



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN Y  
ACONDICIONAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA, A SER  
CALENTADA POR UN COLECTOR SOLAR PLANO CON  
EFECTO TERMOSIFÓN, PARA USO DOMÉSTICO SANITARIO.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**RUALES FONSECA CARLOS FELIPE**  
carlos.ruales@epn.edu.ec

**TORO ESCOBAR JOSÉ LUIS**  
jose.toro01@epn.edu.ec

**DIRECTOR: FÍS. YÁNEZ SALCEDO MARCO VINICIO**  
marco.yanez@epn.edu.ec

Quito, marzo 2019

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Ruales Fonseca Carlos Felipe y Toro Escobar José Luis, bajo mi supervisión.

---

**Fís. Marco Yáñez**

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, Ruales Fonseca Carlos Felipe y Toro Escobar José Luis, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Ruales Fonseca Carlos Felipe

---

Toro Escobar José Luis

## DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está enteramente dedicado a mis padres, Jackeline Escobar y Luis Toro. Mi madre ha trabajado cada día de su vida, desde que tengo uso de razón, para que mi hermano y yo logramos alcanzar la grandilocuencia. El desarrollo de este proyecto representa la culminación de un ciclo de preparación profesional y, por ende, el cumplimiento de su propio compromiso de llevarnos al inicio del viaje hacia una vida de éxito. A mi padre le debo lo más preciado que tengo. Le debo una capacidad intelectual vasta y una comprensión del comportamiento y la filosofía de la naturaleza tal que he logrado un desempeño admirable sin sacrificio. Gracias a ambos he cumplido esta primera gran meta cuyos honores me los despojo y se los atribuyo enteramente a ustedes,

José Luis Toro

Dedico este trabajo especialmente a mi abuelita Carlota y a mi mamá Mireya por la alegría que sienten al verme concluir esta etapa de mi vida, a mi papá Manuel por la felicidad que rebosa en su corazón desde mucho antes de graduarme, a mi abuelito Bolívar por siempre ser ese amigo dispuesto a compartir toda dicha con una carcajada, y a mi hermano Agustín por la grata sorpresa que el tiempo nos brinda para vivir buenos momentos.

Carlos Ruales

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco mi novia, Mariela Toasa, quien ha sido mi más grande apoyo emocional y por quien he logrado superar los más duros desafíos que me han sido impuestos.

Agradezco a mis abuelos, Luis Escobar y Teresa Vargas, quienes han impulsado mis anhelos con tan solo el deseo de infundir en ellos orgullo.

Agradezco a mi hermano, Luis Alejandro Toro, quien ha sido un modelo y referente del potencial albergado y de cómo aprovecharlo en su máxima expresión.

José Luis Toro

A mis padres Manuel y Mireya, a mi hermano Agustín, y a mis abuelitos Bolívar y Carlota, por todo lo que he aprendido de ellos en el transcurso de mi vida junto a Dios: “Ustedes han sido la mejor de las guías porque a su lado siempre me he sentido un triunfador”.

Carlos Ruales

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
Pregunta de investigación.....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
Alcance.....	2
Acrónimos.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Precipitación fluvial.....	4
1.2. Calidad del agua lluvia.....	5
1.3. Radiación solar directa y difusa.....	5
1.4. Temperatura ambiental.....	7
1.5. Volumen consumido diario y temperatura de uso del agua caliente sanitaria.....	8
1.6. Presión y caudal de consumo.....	9
1.7. Viviendas proporcionadas por el MIDUVI.....	11
1.8. Sistema unificado de provisionamiento de agua caliente sanitaria (SUPACS).....	14
1.8.1. Subsistema de captación de agua lluvia.....	14
1.8.2. Subsistema de almacenamiento de agua lluvia.....	17

1.8.3. Subsistema de acondicionamiento térmico .....	20
1.8.4. Subsistema de distribución .....	28
1.8.5. Saneamiento del agua lluvia.....	30
2. METODOLOGÍA .....	35
2.1. Definición del producto .....	35
2.1.1. Modos de operación.....	35
2.1.2. Entorno de operación.....	35
2.1.3. Servicios de entorno .....	35
2.1.4. Aspectos de fabricación .....	36
2.1.5. Aspectos comerciales .....	36
2.1.6. Aspectos legales .....	36
2.2. Diseño conceptual .....	36
2.2.1. Especificaciones del producto .....	36
2.2.2. Diagrama de flujo del proceso .....	37
2.2.3. Opciones de solución.....	37
2.2.4. Selección de una solución .....	39
2.2.5. Despliegue de la función de la calidad .....	39
2.3. Diseño de materialización.....	40
2.3.1. D.M. del subsistema de captación.....	40
2.3.2. D.M. del subsistema de almacenamiento .....	45
2.3.3. D.M. del subsistema de acondicionamiento térmico.....	54
2.3.4. D.M. del subsistema de distribución .....	57
2.3.5. D.M. del subsistema de saneamiento del agua lluvia .....	65
2.4. Diseño de detalle .....	69
2.4.1. D.D. del subsistema de captación .....	69
2.4.2. D.D. del subsistema de almacenamiento .....	69
2.4.3. D.D. del subsistema de distribución .....	74
2.4.4. D.D. del subsistema de saneamiento del agua lluvia .....	81
2.5. Construcción.....	83

2.5.1.El escalamiento.....	83
2.5.2.Preparación de la estructura.....	84
2.5.3.Construcción subsistema de captación.....	85
2.5.4.Construcción subsistemas de almacenamiento y saneamiento.....	86
2.5.5.Construcción de los subsistemas de distribución y acondicionamiento térmico.....	88
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	89
3.1. Resultados.....	89
3.1.1.Subsistema de captación.....	89
3.1.2.Subsistema de almacenamiento.....	89
3.1.3.Subsistema de acondicionamiento térmico.....	90
3.1.4.Subsistema de distribución.....	90
3.1.5.Subsistema de saneamiento.....	91
3.1.6.Costos.....	92
3.1.7.Discusión.....	93
4. CONCLUSIONES.....	96
5. RECOMENDACIONES.....	97
6. TRABAJOS DERIVADOS RECOMENDADOS.....	98
7. REFERENCIAS.....	99
8. ANEXOS.....	104



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Radiación Solar Directa en el Ecuador. ....	6
Figura 1.2. Radiación Solar Difusa en el Ecuador. ....	6
Figura 1.3. Radiación Solar Directa en la ciudad de Quito. ....	6
Figura 1.4. Radiación Solar Difusa en la ciudad de Quito. ....	6
Figura 1.5. Modelo de vivienda tipo “Costeño” .....	12
Figura 1.6. Plano arquitectónico del modelo tipo “Costeño” .....	12
Figura 1.7. Modelo de vivienda tipo “Sierra- Oriente 1” .....	12
Figura 1.8. Plano arquitectónico del modelo tipo “Sierra- Oriente 1” .....	12
Figura 1.9. Modelo de vivienda tipo “Sierra- Oriente 2” .....	13
Figura 1.10. Plano arquitectónico del modelo tipo “Sierra- Oriente 2” .....	13
Figura 1.11 Modelo de vivienda tipo “Sierra- Oriente 3” .....	13
Figura 1.12. Plano arquitectónico del modelo tipo “Sierra- Oriente 3” .....	13
Figura 1.13. Área de captación. ....	14
Figura 1.14. Posicionamiento de tanque bajo límite de piso. ....	18
Figura 1.15. Tanque de concreto bajo límite de piso. ....	18
Figura 1.16. Tanque de concreto integrado en la zona de garaje subterránea. ....	18
Figura 1.17. Posicionamiento de tanque a ras de piso. ....	18
Figura 1.18. Tanque de plástico a ras de piso. ....	19
Figura 1.19. Tanque a un nivel superior al ras de piso. ....	19
Figura 1.21. Tanque de agua para viviendas unifamiliares a un nivel superior al ras de piso. ....	19
Figura 1.22. Colector solar cónico. ....	20
Figura 1.23. Colector solar de caucho. ....	21
Figura 1.24. Colector solar plano. ....	21
Figura 1.25. Elementos de un colector solar plano. ....	21
Figura 1.26. Ilustración de las cantidades de radiación descritas por sus respectivos coeficientes. ....	22
Figura 1.27. Efecto termosifón en un colector solar plano de doble circuito. ....	24
Figura 1.28. Tubería del PP para agua caliente. ....	28
Figura 1.29. Tubería de acero galvanizado. ....	28
Figura 1.30. Aislamiento de espuma elastomérica. ....	29
Figura 1.31. Aislamiento de lana mineral. ....	29
Figura 1.32. Aislamiento de polietileno. ....	29
Figura 1.33. Dispositivo para evacuación del primer flujo. ....	31
Figura 1.34. Apertura y malla para filtración de sólidos. ....	31

Figura 1.35. Canaleta cubierta con malla para filtración de sólidos.....	31
Figura 1.36. Filtro de tres vías. ....	31
Figura 1.37. Tanque de primeras lluvias.....	32
Figura 1.38. Esquema de tanque con cámara de sedimentación.....	33
Figura 1.39. Distribución del tamaño de partículas en el agua.....	33
Figura 2.1. Alternativa 1, posicionamiento lateral izquierda del tanque.....	38
Figura 2.2. Alternativa 2, posicionamiento posterior del tanque. ....	39
Figura 2.3. Plano de la vivienda con dimensiones. (Modificación de la Figura 1.10)...	40
Figura 2.4. Canaleta tipo J. ....	42
Figura 2.5. Dimensiones de las canaletas, Vista superior. ....	44
Figura 2.6. Dimensiones de las canaletas, Vista sección transversal. ....	44
Figura 2.7. Vista frontal de la vivienda.....	45
Figura 2.8. Volumen almacenado vs Tiempo en época de sequía 600l.....	49
Figura 2.9. Volumen almacenado vs Tiempo condiciones promedio 600l. ....	49
Figura 2.10. Volumen almacenado vs Tiempo en época de sequía 240l.....	50
Figura 2.11. Volumen almacenado vs Tiempo condiciones promedio 240l. ....	50
Figura 2.12. Volumen almacenado vs Tiempo en época de sequía 360l.....	51
Figura 2.13. Volumen almacenado vs Tiempo condiciones promedio 360l. ....	51
Figura 2.14. Vista radial del tanque y corte A-A. ....	53
Figura 2.15. Definición del parámetro $dz$ , y de los puntos de entrada y salida de la línea. .....	58
Figura 2.16. Trazo de la línea de distribución.....	60
Figura 2.17. Curvas de caudal para filtros de materiales alternativos. ....	66
Figura 2.18. Subsistema de Saneamiento.....	66
Figura 2.19. Condiciones para el diseño del subsistema de saneamiento de agua lluvia. .....	67
Figura 2.20. Purga de aire.....	68
Figura 2.21. Esfera de sellado. ....	68
Figura 2.22. Transferencia de calor vs. Espesor del tanque.....	72
Figura 2.23. Interpretación del análisis térmico del subsistema de distribución. ....	75
Figura 2.24. Esquema del tanque de primeras lluvias para el SUPACS. ....	82
Figura 2.25. Asiento e interacción con la esfera.....	82
Figura 2.26. Base de la estructura.....	84
Figura 2.27. Recubrimiento anticorrosivo. ....	84
Figura 2.28. Plinto de concreto. ....	85
Figura 2.29. Construcción de la superficie de captación prototipo (A).....	85

Figura 2.30. Construcción de la superficie de captación prototipo (B).....	85
Figura 2.31. Canaletas del prototipo. ....	86
Figura 2.32. Tapa de canaleta. ....	86
Figura 2.33. Sello del tanque de primeras lluvias.....	86
Figura 2.34. Bajante. ....	86
Figura 2.35. Tanque de almacenamiento, visor de nivel y salida a la distribución. ....	87
Figura 2.36. Purga de aire y entrada de agua captada. ....	87
Figura 2.37. Entrada y salida al colector solar plano y entrada de agua del suministro público.....	87
Figura 2.38. Tanque de primeras lluvias, entrada de agua contaminada, toma de agua no sanitaria y tapón de mantenimiento. ....	87
Figura 2.39. Construcción del subsistema de distribución. ....	88
Figura 2.40. Bajante y subsistemas de almacenamiento, saneamiento y acondicionamiento térmico vista posterior.....	88
Figura 3.1. Muestras de agua del tanque (izquierda) y del tanque de primeras lluvias (derecha).....	91

