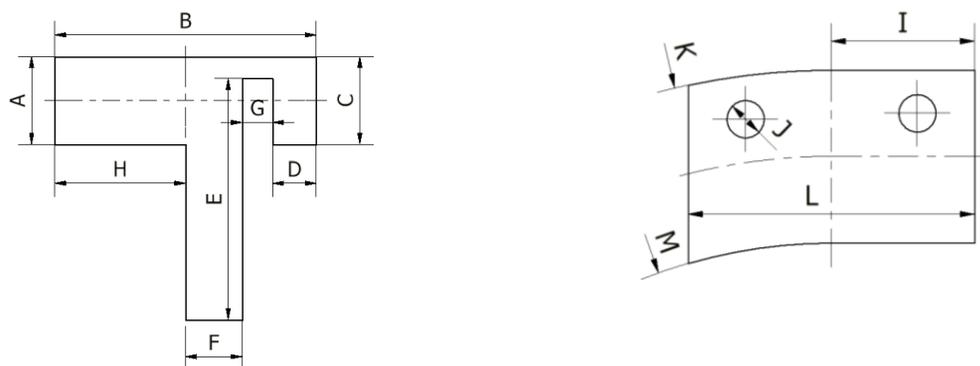


Figura 54. Dimensiones generales de la pieza de sujeción superior e inferior. Fuente: Elaboración personal

Tabla 46. Resumen dimensiones generales pieza de apoyo superior e inferior. Fuente: Elaboración personal.

Índice	Dimensión (mm)	Índice	Dimensión (mm)
A	20	H	30
B	60	I	50
C	25	J	13
D	10	K	240
E	40	L	100
F	13	M	180
G	7-0,50		

Fuente: Elaboración personal.

De igual manera que la pieza principal, estas deben contar con una pieza superior para ejercer presión sobre el material de ensayo, fijándolo con pasadores tipo pernos.

Para el caso que el material de ensayo fuera de un material flexible, se deben diseñar soportes laterales que permitan una tensión adecuada a los costados del equipo, y que, de manera correcta, eviten grados de libertad en este tipo de material, el cual posiblemente va a tender a ejercer más movimiento en condiciones de viento, o factores externos.

Estas sujeciones son de una geometría sencilla, y obedecen el mismo sistema que las piezas de acople superior, siendo posicionadas en la ranura de los costados del quipo.

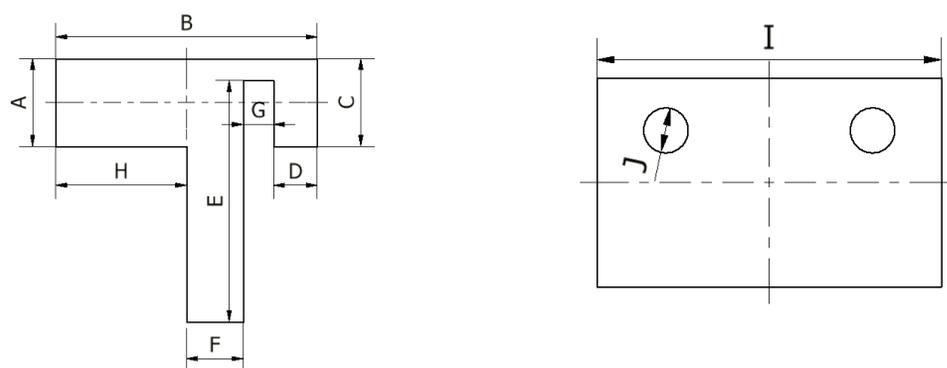


Figura 55. Dimensiones generales pieza de sujeción lateral. Fuente: Elaboración personal.

Tabla 47. Resumen general dimensiones placa de soporte lateral material flexible. Fuente: Elaboración personal.

Índice	Dimensión (mm)	Índice	Dimensión (mm)
A	20	F	20
B	60	G	7-0,50
C	25	H	30
D	10	I	100
E	40	J	13

Fuente: Elaboración personal.

Esta pieza obedece a las dimensiones principales de las piezas de anclaje en los arcos de circunferencia del fotorreactor, tiene una altura máxima de 45 mm, con un largo de apoyo de 60 mm, contiene dos orificios de 13 mm de diámetro para elementos pasadores de M12 o ½ pulgada y una tolerancia en la ranura de acople de 0,5 mm, tal como se ilustra en la tabla N°47.

#### 4.1.1. MATERIAL DE CONTRUCCIÓN

Para analizar el tipo de material con el que se deben construir las piezas, se debe tener en cuenta las dimensiones de su diseño, estas juegan un punto a favor, debido a que sus medidas primitivas no superan los 100 mm en ninguna de sus tres direcciones espaciales. Por este motivo, deben ser construidas en polímeros termo moldeables, mediante una impresora 3D. El motivo principal en la elección de este tipo de proceso de manufactura, es la geometría y volumen de las piezas.

El polímero de elección será el acrilonitrilo estireno acrilato o ASA por su abreviatura, este polímero termoplástico, tiene una gran resistencia al agua, a las condiciones ambientales y especialmente a su degradación a la radiación ultravioleta. Esta principal característica lo diferencia de los polímeros PLA y ABS, como se menciona en el apartado 2.4.2.1, además que el sistema de moldaje ayudará a las secciones de geometría relativamente compleja, sin mencionar su buena resistencia mecánica.

#### **4.1.2. VALIDACIÓN ESTRUCTURAL DEL DISEÑO**

Para el análisis de las tensiones admisibles, se deben considerar dos parámetros de estudio. El primero considera un peso unitario de la plancha de vidrio pírex, el cual tiene las siguientes características

- Densidad de 2,23 gr/cm<sup>3</sup>
- Considerando un volumen de ensayo para una placa de 3 mm de espesor, con una altura de 480 mm y un ancho de 1000 mm, el peso unitario de la plancha bordea los 5,54 kg-f

El segundo parámetro considera las propiedades mecánicas definidas para el polímero termorresistente ASA por sus siglas, son las siguientes:

- Resistencia a la rotura de 42 Mpa o 420 kg-f/cm<sup>2</sup> según norma ISO 527
- Resistencia a la flexión de 65 Mpa o 650 kg-f/cm<sup>2</sup> según norma ISO527

Para las condiciones del análisis por elementos finitos utilizando el software de modelado Autodesk Inventor, se considera que las placas están empotradas en la sección donde van apoyadas en la ranura de la semicircunferencia del fotorreactor., considerando una carga de 5,54 kg-f; un enmallado promedio de 0,05 del tamaño del elemento y un ángulo máximo de giro de 60°, da como resultado un esfuerzo máximo de trabajo de  $7,596 \times 10^{-2}$  Mpa o 0,759 kg-f/cm<sup>2</sup>.

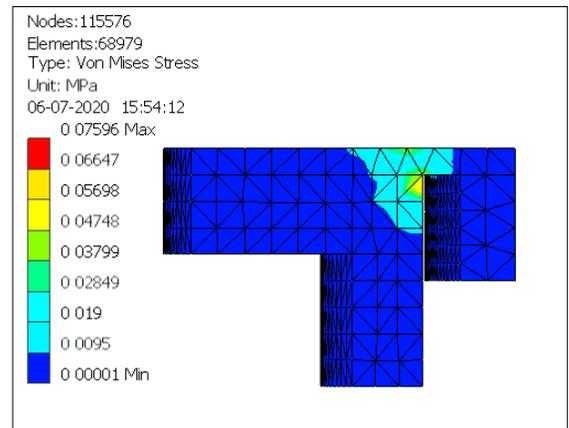
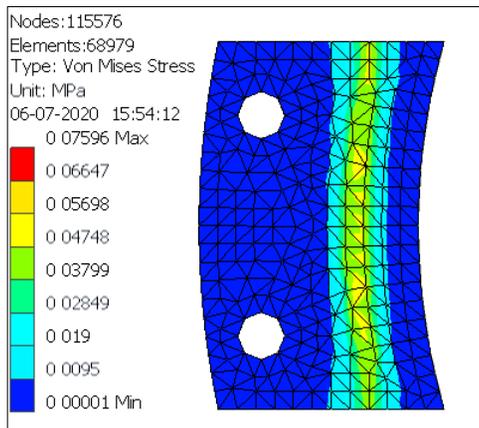


Figura 56. Resumen análisis de tensiones admisibles por elementos finitos para las piezas de apoyo propuestas. Fuente: Elaboración personal.

El esfuerzo de trabajo máximo dada las condiciones definidas, es inferior al esfuerzo de ruptura definido, por lo tanto, la pieza cumple las condiciones de diseño.

En cuanto al desplazamiento de las piezas por los esfuerzos aplicados presentados en la figura N°57:

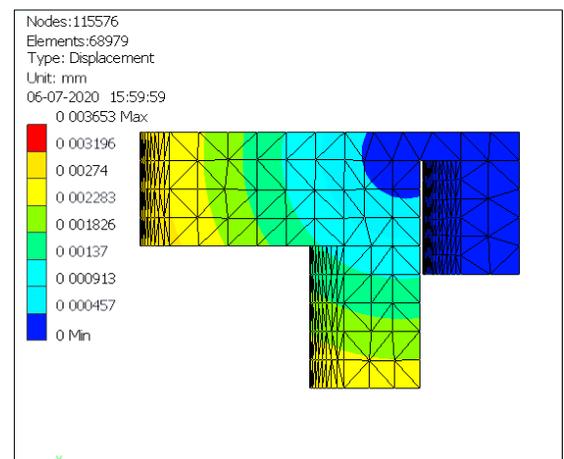
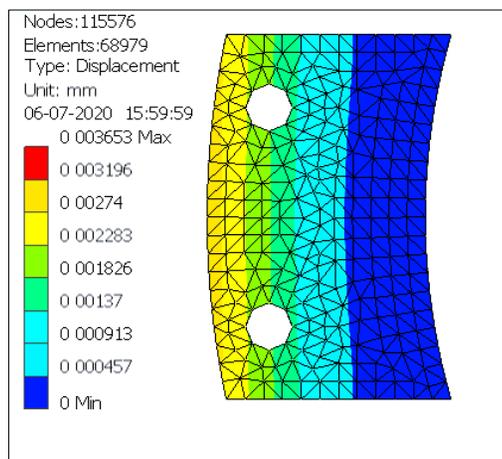


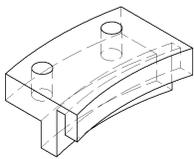
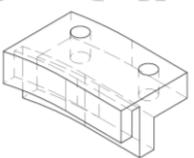
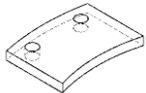
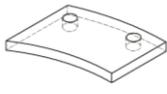
Figura 57. Resumen del análisis de desplazamientos máximos por elementos finitos para la pieza de apoyo. Fuente: Elaboración personal

El desplazamiento máximo se observa en la sección donde más alejada desde el punto de apoyo de la pieza, como era de esperarse. Este desplazamiento no supera los 0,003553 mm, el cual puede considerarse despreciable

### 4.1.3. PIEZAS DE ACOPLER PARA ENSAYO RÍGIDO

Es necesario mencionar que las piezas de acople no serán las mismas si se pretende posicionar un material de ensayo rígido a uno flexible, de esta manera en la tabla N°48 se detallan las piezas necesarias para ensayar un material de tipo rígido, con el requerimiento en cantidades y las dimensiones primitivas.

Tabla 48. Resumen de componentes de acople para materiales de ensayo rígidos.

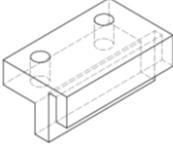
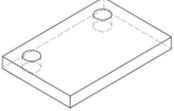
Componente	Dimensiones (mm)	Material	Cantidad	Ilustrador
Acople central radio	100x60x40	ASA	02	
Acople lateral superior e inferior radio	100x60x40	ASA	04	
Placa prensa acople central radio	100x60x10	ASA	02	
Placa prensa acople lateral radio	100x60x10	ASA	04	

Fuente: Elaboración propia.

### 4.1.4. PIEZAS DE ACOPLER FLEXIBLE

En el caso que el material a ensayar sea de características flexibles, se deben anexar acoples laterales ilustrados en la tabla N°49

Tabla 49. Resumen componentes de acople para materiales flexibles.

Componente	Dimensiones (mm)	Material	Cantidad	Ilustrador
Acople lateral central	100x60x40	ASA	01	
Placa prensa acople lateral central	100x60x10	ASA	01	

Fuente: Elaboración personal.

## 4.2. PROCEDIMIENTO DE MONTAJE MATERIAL DE ENSAYO

### 4.2.1. MONTAJE MATERIAL RÍGIDO

Para realizar un correcto montaje, las piezas deben posicionarse en la semi circunferencia laterales del fotorreactor, aparentando un plano cartesiano orientado al sistema de grados. Este supone un eje horizontal imaginario posicionado en la mitad del fotorreactor; la primera pieza se debe posicionar a los  $0^\circ$ , mientras que las piezas 2 y tres deben posicionarse a los  $90^\circ$  y  $270^\circ$ , tal como se muestra en la figura N°58.

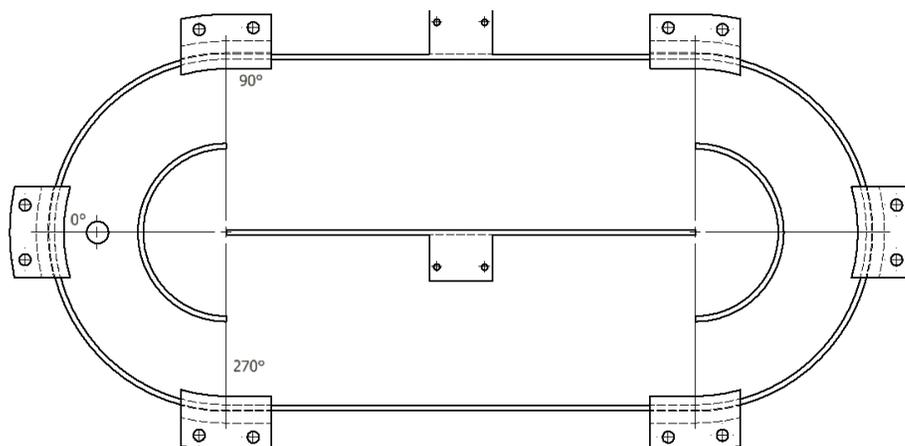


Figura 58. Vista planta de las piezas acopladas al fotorreactor. Fuente: Elaboración personal

En segundo lugar se debe acondicionar el material de ensayo a la geometría del reactor, este tiene un área superficial bruta de 920x380 mm, la cual debe estar adaptada a las dos semicircunferencia que proyectan las piezas de sujeción, además de considerar las paletas hidráulicas que van posicionadas en las placas sobresalientes.