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Precipitación fluvial en la Ciudad de Quito desde 2009 hasta 2013.....	4
Tabla 1.2. Precipitación fluvial en la Ciudad de Quito 2015.....	5
Tabla 1.3. Temperaturas de la Ciudad de Quito a lo largo del año. ....	7
Tabla 1.4. Temperatura media del aire año 2015 de la ciudad de Quito. ....	8
Tabla 1.5. Volumen de consumo diario de Agua Caliente Sanitario según el tipo de edificación.....	8
Tabla 1.6. Condiciones de uso del ACS. ....	9
Tabla 1.7. Caudal y presión según la NEC.....	9
Tabla 1.8. Caudales para aparatos según el MITCO de España. ....	10
Tabla 1.9. Consumo y caudales de uso según Despins. ....	11
Tabla 1.10. Factores de pérdidas de volumen de agua por material de la superficie de captación según Despins. ....	15
Tabla 1.11. Coeficientes de escorrentía de volumen de agua por material de la superficie de captación. ....	15
Tabla 1.12. Dimensiones de las canaletas horizontales en función de las condiciones de la precipitación fluvial. ....	16
Tabla 1.13. Dimensiones de los bajantes en función de las canaletas. ....	16
Tabla 1.14. Valores típicos de eficiencia de colectores solares.....	28
Tabla 2.1. Especificaciones del SUPACS.....	36
Tabla 2.2. Iteración de valores de $m$ e $y$ según el área de captación por canaleta tipo J para la máxima precipitación fluvial registrada.....	43
Tabla 2.3. Meses con menos precipitación y media entre el 2009 y el 2013 de la ciudad de Quito. (Fragmento de la Tabla 1.1).....	46
Tabla 2.4. Media de precipitación mensual y media general entre 2009 y 2013 en la ciudad de Quito (Fragmento y desarrollo de la Tabla 1.1).....	47
Tabla 2.5. Media de días con precipitación por mes y media general entre 2009 y 2013 en la ciudad de Quito. (Fragmento y desarrollo de la Tabla 1.1).....	47
Tabla 2.6. Temperaturas máxima promedio, mínima promedio y promedio de la ciudad de Quito. (Desarrollo de la Tabla 1.3).....	54
Tabla 2.7. Primeros resultados para el subsistema de distribución. ....	64
Tabla 2.8. Resultados definitivos para el subsistema de distribución.....	64
Tabla 2.9. Resultados para el subsistema de distribución. ....	81
Tabla 3.1. Resultados de captación de agua lluvia. ....	89
Tabla 3.2. Tiempos transcurridos para que un litro de agua fluya según diferentes niveles de agua en el tanque.....	90

Tabla 3.3. Costos de inversión del SUPACS.....	93
Tabla 3.4. VAN para los distintos tipos de calentamiento de agua en un periodo de 10 años. ....	93

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.1. Ecuación de Manning:.....	16
Ecuación 1.2. Radio hidráulico:.....	17
Ecuación 1.3. Energía solar colectada: .....	24
Ecuación 1.4. Energía absorbida por el agua:.....	24
Ecuación 1.5. Energía proporcionada por el sistema de colección: .....	25
Ecuación 1.6. Fracción solar transmitida: .....	25
Ecuación 1.7. Variable adimensional $X$ : .....	25
Ecuación 1.8. Variable adimensional $Y$ :.....	25
Ecuación 1.9. Primera corrección del valor $X$ :.....	26
Ecuación 1.10. Segunda corrección del valor $X$ :.....	26
Ecuación 1.11. Relación de volumen acumulado y área de colección: .....	26
Ecuación 1.12. Eficiencia energética de un colector solar: .....	27
Ecuación 1.13. Volumen del tanque de primeras lluvias:.....	32
Ecuación 2.1 Área de captación para bases rectangulares: .....	41
Ecuación 2.2. Caudal captable por canaleta: .....	41
Ecuación 2.3. Área transversal de canaletas tipo J:.....	42
Ecuación 2.4. Perímetro mojado:.....	42
Ecuación 2.5 Ecuación de diseño para el subsistema de captación: .....	43
Ecuación 2.6 Altura al desfogue de la canaleta:.....	44
Ecuación 2.7. Volumen de consumo diario .....	45
Ecuación 2.8. Volumen captable mínimo promedio: .....	46
Ecuación 2.9. Volumen de almacenamiento. ....	48
Ecuación 2.10. Volumen de un cuerpo de sección constante:.....	52
Ecuación 2.11. Longitud de un cuerpo de sección constante. ....	52
Ecuación 2.12. Área de un círculo. ....	52
Ecuación 2.13. Número adimensional de Reynolds:.....	59
Ecuación 2.14. Factor de fricción de Darcy-Weisbach para flujo laminar:.....	59
Ecuación 2.15. Factor de fricción de Darcy-Weisbach para flujo turbulento: .....	59
Ecuación 2.16. Ecuación de pérdidas de carga: .....	60
Ecuación 2.17. Ecuación de la energía para flujo en estado estable: .....	62
Ecuación 2.18. Caudal para un tubo de sección circular: .....	63
Ecuación 2.19. Espesor de un tanque cilíndrico si la presión no excede 0,385SE: .....	69
Ecuación 2.20. Espesor de un tanque cilíndrico si la presión no excede 1,25SE: .....	69
Ecuación 2.21. Presión hidrostática de un líquido:.....	70

Ecuación 2.22. Resistencia térmica por conducción en una pared plana: .....	70
Ecuación 2.23. Resistencia térmica por convección en una pared plana:.....	70
Ecuación 2.24. Resistencia térmica por conducción en un cilindro hueco: .....	71
Ecuación 2.25. Resistencia térmica por convección en un cilindro hueco: .....	71
Ecuación 2.26. Flujo de calor en función de la variación de temperatura y resistencia total: .....	71
Ecuación 2.27. Definición de potencia:.....	73
Ecuación 2.28. Escape de energía interna por convección interna: .....	76
Ecuación 2.29. Escape de energía interna por conducción: .....	76
Ecuación 2.30. Escape de energía interna por transferencia de calor al exterior: .....	76
Ecuación 2.31. Energía interna perdida:.....	76
Ecuación 2.32. Temperatura media del agua:.....	77
Ecuación 2.33. Resistencia térmica por conducción en un cilindro hueco: .....	77
Ecuación 2.34. Resistencia térmica en un cilindro por convección interna: .....	77
Ecuación 2.35. Resistencia térmica por transferencia de calor con el exterior: .....	77
Ecuación 2.36. Resistencia térmica en un cilindro por convección externa: .....	77
Ecuación 2.37. Resistencia térmica en un cilindro por radiación:.....	77
Ecuación 2.38. Número de Nusselt para régimen turbulento y flujo de calor hacia el exterior: .....	78
Ecuación 2.39. Coeficiente de convección interna:.....	78
Ecuación 2.40. Coeficiente de expansión:.....	79
Ecuación 2.41. Número de Grashof:.....	79
Ecuación 2.42. Número de Rayleigh: .....	79
Ecuación 2.43. Número de Nusselt para $104 < Ray < 109$ :.....	79
Ecuación 2.44. Coeficiente de convección externa:.....	79
Ecuación 2.45. Coeficiente de radiación con el exterior:.....	80
Ecuación 2.46. Flujo másico en un tubo de sección circular.....	80
Ecuación 3.1. Precipitación mensual límite para poder almacenar la cantidad de agua lluvia requerida: .....	92

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I TIPOS DE CANALETAS .....	105
ANEXO II COEFICIENTES DE MANNING .....	106
ANEXO III TUBERÍAS .....	107
ANEXO IV MATRICES DE PONDERACIÓN .....	109
ANEXO V FUNCIÓN DE LA CALIDAD .....	115
ANEXO VI PLANOS .....	117



## RESUMEN

El trabajo tuvo como objetivo diseñar un sistema de colección de agua lluvia que sea acondicionado térmicamente por un colector solar plano en viviendas proveídas por el MIDUVI, que se acople a las necesidades sanitarias, de confort, estéticas y económicas de quienes sean beneficiados con la implementación del sistema. Para ello, se emplearon los criterios de diseño concurrente basados en el proseguir de tres etapas que son el diseño conceptual, el diseño de materialización y el diseño de detalle, para finalmente comprobar la funcionalidad del diseño con la construcción de un prototipo. Como resultado se obtuvo un sistema capaz de captar, sanitizar, almacenar, acondicionar térmicamente el agua y distribuirla en la vivienda de manera eficaz, con una inversión recuperable en un tiempo menor al de la vida del producto.

**Palabras clave:** acondicionamiento térmico, agua, colección solar, diseño, lluvia

## **ABSTRACT**

The work had as its main objective to design a rain water collection system that also heats the water using a flat solar collector for sanitary uses in houses given by the MIDUVI. The design must fit the health, comfort, aesthetic and economic needs of those who benefit from the implementation of the system. For this, the criteria of concurrent design were used based on three stages that are the conceptual design, the materialization design and the detailed design to finally verify the functionality of the design with the construction of a prototype. As result of the design process, a system availed to catch, sanitize, store and distribute rain water to the house that was effective and with a recoverable inversion was obtained.

**Keywords:** design, health, rain, solar collection, thermal conditioning, water

# **DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA, A SER CALENTADA POR UN COLECTOR SOLAR PLANO CON EFECTO TERMOSIFÓN, PARA USO DOMÉSTICO SANITARIO.**

## **INTRODUCCIÓN**

La dependencia nacional, tanto en la explotación, como en el consumo de combustibles fósiles, y el uso inadecuado del agua potable para fines domésticos, son realidades que demuestran el bajo nivel de conciencia ambiental que las políticas ecuatorianas han promovido a lo largo de la historia. Aun siendo un territorio favorecido con sus ríos, montañas, mares y demás recursos hídricos, el cambio climático se está volviendo cada vez más evidente y más agresivo, no solo en el mundo, sino también en nuestro país [1]. Es entonces que se plantea solucionar tres realidades: El constante incremento poblacional, no solo en nuestro país Ecuador, sino en todo el mundo, genera una demanda creciente por agua para uso doméstico. Tomando en consideración la ventaja de la intensidad de las precipitaciones fluviales en la ciudad de Quito [2] se plantea la viabilidad de incorporar sistemas de captación de agua lluvia en las viviendas, actuales y futuras, para uso sanitario como una medida adecuada que reducirá tanto la dependencia como el consumo del agua potable de la red de suministro.

En la actualidad, la mayor cantidad de hogares ecuatorianos utilizan calefones que funcionan con gas licuado de petróleo. Esto se debe en gran medida al subsidio, que el gas licuado de petróleo percibe por parte del estado ecuatoriano, que ocasiona perjuicios económicos al Estado, contaminación ambiental y presenta un riesgo latente de incendios en los establecimientos de los usuarios.

Finalmente, una parte de la población hace uso de duchas eléctricas resistivas que involucra un alto consumo de energía eléctrica, también subsidiada, que conlleva a un incremento del costo del servicio, un perjuicio económico para el estado y la necesidad de crear nuevas fuentes de generación eléctrica para satisfacer la demanda [3]. Estos tres planteamientos incitan a cuestionar; ¿Hay mejores formas de obtener agua acondicionada térmicamente? ¿Cuáles son estas formas? ¿Cuál es su costo? ¿Es viable económica y ambientalmente decidirse por una forma alternativa de obtención de agua acondicionada térmicamente? Este trabajo de titulación prevé que la solución a estas problemáticas es la implementación de un sistema de captación de agua lluvia que será sanitizada, acondicionada térmicamente por un colector solar plano de efecto

termosifón y distribuida en el inmueble en el que se encuentre instalado con el fin de mitigar las tres problemáticas a la vez.

## **Pregunta de investigación**

¿Es viable económica, funcional, eficiente, sanitaria y tecnológicamente la implementación de un sistema de captación de agua lluvia sanitizada y acondicionada térmicamente por un colector solar plano para usos domésticos?

## **Objetivo general**

Diseñar un sistema de captación, almacenamiento, calentamiento y distribución de agua lluvia en una vivienda unifamiliar.

## **Objetivos específicos**

- Realizar el diseño conceptual del sistema unificado de provisionamiento de agua caliente sanitaria (SUPACS).
- Realizar el diseño de materialización del SUPACS.
- Realizar el diseño de detalle del SUPACS.
- Elaborar un prototipo para evidenciar los resultados.

## **Alcance**

El proyecto tuvo como alcance el diseñar un sistema de captación, almacenamiento, acondicionamiento térmico y distribución de agua lluvia para usos sanitarios en un domicilio, con base a un modelo de vivienda entregado por el MIDUVI, en la ciudad de Quito, utilizando como acondicionador térmico exclusivamente un colector solar plano de efecto termosifón. Y la construcción de un prototipo en el techo de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional usando los implementos que el laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética pueda proveer.

## **Acrónimos**

ACS: Agua caliente sanitaria.

AFCH: Agua fría de consumo humano.

CSP: Colector Solar Plano.

CTE: Código Técnico de la Edificación.

D.D.: Diseño de detalle.

D.M.: Diseño de materialización.

FPT: *Female Pipe Thread* (Roscas de tubería hembra)

GLP: Gas licuado de petróleo.

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización.

MIDUVI: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda del Ecuador.

MITCO: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

MIFE: Ministerio de Fomento de España.

NEC: Normativa Ecuatoriana de la Construcción.

NTE: Normativa Técnica Ecuatoriana.

OMS: Organización Mundial de la Salud.

PP: Polipropileno.

SUPACS: Sistema unificado de provisionamiento de agua caliente sanitaria.

TIMEESCI: Centro de investigaciones y desarrollo tecnológico del Ecuador.

HDPE: *High density polyethylene* (Polietileno de alta densidad)

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Precipitación fluvial

El Ecuador es un país dotado de recursos naturales abundantes, de los cuales el agua es uno de ellos. Tiene costas adyacentes al Océano Pacífico, provisto de una cordillera que los atraviesa por la mitad, de norte a sur, desde donde numerosos ríos recorren sus cauces tanto a oriente como a occidente y dotado de precipitaciones fluviales a lo largo de todo el año. Sin embargo, con las problemáticas de contaminación, sobreexplotación, y desperdicio de recursos hídricos del siglo XXI, el agua debe ser aprovechada de manera eficiente y es necesario que se diseñen sistemas que sepan fructificar las fuentes de este suministro [4, 5].

Somos testigos de cómo con cada lluvia, litros y litros de agua terminan en el sistema de alcantarillado, o en su defecto, inundando calles, escuelas, hospitales y casas por la falta de un medio de aprovechamiento de estas precipitaciones.

La Tabla 1.1 muestra el comportamiento de las precipitaciones fluviales en la ciudad de Quito durante 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013. Es apreciable que llueve durante todo el año y que los meses con mayor precipitación son los de enero y febrero y el mes con menor precipitación es el de julio.

Tabla 1.1. Precipitación fluvial en la Ciudad de Quito desde 2009 hasta 2013.

Fuente: [6, 7, 8, 9, 10]

Año	2009		2010		2011		2012		2013	
Mes	Precipitación (mm)	Número de días con precipitación	Precipitación (mm)	Número de días con precipitación	Precipitación (mm)	Número de días con precipitación	Precipitación (mm)	Número de días con precipitación	Precipitación (mm)	Número de días con precipitación
Enero	295,4	26	45,6	10	138,3	21	254,3	17	43,7	11
Febrero	186,6	21	103,7	18	193,3	22	227,3	29	230,5	24
Marzo	262,4	26	114,2	17	143,7	25	197,4	20	128,1	20
Abril	189,9	22	289,2	27	262,4	29	219,3	27	101,9	19
Mayo	102,8	19	149,2	15	92,8	17	64	17	139	31
Junio	48,2	15	100,4	20	61,4	14	10,6	7	9,8	4
Julio	7,1	9	196,2	19	69,4	17	19,8	4	8,3	4
Agosto	29	10	52,5	7	76,7	11	20	7	43,5	10
Septiembre	9,7	4	79,5	19	56,9	10	20,5	7	38,9	12
Octubre	86,4	16	89,7	16	197,6	18	157	22	191,5	23
Noviembre	88,8	13	249,4	22	30,4	13	159	21	45,9	11
Diciembre	209,9	23	304,8	27	164,9	24	30,5	10	79,6	10

Tabla 1.2. Precipitación fluvial en la Ciudad de Quito 2015.

Fuente: [11]

QUITO	Normal acumulada	Acumulada 2015	Variación	Días de precipitación en 2015	Precipitación máxima en 24 horas	
<i>mm</i>	1126,7	776,1	-31%	115	mes noviembre	38,4

La Tabla 1.2 muestra el comportamiento de las precipitaciones fluviales en el año 2015. Se aprecia que este año tuvo un acumulado de 776,1mm de precipitación que en comparación con el promedio de acumulación anual de 1126,7mm presenta un decrecimiento del 31%.

La lluvia más intensa en Quito en los últimos 42 años se presentó el día 15 de mayo del 2017 con una duración de 2 horas con 20 minutos acumulando 65 mm de precipitación fluvial [12].

## 1.2. Calidad del agua lluvia

El agua lluvia presenta una calidad adecuada que permite su uso doméstico pudiendo ser usada para fines idénticos a los del agua potable. Sin embargo, en su interacción con el techo y las canaletas, el agua lluvia irá inevitablemente acarreado ramas, hojas, polvo, y demás residuos que deben ser eliminados debido a las consecuencias indeseables que pueden ocasionar (turbidez en el agua, taponamiento de las líneas en el subsistema de distribución, acumulación de material en el tanque, entre otros). Se suma a estos factores también los agentes contaminantes del aire que interactuarán con la precipitación fluvial [13, 14].

Es por estas razones que el agua lluvia sin un adecuado tratamiento no debe ser destinada al consumo directo del usuario ni a usos sanitarios.

## 1.3. Radiación solar directa y difusa

El implementar colectores solares para calefacción de agua caliente sanitaria en viviendas ha cobrado relevancia a nivel regional. En la República de Chile se ha aprobado el desarrollo de un proyecto para la generación de sistemas de este tipo de sistemas por parte de su ministerio de energía [15]. Gracias a las condiciones latitudinales en las que se encuentra el Ecuador, también se puede aprovechar la radiación solar para estos fines.

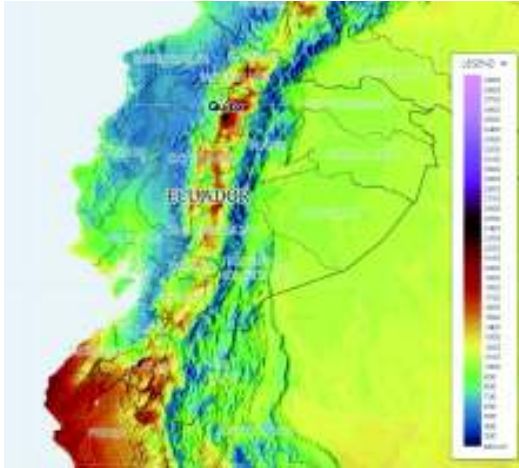


Figura 1.1. Radiación Solar Directa en el Ecuador.  
Fuente: [16]



Figura 1.2. Radiación Solar Difusa en el Ecuador.  
Fuente: [16]

La Figura 1.1 presenta un panorama general de la incidencia de radiación solar directa en el Ecuador. Es notable que en las regiones Costa y Amazonía esta incidencia es baja en comparación con el despunte en la zona Sierra del país.

La Figura 1.2 presenta un panorama general de la incidencia de radiación solar difusa en el Ecuador. Es notable que en las regiones Costa y Amazonía esta incidencia es alta en comparación con la zona Sierra del País.

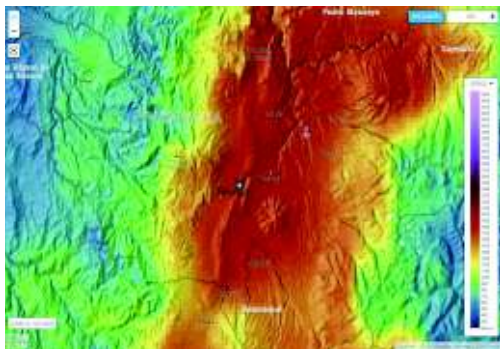


Figura 1.3. Radiación Solar Directa en la ciudad de Quito.  
Fuente: [16]

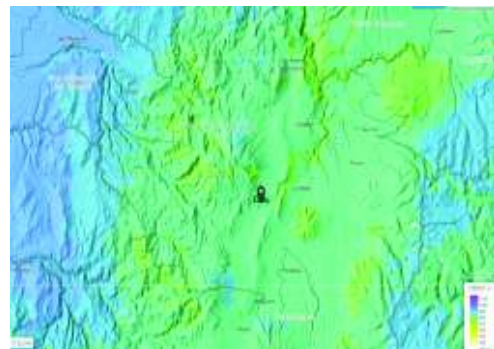


Figura 1.4. Radiación Solar Difusa en la ciudad de Quito.  
Fuente: [16]

La Figura 1.3 muestra como Quito posee una incidencia de radiación solar directa anual de aproximadamente  $2100 \text{ kWh/m}^2$ . Este valor es de los más altos del país como se puede distinguir de la Figura 1.1.

La Figura 1.4 muestra como la radiación solar difusa anual en la ciudad de Quito bordea los  $800 \text{ kWh/m}^2$ . Este valor no es de los más altos del país; sin embargo, implica una cantidad energética adicional aprovechable para la implementación del SUPACS.



## 1.4. Temperatura ambiental

Se esperaría que el Ecuador sea un país con clima cálido dadas sus condiciones latitudinales. Sin embargo; gracias a la cordillera de los Andes se distingue una región montañosa denominada Sierra que provee de climas variados al país.

Quito, en específico, según datos del INHAMI, presenta temperaturas que varían entre 19 y 6 grados Celsius entre día y noche, manteniéndose esta variación estable a lo largo del año como se puede visualizar en la Tabla 1.3.

La Tabla 1.4 muestra que durante el año 2015 la temperatura media de la ciudad de Quito fue de 16,9°C que en comparación con la temperatura media anual normal de 14,9°C tiene un incremento de 2,1°C. Este hecho muestra que el 2015 fue un año especialmente más cálido.

Tabla 1.3. Temperaturas de la Ciudad de Quito a lo largo del año.

Fuente: [6, 7, 8, 9, 10]

Año	2009		2010		2011		2012		2013	
	T máxima promedio °C	T mínima promedio °C	T máxima promedio °C	T mínima promedio °C	T máxima promedio °C	T mínima promedio °C	T máxima promedio °C	T mínima promedio °C	T máxima promedio °C	T mínima promedio °C
Enero	17,4	7,5	19,8	6,1	18,2	6,4	16,9	7	19,8	6,2
Febrero	17,4	7,3	19,6	7,8	17,2	7	16,5	7,4	17,8	7,3
Marzo	18,3	7,1	19,2	7,5	17	6,5	18,2	7,1	19	6,9
Abril	18,2	6,9	18,4	8,3	16,7	7	17,3	6,7	19,2	6,2
Mayo	18,4	6,2	19	7,6	18,4	6,5	18	6,3	18,2	6,5
Junio	18,3	6,6	17,8	6,5	18,3	6	19	5,6	19,7	5,7
Julio	19,3	6,4	18,3	5,8	17,6	5,8	19,8	6,4	19,8	5,7
Agosto	19,4	6,1	18,8	4,4	18,9	5,6	19,8	5,8	19,7	5,3
Septiembre	20,8	6,2	18,5	5,6	18,8	5,8	20,1	6,1	19,7	6,2
Octubre	19,6	7,1	18,6	6,3	18,5	5,7	18,6	6,5	19,1	6,6
Noviembre	19,6	6,5	17,1	5,8	19,3	5,3	18,3	6,2	18,7	6
Diciembre	19,2	7,5	16,4	7	18,4	6,8	18,8	5,5	18,9	6

Tabla 1.4. Temperatura media del aire año 2015 de la ciudad de Quito.  
Fuente: [11]

Temperatura media del aire °C		
Normal	Media en 2015	Anomalía
14,9	16,9	2,0

## 1.5. Volumen consumido diario y temperatura de uso del agua caliente sanitaria

El caudal de agua consumido diariamente por habitante es un factor preponderante en este tipo de sistemas. Si bien, es verdad que no todos los habitantes consumen la misma cantidad de agua caliente, es necesario establecer un valor que satisfaga la demanda de este fluido. Para ello la NEC 11 en su capítulo 14 “Energías Renovables” proporciona una tabla con valores nominales para el consumo diario de agua caliente por persona dependiendo del tipo de vivienda.