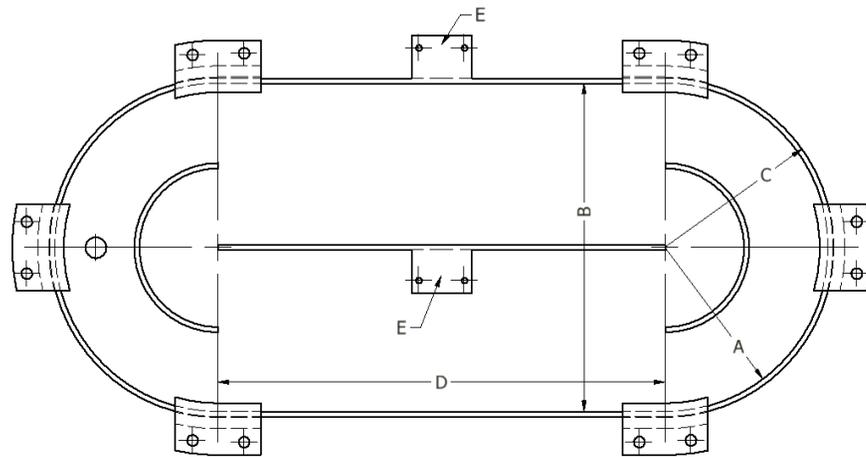


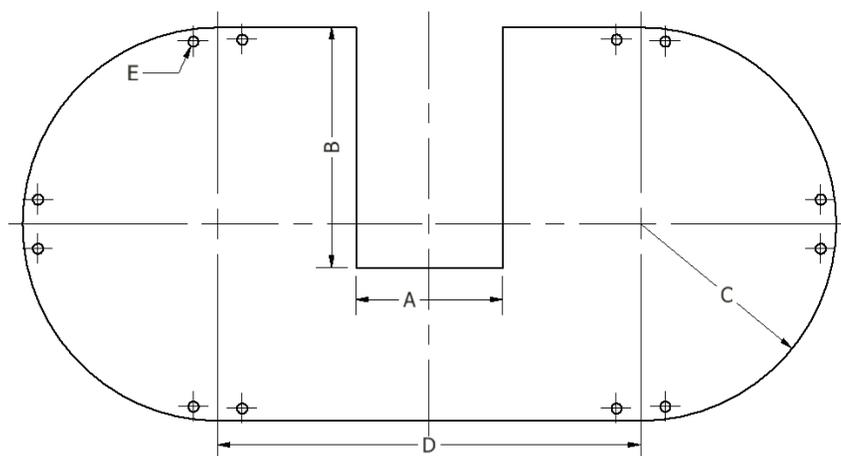
Figura 59. Vista planta detalles generales y dimensiones en fotorreactor. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 50. Resumen y detalle de las dimensiones del equipo con las placas de sujeción.

Índice	Dimensión (mm)	Descripción
A	192	Radio exterior semicircunferencia del equipo
B	380	Ancho interior equipo
C	240	Radio proyectado por las piezas de sujeción del equipo
D	520	Largo del cuerpo del equipo
E	70x50x10	Placas de apoyo para cojinetes del equipo de paletas hidráulicas

Fuente: Elaboración personal.

En el índice E como se muestra en la tabla N°50 y figura N°59, corresponde a los apoyos de los cojinetes de las paletas hidráulicas, estas paletas tienen un ancho de operación de 52 mm a cada lado si se presentan como paralelas al eje horizontal del equipo. El índice C, representa el radio inscrito entre las piezas de sujeción, de esta manera el material de ensayo debe adecuarse a estos parámetros geométricos.



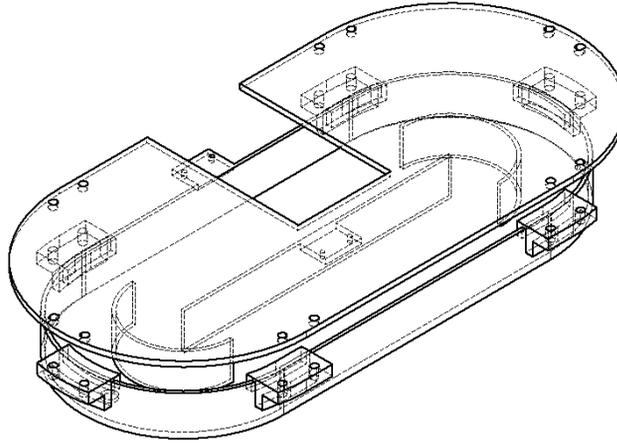
*Figura 60. Vista planta dimensiones generales placa rígida de ensayo. Fuente: Elaboración personal*

El material de ensayo debe cumplir las condiciones de dimensión ilustradas en la tabla N°51.

*Tabla 51. Dimensiones generales para un material de ensayo rígido. Fuente: Elaboración personal.*

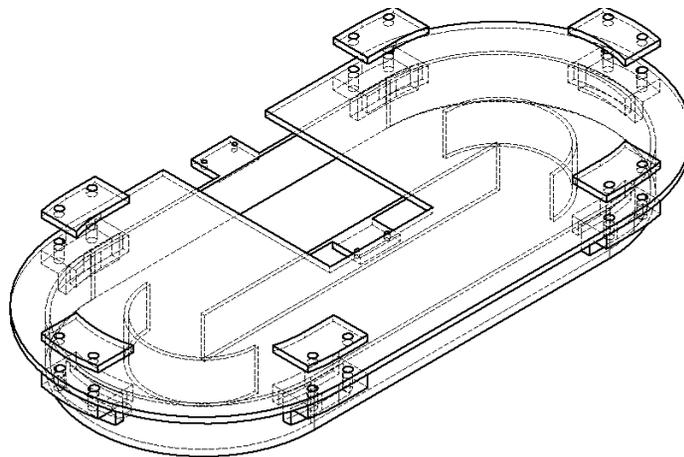
Índice	Dimensión [mm]
A	180
B	294
C	240
D	520
E	13

Definida las dimensiones, la placa debe posicionarse encima de las piezas sujetas a las semicircunferencia del equipo encajando con los agujeros del pasador de sujeción, en este caso pernos hexagonales M12 o ½ pulgada.



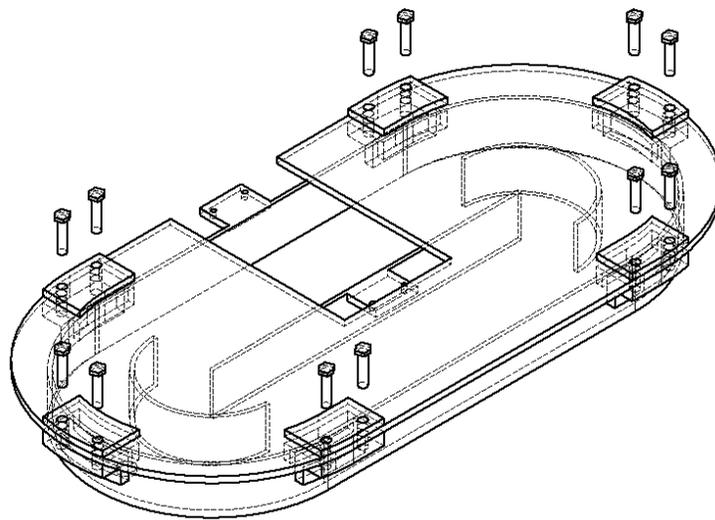
*Figura 61. Vista isométrica fotorreactor para montaje de material de ensayo rígido.  
Fuente: Elaboración personal.*

Luego de posicionar la placa de ensayo, se deben montar las piezas que ejercerán la función de prensas para restringir los grados de libertad que pueda presentar la placa, además de anclarla de forma segura al equipo. Entre las piezas de apriete y la placa, es recomendable fijar un tipo de goma para evitar cualquier fuerza cortante que pueda deslizar la placa.



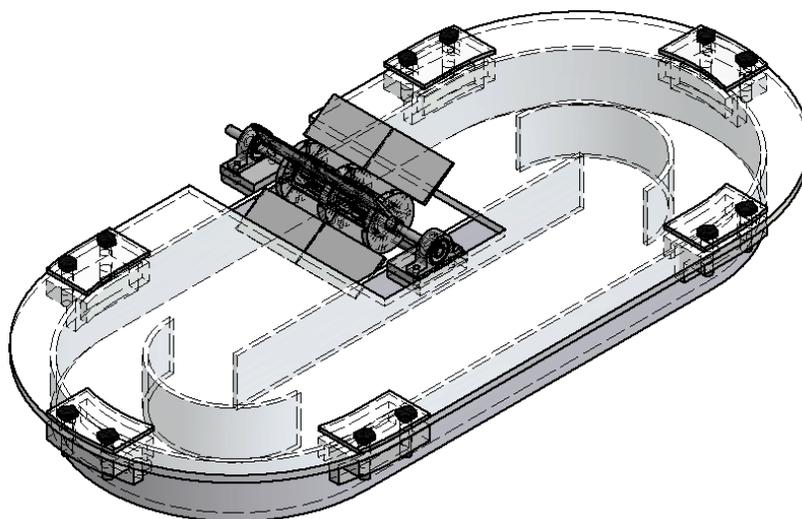
*Figura 62. Vista isométrica montaje de las placas de apriete en el fotorreactor.  
Fuente: Elaboración personal.*

Finalmente posicionar los pernos de sujeción sobre la estructura, a los cuales se les debe dar un apriete para aumentar el área que será sometida a compresión.



*Figura 63. Vista isométrica montaje de pernos de sujeción en fotorreactor. Fuente: Elaboración personal.*

Los pernos deben ser preferentemente de acero inoxidable, ya que este equipo se va a situar en la costa de la región de Arica y Pranicota con altos niveles de humedad salina.

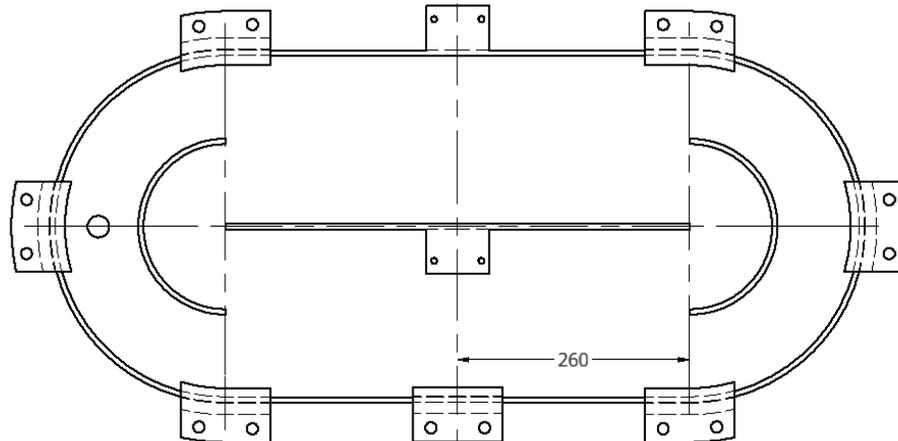


*Figura 64. Vista isométrica final del equipo recubierto a tope con una placa transparente. Fuente: Elaboración personal.*

Es recomendable poner entre la pieza tipo prensa y la pieza de sujeción principal una especie de goma para reducir la fricción que se pueda generar al momento de tensionar el material de ensayo.

#### 4.2.2. MONTAJE MATERIAL FLEXIBLE

Para el posicionamiento de un material flexible, se debe montar una pieza de soporte extra en el eje central del fotorreactor. El centro de la pieza debe encajar con el centro de la ranura inferior, ubicado a 260 mm.



*Figura 65. Vista planta montaje de pieza central de soporte para materiales flexibles de ensayo. Fuente: Elaboración personal.*

Para el caso particular de un material de ensayo flexible, este no necesariamente debe ser adaptado a la geometría circular del fotorreactor, basta con cumplir las medidas de área bruta, siendo estas 1000x480 mm. Sin embargo, considerando que las ranuras por donde debe ser anclada la placa de ensayo consideran perforaciones y siendo este un material flexible sometido a tensión, se deben considerar tolerancias de geometría que permitan alejar las ranuras de anclaje de las fronteras del material.

Según el método de cargas y resistencia por factores de diseño o LRDF por sus siglas en inglés [106], debe existir una distancia mínima de 50 mm para elementos sometidos a tensión que se encuentren apertados, de esta manera el área para el material de ensayo flexible debe ser el siguiente.

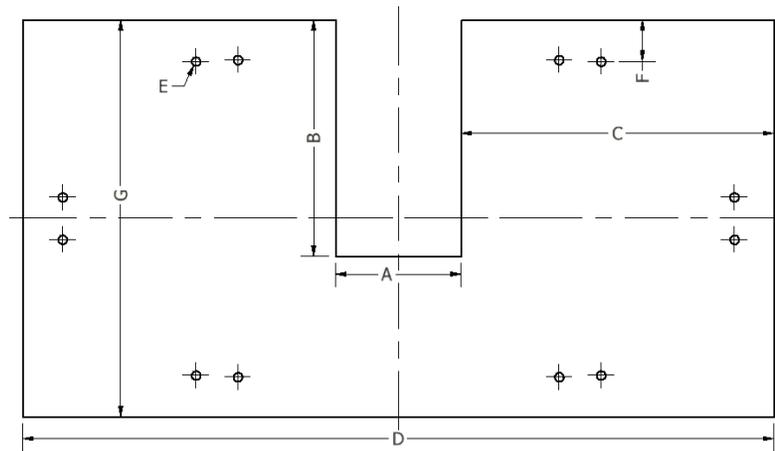


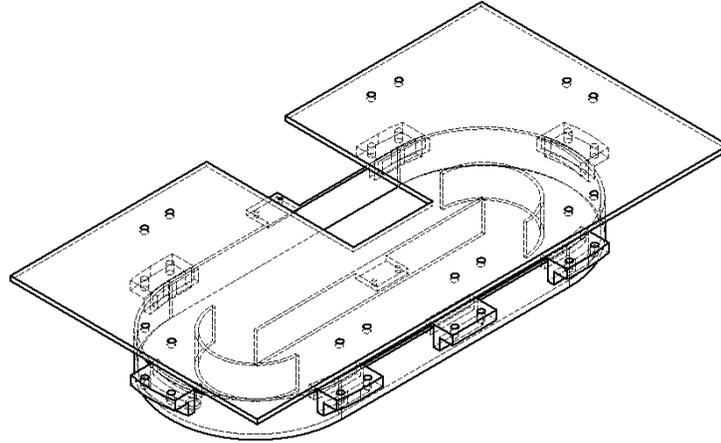
Figura 66. Vista planta dimensiones generales material de ensayo flexible. Fuente: Elaboración personal.

Tabla 52. Resumen dimensiones generales material de ensayo flexible.

Índice	Dimensión [mm]
A	180
B	344
C	440
D	1100
E	10
F	50
G	580

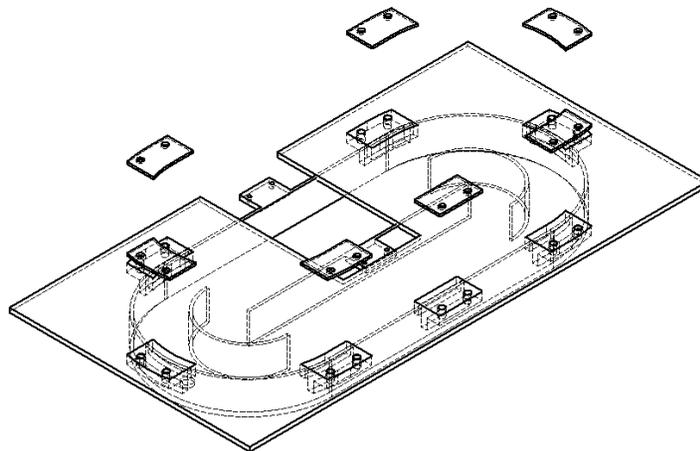
Fuente: Elaboración personal.