Tabla 1.5. Volumen de consumo diario de Agua Caliente Sanitario según el tipo de edificación.  
Fuente: TIMEESCI y CTE citados por [17]

Criterio de consumo	Opción 1 <i>lacs/día a 55°C</i>	Opción 2 <i>lacs/día a 60°C</i>	Criterio de conteo
Viviendas unifamiliares	80	30	Por persona
Viviendas multifamiliares	55	22	Por persona
Hospitales y hospitales básicos	100	55	Por cama
Hoteles	100	70	Por cama
Moteles	80	55	Por cama
Hoteles y hostales	60	40	Por cama
Residencias	70	55	Por cama
Vestuarios	25	15	Por servicio
Escuelas	5	3	Por alumno
Cuarteles	25	20	Por persona
Fábricas	20	15	Por persona
Oficinas	2	3	Por persona
Gimnasios	15	20	Por usuario
Lavanderías	5	3	Por kilo de ropa

Restaurantes	5	5	Por comida
Cafeterías	1	1	Por almuerzo

A partir de los datos de la Tabla 1.5, para el proyecto en cuestión, es claro que se necesita aplicar un valor de 80 *lacs/día* a 55°C o 30 *lacs/día* a 60°C por persona dado que el diseño a realizarse está destinado para viviendas unifamiliares.

La misma NEC, en su capítulo 14, recomienda el uso de 45 *l/día* a 60°C para viviendas unifamiliares como es notable en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Condiciones de uso del ACS.

Fuente: [17]

Zona	Costa	Sierra
Temperatura de uso °C	60	60
Número de usuarios	4	4
Caudal diario ( <i>l/día</i> )	45	45
Número de viviendas	1	1

## 1.6. Presión y caudal de consumo

Se debe asegurar que el flujo de ACS cumpla con un nivel de confort; de tal forma que, los usuarios mantengan la preferencia por este sistema y no opten por otros tipos de obtención de agua caliente como calefones a GLP o duchas eléctricas. Para ello, es necesario que las condiciones de uso del ACS estén dentro de valores recomendados por entes especializados.

En la Tabla 1.7 se aprecian valores emitidos por la NEC para caudal y presión en distintos usos dentro de edificaciones, de los cuales el valor de 0,2 *l/s* a una presión mínima de 3 *m. c. a.* para duchas aplica en la implementación del SUPACS [18].

Tabla 1.7. Caudal y presión según la NEC.

Fuente: [18]

Aparato sanitario	Caudal instantáneo mínimo [ <i>l/s</i> ]	Presión		Diámetro según NTE INEN1369 [ <i>mm</i> ]
		Recomendada [ <i>m. c. a.</i> ]	Mínima [ <i>m. c. a.</i> ]	
Bañera	0,3	7	3	20
Bidet	0,1	7	3	16
Calentadores	0,3	15	10	20
Ducha	0,2	10	3	16

Fregadero	0,2	5	2	16
Fuentes para beber	0,1	3	2	16
Grifo para manguera	0,2	7	3	16
Inodoro con depósito	0,1	7	3	16
Inodoro con fluxor	1,25	15	10	25
Lavabo	0,1	5	2	16
Máquina de lavar ropa	0,2	7	3	16
Máquina lava vajilla	0,2	7	3	16
Urinario con fluxor	0,5	15	10	20
Urinario con llave	0,15	7	3	16
Sauna, turco o hidromasaje doméstico	1	15	10	25

En la Tabla 1.8 se aprecian valores de caudal para diferentes usos en edificaciones según el MITCO del Gobierno de España. El valor de caudal de 0,1 l/s para duchas en ACS es propicio para el diseño del SUPACS [19].

Tabla 1.8. Caudales para aparatos según el MITCO de España.

Fuente: [19]

Cálculo de caudales (l/s) y aparatos							
Zonas y locales		AFCH			ACS		
		Aparatos	Unitario	Total	Aparatos	Unitario	Total
Cocina	Fregadero	1	0,2	0,2	1	0,1	0,1
	Lavadora	1	0,2	0,2	1	0,15	0,15
	Lava vajillas	1	0,15	0,15	1	0,1	0,1
	Total cocina	3	–	0,55	3	–	0,35
Baño	Bañera	1	0,3	0,3	1	0,2	0,2
	Lavabo	1	0,1	0,1	1	0,065	0,065

	Bidé	1	0,1	0,1	1	0,065	0,06
	Inodoro con cisterna	1	0,1	0,1	–	–	–
	Total baño	4		0,6	3	–	0,33
Aseo	Ducha	1	0,2	0,2	1	0,1	0,1
	Lavabo	1	0,1	0,1	1	0,065	0,065
	Inodoro con cisterna	1	0,1	0,1	–	–	–
	Total aseo	3	–	0,4	2	–	0,165
Total vivienda		10	–	1,55	8	–	0,845

De la Tabla 1.9. se tiene que una ducha de alta eficiencia ocupa un caudal de  $5,7 \text{ l/min}$  en una duración de 5 minutos y en un uso de 0,3 veces por persona por día.

Tabla 1.9. Consumo y caudales de uso según Despins.

Fuente: [20]

Accesorios	Tipo de accesorio	Consumo de agua	Número de usos por persona	Duración del consumo de agua
Retrete	Bajo flujo	$13 \text{ l/flujo}$	5	
Retrete	Ultra-bajo flujo	$6 \text{ l/flujo}$	5	
Retrete	Flujo dual	$4,8 \text{ l/flujo}$	5	
Lavadora	Carga máxima	$150 \text{ l/carga}$	0,37	
Lavadora	Carga media	$100 \text{ l/carga}$	0,37	
Lavadora	Ineficiente/vieja	$8 \text{ l/min}$	3	$0,5 \text{ min}$
Lavadora	Estándar	$5,3 \text{ l/min}$	3	$0,5 \text{ min}$
Lavadora	Alta eficiencia	$3,2 \text{ l/min}$	3	$0,5 \text{ min}$
Ducha	Ineficiente/vieja	$9,5 \text{ l/min}$	0,3	$5 \text{ min}$
Ducha	Estándar	$8,3 \text{ l/min}$	0,3	$5 \text{ min}$
Ducha	Alta eficiencia	$5,7 \text{ l/min}$	0,3	$5 \text{ min}$

## 1.7. Viviendas proporcionadas por el MIDUVI

Como se especifica en el título del proyecto y en el alcance, este proyecto está enfocado a ser aplicado en viviendas proporcionadas por el MIDUVI. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que este Ministerio tiene diversos modelos de vivienda a lo largo de los años

con arquitecturas diferentes dependiendo de la zona del país en la que se vaya a ubicar [21].

Para la presente fecha, son cuatro los modelos que se están proporcionando [21]. En las Figura 1.5 y Figura 1.6 se muestra tanto el modelo tipo costeño como su respectivo plano arquitectónico. Es notable que este modelo se estructura como un palafito dadas las condiciones meteorológicas que la zona costa posee. En este modelo la zona de baño se encuentra a ras de suelo. Si se deseara diseñar un SUPACS para la región costa este hecho representaría una ventaja al tener más altura entre el área de colección y la toma de agua.



Figura 1.5. Modelo de vivienda tipo “Costeño”  
Fuente: [22]



Figura 1.6. Plano arquitectónico del modelo tipo “Costeño”  
Fuente: [22]

En las Figura 1.7 y Figura 1.8 se muestra el modelo de vivienda Sierra-Oriente tipo 1 en conjunto con su plano arquitectónico. Su techo con pendiente facilitaría en gran medida la captación de agua lluvia haciendo viable su uso como superficie de captación.



Figura 1.7. Modelo de vivienda tipo “Sierra-Oriente 1”  
Fuente: [22]

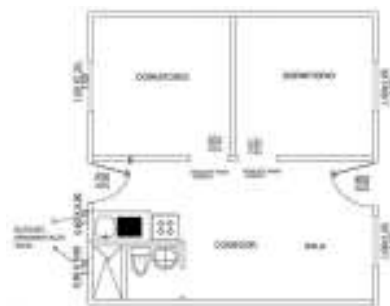


Figura 1.8. Plano arquitectónico del modelo tipo “Sierra- Oriente 1”  
Fuente: [22]

En las Figura 1.9 y Figura 1.10 se muestra el modelo de vivienda Sierra-Oriente tipo 2 en conjunto con su plano arquitectónico. Este modelo presenta pocas variaciones en

comparación con el tipo 1 siendo la más notable un leve incremento en su área. Este incremento de área conllevaría un incremento en la cantidad de agua que podría ser captada por un SUPACS.



Figura 1.9. Modelo de vivienda tipo "Sierra-Oriente 2"  
Fuente: [22]

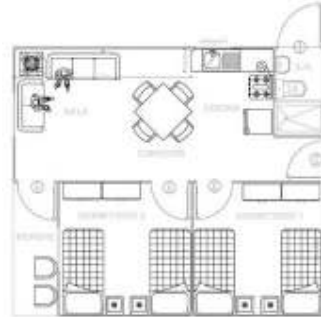


Figura 1.10. Plano arquitectónico del modelo tipo "Sierra-Oriente 2"  
Fuente: [22]

Las Figura 1.11 y Figura 1.12 muestran el modelo de vivienda tipo Sierra-Oriente tipo 3 en conjunto con su plano arquitectónico. Similar a los modelos tipo 1 y 2. Este en particular se distingue por tener un área de construcción totalmente rectangular.



Figura 1.11 Modelo de vivienda tipo "Sierra-Oriente 3"  
Fuente: [22]



Figura 1.12. Plano arquitectónico del modelo tipo "Sierra-Oriente 3"  
Fuente: [22]

El programa de viviendas ha entregado más de 255,000 solares durante los primeros 6 años de su implementación. De esa cantidad el 30% corresponde a la Sierra, principalmente a Pichincha [21].

## 1.8. Sistema unificado de provisionamiento de agua caliente sanitaria (SUPACS)

Sistema unificado de provisionamiento de agua caliente sanitaria (SUPACS) es como se va a denominar al conjunto de subsistemas que tienen como objetivo la captación de agua lluvia, su almacenamiento, acondicionamiento y distribución en una vivienda para uso sanitario. Para este sistema unificado se requiere de 4 subsistemas principales y 1 secundario que son:

- Subsistema de captación de agua lluvia.
- Subsistema de almacenamiento.
- Subsistema de acondicionamiento térmico.
- Subsistema de distribución.
- Subsistema de saneamiento del agua lluvia.

### 1.8.1. Subsistema de captación de agua lluvia

El primer subsistema necesario en el SUPACS es el de captación de agua lluvia. Se debe empezar por determinar el área de captación de agua lluvia. El área de captación es el área proyectada del área total de una superficie expuesta al cielo. Esto es verificable en la Figura 1.13.

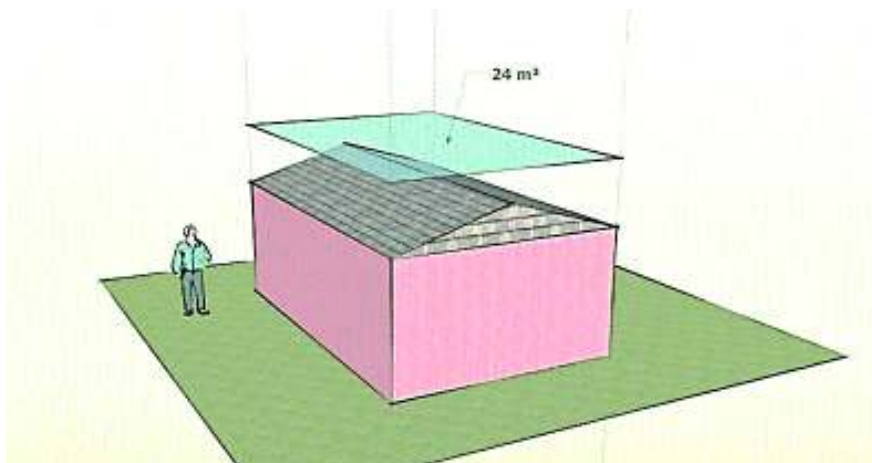


Figura 1.13. Área de captación.  
Fuente: [23]

El volumen acumulado es equivalente al volumen que se obtiene en un área de captación por milímetro de precipitación fluvial.

Es importante, de igual manera, saber el material del cual está compuesto el área de captación. El material del cual esté hecha la superficie de captación puede absorber



parte de la precipitación fluvial y también pueden existir pérdidas debido a discontinuidades o por la geometría de la superficie. Otros factores como la evaporación del agua o por la intensidad del viento pueden influir en la cantidad de pérdidas de volumen de agua. Las Tabla 1.10 y Tabla 1.11 muestran factores para el cálculo de pérdidas dependiendo del material del que esté hecha la superficie de captación.

Tabla 1.10. Factores de pérdidas de volumen de agua por material de la superficie de captación según Despins.

Fuente: [20]

Material de la superficie de captación	Factor de pérdidas de la lluvia inicial (mm)	Factor de pérdidas continuas (%)
Acero	0,25	20
Tejas de asfalto	0,5	20
Fibra de vidrio	0,5	20
Asfalto plano	1,5	20
Techo de Hypalón (goma)	1,5	20

Según Despins, después de la lluvia inicial, una capa superficial de agua se crea sobre la superficie de captación haciendo que el material original de la superficie sea irrelevante para el cálculo de pérdidas posteriores. Debido a este efecto el coeficiente de pérdidas es de 20% para cualquier material [20].

Tabla 1.11. Coeficientes de escorrentía de volumen de agua por material de la superficie de captación.

Fuente: [24]

Superficie	Coeficientes de escorrentía
Metálica- Galvanizado	0,9
Concreto o asfalto	0,7 – 0,95
Tejas de arcilla	0,8 – 0,9
Madera	0,8 – 0,9
Paja	0,6 – 0,7
Pizarra	0,7 – 0,95
Grava	0,15 – 0,3
Césped	0,05 – 0,3

La Tabla 1.11. especifica el coeficiente de escorrentía de cada material que puede ser utilizado como superficie de captación. La escorrentía es la fracción volumétrica de agua lluvia que puede ser captada. Es notable que las Tabla 1.10 y Tabla 1.11 muestran diferentes formas de cálculo para las pérdidas de volumen de agua. Es por esto que,

sus efectos no deben ser sumados, sino que se debe seleccionar un método u otro al realizar el análisis. Es importante que, si el techo está fabricado con materiales como asbesto, el agua captada no debe entrar en contacto con el ser humano hasta que un estudio sobre su incidencia en la salud de las personas demuestre su uso seguro.

Como parte del subsistema de captación puede encontrarse también una red de canaletas. Las canaletas vienen en varias geometrías y cada una de estas tiene diferentes dimensiones dependiendo del caudal para el cual sean utilizadas. Los tipos de canaletas se detallan en el Anexo I.

Las dimensiones de las canaletas pueden ser determinadas siguiendo la Tabla 1.12. La Tabla 1.13. es utilizada para seleccionar las dimensiones de los bajantes (ductos verticales) a partir de la selección previa de las canaletas.

Tabla 1.12. Dimensiones de las canaletas horizontales en función de las condiciones de la precipitación fluvial.

Fuente: [20]

Tamaño de canaleta mínimo requerido.	Área máxima del techo servida por bajante ( $m^2$ )							
	Intensidad de lluvia de diseño (15 min de lluvia, mm)							
	18,75	25	31,25	37,5	43,75	50	56,25	62,5
100 mm	71	53	43	35	30	27	24	21
125 mm	130	98	78	65	56	49	43	39
150 mm	212	159	127	106	91	79	71	64

Tabla 1.13. Dimensiones de los bajantes en función de las canaletas.

Fuente: [20]

Tamaño de canaleta	Tamaño mínimo de bajante (mm)	
	Tipo rectangular	Tipo cuadrado
100 mm	50 x 75	75 x 75
125 mm	50 x 75	75 x 75
150 mm	75 x 100	100 x 100

Las canaletas son tratadas como canales de flujo abierto (abierto a la atmósfera) y por consiguiente la presión estática se mantiene constante. Cuando existe flujo en canal abierto el caudal es calculado con la Ecuación 1.1. [25].

Ecuación 1.1. Ecuación de Manning:

$$Q = \frac{a}{n} * A_t * (R_h)^{\frac{2}{3}} * S_o^{0,5}$$

Donde:

$Q$ : Caudal en canal abierto [ $m^3/s$ ]

$a$ : Constante dimensional 1 [ $m^{1/3} /s$  ]

$n$ : Coeficiente de Manning

$A_t$ : Área de la sección transversal [ $m^2$ ]

$R_h$ : Radio hidráulico [ $m$ ]

$S_o$ : Pendiente del canal

El coeficiente de Manning ( $n$ ) es un valor que explica las variaciones del caudal en canales abiertos dependiendo de la rugosidad del material del cual esté fabricado. Este coeficiente puede ser verificado en la Figura de anexos 5 [25]. El radio hidráulico para cualquier geometría se puede calcular con la Ecuación 1.2.

Ecuación 1.2. Radio hidráulico:

$$R_h = \frac{A_t}{P}$$

Donde:

$R_h$ : Radio hidráulico [ $m$ ]

$A_t$ : Área ocupada por el fluido en el corte transversal [ $m^2$ ]

$P$ : Perímetro mojado. [ $m$ ]

### 1.8.2. Subsistema de almacenamiento de agua lluvia

Posterior al diseño del subsistema de captación es imperativo el diseño de un subsistema de almacenamiento para el uso posterior del agua captada. El uso de tanques es una solución para realizar esta función. La variedad de tanques aplicables es extensa tanto por su posicionamiento como por el material del cual esté compuesto.

Por posicionamiento, estos pueden estar bajo tierra, a ras de piso o a una altura superior que el ras de piso [20].

Un tanque que se encuentra bajo tierra es utilizado principalmente para aplicaciones comerciales o multifamiliares ya que los volúmenes almacenables por estos son cuantiosos. Los tanques que se encuentran bajo tierra pueden estar también integrados a la edificación [20].

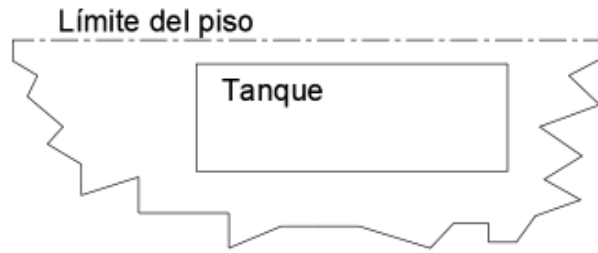


Figura 1.14. Posicionamiento de tanque bajo límite de piso.



Figura 1.15. Tanque de concreto bajo límite de piso.  
Fuente: [20]



Figura 1.16. Tanque de concreto integrado en la zona de garaje subterránea.  
Fuente: [20]

La Figura 1.15 muestra la instalación de un tanque bajo tierra cuyas dimensiones son equiparables a un automóvil pequeño. La Figura 1.16 muestra como un tanque puede ser instalado en el subsuelo en la sección del garaje; de igual manera, sus dimensiones son equiparables con un automóvil.

Un tanque que se encuentra a ras de piso es utilizado comúnmente para fines domésticos: como almacenamiento de agua para riego de jardines o reservorios en tiempo de sequías [20, 18]. La Figura 1.18 muestra un tanque a ras de piso fabricado por materiales poliméricos.

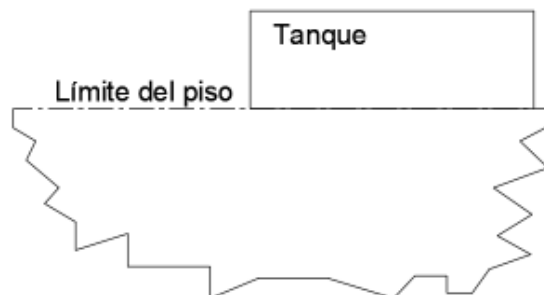


Figura 1.17. Posicionamiento de tanque a ras de piso.



Figura 1.18. Tanque de plástico a ras de piso.  
Fuente: [20]

Un tanque que se encuentra a una altura superior que el ras de piso es utilizado principalmente para sistemas que deseen prescindir de un sistema de bombeo para una posterior distribución del líquido contenido. El volumen y aplicación los tanques que se encuentren en este posicionamiento es variado; tanto así, que pueden proveer de líquido pueblos enteros (**Figura 1.20.**) o pueden ser utilizados para viviendas unifamiliares (Figura 1.21.).



Figura 1.19. Tanque a un nivel superior al ras de piso.



Figura 1.20. Tanque de agua de Alcaraz.



Figura 1.21. Tanque de agua para viviendas unifamiliares a un nivel superior al ras de piso.

Es notable de las Figura 1.20 y Figura 1.21 que, para altas cargas, el diseño de la estructura de soporte debe ser realizado por un trabajo ingenieril especializado; y para cargas bajas, un trabajo artesanal puede cumplir con los requisitos mínimos de operación.

Por su material, los tanques pueden ser de concreto, plástico o fibra de vidrio para la acumulación de agua lluvia. La selección del material depende principalmente de la disponibilidad, el costo y el posicionamiento del tanque. Para tanques bajo el límite del piso se utiliza concreto. Para tanques a ras de piso o a un nivel superior para viviendas unifamiliares se utiliza plástico y para tanques a un nivel superior o integrados en edificaciones para fines multifamiliares se utiliza tanques de plástico empotrados en bases de concreto. Finalmente, se recomienda no utilizar tanque de asbesto puesto que es necesario realizar un estudio de sus efectos sobre la salud de los usuarios [20].

### **1.8.3. Subsistema de acondicionamiento térmico**

Con la intención de elevar la temperatura del agua, es necesario el uso de un subsistema que transfiera energía al fluido. Para este fin se especifica en el alcance el uso de un colector solar plano con efecto termosifón. Sin embargo, no es el único medio para la transferencia de energía. En las Figura 1.22 y Figura 1.23 se muestran dos medios de transferencia de energía por colección solar de entre tantos otros existentes.

Un colector solar es un “intercambiador de calor en el que tiene lugar la transferencia de energía calorífica solar al fluido que circula por el colector” [26].



Figura 1.22. Colector solar cónico.  
Fuente: [27]

La Figura 1.22 muestra un colector solar cónico cuya principal ventaja es que su geometría permite siempre tener incidencia directa de radiación solar. Una pequeña

variación en su geometría puede dar cabida al tipo esférico que presentaría la misma ventaja. Su principal desventaja es que su superficie de captación es pequeña [28].



Figura 1.23. Colector solar de caucho.  
Fuente: [29]



Figura 1.24. Colector solar plano.  
Fuente: [30]

La Figura 1.23 muestra un colector solar de caucho. Este tipo de colectores solares es utilizado para el acondicionamiento de piscinas debido a su bajo precio y a que poseen un mejor rendimiento óptico que los de placa plana y los de tubos al vacío. Su principal problema es que al no tener una cubierta protectora no alcanzan altas temperaturas [28].

Un colector solar plano es denominado con ese nombre debido a que su componente principal asemeja una placa plana (Figura 1.24). Es de uso común y en el cual se basará el presente proyecto para la implementación del SUPACS.

Los colectores solares planos se conforman de seis elementos que son dispuestos según se aprecia en la Figura 1.25.

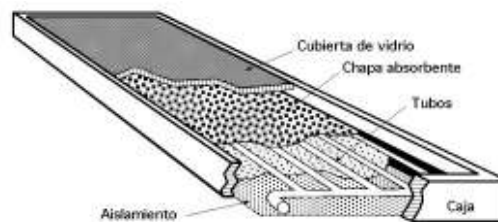


Figura 1.25. Elementos de un colector solar plano.  
Fuente: [31]

Un colector solar plano es capaz de absorber la suma de la radiación directa y la difusa. Estos colectores son utilizados cuando la temperatura a la que se quiere acondicionar el fluido de trabajo no sobrepasa los  $90^{\circ}\text{C}$  [28].