Definidas las dimensiones para el material de ensayo flexible, este debe ser posicionado sobre el fotorreactor. Es recomendable realizar las ranuras de anclaje con un diámetro menor que el establecido, esto para que al momento de pasar el perno de apriete, este se expanda debidamente con una holgura de 1,5 mm.



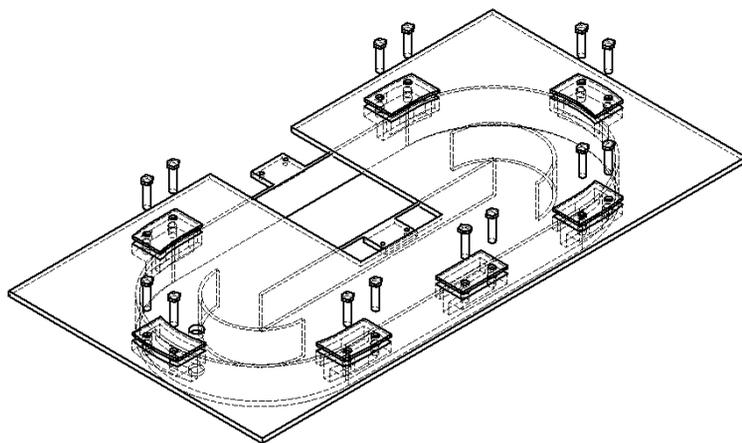
*Figura 67. Vista isométrica montaje y posicionamiento material flexible en el fotorreactor. Fuente: Elaboración personal.*

Debidamente posicionada la placa de material flexible, es recomendable tensarla en las direcciones horizontal y vertical antes de posicionar las piezas que sujetan el material de ensayo al fotorreactor, este tensado del material debe realizarse de forma manual sin mayor esfuerzo de evitar que ocurra flexión encima del estanque de operación. Luego de tensar el material de forma manual, se deben posicionar las placas de apriete sobre las ranuras establecidas en cada pieza.



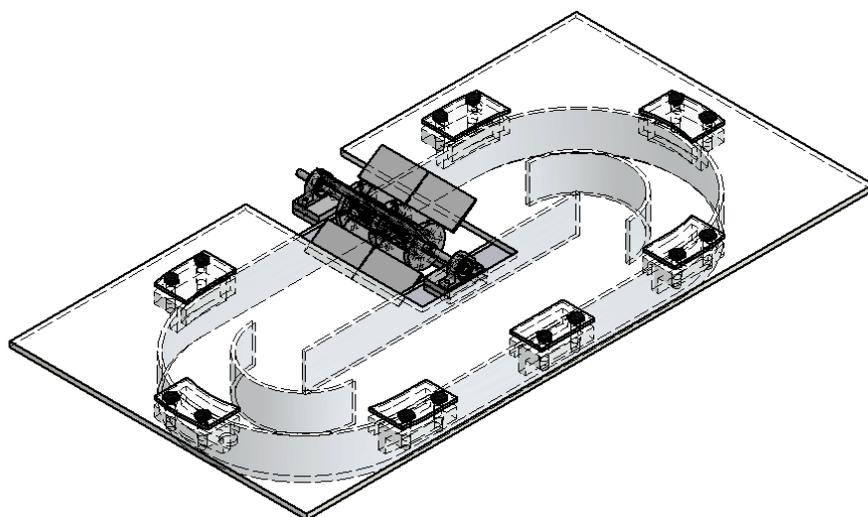
*Figura 68. Vista isométrica posicionamiento y montaje de placas de apriete material de ensayo flexible. Fuente: Elaboración personal.*

Finalmente se deben montar los pernos de apriete en las ranuras de la pieza para comenzar con las pruebas de operación.



*Figura 69. Vista isométrica montaje y posicionamiento de pernos de apriete para material de ensayo flexible. Fuente: Elaboración personal.*

Los pernos deben ser preferentemente de acero inoxidable por su prolongada exposición a las condiciones ambientales salinas y húmedas de la costa de Arica.



*Figura 70. Vista isométrica fotorreactor tapado con un material de ensayo flexible. Fuente: Elaboración personal.*

## 5. CAPITULO V: ANÁLISIS ECONOMICO

Dentro del análisis de este estudio, se hará un completo énfasis a las inversiones estimadas que se requieren para adquirir todos los componentes necesarios para materializar las propuestas, en función de los fondos económicos asignados.

El fondo asignado por el proyecto **FONDECYT INICIACIÓN N°11160680** para llevar a cabo esta tesis de investigación asciende a un monto de 1.200.000 CLP. De este monto total bruto, se le asignó al alumno tesista un monto de 500.000 CLP como remuneración para desarrollar esta tesis.

De esta manera, existe un monto de inversión en componentes y materiales semi transparentes total de 700.000 CLP.

### 5.1. COSTOS DE INVERSIÓN

#### 5.1.1. MATERIALES DE RECUBRIMIENTO DE EQUIPO

En primer lugar, se deben adquirir los materiales propuestos en las dimensiones de la estructura de testeo. Se les asignará un sobre dimensionamiento a modo de tolerancias. El precio de adquisición se presenta en la tabla N°53. Estos costos se definirán como gastos fijos dentro de la adquisición de los implementos.

*Tabla 53. Resumen de los costos fijos en la adquisición de materiales para la estructura soporte.*

<b>Material</b>	<b>Dimensiones [m]</b>	<b>Peso [kg]</b>	<b>Precio Unitario [CLP]</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio [CLP]</b>
Polietileno de baja densidad	10x0.49x0.025	1.0	4.990	01	4.990
Polietileno	0.4x2x0.1	0.38	1.400	01	1.400
Policloruro de vinilo	2x0.49x0.25	0.23	2.990	01	2.990
Acrílico	0.7x0.5x0.04	0.34	29.900	01	29.900
Vidrio pírex	0.31x0.32x0.03	0.73	36.480	01	49.600
Polycarbonato alveolar	2.9x1.05x0.04	0.55	12.690	01	12.690

En cuanto a la tapa de recubrimiento del fotorreactor, solo un material de toda la adquisición será el candidato final para realizar pruebas con condiciones reales. Este dependerá completamente de la capacidad de los candidatos para transmitir la radiación ultravioleta. Sin embargo, se entregarán los valores para la cantidad de material necesario para cubrir ambos equipos, como gastos variables en la adquisición de implementos.

*Tabla 54. Resumen de los costos variables en la adquisición de materiales para los equipos fotorreactores.*

<b>Material</b>	<b>Dimensiones [m]</b>	<b>Precio Unitario [CLP]</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio [CLP]</b>
Polietileno	0.5x2x0.1	700	02	1.400
Policloruro de vinilo	2x0.49x0.25	2.990	02	5.980
Acrílico	1..7x0.55x0.04	65.450	02	130.900
Vidrio pírex	1.5x0.5x0.03	182.140	02	364.280
Policarbonato alveolar	2.9x1.05x0.04	12.690	02	25.380

- El polietileno de baja densidad no se considera en esta tabla de adquisición, principalmente porque al ser un rollo de papel film, viene en una cantidad de 10 metros lineales.

### **5.1.2. ESTRUCTURA DE TESTEO**

La estructura de soporte, como la mayoría de los materiales empleados para modificar técnicamente el fotorreactor deben ser materializados con impresión térmica. El material de construcción debe ser el polímero termo estable ASA.

Para estimar el gasto de material de impresión, se debe tener en cuenta el volumen de cada componente de la estructura, debido a que el filamento de impresión térmica se vende por unidad de peso (kg).

*Tabla 55. Costos fijos de adquisición de material prima en la impresión del componente para la estructura soporte.*

<b>Componente</b>	<b>Volumen [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso [gr]</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Peso Total [kg]</b>
Columna de apoyo	644,10	600	4	2,4
Viga lateral de apoyo	95,40	100	4	0,4
Placa de sujeción	7,46	8	4	0,032

- La estructura contempla pernos de sujeción para anclar el material.

*Tabla 56. Costos de adquisición en componentes necesarios para anclar el material de recubrimiento a la estructura soporte.*

<b>Componente</b>	<b>Dimensión [mm]</b>	<b>Precio unitario [CLP]</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total [CLP]</b>
Perno hexagonal inoxidable G2	M10x40	1.374	4	5.496

### **5.1.3. ELEMENTOS DE ANCLAJE EQUIPO FOTORREACTOR**

Los componentes empleados como elementos de anclaje y sujeción del recubrimiento en el fotorreactor, también serán empleados en base al polímero termoestable ASA. De igual manera que la estructura soporte, se estimará el gasto del material por kilogramo de uso en cada componente.

*Tabla 57. Costos fijos de adquisición de material prima en la impresión de componentes para los equipos fotorreactor.*

<b>Componente</b>	<b>Volumen [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso [gr]</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Peso Total [kg]</b>
Acople de arco central	140.67	151.33	02	0.303
Acople de arco lateral inferior y superior	143.18	155.40	04	0.622
Pieza de posición central	28.87	91.14	02	0.182
Pieza de posición lateral superior	30.25	93.16	04	0.373
Acople lateral central	141.70	150	01	0.150
Pieza de posición lateral central	28.67	31	01	0.031

Los equipos contemplan pernos para la sujeción del material de recubrimiento a los equipos fotorreactor.

*Tabla 58. Costos de adquisición en componentes necesarios para anclar el material de recubrimiento a al equipo fotorreactor.*

<b>Componente</b>	<b>Dimensión [mm]</b>	<b>Precio unitario [CLP]</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total [CLP]</b>
Perno hexagonal inoxidable G2	M12x40	1859	14	26.026
Tuerca hexagonal inoxidable	M12	470	14	6.580

## **5.2. BALANCE FINAL**

### **5.2.1. COSTOS FIJOS TOTALES**

#### **I. Materia prima de impresión 3D**

El filamento de impresión 3D ASA de 1,75 mm de diámetro, tiene un precio en el mercado actual de 29.990 CLP por kilogramo de materia prima.

Tabla 59. Resumen total de los costos fijos de inversión para la materia prima de impresión 3D.

Componente	Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Peso [gr]	Cantidad	Peso Total [kg]
Columna de apoyo	644.10	600	4	2.4
Viga lateral de apoyo	95.40	100	4	0.4
Placa de sujeción	7.46	8	4	0.032
Acople de arco central	140.67	151.33	02	0.303
Acople de arco lateral inferior y superior	143.18	155.40	04	0.622
Pieza de posición central	28.87	91.14	02	0.182
Pieza de posición lateral superior	30.25	93.16	04	0.373
Acople lateral central	141.70	150	01	0.150
Pieza de posición lateral central	28.67	31	01	0.031
			<b>Total</b>	<b>4.50</b>
			<b>CLP</b>	<b>164.945</b>

## II. Componentes menores

En cuanto a los componentes menores de adquisición como pernos y tuercas, se tiene el siguiente balance.

Tabla 60. Resumen de total de los costos de adquisición en componentes menores como pernos, tuercas.

Componente	Dimensión [mm]	Precio unitario [CLP]	Cantidad	Total [CLP]
Perno hexagonal inoxidable	M10x40	1.374	4	5.496
Perno hexagonal inoxidable	M12x50	1.859	14	26.026
Tuerca hexagonal inoxidable	M12	470	14	6.580
			<b>Total</b>	<b>38.102</b>

### III. Materiales de recubrimiento

Tabla 61. Resumen de total de los costos de adquisición en los materiales semi transparentes de prueba.

Material	Dimensiones [m]	Peso [kg]	Precio Unitario [CLP]	Cantidad	Precio [CLP]
Polietileno de baja densidad	10x0.49x0.025	1.0	4.990	01	4.990
Polietileno	0.4x2x0.1	0.38	1.400	01	1.400
Policloruro de vinilo	2x0.49x0.25	0.23	2.990	01	2.990
Acrílico	0.7x0.5x0.04	0.34	29.900	01	29.900
Vidrio pírex	0.31x0.32x0.03	0.73	36.480	01	36.480
Polycarbonato alveolar	2.9x1.05x0.04	0.55	12.690	01	12.690
<b>Total</b>					<b>88.270</b>

Finalmente se tiene el balance final de los costos fijos de inversión para llevar a cabo el estudio de los materiales de recubrimiento para los equipos fotorreactor.

Tabla 62. Balance final para los costos de inversión para el proyecto de recubrimiento en equipos fotorreactores.

Costo Fijo	Precio [CLP]
Materia de impresión 3D	164.945
Componentes menores de anclaje	38.102
Materiales de recubrimiento	88.270
<b>Total</b>	<b>290.474</b>

#### 5.2.2. COSTOS VARIABLES

Se asume que los gastos presentados en la tabla N°63, son gastos variables por el motivo principal que solo uno de estos candidatos será adquirido de forma definitiva por el proyecto.

Tabla 63. Resumen de los costos variables de adquisición en los materiales de recubrimiento para los equipos fotorreactor.

<b>Material</b>	<b>Dimensiones [m]</b>	<b>Precio Unitario [CLP]</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio [CLP]</b>
Polietileno	0.5x2x0.1	1.400	01	2.800
Policloruro de vinilo	2x0.49x0.25	2.990	02	5.800
Acrílico	2.5x0.9x0.04	65.450	02	130.900
Vidrio pírex	1.5x0.5x0.03	182.140	02	364.280
Polycarbonato alveolar	2.9x1.05x0.04	12.690	02	25.380
			<b>Total</b>	<b>539.160</b>

Suponiendo el caso que el material candidato a ser adquirido para las dimensiones representativas de los equipos fotorreactor sea el vidrio de borosilicato, el cual tiene el precio de adquisición más alto dentro de todos los materiales semitransparentes, se tiene el siguiente balance.

Tabla 64. Balance final de los costos de adquisición e implantación para cubrir los equipos fotorreactor "raceway pond"

<b>Costo Totales</b>	<b>Precio [CLP]</b>
<b>Costos fijos</b>	290.474
<b>Costos Variables</b>	364.280
<b>Total</b>	<b>654.754</b>

## 6. CONCLUSIONES

- El modelo de transferencia de calor propuesto satisface la teoría analítica y termodinámica para cada uno de los fenómenos térmicos que experimenta un estanque poco profundo cubierto con un material óptico semi transparente, considerando que éste a su vez, contempla un equipo auxiliar de mezcla.
- La metodología de adquisición de la radiación ultravioleta a través de distintos materiales, entrega instrucciones y modelos comparativos basado en analítica cuantitativa que define, según su comportamiento, el material más óptimo para recubrir los equipos fotorreactores.
- La estructura soporte de testeo para adecuar cada muestra de material, cumple todos los requerimientos estructurales y operacionales para trabajar en conjunto con los equipos radiómetros en constante exposición a la radiación ultravioleta y las condiciones climáticas de la ciudad de Arica.
- Bajo todo los conceptos analíticos y matemáticos estudiados, los equipos fotorreactor “*raceway pond*” pueden operar sin ningún problema con una cubierta semi transparente sin exceder la temperatura máxima de operación, considerando los valores máximos de radiación solar y temperatura incidente en las coordenadas de estudio.
- Los acoples tipo L están diseñados para adecuar cualquier material de recubrimiento semi transparente de orden flexible o rígido hacia un fotorreactor “*raceway pond*”, con la facilidad de poder montarse y desmontarse según los requerimientos operacionales.
- Los acoples tipo L cumplen con todos los requerimientos estructurales y operacionales que implica adosar materiales semi transparentes con un peso de 6 kg-f sobre el área superficial del equipo. De igual forma, el material seleccionado (ASA), está estructurado para estar constantemente expuesto a la radiación solar ultravioleta y a reactivos químicos operacionales propios del equipo sin sufrir degradación y mayores cambios internos.