Para analizar los fenómenos ocurridos en el interior del colector solar plano es necesario definir tres coeficientes que intervienen en los efectos de la radiación. El coeficiente de reflexión, reflectividad o reflectancia ( $\rho$ ) es aquel que cuantifica la proporción de la radiación reflejada por una superficie. El coeficiente de transmisión, transmitividad o transmitancia ( $\tau$ ) es aquel que cuantifica la proporción de la radiación que logra atravesar un cuerpo por completo. El coeficiente de absorción o absorptancia ( $\alpha$ ) es aquel que cuantifica la proporción de la radiación que es absorbida por un cuerpo. Estos tres coeficientes oscilan en valores entre 0 y 1 siendo su suma siempre igual a 1. Esto debido a la ley de conservación de energía que obliga a que la suma de las fracciones en las que se dividió la energía incidente sea igual al total de la energía incidente ( $I$ ) [32].

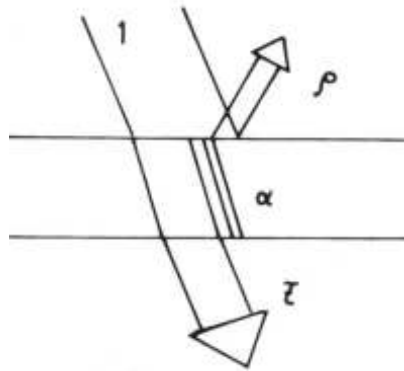


Figura 1.26. Ilustración de las cantidades de radiación descritas por sus respectivos coeficientes.  
Fuente: [32]

La cubierta transparente tiene por objetivos producir el efecto invernadero y reducir las pérdidas por convección. Para el primer objetivo se requieren materiales con un alto coeficiente de transmitancia y baja reflectancia y absorptancia en ondas de luz visibles; y, baja transmitancia y absorptancia con alta reflectancia en ondas de luz infrarrojas. Esto provoca que las ondas de luz visible, una vez hayan atravesado la superficie transparente, sean absorbidas por la superficie absorbente y las ondas de luz infrarrojas emitidas por la superficie absorbente sean reflejadas nuevamente al interior del colector. Como materiales de la cubierta transparente se puede utilizar vidrios o plásticos [26, 28].

La superficie absorbente es aquella encargada de capturar la radiación proveniente del sol y transmitir la energía hacia el fluido de trabajo. Para cumplir con estos propósitos debe poseer cuatro características. Debe tener un alto coeficiente de absorptancia, debe tener bajas emitancia y reflectividad; y debe tener alta conductividad térmica. Como



material de la superficie absorbente se puede utilizar cobre ennegrecido o metales con pinturas absorbentes [26, 28].

El fluido de trabajo es aquel al que se le transmite la energía absorbida por la superficie absorbente elevando de esta manera su temperatura. Son varios los líquidos que pueden ejercer el papel de fluido de trabajo en un colector solar plano como el agua o alcoholes. El fluido de trabajo puede ser puesto en circulación gracias al efecto de una bomba o se puede utilizar el efecto termosifón para la circulación de la energía. El fluido de trabajo puede permanecer separado del fluido de consumo y la energía térmica puede ser transferida en un intercambiador de calor; o, el fluido de trabajo y el de consumo pueden ser el mismo y transmitir la energía térmica en un tanque de mezclado. El uso de una u otra forma depende de la aplicación que se necesite implementar [26, 28].

El aislamiento térmico tiene como finalidad el evitar pérdidas de energía por conducción hacia la carcasa y al medio externo. Para cumplir con este objetivo debe cumplir con cuatro características. Debe tener baja conductividad térmica, alta resistencia a elevadas temperaturas, debe soportar condiciones de alta humedad y debe ser resistente a la degradación. Como material del aislamiento térmico se puede utilizar cerámicos, espumas u otros polímeros [26, 28].

La carcasa cumple con la finalidad de almacenar los elementos que componen la parte funcional del colector solar. Debe cumplir con cuatro requisitos. Debe ofrecer rigidez de forma, debe proveer resistencia a la intemperie, debe ser ligera y debe tener resistencia a la corrosión. Como material de carcasa se puede utilizar madera, metal o plástico [26, 28].

El efecto termosifón es un caso de convección natural que se produce cuando, gracias al incremento de temperatura que se da en el colector solar plano, el fluido asciende debido a que es menos denso que el líquido que se encuentra en el intercambiador de calor o mezcladora. A la vez, el líquido que se encontraba en el intercambiador de calor o mezcladora desciende hacia el colector solar plano y se repite el proceso [33].

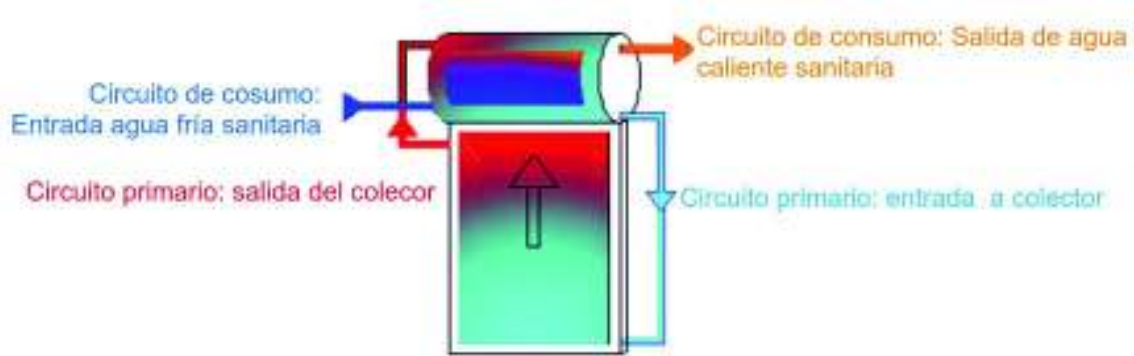


Figura 1.27. Efecto termosifón en un colector solar plano de doble circuito.  
Fuente: [33]

El proceso de dimensionamiento de un colector solar plano está disponible en la normativa ecuatoriana de la construcción en su capítulo 14 [17]. La energía que un colector solar absorbe de la radiación está descrita en la Ecuación 1.3.

Ecuación 1.3. Energía solar colectada:

$$E_c = \eta * I_s * A_c$$

Donde:

$E_c$ : Energía solar colectada [kJ]

$\eta$ : Eficiencia del colector solar

$I_s$ : Irradiancia [kJ/m<sup>2</sup>]

$A_c$ : Área del colector solar [m<sup>2</sup>]

Es necesario determinar la cantidad de energía suficiente para alcanzar las condiciones que sean necesarias. Para ello se hace uso de la Ecuación 1.4.

Ecuación 1.4. Energía absorbida por el agua:

$$E_a = V * \rho * C_p * (T_f - T_o)$$

Donde:

$E_a$ : Energía absorbida por el agua [kJ]

$V$ : Volumen [m<sup>3</sup>]

$\rho = 1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ : densidad del agua

$C_p = 4,186[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}]$ : Calor específico del agua

$T_f$ : Temperatura final [ $^\circ C$ ]

$T_o$ : Temperatura inicial [ $^\circ C$ ]

Esta energía es proporcionada por el colector solar plano. Para determinar la energía que el colector debe adquirir de la radiación se hace uso de la Ecuación 1.5 que muestra la relación entre la energía necesaria por la carga y la energía proporcionada por el sistema de colección [17].

Ecuación 1.5. Energía proporcionada por el sistema de colección:

$$E_a = f * E_u$$

Donde:

$E_a$ : Energía absorbida por el agua [kJ]

$f$ : Fracción solar transmitida

$E_u$ : Energía proporcionada [kJ]

La fracción solar transmitida se calcula como una función de dos variables adimensionales denominadas como  $X$  e  $Y$  según las Ecuación 1.6, Ecuación 1.7 y Ecuación 1.8 [17].

Ecuación 1.6. Fracción solar transmitida:

$$f = 1,929Y - 0,065X - 0,245Y^2 + 0,0018X^2 + 0,0215Y^3$$

Ecuación 1.7. Variable adimensional  $X$ :

$$X = A_c * \frac{F_r U_L \frac{F_r'}{F_r} (100 - \bar{T}_a) * \Delta t}{E_{am}}$$

Ecuación 1.8. Variable adimensional  $Y$ :

$$Y = A_c * \frac{F_{r(\tau\alpha)_n} \frac{F_r'}{F_r} \left( \frac{\bar{\tau\alpha}}{\tau\alpha_n} \right) * N_M \bar{H}_T}{E_{am}}$$

Donde:

$F_{r(\tau\alpha)_n}$ : Eficiencia óptica del colector

$F_r U_L$ : Coeficiente global de pérdidas térmicas del colector [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$A_c$ : Área de colección [ $m^2$ ]

$\Delta t$ : 2592000 [s]:Tiempo de un mes (30 días) en segundos

$\frac{F_r'}{F_r}$ : Factor de corrección del intercambiador (1 si el colector es de un solo fluido, 0,95 para colectores de dos fluidos)

$\overline{T_a}$ : Media mensual de temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]

$E_{am}$ : Energía absorbida por el agua en un mes [J]

$\frac{\overline{\tau\alpha}}{\tau\alpha_n}$ : Factor de pérdida de rendimiento debido al ángulo de incidencia. (0,95)

$N_M$ : 30 [días]: días del mes

$\overline{H_T}$ : media mensual diaria de la radiación incidente sobre la superficie colectora [ $J/m^2$ ]

Sin embargo; para volúmenes de almacenamiento mayores a  $75 l/m^2$  es necesario realizar correcciones al valor de  $X$  para obtener un valor más acertado. Las correcciones son realizadas con el uso de las Ecuación 1.9 y Ecuación 1.10.

Ecuación 1.9. Primera corrección del valor  $X$ :

$$X_c = X * \left(\frac{V}{75}\right)^{-0,25}$$

Ecuación 1.10. Segunda corrección del valor  $X$ :

$$X_{cc} = X_c * \frac{11,6 + 1,18 T_{ACS} + 3,68 T_{red} - 2,32 T_a}{100 - T_a}$$

Donde:

$X_c$ : Primera corrección del valor de  $X$

$V$ : Volumen [L]

$T_{ACS}$ : Temperatura deseada del ACS [ $^{\circ}C$ ]

$T_{red}$ : Temperatura de la red [ $^{\circ}C$ ]

$T_a$ : Temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]

Se establece la relación dispuesta en la Ecuación 1.11.

Ecuación 1.11. Relación de volumen acumulado y área de colección:

Fuente: [17]

$$50 < \frac{V}{A_c} < 180$$

Donde:

$V$ : Volumen acumulado [L]

$A_c$ : Área de colección [ $m^2$ ]

Al igual que en cualquier sistema energético, en el colector solar plano se pierde energía térmica por varias razones que evitan que se aproveche el total de la energía incidente. Para calcular la energía aprovechada se ha definido una eficiencia calculable con la Ecuación 1.12 [17].

Ecuación 1.12. Eficiencia energética de un colector solar:

$$\eta = F_{r(\tau\alpha)n} - F_r U_L \frac{(T_e - T_a)}{I_s/t}$$

Donde:

$F_{r(\tau\alpha)n}$ : Eficiencia óptica del colector

$F_r U_L$ : Coeficiente global de pérdidas térmicas del colector [ $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ]

$T_e$ : Temperatura de entrada del fluido al colector [ $^\circ C$ ]

$T_a$ : Temperatura ambiente [ $^\circ C$ ]

$I_s$ : Irradiación solar aplicable [ $\frac{Wh}{m^2}$ ]

$t$ : 4380 [h]: tiempo de exposición anual en horas.

La Tabla 1.14 muestra los valores de  $F_{r(\tau\alpha)n}$  y  $F_r U_L$  en función del rango de temperaturas de trabajo del colector. Se recomienda que el valor del coeficiente global de pérdidas térmicas del colector no supere los  $8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ C$  [17].

Tabla 1.14. Valores típicos de eficiencia de colectores solares  
Fuente: CENSOLAR citado por [17].

Tipo de colector	Rango T [°C]	$F_{r(\tau\alpha)n}$	$F_r U_L \frac{W}{m^2 \circ C}$
Sin cubierta	10 – 40	0,9	15 – 25
Cubierta simple	10 – 60	0,8	7
Cubierta doble	10 – 80	0,65	5
Superficie selectiva	10 – 80	0,8	5
Tubos de vacío	10 – 130	0,7	2

Para el caso práctico de estar en la ciudad de Quito y que las casas pueden estar ubicadas en varias zonas del cantón se aplica una inclinación de 5° para el colector solar [17].

#### 1.8.4. Subsistema de distribución

Con la intención de llevar el agua lluvia acondicionada térmicamente al consumidor es necesario implementar un subsistema de distribución. Este subsistema de distribución puede estar compuesto de una red de tuberías y puede o no disponer de una bomba dependiendo del posicionamiento del tanque.

La red de tuberías puede estar compuesta de tubos de polipropileno (PP) o de acero galvanizado. Cualquiera que sea el caso, al estar transportando un fluido con temperatura superior a la del ambiente es necesario que estos sean capaces de soportar dichas temperaturas sin sufrir un deterioro y además deben estar recubiertas con un aislante térmico para evitar las pérdidas de energía.



Figura 1.28. Tubería del PP para agua caliente.  
Fuente: [34]



Figura 1.29. Tubería de acero galvanizado.  
Fuente: [35]

El aislamiento de la red de tuberías puede estar compuesto de una diversa gama de materiales entre los que están la fibra de vidrio, perlita expandida, lana mineral, vidrio celular, pyrogel XT-E, flexin, fibra cerámica, fibraroll, silicato de calcio, espuma elastomérica, polietileno entre otros. El uso de uno u otro material depende de las condiciones a las que va a estar sometido el aislante y la disponibilidad en el mercado local. Ver Figura 1.30, Figura 1.31 y Figura 1.32.



Figura 1.30. Aislamiento de espuma elastomérica.



Figura 1.31. Aislamiento de lana mineral.  
Fuente: [36]



Figura 1.32. Aislamiento de polietileno.  
Fuente: [36]

Dependiendo del posicionamiento del subsistema de almacenamiento, será necesaria la implementación o no de una bomba en el subsistema de distribución. Se puede prescindir de una bomba si el subsistema de almacenamiento se encuentra a mayor altura que la toma de agua y las pérdidas de presión en el interior de la red de tuberías no lleguen a impedir el flujo desde el almacenamiento a la toma.

Para aquellos sistemas en los que se haya determinado la necesidad de una bomba, se pueden utilizar de diversos tipos. Entre algunos ejemplos están la bomba centrífuga,

bomba de desplazamiento positivo, bomba de lóbulos dobles, bomba de engranajes, etc.

#### **1.8.5. Saneamiento del agua lluvia**

Además de los cuatro subsistemas esenciales para el SUPACS, es necesario que el agua sea tratada para proporcionar las condiciones de uso sanitario. Son tres los tratamientos que se pueden aplicar al agua para conseguir un fluido libre de peligros para el consumidor, estos son la filtración, la desinfección y el tratamiento estético [20].

Para el presente proyecto la normativa vigente es la “NTE-INEN 1108-2014 Agua potable, requisitos”. Que establece los requisitos mínimos necesarios para que un suministro de agua sea considerada potable. Debido a que no existe normativa para agua sanitaria se tomará al agua potable como símil [37].

El agua sanitaria se define como aquella que es apta para la limpieza o usos higiénicos. Con relación al ser humano, se la puede usar para limpiar la piel mas no para su consumo para beber [38].

Para que el agua lluvia captada pueda ser considerada como sanitaria hay ciertos criterios que ayudan a alcanzar las condiciones mínimas necesarias:

La superficie de captación debe permanecer limpia, las ramas de los árboles aledaños deben ser podadas y los ductos de ventilación de calefones y cocinas deben tener su salida por debajo de las canaletas [20]. Esto último para evitar la acumulación de partículas en la superficie de captación y en las canaletas.

El tanque de almacenamiento debe tener una distancia aceptable con el sistema de bombeo. Se debe prevenir aperturas del tanque al ambiente que garanticen como mínimo que no incida luz solar al interior del tanque. Toda entrada de fluido al tanque desde el exterior debe tener por lo menos una membrana o filtro [20].

Se debe asegurar que el diseño del sistema de almacenamiento pueda evacuar sobre flujos en caso de precipitaciones intensas [20].

El tratamiento del agua puede desarrollarse antes o después de su almacenamiento. Los dispositivos implicados en el pre-almacenamiento siempre dependen de la influencia de la gravedad para la circulación del agua captada. El tratamiento pos-almacenamiento tiende a ser mucho más riguroso ya que requiere de flujo presurizado para el proceso [20].



Si el agua captada será utilizada para aplicaciones comunes, exceptuando su consumo humano, bastaría con un tratamiento previo al almacenado utilizando un diseño propio o alguno de los siguientes propuestos. Dispositivo de evacuación de primer flujo (Figura 1.33) es utilizado para que las primeras aguas lluvias captadas, que acarrean las impurezas de la superficie de captación, sean evacuadas por un desfogue diferente, de esta manera asegura que solo el agua subsiguiente ingrese al subsistema de almacenamiento. Mallas previas al ingreso a las canaletas y previas al ingreso al subsistema de almacenamiento pueden ser utilizadas para separar sólidos de tamaños macroscópicos del agua (Figura 1.34 y Figura 1.35). El filtro de tres vías es un filtro especial que realiza la función de la cámara de evacuación y de las mallas en un solo proceso. No es común en el mercado local y su importación es costosa, pero puede obtenerse un diseño similar con un proyecto de fin de carrera de pregrado y fabricado por un proveedor local posteriormente (Figura 1.36) [20, 34, 36].

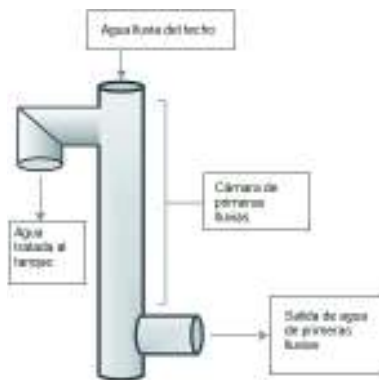


Figura 1.33. Dispositivo para evacuación del primer flujo.  
Fuente: [20]



Figura 1.34. Apertura y malla para filtración de sólidos.  
Fuente: [20]



Figura 1.35. Canaleta cubierta con malla para filtración de sólidos.  
Fuente: [20]

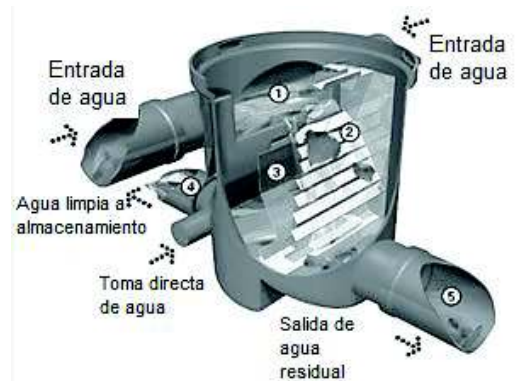


Figura 1.36. Filtro de tres vías.  
Fuente: [20]

Un dispositivo similar al filtro de tres vías es el tanque de primeras lluvias (Figura 1.37), una cámara que recibe a las primeras aguas lluvias que generalmente acarrean material

indeseado. Una vez lleno, el agua lluvia que viene por la entrada será conducida directamente hacia la cisterna o tanque de almacenamiento por acción del nivel del agua. La organización mexicana Islaurbana propone la Ecuación 1.13 para su dimensionamiento [39].

Ecuación 1.13. Volumen del tanque de primeras lluvias:

$$V_{tl} = 2 \left[ \frac{l}{m^2} \right] * A_c$$

Donde:

$V_{tl}$ : Volumen del tanque de primeras lluvias [l]

$A_c$ : Área de captación de agua lluvia [ $m^2$ ]

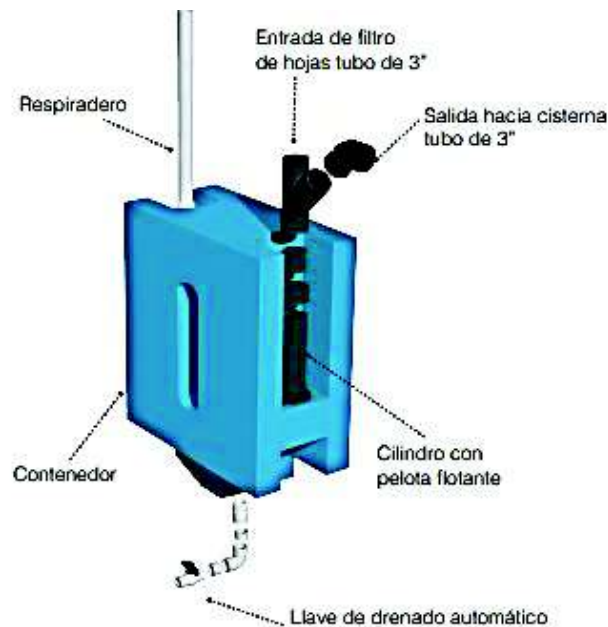


Figura 1.37. Tanque de primeras lluvias.  
Fuente: [39]

Adicionalmente, también se recomienda que el diseño del tanque del sistema de colección incluya una cámara de sedimentación (Figura 1.38) o que exista un tanque de sedimentación previo al tanque de almacenamiento [20].

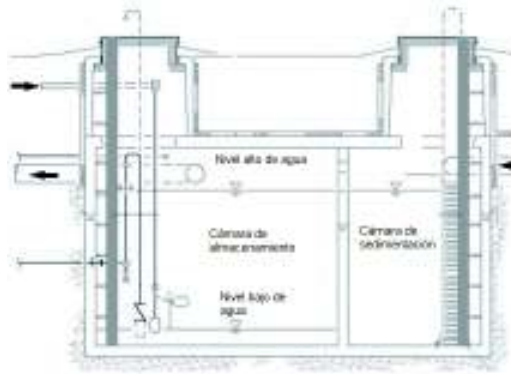


Figura 1.38. Esquema de tanque con cámara de sedimentación.  
Fuente: [20]

El tratamiento pos-almacenamiento incluye los procesos de filtración, desinfección y tratamiento estético [20]. La filtración es el proceso que remueve partículas suspendidas al hacer pasar el fluido por un material permeable como arena, membranas o tejidos. De una forma convencional, se utiliza a un medio poroso (grava, arena, antracita, entre otros) como elemento filtrante. Así es como el agua a tratar es forzada a pasar por estos materiales para eliminar su turbiedad y el total de sus sólidos suspendidos. Generalmente se filtran hasta partículas de 5 micrones de tamaño [20, 40].

En la Figura 1.39. se presenta la distribución de las partículas según su tamaño comúnmente presente en el agua.

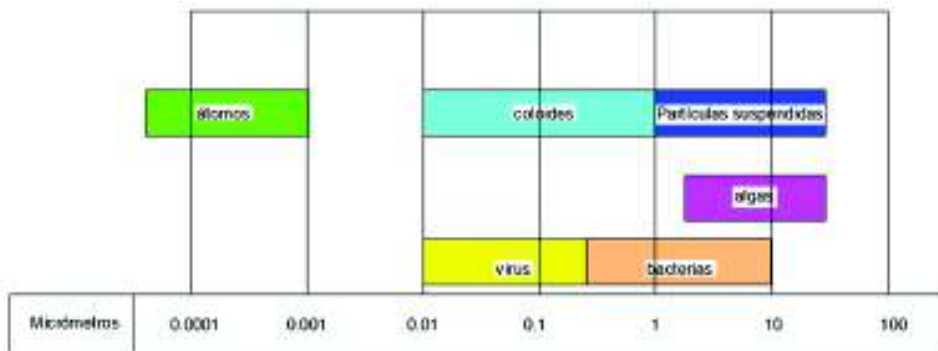


Figura 1.39. Distribución del tamaño de partículas en el agua.  
Fuente: [41]

La desinfección es el proceso que remueve microorganismos del fluido mediante acción química o física. Para ello se puede usar procesos de cloración, ozonización, tratamientos térmicos, irradiación ultravioleta o membranas especializadas [20].

El tratamiento estético remueve constituyentes orgánicos e inorgánicos que cambian el color, olor y sabor del agua como el sulfato de hidrógeno, materia orgánica, magnesio y hierro. Para ello se puede utilizar carbón activo, ozonización, osmosis inversa o membranas especializadas [20].