- La adquisición, impresión e implementación de los distintos componentes para recubrir ambos equipos fotorreactores no excede el presupuesto de 700.000 CLP asignado para este estudio, aun considerando la adquisición de vidrio borosilicato, el cual representa el valor más alto en el mercado.

Es importante estudiar a fondo la capacidad que tienen los diferentes reactivos químicos utilizados en la degradación de aguas tóxicas para transferir energía y calor. Este estudio implica comprender toda la mecánica de fluidos operacionales que puede experimentar un estanque poco profundo, la mecánica computacional (CDF) puede entregar aproximaciones exactas al comportamiento de los equipos en constante operación, sin la necesidad de asignar recurso experimentales. De esta manera, se pueden interpretar un sinnúmero de variables y sectores geográficos de emplazamiento, reduciendo considerablemente los tiempos y recursos asignados a estudios experimentales.

## 7. REFERENCIAS

- [1] G. Sevilla, «Abientum,» [En línea]. Available: [https://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/aguas/el\\_agua\\_motor\\_del\\_ecosistema.asp](https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/el_agua_motor_del_ecosistema.asp). [Último acceso: 09 julio 2020].
- [2] O. d. N. Unidas, «Fashion and the Sustainable Development Goals: Ehat role for the UN ?,» 2018.
- [3] García, R. R. García, M. D. Valiño, S. V. Fernandez y J. M. S. García, «Tratamiento avanzados de aguas residuales industriales,» Madrid, 2006.
- [4] A. R. Fernandez-Alba, P. L. García, R. R. García, M. D. Valiño, S. V. Fernadez y J. M. S. García, «Tratamientos avanzados de oxidación de aguas residuales industriales,» Condeferación Empresarial de madrid, Madrid.
- [5] D. Valiño, S. V. Fernandez y J. M. S. García, «Tratamiento avanzados de aguas residuales industriales,» 2006.
- [6] O. R. T. Gómez, A. M. M. Escudero y H. Z. Gamarra, «Treatment of effluent textiles whit ultraviolet light,» *Revista Facultad de Ingeniería Industrial*, pp. 10-11, 2012.
- [7] O. Tinoco y A. Z. H. Medina, «Tratamiento de efluentes textiles con luz ultravioleta,» *Facultad de ingeniería indutrail*, pp. 1-7, 2011.
- [8] G. A, L. C, M. HD y R. J, «Tratamiento de residuos líquidos de la industria de celulosa y textil, M.A. (Ed). Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea,» CYTED, La plata, Argentina, 2001.
- [9] O. R. T. Gómez, A. M. M. Escudero y H. Z. Gamarra, «Treatment of Efluent Textiles Whit Ultraviolet Light,» *Facultad de Ingeniería Industrial UNMS*, p. 11, 2012.
- [10] E. Gilpavas, P. E. Arbeláez-Castaño, J. D. Medina-Arroyave y C. M. Gomez-Atehortua, «Tratamiento de las aguas residuales de la industria textil medinte coagulación química acoplada a procesos fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia,» *Revista internacional de contaminantes ambientales*, México, 2018.
- [11] S. M. Chesmehmeh R.D, «Periodate-assisted pulsed sonocatalysis of real textile wastewater in the presence of MgO nanoparticles: Response surface methodological optimization. Ultrason,» 2016.
- [12] Mansilla, «Tratamiento de residuos líquidos de la industria textil y celulosa,» 2002.
- [13] L. A. Bernal, M. K. Hernandez, M. S. Berber, M. E. Martinez, R. D. Delgado y M. A. Espinosa, «Removal of the compound dye remazol orange from wastewater generated in the textile industry,» Mexico, 2017.
- [14] R. M, S. O, H. R y A. A, «Thermal modification of activated carbon surface chemistry improves its capacity as redox mediator for azo dye reduction.,» *Journal of hazardous Materials*, 2010.

- [15] San Pedro-Cedillo L., «Evaluation of adsorption and Fenton-adsorption processes for landfill leachate treatment,» *Revista de ingeniería Química*, pp. 745-755, 2015.
- [16] V. Doumic L.I., «Enhancement of a solar photo-Fenton reaction by using ferrioxalate complexes for the treatment of a synthetic cotton-textile dyeing wastewater,» *Chemistic Ingeneering*, pp. 86-96, 2015.
- [17] A. R. Fernandez-Alba, P. L. García, R. R. García, M. D. Valiño, S. V. Fernandez y J. M. S. García, «Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales,» Fundación para el conocimiento madrid+d CEIM, Madrid, 2006.
- [18] L. Rizzo, «Bioassays as a tool for evaluating advanced oxidation processes,» *Water Research*, 2011.
- [19] S. C. Vicent, J. G. B. Clavijo, R. M. Cuenca y J. C. Agustina, «Procesos de oxidación avanzada en el ciclo integral del agua,» 2017.
- [20] J. Sanz, J. I. Lombraña y A. d. Luis, «Estado del arte en la oxidación avanzada a efluentes industriales: nuevos desarrollos y futuras tendencias,» pp. 1-9, 2012.
- [21] Comninellis C., «'Advanced oxidation processes for water tratment: advances and trends for R&D,» *J. Chem. Technol. Biotechnol*, pp. 769-766, 2009.
- [22] Sirtori C., «Decontamination industrial pharmaceutical wastewater by combining solar photo-fenton and biological tratment,» *Water Res*, pp. 661-668, 2009.
- [23] J. I. L. A. d. L. Josu Sanz, «Estado del arte en la oxidación avanzada a efluentes industriales: nuevos desarrollos y futuras tendencias,» *1Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente, UPV/EHU*, pp. 1-9, 2012.
- [24] A. R. Fernández-Alba, P. L. García, R. R. García, M. D. Valiño, S. V. Fernández y J. M. S. García, «Tratamientos de avanzados de aguas residuales industriales,» pp. 46-91, 2006.
- [25] O. R. T. Gómez, A. M. M. Escudero y H. Z. Gamarra, «Treatment of effluent textiles whit ultraviolet light,» *Revista Facultad de Ingeniería Industrial*, pp. 10-11, 2012
- [26] M. Giray, «Comparison of classic Fenton whit ultrasound fenton processes on industrial textile wastewater,» *Sustainable Environment Research*,, vol. 28, pp. 165-170, 2018.
- [27] Hossain, «Antimicrobial nanomaterials as water desinfectant: Applications, limitations and future perspective,» *Science of the total enviroment*, pp. 1047-1059, 2014.
- [28] Michael-Kordatou, «The role of operating parameters and oxidative danmage mechaisms of advanced chemical oxidation processes in the combat against antibiotic-resistant bacteria and resistance genes present in urban wastewater,» *Water Research*, vol. 129, pp. 208-230, 2018.
- [29] . G. Oszajca, «Mechanistic studies on versatile metal-assisted hydrogen peroxide activation processes for biomedical and environmental incentives,» *Coordination Chemisty Reviews*, pp. 327-328, 2016.

- [30] D. M. R. Spasiano, «Solar photocatalysis: Material, reactors, some commercial, and pre industrialized applications. A comprehensive approach,» *Applied Catalysis B: Environmental*, pp. 1-34, 2014.
- [31] J. Blanco, «El Reactor Solar Fotocatalítico-Estado del Arte,» *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas*, pp. 277-303, 2005.
- [32] Blanco, A, «El Reactor Solar,» *Centro de Investigaciones Energéticas*, pp. 277-303, 2007.
- [33] S. Malato, «Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale:an overview,» *Appl. Catal. B: Environ*, pp. 1-15, 2002.
- [34] M. Paulescu, «Weather Modeling and Forecasting of PV Systems Operation,» *Springer Science & Business Media*, 2012.
- [35] Danilo Spasiano, «Solar photocatalysis-Materials, reactor, some commercial, and pre-industrialized applications. A comprehensive approach,» *Applied Catalysis B: Environmental*, pp. 1-34, 2014.
- [36] Q. H. E. Jiyun, «Concentrating or non-concentrating solar collectors for solar Aided Power Generation,» *Energy Conversion and Management*, pp. 281-290, 2017.
- [37] E. S. V. G. T. Hadiyanto H, «Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design,» *Chem Eng J*, vol. 217, pp. 231-239, 2013.
- [38] J. B. Gálvez, «El reactor solar fotocatalítico estado del arte,» Almería.
- [39] D. U. S. K. M. Singha NB, «Investigation of flow dynamics for microalgae suspension in an open pond system,» *Am J Computat Math* , pp. 195-207, 2017.
- [40] P. M. Pandey R, «Design and analysis of flow velocity distribution inside a raceway pond using computational fluid dynamics,» *Bioprocess Biosyst Eng*, vol. 40, pp. 439-450, 2017.
- [41] P. M. C. D. Chiaramonti D, «Review of energy balance in raceway ponds for microalgae cultivation: re-thinking a traditional system is possible.,» *J Appl Energ.*, vol. 102, pp. 101-111, 2013.
- [42] G. R. Ibañez, Assessment of solar photo-Fenton in raceway pond reactors for micropollutant removal in secondary effluents from agro-food industry and municipal WWWTs, 2017, p. 34.
- [43] I. C. e. al, *Journal of Hazardous Materials* 279, 2014, pp. 322-329.
- [44] G. Rivas, «Assesment of solar photo-Fenton in raceway pond reactors for micropollutant removal in secondary effluents from agro food,» pp. 1-242, 2017.
- [45] W. J. Oswald y H. M. Asce, *Photosynthesis in sewage treatment*, 1852.
- [46] Y. Chisti, *Biodiesel from microalgae, biotechnology advances* 25 294-306, 2007.
- [47] Q. H. Richmond A, «Principles for efficient utilization of light for mass production of photoautotrophic microorganisms,» *Appl Biotechnol*, vol. 63, pp. 649-658, 1997.

- [48] S. B. M. J. Hreiz R, «Experimental and numeral investigation of hydrodynamics in raceway reactors used for algaculture,» *Chem Eng J*, vol. 250, pp. 230-239, 2014.
- [49] B. MA., «Commercial production of microalgae: pond, tanks, tubes and fermenters,» *J. Biotechnol*, vol. 70, pp. 313-321, 1999.
- [50] G. JU., «Mass production of microalgae at optimal photosynthetic rates,» *Dubinsky Z, editor Photosynmethesis*, 2013.
- [51] A. Cajamar, «Cultivo de microalgas a gran escala: Sistemas de producción,» *Negocio Agroalimentario y Cooperativo*, pp. 1-14, 2016.
- [52] Hadiyanto H, «Hydrodynamic evaluations in high rate algae pong (HRAP) desing,» *Chem Eng J*, vol. 217, pp. 231-239, 2013.
- [53] A. JC, «Field pond performance and desing evaluation using physical models,» *Water Research*, vol. 26, pp. 1403-1407, 1992.
- [54] X. S. Y. C. Zhang Q, «Installation of flow deflectors and wing baffles to reduce dead zone and enhance flashing light effect in an open raceway pond,» *J bioresource Tecjology*, vol. 198, pp. 150-156, 2015.
- [55] C. Y. S. T. Sompech K, «Design of raceway pond for producing microalgae,» *J biofuels*, vol. 3, pp. 387-397, 2012.
- [56] JI, «The removal of secreted bacteria and viruses in deep waste stabilization ponds in North-East Brazil.,» *J water sci tchnology*, vol. 19, pp. 569-573, 1987.
- [57] P. M. Pandey R, «Desing and analysis of flow velocity distributio inside a racewat pond using computational fluid dynamics,» *Bioprocess Biosyst Eng*, vol. 40, pp. 439-450, 2017.
- [58] X. S. Y. C. Zhang Q, «Instalation of flow deflectors and wing baffles to reduce dead zone and enhance flashing light effect in a open raceway pond,» *J Bioresource Technol* , vol. 198, pp. 150-156, 2015.
- [59] S. L. M. D. Riley WFF, «Mechanics of materials,» *J wiley & Sons*, nº 5, p. 720, 1998.
- [60] D. U. S. K. M. Singha NB, «Investigation of flow dinamics for microalgae suspension in an open pond system,» *Am J Computat Math* , pp. 195-207, 2017.
- [61] G. F. M. E. Contretas A, «Interaction between CO2-mass transfer, ligh availability, and hidrodynamic stress in the growth of *Phaeodactylum tricormutum* in concentric tube airlift photobioreactor,» *Biotechnol Bioeng*, vol. 60, pp. 317-325, 1998.
- [62] D. JC, «Elements of pond design and construction: handbook of microalgal mass culture by Amos,» *Richmond Boca Raton*, 1986.
- [63] G. M. G. I. Mendoza JL, «Fluid dynamic characterization of real scale raceway reactor for microalgae production.,» *J Biomass Bionerg*, vol. 54, pp. 267-275, 2013.

- [64] P. D. L. P. Liffman K, «Comparing the energy efficiency of different high rate algal raceway pond desings using computational fluid dynamics,» *J chem Eng Res Desing*, vol. 91, pp. 221-226, 2013.
- [65] Z. Q. W. Z. Li Y, «Evaluation of power consupion of paddle wheel in a open raceway pong,» *Bioprocess Biosyst Eng*, vol. 37, pp. 1325-1336, 2014.
- [66] P. M. C. D. Chiaramonti D, «Review of energy balance in raceway ponds for microalgae cultivation: re-thinkins a traditional system is possible.,» *J Appl Energ.*, vol. 102, pp. 101-111, 2013.
- [67] P. M. C. D. Chiaramonti D, «Review of energy balance in raceway pond for microalgae cultivation: re-thinking a traditional system is possible,» *J Appl Energ*, vol. 102, pp. 101-111, 2013.
- [68] A. JC, «Field pond performance and desing evaluation using physical models,» *Water Res*, vol. 26, pp. 1403-1407, 1992.
- [69] D. JC, «Elements of pond design and construction: handbook of microalgal mass culture by Amos Richmond Boca Raton,» *CRC press Inc*, 1986.
- [70] B. K. Polprasert C, «Dispersion model for waste stabilization ponds,» *J Enviroment Eng*, vol. 111, pp. 45-59, 1985.
- [71] M. D. Marecos do Mont MHD, «The hydraulic performance of waste stabilization ponds in portugal,» *Internaniotal conference on waste stabilization ponds*, pp. 39-47, 1987.
- [72] G. S. J. M. C. I. Barceló Villalobos M, «Analysis of mass tranfer capacity in raceway reactor,» *Res*, vol. 35, pp. 91-97, 2018.
- [73] G. R. Weissman JC, «Desing and analysis of microalgal open pond systems for the purpose of producing fuels: a subcontract report,» *Golden CO Solar Energy Research Institute*, 1987.
- [74] T. MR, «Mass production of microalgae: photobioreactors In Richmond A, editor Handbook of microalgal culture.,» *Oxford Blackwell Science*, pp. 178-214, 2014.
- [75] C. Y, «Large-scale production of algal biomass raceway pond, algae biotechnology products and processes,» *Springer New York*, 2016.
- [76] S. B. M. J. Hreiz R, «Experimental and numerical investigation of hydrodynamics in raceway pond reactors used for algaculture,» *Chem Eng J*, vol. 250, pp. 230-239, 2014.
- [77] A. Vera y N. Lazo, «Estudio, diseño, construcción y puesta en marcha de un fotorreactor económico para el tratamiento de aguas residuales industriales de la industria textil,» *ARICA*, 2019.
- [78] O. Raynolds, An experimental investigation of the circunstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels, *Philosophical Transactions of the Royal Society (PP 935-982)*, 1883.

- [79] N. 1kwan-hoong, Non-ionizing radiations sources, biological effects, emissions and exposures, International Conference on non-ionizing radiation, 2003.
- [80] Y. Cengel, Transferencia de calor y masa, Mexico D.F.: McGrawHill (pp. 700-750), 211.
- [81] A. D. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, New Jersey , 2013.
- [82] J. Duffe y W. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 202-234, 2013.
- [83] M. Alvarado, «engimia,» 2018. [En línea]. Available: <https://engimia.com/blog/el-cinturon-solar-de-la-tierra-que-es-y-que-paises-se-encuentran-dentro>. [Último acceso: 17 08 2020].
- [84] G. C. J. H. A. M. A. Hartley, «150 million years of climatic stability: evidence from the atacama Desert, northern Chile,» *J. Geol. Soc. Lond.*, pp. 421-424, 2005.
- [85] U. d. Tarapacá, «UTA,» Dirección de extensión y vinculación con el medio , 20 diciembre 2013. [En línea]. Available: <https://www.uta.cl/index.php/2013/12/20/radiacion-solar-en-arica-y-parinacota-estaria-entre-las-mejores-del-mundo/>. [Último acceso: 16 junio 2020].
- [86] K. Leszczynsky, K. Jokela, L. Ylianttila, R. Visuri y M. Blumthaler, Erythemally weighted radiometers in solar UV monitoring: results from the WMO/STUK intercomparison, *Photochem, Photobiol*, 67(2), 212-221, 1998.
- [87] L. McArthur, «World Climate Research Programme-Baseline Surface Radiation Network (BSRN)-Operation Manual Version 2.1,» 2005.
- [88] L. Cornejo, L. Martín-Pomares, D. Alarcón, J. Blanco y J. Polo, «A Trough Analysis of Solar Radiation Measurements In the Region of Arica y Parinacota,» *Renewable Energy*, pp. 197-208, 2016.
- [89] Kipp&Zonen, «Kipp&Zonen Instruction Sheet Smart UV Radiometer SUV Seroes V1811,» 2020.
- [90] Mexpolímeros, «Mexpolimeros,» [En línea]. Available: <https://www.mexpolimeros.com/>. [Último acceso: 18 07 2020].
- [91] R. Hill, The mathematical theory of plasticity, Oxford: Clarendon Press, 1950.
- [92] Y. Cengel y J. Afshin, Transferencia de calor y masa-Fundamento y Aplicaciones, México : PP-685, 2011.
- [93] P. L. M. Slegers, «Scenario evaluation of open pond microalgae production,» *Algal Research*, pp. 1-11, 2012.
- [94] D. P. M. C. D. Chiaramonti, «Review of energy balance in raceway pond for microalgae cultivation Re-thinking a traditional system is possible,» *Applied Energy*, pp. 101-111, 2013.
- [95] A. g. t. m. f. s. photobioreactors, «Goetz, V. Le Borgne, F.,» *Chemical Engineering Journal*, pp. 443-449, 211.

- [96] J. McCormac, Diseño de estructuras de acero-metodo LRFD, México D.F: pp 63-101, 2002.
- [97] I. O. Tito, «Emprendices,» 14 agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.emprendices.co/estimacion-de-precios-la-regla-de-los-6-decimos-y-logaritmos/>.
- [98] I. S. C. P. Ramon Vilanova, «Control y Operacion de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales: Modelado y Simulación,» *Revista iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, pp. 217-233, 2017.
- [99] A. R. Fernandes-Alba, P. L. García, R. R. García, M. D. Valiño, S. V. Fernandez y J. M. S. García, «Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales,» Confederación empresarial de madrid, madrid, 2006.
- [100] L. Castro-Peña y J. Duran-Herrera, «Degradation and decoloration of contaminated water whit textile dyes using advanced oxidation processes,» *Tecnología en Marcha*, vol. 27, nº 2, pp. 41-43, 2014.
- [101] Mansilla, «Tratamiento de residuos líquidos de la industria téxtil y celulosa,» [En línea]. Available: <http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/cyted/20cap13.pdf>. [Último acceso: 08 05 2020].
- [102] R. Andreozzi, V. Caprio, A. Insola y R. Marotta, «Advanced oxidation processes AOP for water purification and recovery,» *Cata. Today* 53, pp. 51-59, 212.
- [103] K. & Z. B.V., «Smart Explorer Software Manual,» Kipp & Zonen, netherland, 2019.
- [104] J. A. Villalobos, «La hora de la Tierra y la hora Solar,» de *IX Congreso nacional de ciencias*, Costa Rica, 2007.
- [105] A. J. Martínéz, «Estudio comparativo de la irradiancia solar global, directa y difusa medida en estaciones meteorológicas ubicadas en la zona costera de la región de Arica y Parinacota,» Arica, 2018, pp. 19-22.
- [106] R. Pichs, «Subsedarrollo, déficit de agua dulce y deterioro ambiental,» de *Centro de investigación de la economía mundial*, La habana, Cuba, 2004, pp. 111-124.
- [107] Ad De Roo, «Modeling water demand and availavilty scenario for current and future land use and climate in the sava river basin,» *JRC technical reports*, pp. 1-94, 2016.
- [108] O. d. I. n. unidas, «Soluciones basadas en la naturaleza para la gestion del agua-cifras y datos,» 2018.
- [109] ONG, «Informe mundial de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recurso hídricos 2019,» París, 2019.
- [110] P. Burek, «Global exposure and vulnerability to multi-sector development and climate change hotspots,» 2016.
- [111] N. Nieto, «La gestión del agua: Tensiones globales y latinoamericanas,» 2011.
- [112] Unesco, «Latin America and the Caribbean,» 2003. [En línea]. Available: [<http://www.wateryear2003.org/en/ev.php>-

URL\_ID=4926&URL\_DO=DO\_TOPIC&URL\_SECTION=201.html]. [Último acceso: 10 06 2020].

- [113] M. Barlow y T. Clarke, «Water Privatization: the world bank's latest market fantasy,» Polaris Institute, 2001.
- [114] A. Enciso, «El agua, botín para transnacionales; la privatización con alto costo social,» La jornada, sección sociedad y justicia, 2005.
- [115] T. u. N.-w. w. development, «Water. A shared responsibility,» 2006.
- [116] Naje A.S., «Electrocoagulation using a rotated anode: A novel reactor design for textile wastewater treatment. J. Environ. Manage,» 2016.
- [117] C. Ö. y. S. E. Yurtsever A., «Treatment of textile wastewater using sequential sulfate-reducing anaerobic and sulfide-oxidizing aerobic membrane bioreactors,» 2016.
- [118] . Li Y, «Evaluation of power consumption of paddle wheel in a open raceway pond,» *Bioprocess Biosyst Eng*, vol. 37, pp. 1325-1336, 2014
- [119] IDEM. [En línea].
- [120] F. Palma, «UCHILE,» 20 enero 2017. [En línea]. Available: <https://www.uchile.cl/noticias/130633/energia-solar-las-potencialidades-de-arica-de-iluminar-el-pais>. [Último acceso: 16 junio 2020].
- [121] «3D printer Farms And Robotics Start Pointing To Duture of Manufacturing,» forbe, 8 noviembre 2011. [En línea]. Available: <https://www.forbes.com/sites/tjmccue/2017/11/08/3d-printer-farms-and-robotics-start-pointing-to-future-of-manufacturing/#739d0065a429>.. [Último acceso: junio 17 2020].
- [122] D. Ad De Roo, «Modeling water demand and availavilty scenario for current and future land use and climate in the sava river basin,» *JRC technical reports*, pp. 1-94, 2016.
- [123] A. g. t. m. f. s. phobioreactors, «Goetz, V. Le Borgne, F.,» *Chemical Engineering Journal*, pp. 443-449, 211.
- [124] L. McArtur, «Worl Cimate Research Programe-Baseline Surface Radiation Network (BSRN)-Operation Manual Version 2.1,» 2005.
- [125] Y. Chisty, Raceway bases production of alga crude oil, Berlin: Poste & C. Walter microalgal biotechnology potential and production (pp. 113-146), 2012.
- [126] J. Villalobos, La hora de la tierra y la hora solar, Costa Rica: Congreso Nacional de ciencias (pp 1-6), 2007.
- [127] A. Esteban, Estudio comparativo de la irradiancia solar global, directa y difusa, medida en estaciones meteorológicas ubicadas en la zona costera de la región de Arica-Parinacota, Chile, Arica: (pp19-22), 2018.

- [128]Mariano, «Tecnología de los Plásticos,» 7 mayo 2012. [En línea]. Available: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/05/asa.html>. [Último acceso: junio 25 2020].
- [129]J. Esteban, Estudio comparativo de la irradiancia solar global, directa y difusa medida en estaciones ubicadas en la zona costera de la región de Arica Parinacota, Arica, 2018.
- [130]A. Cabrera Reina, S. Miralles Cuevas, G. Rivas y J. A. Sánchez Pérez, «Comparison of different detoxification pilot plants for the treatment of industrial wastewater by solar photo-Fenton: are raceway pond reactors a feasible option?,» *Science of the Total Environment*, vol. 648, pp. 601-608, 2019.

## 8. ANEXOS

**ANEXO 1.** Radiación solar  $G(t)$  incidente en el vidrio borosilicato mes de enero equipo RT01 y RT02

$$Q_{in} = G * \alpha * A$$

Tabla 1. Hoja de cálculo para la energía entrante para el vidrio borosilicato mes de enero.

Hora UTC-3	Radiación $G(t)$ (W/m <sup>2</sup> )	Energía entrante $Q_{in}$ (W)	Hora UTC-3	Radiación $G(t)$ (W/m <sup>2</sup> )	Energía entrante $Q_{in}$ (W)
0:00	0	0	12:00	966	18,17046
1:00	0	0	13:00	1007	18,94167
2:00	0	0	14:00	961	18,07641
3:00	0	0	15:00	835	15,70635
4:00	0	0	16:00	632	11,88792
5:00	0	0	17:00	397	7,46757
6:00	0	0	18:00	191	3,59271
7:00	55	1,03455	19:00	35	0,65835
8:00	231	4,34511	20:00	0	0
9:00	420	7,9002	21:00	0	0
10:00	661	12,43341	22:00	0	0
11:00	851	16,00731	23:00	0	0

**ANEXO 2.** Radiación solar  $G(t)$  incidente en el vidrio borosilicato mes de febrero equipo RT01 y RT02

$$Q_{in} = G * \alpha * A$$

Tabla 2. Hoja de cálculo para la energía entrante para el vidrio borosilicato mes de febrero.

Hora UTC-3	Radiación $G(t)$ (W/m <sup>2</sup> )	Energía entrante $Q_{in}$ (W)	Hora UTC-3	Radiación $G(t)$ (W/m <sup>2</sup> )	Energía entrante $Q_{in}$ (W)
0:00	0	0	12:00	953	17,92593
1:00	0	0	13:00	1002	18,84762
2:00	0	0	14:00	952	17,90712
3:00	0	0	15:00	833	15,66873
4:00	0	0	16:00	605	11,38005
5:00	0	0	17:00	379	7,12899
6:00	0	0	18:00	171	3,21651
7:00	34	0,63954	19:00	20	0,3762
8:00	200	3,762	20:00	0	0
9:00	412	7,74972	21:00	0	0
10:00	645	12,13245	22:00	0	0
11:00	835	15,70635	23:00	0	0

**ANEXO 3.** Radiación solar G(t) incidente en el vidrio borosilicato mes de julio equipo RT01 y RT02

$$Q_{in} = G * \alpha * A$$

Tabla 3. Hoja de cálculo para la energía entrante para el vidrio borosilicato mes de julio.

Hora UTC-3	Radiación G(t) (W/m <sup>2</sup> )	Energía entrante Q <sub>in</sub> (W)	Hora UTC-3	Radiación G(t) (W/m <sup>2</sup> )	Energía entrante Q <sub>in</sub> (W)
0:00	0	0	12:00	433	8,14473
1:00	0	0	13:00	633	11,90673
2:00	0	0	14:00	637	11,98197
3:00	0	0	15:00	533	10,02573
4:00	0	0	16:00	391	7,35471
5:00	0	0	17:00	205	3,85605
6:00	0	0	18:00	33	0,62073
7:00	0	0	19:00	0	0
8:00	32	0,60192	20:00	0	0
9:00	110	2,0691	21:00	0	0
10:00	187	3,51747	22:00	0	0
11:00	319	6,00039	23:00	0	0

**ANEXO 4.** Temperatura del cielo mes de enero equipo RT01 y RT02

$$T_{sky} = (273.15 + T_a)(0.711 + 0.0056T_{dw}7.3 \times 10^{-5}T_{dw}^2 + 0.13\cos(15t_{solar}))^{0.25}$$

- Temperatura de rocío promedio en Arica alrededor de 12°C
- Horas sin luz solar después de medianoche ( $t_{solar}$ ) en promedio de 6

Tabla 4. Hoja de cálculo para la temperatura del cielo mes de enero.

Hora UTC-3	Temperatura Ambiente [C°]	Temperatura del cielo [C°]	Hora	Temperatura Ambiente [C°]	Temperatura del cielo [C°]
0:00	18	-5,73115223	12:00	24	-0,22020225
1:00	17	-6,64964389	13:00	24	-0,22020225
2:00	17	-6,64964389	14:00	24	-0,22020225
3:00	16	-7,56813556	15:00	24	-0,22020225
4:00	16	-7,56813556	16:00	23	-1,13869391
5:00	16	-7,56813556	17:00	22	-2,05718558
6:00	15	-8,48662722	18:00	21	-2,97567724
7:00	17	-6,64964389	19:00	21	-2,97567724
8:00	18	-5,73115223	20:00	20	-3,8941689
9:00	20	-3,8941689	21:00	19	-4,81266057
10:00	22	-2,05718558	22:00	19	-4,81266057
11:00	23	-1,13869391	23:00	18	-5,73115223

## ANEXO 5. Temperatura del cielo mes de febrero equipo RT01 y RT02

$$T_{sky} = (273.15 + T_a)(0.711 + 0.0056T_{dw}7.3x10^{-5}T_{dw}^2 + 0.13\cos(15t_{solar}))^{0.25}$$

- Temperatura de rocío promedio en Arica alrededor de 12°C
- Horas sin luz solar después de medianoche ( $t_{solar}$ ) en promedio de 6

Tabla 5. Hoja de cálculo para la temperatura del cielo mes de febrero.

Hora UTC-3	Temperatura Ambiente [C°]	Temperatura del cielo [C°]	Hora	Temperatura Ambiente [C°]	Temperatura del cielo [C°]
0:00	18	-5,73115223	12:00	25	0,69828941
1:00	18	-5,73115223	13:00	26	1,61678108
2:00	17	-6,64964389	14:00	26	1,61678108
3:00	17	-6,64964389	15:00	25	0,69828941
4:00	16	-7,56813556	16:00	25	0,69828941
5:00	16	-7,56813556	17:00	24	-0,22020225
6:00	16	-7,56813556	18:00	22	-2,05718558
7:00	17	-6,64964389	19:00	22	-2,05718558
8:00	19	-4,81266057	20:00	21	-2,97567724
9:00	21	-2,97567724	21:00	20	-3,8941689
10:00	22	-2,05718558	22:00	20	-3,8941689
11:00	24	-0,22020225	23:00	19	-4,81266057

## ANEXO 6. Temperatura del cielo mes de julio equipo RT01 y RT02

$$T_{sky} = (273.15 + T_a)(0.711 + 0.0056T_{dw}7.3x10^{-5}T_{dw}^2 + 0.13\cos(15t_{solar}))^{0.25}$$

- Temperatura de rocío promedio en Arica alrededor de 12°C
- Horas sin luz solar después de medianoche ( $t_{solar}$ ) en promedio de 6 horas

Tabla 6. Hoja de cálculo para la temperatura del cielo mes de julio.

Hora	Temperatura Ambiente [C°]	Temperatura del cielo [C°]	Hora	Temperatura Ambiente [C°]	Temperatura del cielo [C°]
0:00	14	-9,40511888	12:00	18	-5,73115223
1:00	13	-10,3236105	13:00	19	-4,81266057
2:00	12	-11,2421022	14:00	19	-4,81266057
3:00	12	-11,2421022	15:00	19	-4,81266057
4:00	12	-11,2421022	16:00	18	-5,73115223
5:00	11	-12,1605939	17:00	18	-5,73115223
6:00	11	-12,1605939	18:00	17	-6,64964389
7:00	12	-11,2421022	19:00	16	-7,56813556

<b>8:00</b>	13	-10,3236105	<b>20:00</b>	16	-7,56813556
<b>9:00</b>	14	-9,40511888	21:00	15	-8,48662722
<b>10:00</b>	16	-7,56813556	22:00	15	-8,48662722
<b>11:00</b>	18	-5,73115223	23:00	14	-9,40511888

**ANEXO 7.** Radiación solar G(t) incidente en el fotorreactor RT01 y RT02 para el mes de enero.

$$Q_{in} = G * \alpha * \tau * A$$

Tabla 7. Hoja de cálculo para la energía entrante en el fotorreactor mes de enero.

Hora UTC-3	Radiación (W/m <sup>2</sup> )	G(t) Vidrio (W)	Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )	G(t) Vidrio (W)
<b>0:00</b>	0	0	<b>12:00</b>	966	139,35091
<b>1:00</b>	0	0	<b>13:00</b>	1007	145,265389
<b>2:00</b>	0	0	<b>14:00</b>	961	138,629632
<b>3:00</b>	0	0	<b>15:00</b>	835	120,453426
<b>4:00</b>	0	0	<b>16:00</b>	632	91,1695392
<b>5:00</b>	0	0	<b>17:00</b>	397	57,2694732
<b>6:00</b>	0	0	<b>18:00</b>	191	27,5528196
<b>7:00</b>	55	7,934058	<b>19:00</b>	35	5,048946
<b>8:00</b>	231	33,3230436	<b>20:00</b>	0	0
<b>9:00</b>	420	60,587352	<b>21:00</b>	0	0
<b>10:00</b>	661	95,3529516	<b>22:00</b>	0	0
<b>11:00</b>	851	122,761516	<b>23:00</b>	0	0

**ANEXO 8.** Radiación solar G(t) incidente en el fotorreactor RT01 y RT02 para el mes de febrero.

$$Q_{in} = G * \alpha * \tau * A$$

Tabla 8. Hoja de cálculo para la energía entrante en el fotorreactor mes de febrero.

Hora UTC-3	Radiación (W/m <sup>2</sup> )	G(t) Vidrio (W)	Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )	G(t) Vidrio (W)
<b>0:00</b>	0	0	<b>12:00</b>	966	137,475587
<b>1:00</b>	0	0	<b>13:00</b>	1007	144,544111
<b>2:00</b>	0	0	<b>14:00</b>	961	137,331331
<b>3:00</b>	0	0	<b>15:00</b>	835	120,164915
<b>4:00</b>	0	0	<b>16:00</b>	632	87,274638
<b>5:00</b>	0	0	<b>17:00</b>	397	54,6728724
<b>6:00</b>	0	0	<b>18:00</b>	191	24,6677076
<b>7:00</b>	55	4,9046904	<b>19:00</b>	35	2,885112
<b>8:00</b>	231	28,85112	<b>20:00</b>	0	0
<b>9:00</b>	420	59,4333072	<b>21:00</b>	0	0
<b>10:00</b>	661	93,044862	<b>22:00</b>	0	0
<b>11:00</b>	851	120,453426	<b>23:00</b>	0	0

**ALEXO 9.** Radiación solar G(t) incidente en el fotorreactor RT01 y RT02 para el mes de julio.

$$Q_{in} = G * \alpha * \tau * A$$

Tabla 9. Hoja de cálculo para la energía entrante en el fotorreactor mes de julio.

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )	G(t) Vidrio (W)	Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )	G(t) Vidrio (W)
0:00	0	0	12:00	966	62,4626748
1:00	0	0	13:00	1007	91,3137948
2:00	0	0	14:00	961	91,8908172
3:00	0	0	15:00	835	76,8882348
4:00	0	0	16:00	632	56,4039396
5:00	0	0	17:00	397	29,572398
6:00	0	0	18:00	191	4,7604348
7:00	55	0	19:00	35	0
8:00	231	4,6161792	20:00	0	0
9:00	420	15,868116	21:00	0	0
10:00	661	26,9757972	22:00	0	0
11:00	851	46,0175364	23:00	0	0

**ANEXO 10.** Temperatura vidrio borosilicato T<sub>g</sub> equipo RT01 y RT02 mes de enero.

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{GA_g\alpha_g - h_{g/amb}A_g(T_g - T_{amb}) - \varepsilon_g\sigma A_g(T_g^4 - T_{sky}^4) - h_{g/s}A_g(T_g - T_s)}{e_gA_gC_{pg}}$$

Tabla 10. Hoja de cálculo temperatura del vidrio borosilicato para el mes de enero.

Hora UTC-3	Temperatura Vidrio RT01 [C°]	Hora UTC-3	Temperatura Vidrio RT01 [C°]
0:00	18,01120574	12:00	24,27587448
1:00	17,0112111	13:00	24,28711016
2:00	17,0112111	14:00	24,27450428
3:00	16,01121574	15:00	24,23997513
4:00	16,01121574	16:00	23,18435731
5:00	16,01121574	17:00	22,11996866
6:00	15,01121978	18:00	21,06352581
7:00	17,02628335	19:00	21,02077544
8:00	18,07450918	20:00	20,01119232
9:00	20,12628948	21:00	19,01119952
10:00	22,19231545	22:00	19,01119952
11:00	23,24437226	23:00	18,01120574

**ANEXO 11.** Temperatura vidrio borosilicato  $T_g$  equipo RT01 y RT02 mes de febrero.

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{GA_g\alpha_g - h_{g/amb}A_g(T_g - T_{amb}) - \varepsilon_g\sigma A_g(T_g^4 - T_{sky}^4) - h_{g/s}A_g(T_g - T_s)}{e_gA_gC_{pg}}$$

Tabla 11. Hoja de cálculo temperatura del vidrio borosilicato para el mes de febrero.

Hora UTC-3	Temperatura Vidrio RT01 [C°]	Hora UTC-3	Temperatura Vidrio RT01 [C°]
0:00	18,01120574	12:00	25,27229782
1:00	18,01120574	13:00	26,28570989
2:00	17,0112111	14:00	26,27200785
3:00	17,0112111	15:00	25,23941292
4:00	16,01121574	16:00	25,1769316
5:00	16,01121574	17:00	24,1150125
6:00	16,01121574	18:00	22,05803543
7:00	17,02052849	19:00	22,01665526
8:00	19,0660077	20:00	21,01118401
9:00	21,12408884	21:00	20,01119232
10:00	22,18793079	22:00	20,01119232
11:00	24,23997513	23:00	19,01119952

**ANEXO 12.** Temperatura vidrio borosilicato  $T_g$  equipo RT01 y RT02 mes de julio

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{GA_g\alpha_g - h_{g/amb}A_g(T_g - T_{amb}) - \varepsilon_g\sigma A_g(T_g^4 - T_{sky}^4) - h_{g/s}A_g(T_g - T_s)}{e_gA_gC_{pg}}$$

Tabla 12. Hoja de cálculo temperatura del vidrio borosilicato para el mes de julio.

Hora UTC-3	Temperatura Vidrio RT01 [C°]	Hora UTC-3	Temperatura Vidrio RT01 [C°]
0:00	14,01122335	12:00	18,12986543
1:00	13,01122656	13:00	19,18466739
2:00	12,01122955	14:00	19,18576355
3:00	12,01122955	15:00	19,1572633
4:00	12,01122955	16:00	18,11835572
5:00	11,01123243	17:00	18,06738412
6:00	11,01123243	18:00	17,02025445
7:00	12,01122955	19:00	16,01121574
8:00	13,01999587	20:00	16,01121574
9:00	14,04136784	21:00	15,01121978
10:00	16,06246138	22:00	15,01121978
11:00	18,09862477	23:00	14,01122335

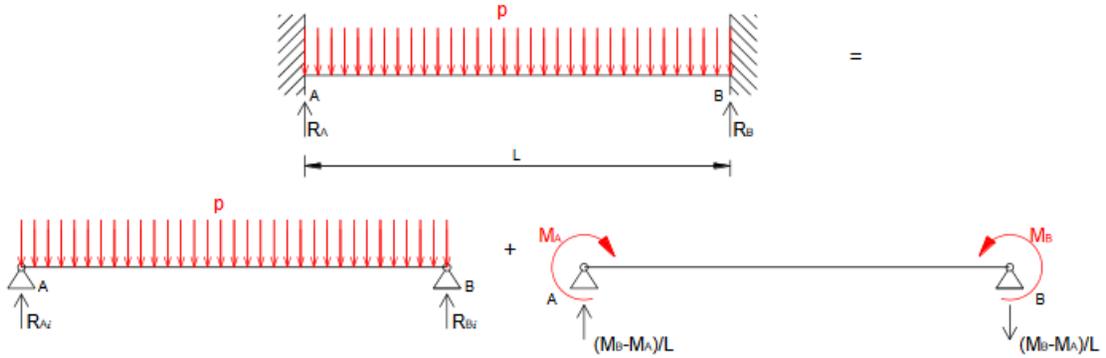
### ANEXO 13.. Tabla de vapor saturado agua a 20°C

Tabla 13. Tabla de valores de vapor saturado en función de su volumen, presión y variables termodinámicas varias.

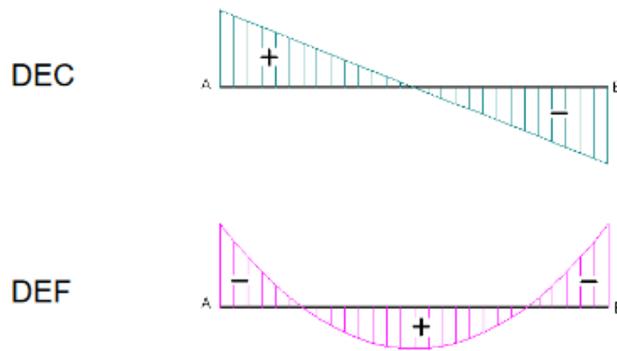
Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., $T$ °C	Pres. sat., $P_{sat}$ kPa	Volumen específico, $m^3/kg$		Energía interna, $kJ/kg$			Entalpía, $kJ/kg$			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Líqu. sat., $v_f$	Vapor sat., $v_g$	Líqu. sat., $u_f$	Evap., $u_{fg}$	Vapor sat., $u_g$	Líqu. sat., $h_f$	Evap., $h_{fg}$	Vapor sat., $h_g$	Líqu. sat., $s_f$	Evap., $s_{fg}$	Vapor sat., $s_g$
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952

### ANEXO 14. Cálculo en vigas biempotrada.



- Diagramas de momento flexor y fuerza cortante



- Reacciones en las en los apoyos empotrados

$$R_A = \frac{pL}{2}$$

$$R_B = \frac{pL}{2}$$

- Momento flector máximo en las vigas

$$M_{AB} = -\frac{p}{12}(L^2 - 6Lx - 6x^2)$$

- Deformación máxima permisible

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{pL^4}{348EI}$$

#### ANEXO 14. Cotización componentes varios y materiales semi transparentes.

- Perno hexagonal inoxidable M12x40 mm

DIN933 [M3-M12], tornillos de cabeza hexagonal de acero inoxidable 304, perno hexagonal exterior A025

★★★★★ 4.6 ∨ 45 Valoraciones 53 vendidos

**CLP 1,859**

CLP 2,424 Cupón de nuevo usuario [Conseguir cupones](#)

Diámetro de la rosca: M12 (1Pcs)

M3 (10Pcs) M4 (10Pcs) M5 (10Pcs) M6 (5Pcs) M8 (2Pcs)

M10 (1Pcs) **M12 (1Pcs)**

Longitud: 40mm

6mm 8mm 10mm 12mm 16mm 20mm 25mm

30mm 35mm **40mm** 45mm 50mm 55mm 60mm

65mm 70mm 75mm 80mm 85mm 90mm

Cantidad:

1 2992 Bolsos disponibles

- Perno hexagonal inoxidable M10x40 mm



**M3-M12**  
**FAST SHIPPING**

304 Stainless Steel

**Hexagon Head Screws**

DIN933 [M3-M12], tornillos de cabeza hexagonal de acero inoxidable 304, perno hexagonal exterior A025

★★★★★ 4.6 45 Valoraciones 53 vendidos

**CLP 1,374**

CLP 2,424 Cupón de nuevo usuario [Conseguir cupones](#)

Diámetro de la rosca: M10 (1Pcs)

M3 (10Pcs) M4 (10Pcs) M5 (10Pcs) M6 (5Pcs) M8 (2Pcs)

M10 (1Pcs) M12 (1Pcs)

Longitud: 40mm

6mm 8mm 10mm 12mm 16mm 20mm 25mm

30mm 35mm 40mm 45mm 50mm 55mm 60mm

65mm 70mm 75mm 80mm 85mm 90mm

Cantidad:  2997 Bolsos disponibles

- Placa de vidrio borosilicato

### Detalles del pedido

Tienda BALITENSEN Printer Store



310mm x 320mm x 3mm de vidrio de borosilicato Placa de construcción para Creality CR10S Pro 3 D impresora de cama (310x320x3mm)

**Ships From:** China

**CLP 36,480**

[Envío gratis](#) vía Seller's Shipping Method

Entrega el 01/11 o reembolso completo >

[+ Enviar mensaje](#)

− 1 +

Subtotal	CLP 36,480
Envío	CLP 0
Cupones de Vendedor	▼
<b>Total</b>	<b>CLP 36,480</b>

- Panel de vidrio borosilicato

### Detalles del pedido

Tienda BALITENSEN Printer Store



1500mm x 500mm x 3mm panel de vidrio borosilicato para usos varios

**Ships From:** China

**CLP 182,140**

Envío gratis vía Seller's Shipping Method  
Entrega el 01/11 o reembolso completo >

[+ Enviar mensaje](#)

− 1 +

Subtotal	CLP 182,140
Envío	CLP 0
Cupones de Vendedor	▼
<b>Total</b>	<b>CLP 182,140</b>

- Naylon de polietileno



📍 Cerrillos
🛒 1
👤 Mi Cuenta



firmamercader  
**Polietileno Transparente 2000 x 0.10 metro lineal**  
Código 737763  
★★★★★ (1)  
**\$1.400 ML**

Metro lineal

− 1 + Agregar al carro

**Satisfacción Garantizada** [ver más](#)

Si este producto no cumple con tus expectativas tienes 120 días desde su recepción para devolverlo en cualquiera de nuestras tiendas o llamando al 6006004020 - opción 2

**Opciones de entrega para Cerrillos**

**Disponibles**  
Despacho a domicilio [ver fechas](#)

- Rollo de embalaje polietileno de baja densidad

**SODIMAC** ¿Qué estás buscando? Cerrillos 1 Mi Cuenta

Topex  
**Plástico stretch para embalaje rollo**  
 Código 948969  
 ★★★★★ (5)  
**\$4.990 C/U**  
 - 1 + **Agregar al carro**

**Satisfacción Garantizada** [ver más](#)  
 Si este producto no cumple con tus expectativas tienes 120 días desde su recepción para devolverlo en cualquiera de nuestras tiendas o llamando al 6006004020 - opción 2

**Opciones de entrega para Cerrillos**  
 Disponible **Despacho a domicilio** [ver fechas](#)  
 Disponible **Retiro en tienda** [ver tiendas](#)

- Papel autoadhesivo PCV transparente

**SODIMAC** ¿Qué estás buscando? Cerrillos 1 Mi Cuenta

**Papel autoadhesivo Malla 2 m transparente**  
 Código 175842X  
 ★★★★★ (3)  
**\$2.990 C/U**  
 ⚠️ **Producto solo disponible en tienda.**  
[Ver tiendas con stock](#)

**Satisfacción Garantizada** [ver más](#)  
 Si este producto no cumple con tus expectativas tienes 120 días desde su recepción para devolverlo en cualquiera de nuestras tiendas o llamando al 6006004020 - opción 2

**Opciones de entrega para Cerrillos**  
 No disponible **Despacho a domicilio** [otras opciones](#)  
 No disponible **Retiro en tienda** [otras opciones](#)

- Policarbonato alveolar

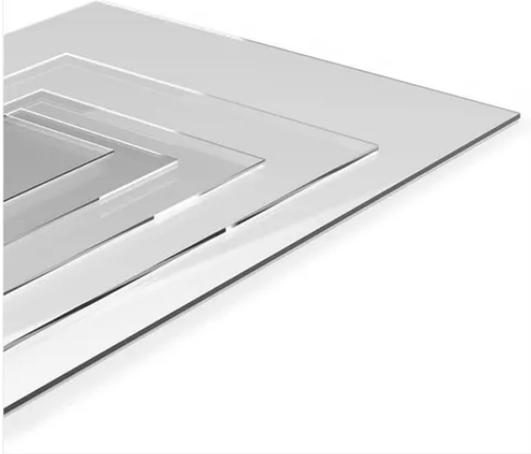
**SODIMAC** ¿Qué estás buscando? Cerrillos 1 Mi Cuenta

DVP  
**4mmx1.05mx2.90m Alveolar / Transparente**  
 Código 584436  
 ★★★★★ (17)  
**\$12.690 PLANCHA**  
 CMR **Obtén tu CMR 100% online**  
 En tu primera compra te regalaremos \$10.000 [Solicítala aquí >](#)

**Satisfacción Garantizada** [ver más](#)  
 Si este producto no cumple con tus expectativas tienes 120 días desde su recepción para devolverlo en cualquiera de nuestras tiendas o llamando al 6006004020 - opción 2

**Opciones de entrega para Cerrillos**  
 Disponible **Despacho a domicilio** [ver fechas](#)

- Placa de acrílico



**Plancha De Acrílico En 4mm De 70x50cm**

**\$ 29.900**

Stock disponible

6 cuotas de \$ 4.983 sin interés

VISA Mastercard

[Ver los medios de pago](#)

Entrega a acordar con el vendedor  
Santiago, RM (Metropolitana)

[Ver costos de envío](#)

Cantidad: 1 Unidad (8 disponibles)

[Comprar ahora](#)

- Para plancha de acrílico de 1750x650x4 mm se tiene un estimado de 65.450 CLP según suministro.

- Filamento para impresión 3D ASA.



**FILAMENTO 3D LEK ASA BLANCO 1,75 MM**

**\$29.900**

precio iva incluido

DESCRIPCIÓN

El filamento ASA (Acrilonitrilo Estireno Acrilato) se trata de un termoplástico que combina la robustez mecánica, la resistencia a los rayos UV, la resistencia al agua y con un gran acabado.

ESPECIFICACIONES

Diámetro: 1,75 mm

Temperatura de impresión: 200°C – 240°C

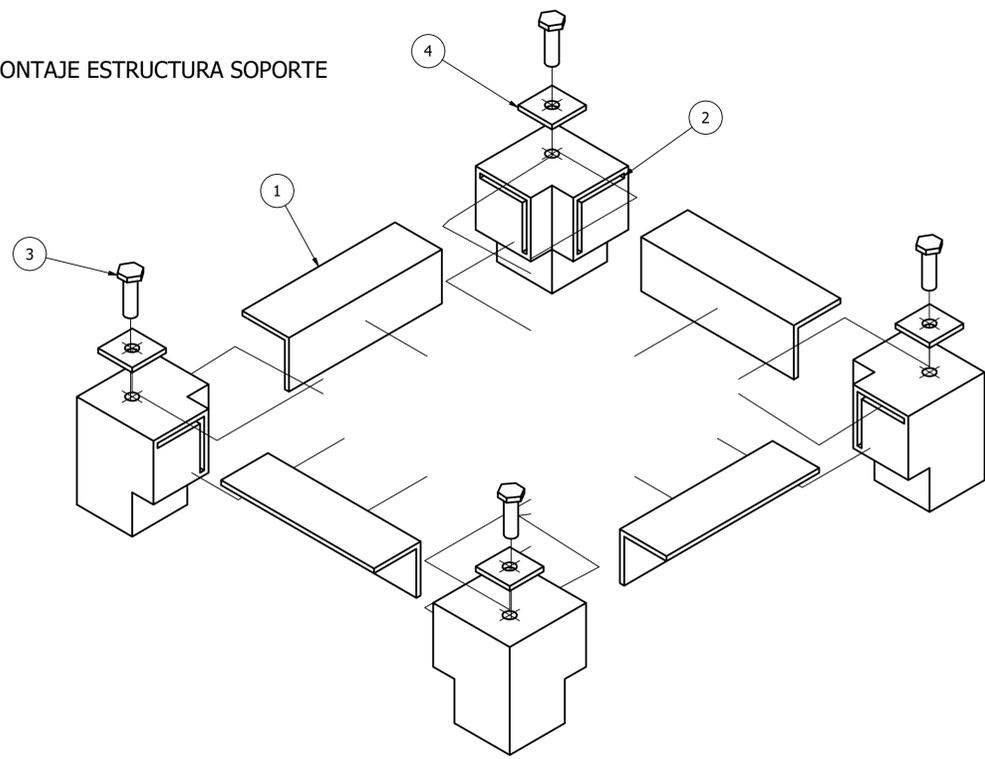
Temperatura de la cama: 100°C – 1200°C / o sin calor

Cantidad: 1 kilo

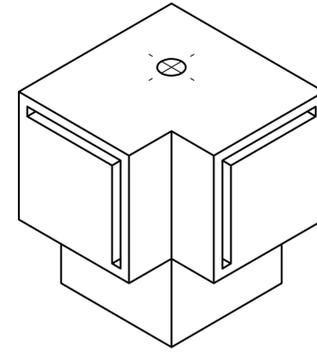
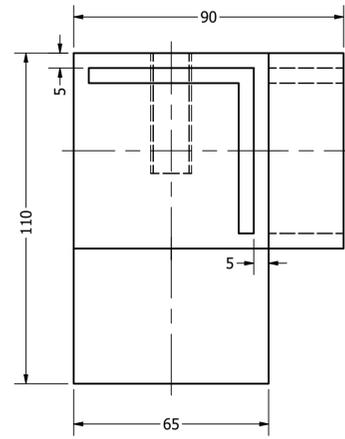
Ventajas: Es más resistente al agua, más rígido y mucho más fácil de imprimir que el ABS.

**Anexo 15. Planos de Diseño.**

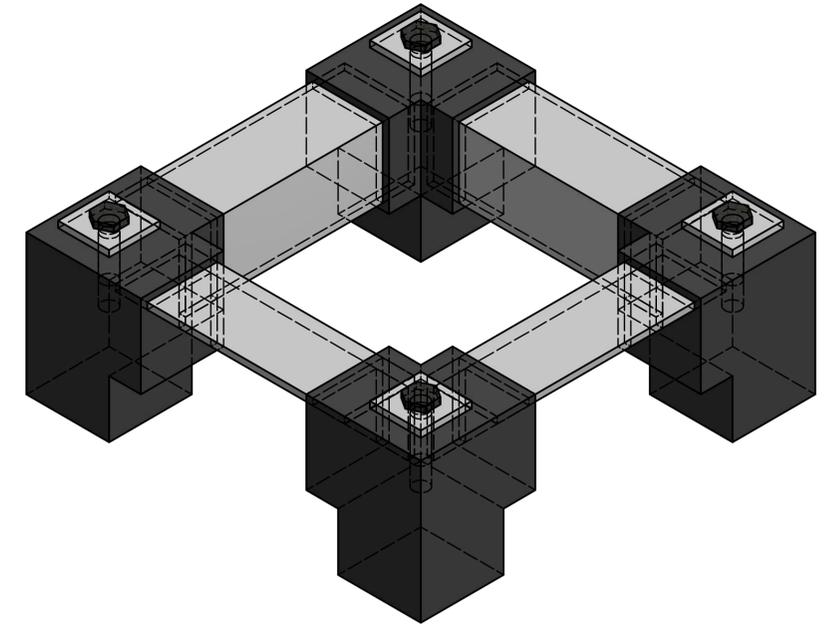
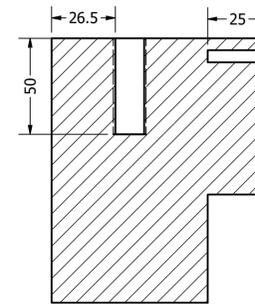
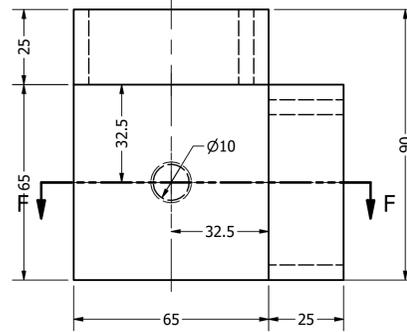
MONTAJE ESTRUCTURA SOPORTE



DETALLE (2)  
UNION LATERAL COLUMNA

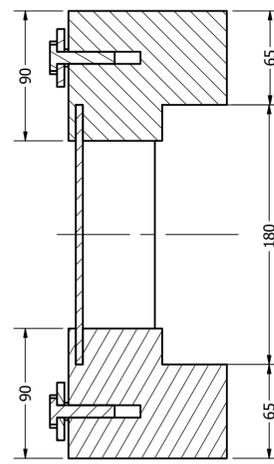
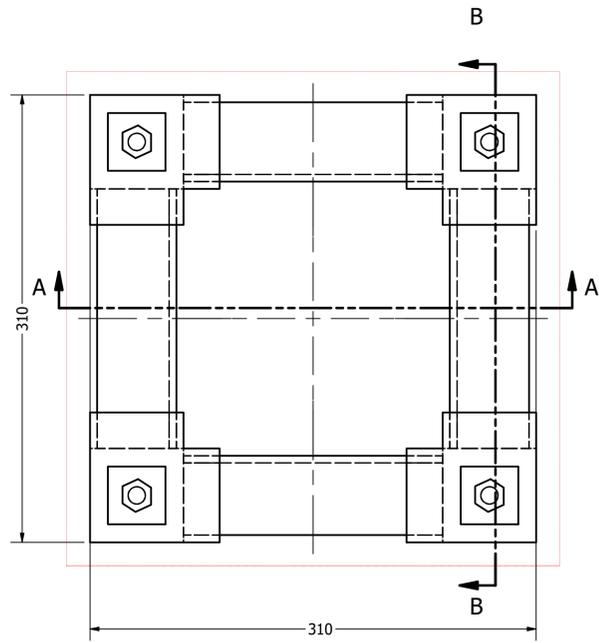


SECCIÓN EN CORTE F  
ESCALA 1:3



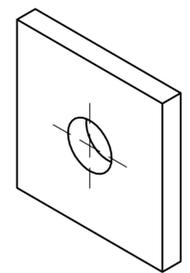
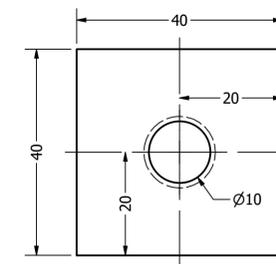
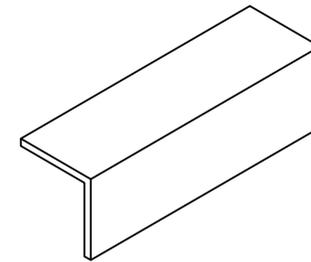
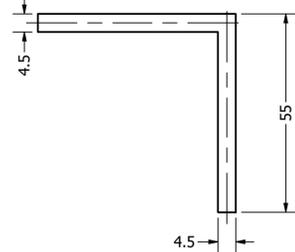
		PART NUMBER			
ITEM	QTY	TAG	MATERIAL	DESCRIPTION	DIMENSION
1	4	VIGA DE APOYO CENTRAL	ASA	VIGA TIPO L	180x55x55
2	4	COLUMNA DE APOYO LATERAL	ASA	COLUMNA DE APOYO CON 2 RANURAS DE ACOPLÉ TIPO L Y RANURA CENTRAL ROSCADA TIPO M10	110x90x90
3	4	PERNO DE SUJECIÓN	ACERO INOX	PERNO INOXIDABLE MÉTRICO	M10x50
4	4	PLACA TIPO PRENSA	ASA	PLACA DE ANCLAJE CUADRADA CON RANURA CENTRAL ROSCADA TIPO M10	40x40x5

- NOTAS:  
 1. Todas las dimensiones se encuentran en milímetros.  
 2. Tolerancias no se especifican según norma ISO 2768-m

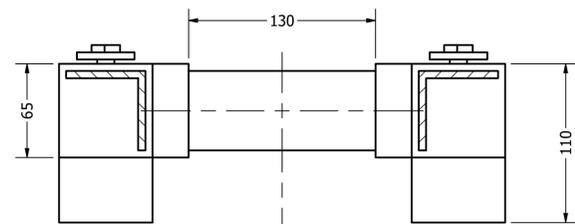
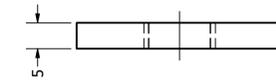


SECCIÓN EN CORTE B  
ESCALA 1:3

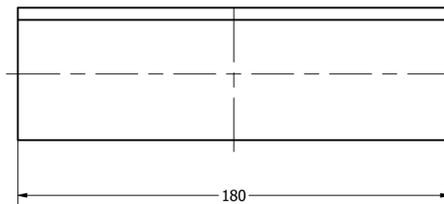
DETALLE (1)  
VIGA LATERAL DE APOYO



DETALLE (4)  
PLACA TIPO PRENSA

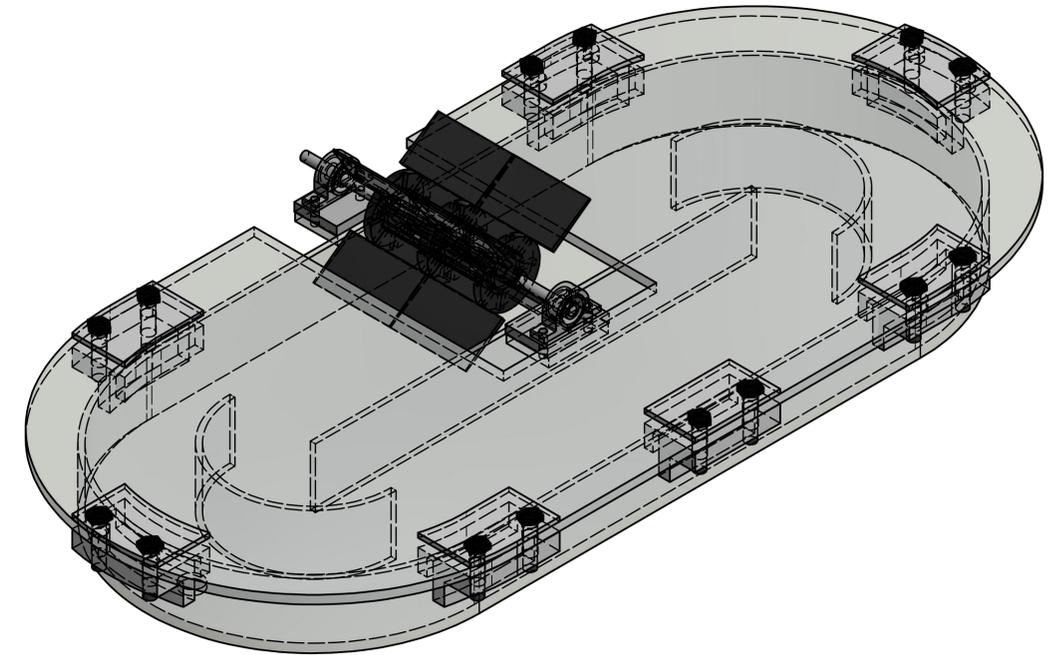
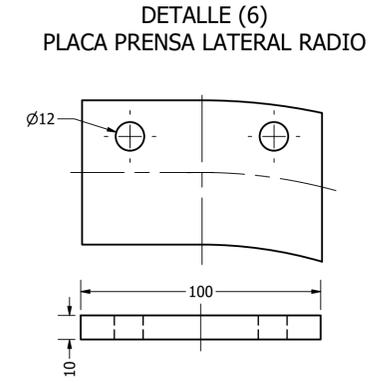
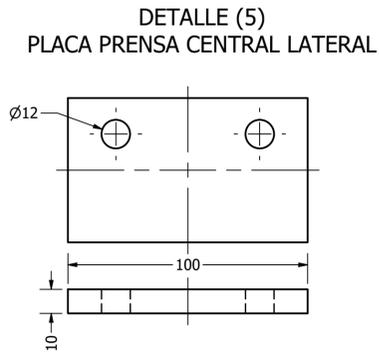
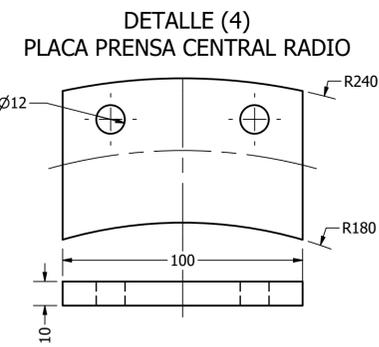
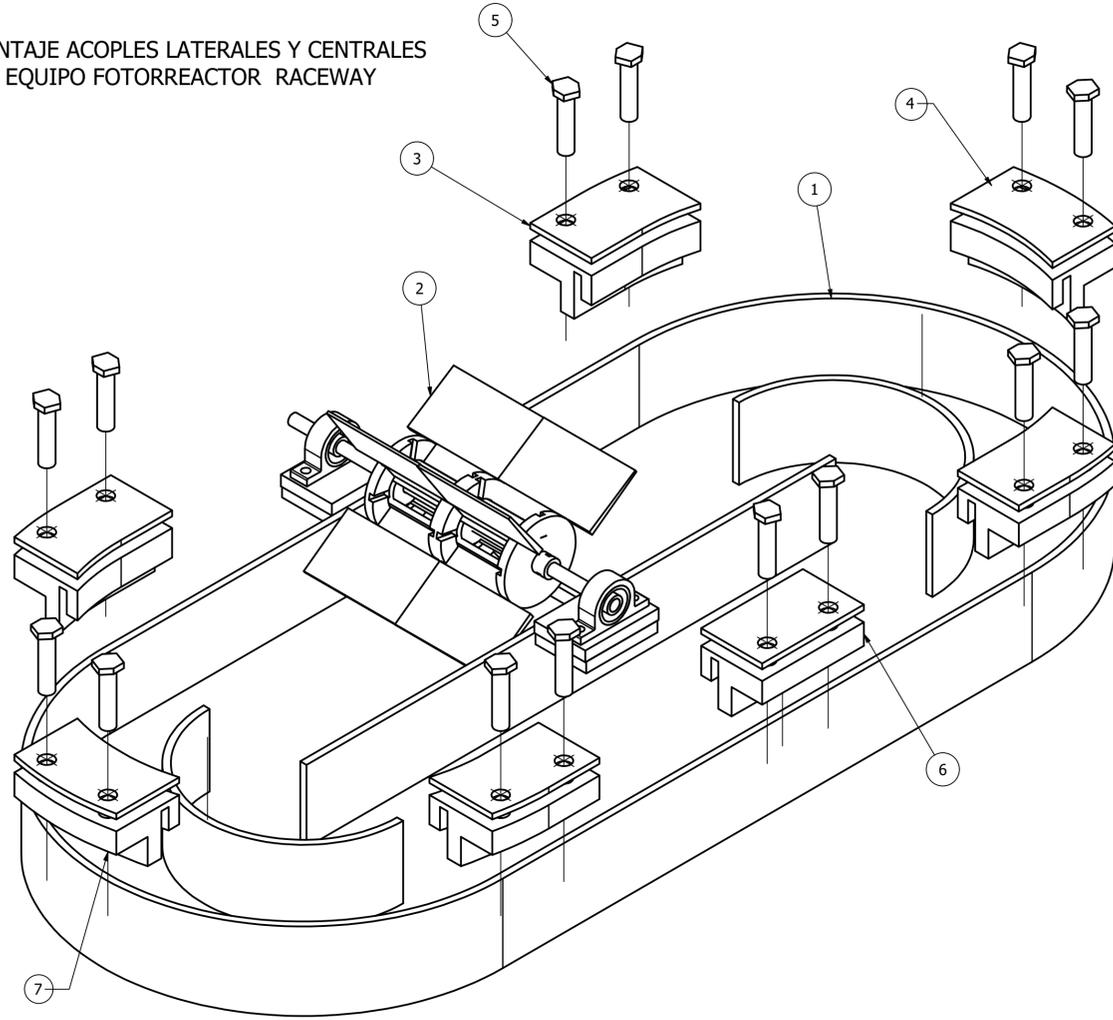


SECCIÓN EN CORTE A  
ESCALA 1:3



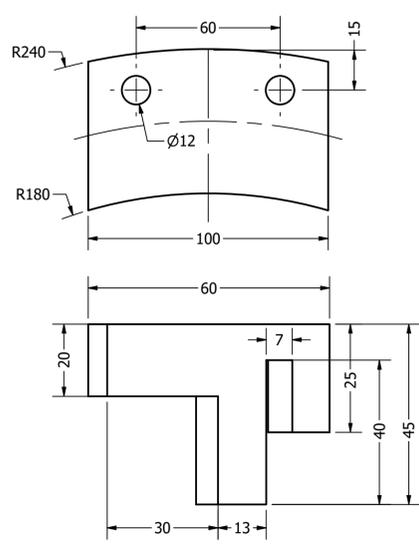
 Departamento de Ingeniería Mecánica	DESING R. BRAVO CHECK L. CORNEJO APPROVE M.FUENTES	26/08/20	LABORATORIO DE INVESTIGACIONES MEDIOAMBIENTALES DE ZONAS ÁRIDAS	
	ESTRUCTURA SOPORTE DE TESTEO			SIZE A5
SCALE 1:3			SHEET 1 OF 1	REV 01

MONTAJE ACOPLES LATERALES Y CENTRALES  
EQUIPO FOTORREACTOR RACEWAY

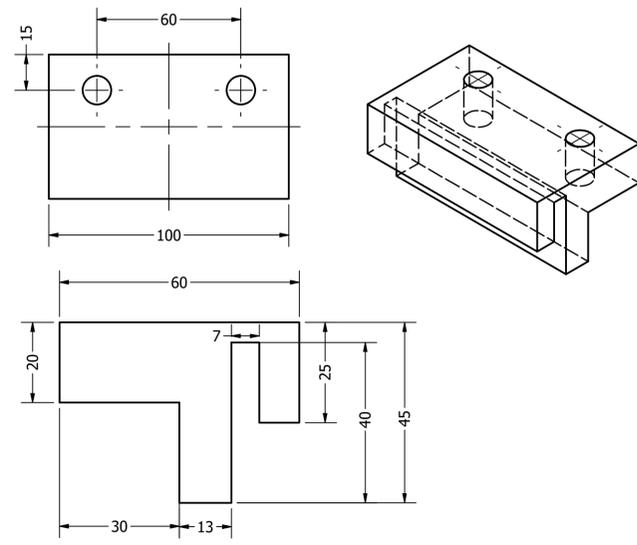


PARTS LIST					
ITEM	QTY	PART NAME	MATERIAL	DESCRIPTION	DIMENSION
1	1	Raceway Pond Reactor	FIBRA DE VIDRIO	Fotorreactor tipo raceway para tratar aguas residuales	900x380x6
2	1	Paletas Hidráulicas	PLA	Paletas hidráulica generadora de mezclas en equipo fotorreactor	160x100
3	4	Acople Lateral Radio	ASA	Acople posicionado en la semi circunferencia del equipo fotorreactor	100x60x45
3	4	Placa Prensa Lateral Radio	ASA	Placa tipo prensa para anclar recubrimiento al equipo fotorreactor	100x60x10
4	2	Acople Central Radio	ASA	Acople posicionado en el eje central del radio del equipo fotorreactor	100x60x45
4	2	Placa Prensa Central Radio	ASA	Placa tipo prensa para anclar recubrimiento al equipo fotorreactor	100x60x10
5	14	Perno de Sujeción	ACERO INOX	Perno de acero inoxidable métrico	M12x40
6	1	Acople Central Lateral	ASA	Acople posicionado en el eje vertical central para efectos de deflexión	100x60x45
6	1	Placa Prensa Central Lateral	ASA	Placa tipo prensa para anclar recubrimiento al equipo fotorreactor	100x60x10
7	14	Tuerca Hexagonal	ACERO INOX	Tuerca exagonal para perno inoxidable métrico	M12

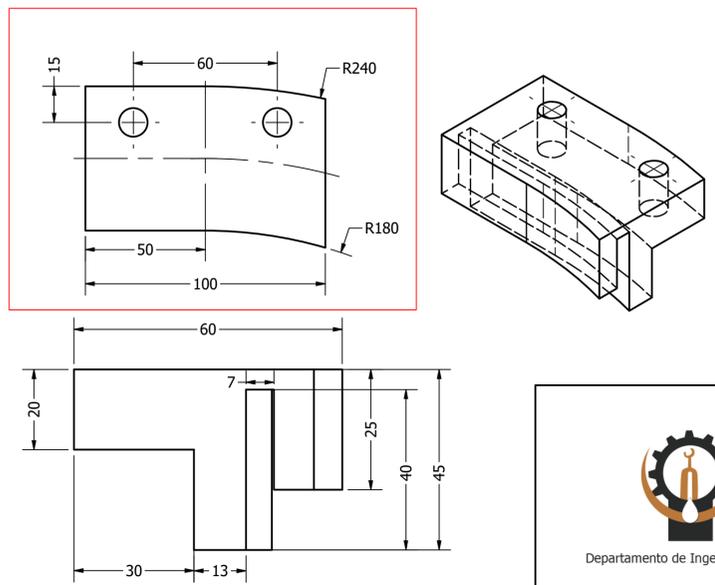
DETALLE (1)  
ACOPLE CENTRAL RADIAL



DETALLE (2)  
ACOPLE CENTRAL LATERAL



DETALLE (3)  
ACOPLE LATERAL RADIO



- NOTAS:
1. Todas las dimensiones se encuentran en milímetros
  2. Tolerancias no especificadas según ISO 2768-m
  3. Acople lateral radio considera una pieza simetrica para el costado opuesto del equipo con las mismas dimensiones

Departamento de Ingeniería Mecánica

DESING R. BRAVO	26/08/20	LABORATORIO DE INVESTIGACIONES MEDIOAMBIENTALES DE ZONAS ÁRIDAS
CHECK L. CORNEJO		
APPROVE M. FUENTES		ACOPLE TIPO L PARA CUBIERTA DE EQUIPO FOTORREACTOR RACEWAY
SIZE A5	DWG NO 02-ME-GGA	REV 01
SCALE 1:3	SHEET 1 OF 1	