## **2. METODOLOGÍA**

El proyecto de diseño del sistema SUPACS es cuantitativo debido a que todas sus variables son medibles con escalas numéricas.

La investigación es del tipo técnico-experimental debido a que se siguen criterios técnicos de diseño corroborados por pruebas experimentales. Dado que el proyecto presenta entregables que contribuyen con la sociedad califica también con proyecto integrador con la comunidad.

La técnica de recolección de información fue el análisis documental.

La muestra de datos utilizados es de aquellos disponibles a partir de enero de 2009.

La hipótesis definida es que la posibilidad de diseñar un SUPACS es viable técnica y económicamente.

El procedimiento que se ha empleado para el diseño del SUPACS está basado en el método de diseño concurrente [42]. Este procedimiento se divide en cuatro etapas que son:

- Definición del producto
- Diseño conceptual
- Diseño de materialización
- Diseño de detalle

### **2.1. Definición del producto**

#### **2.1.1. Modos de operación**

El modo de operación habitual del SUPACS es autónomo y con poca operación manual para mantenimiento. En caso de incidentes o accidentes se podrá bloquear secciones aisladas que afecten lo menos posible el funcionamiento.

#### **2.1.2. Entorno de operación**

El entorno de operación es expuesto al ambiente en la ciudad de Quito, zona de baja humedad y salinidad. Debe estar totalmente expuesto al sol.

#### **2.1.3. Servicios de entorno**

El principal recurso es el agua proveniente de las precipitaciones fluviales. La alimentación energética es totalmente solar. Se requiere de un pequeño jardín además

de un techo. La mayor cantidad de componentes deben: necesitar mínimo mantenimiento, ser reparados por mecánicos y plomeros de la zona.

#### 2.1.4. Aspectos de fabricación

Debe: ser fabricado por proveedores locales, aunque en el caso de ser necesario se puede acudir a proveedores internacionales.

#### 2.1.5. Aspectos comerciales

El precio de compra e implementación debe ser bajo, no debe afectar a la estética del entorno y debe poder realizársele leves modificaciones para que pueda ser implementado en otras viviendas

#### 2.1.6. Aspectos legales

Se acogerá a la normativa nacional vigente, y en caso de ser inexistente, se aplicarán normativas o manuales internacionales.

### 2.2. Diseño conceptual

#### 2.2.1. Especificaciones del producto

Las especificaciones del producto se dividen en dos categorías que son los requerimientos, especificaciones totalmente necesarias para el funcionamiento, y los deseos, especificaciones que, aunque no sean necesarias, mejorarían al producto.

Tabla 2.1. Especificaciones del SUPACS.

Variable	Tipo de especificación	Valor o referencia	Normativa o Bibliografía
Caudal de ACS	Deseo	$\geq 0,1 \text{ l/s}$	MITCO (Tabla 1.8)
Presión	Deseo	$\geq 3 \text{ m. c. a.}$	NEC (Tabla 1.7)
Masa	Deseo	$< 1000 \text{ kg}$	-----
Volumen	Requerimiento	$\geq 30 \frac{\text{lacs}}{\text{persona} * \text{día}}$	NEC (Tabla 1.5)
Temperatura del agua de consumo	Requerimiento	$> 25 < 60 \text{ }^\circ\text{C}$	NEC (Tabla 1.5)
Sanidad del agua	Deseo	$\leq 5 \text{ NTU}$	NTE INEN 1108

La sanidad del agua no es considerada un requerimiento porque su uso se limita a aplicaciones comunes y no a ser destinada al consumo por parte del usuario.

### 2.2.2. Diagrama de flujo del proceso

El diagrama de flujo del proceso ilustra los procedimientos que se llevan a cabo en el producto que se está diseñando. Este diagrama se despliega desde un diagrama primario que resume las funciones principales del proceso hasta cuantos sean necesarios para explicar el funcionamiento total del producto.

Diagrama primario

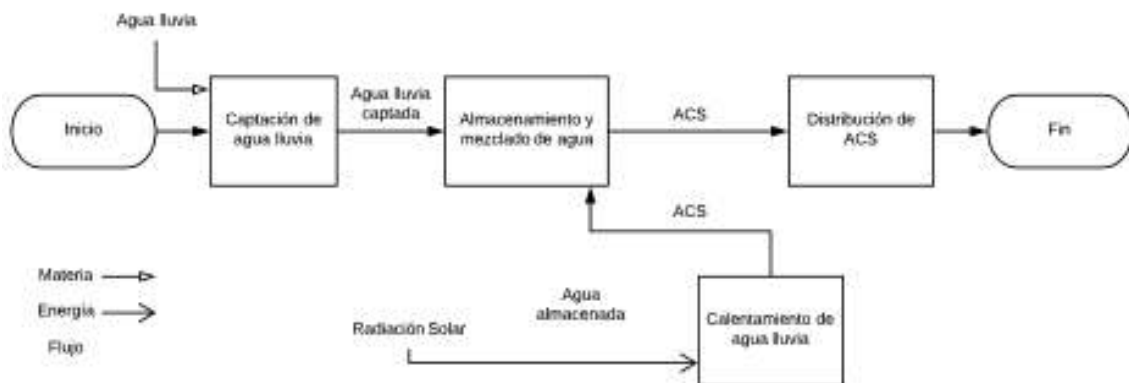
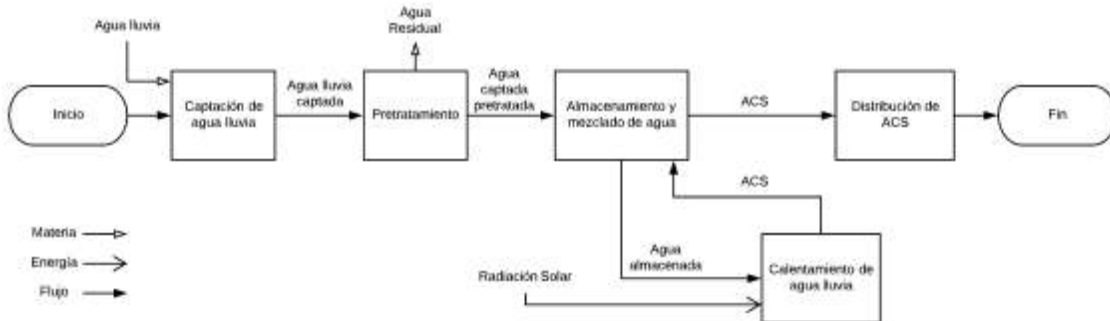


Diagrama secundario



### 2.2.3. Opciones de solución

Como opciones de solución se propone un sistema que esté compuesto por la mejor solución del análisis de los subsistemas aplicado a la arquitectura del modelo de vivienda tipo "Sierra-Oriente 2".

Para el análisis de las mejores soluciones se utilizará el sistema de matrices de ponderación que se encuentran en el ANEXO IV.

*Subsistema de captación*

Para el subsistema de captación se proponen dos soluciones. La primera consiste en utilizar el techo de la vivienda como área de captación, la segunda es la construcción de una estructura de captación independiente de la vivienda aledaña a la misma. Ambas constarán de un sistema de canales abiertos (canaletas) con un bajante para llevar el agua captada al almacenamiento.

### *Subsistema de almacenamiento*

Para el subsistema de almacenamiento se proponen tres soluciones con respecto al nivel de este. Una es colocar un tanque subterráneo, otra es colocar un tanque a ras de suelo y la última es colocar un tanque a un nivel superior al ras de suelo.

Se limitan las opciones a dos en cuanto a su ubicación que son: en las partes lateral izquierda y en la posterior de la casa. Se rechaza la alternativa de localizarlo en la parte lateral derecha debido a su distanciamiento de los puntos de consumo. (Figura 1.10)

Satisfaciendo un costo bajo mientras se estimula la funcionalidad del sistema, se tiene que, tanto el tanque de almacenamiento como el colector solar plano se encuentren lo más cerca de los puntos a ofrecer el agua para su uso doméstico.

En la parte izquierda de la casa (Figura 2.1) se cuenta con un amplio espacio que supera los 4 metros lineales. Se localizaría al tanque de almacenamiento lo más próximo a la casa. El tanque no podrá medir en longitud más de 5 m sin obstruir la ventana presente en la cocina.

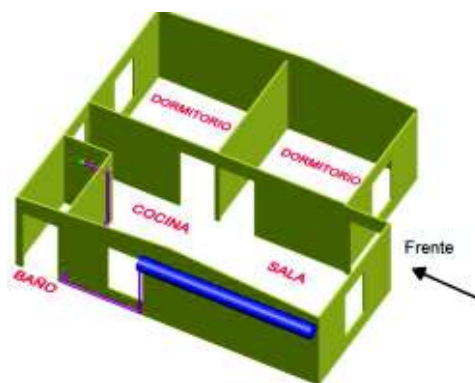


Figura 2.1. Alternativa 1, posicionamiento lateral izquierda del tanque.

En la parte posterior (Figura 2.2) se encuentra que a continuación del baño se cuenta con un espacio lineal de 2,5 m. Debido a que el tanque se encuentra del lado de una de las caídas del agua, se tiene una afectación de aproximadamente 25 mm con respecto a la altura más baja de las canaletas, a diferencia de la primera alternativa. De ser localizado el tanque, con su respectivo colector solar, pegado a la pared (como en la



primera opción) vendría implicada una molestia en cuanto al camino que el usuario deberá recorrer en su trayecto al servicio higiénico. Cabe recalcar que no se cuenta con el resto de esta pared debido a la presencia de una puerta y de una ventana.

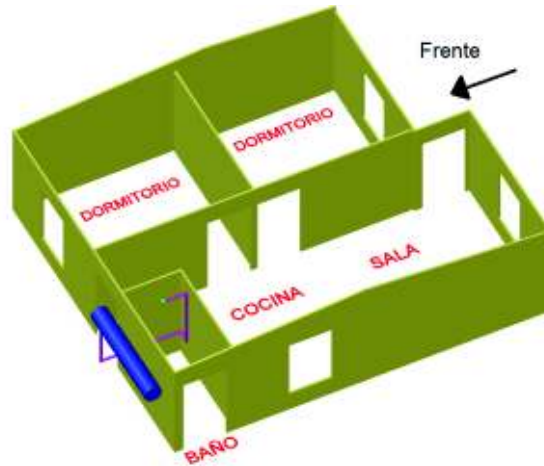


Figura 2.2. Alternativa 2, posicionamiento posterior del tanque.

#### *Subsistema de acondicionamiento térmico*

Para el subsistema de captación se proponen tres soluciones. Un colector solar plano de un solo fluido con tanque independiente, un colector solar plano de dos fluidos y un colector solar plano de un fluido sin tanque independiente.

#### *Subsistema de distribución*

Se proponen dos soluciones: distribución por sistema de bombeo y distribución por gravedad.

Es importante especificar que el subsistema de saneamiento es dependiente del subsistema de distribución elegido. Un sistema de distribución por gravedad limita la aplicación de algunos métodos de saneamiento.

### **2.2.4. Selección de una solución**

El sistema formado por la unión de las mejores soluciones de los subsistemas está compuesto por una red de canaletas alrededor del techo seguido de un tanque a sobre-nivel ubicado en la parte lateral izquierda de la vivienda, un colector solar plano de un solo fluido sin tanque independiente y distribución del agua por gravedad.

### **2.2.5. Despliegue de la función de la calidad**

Se utiliza la herramienta de la casa de la calidad como método final para la calificación y comparación de la solución versus otras soluciones posibles.

Para el despliegue de la función de la calidad se utilizarán tanto a la solución seleccionada para el SUPACS como las siguientes combinaciones.

- Techo-subsuelo-CSP un fluido con tanque-bomba (Opción 1)
- Techo- ras de suelo- CSP un fluido sin tanque- bomba (Opción 2)
- Techo- ras de suelo- CSP dos fluidos-bomba (Opción 3)
- Captación externa-sobre-nivel-CSP un fluido sin tanque-gravedad (Opción 4)

La casa de la calidad es apreciable en el ANEXO V.

## 2.3. Diseño de materialización

El diseño de materialización es el segundo paso del diseño. Este se aplica una vez que el principio de solución ha sido seleccionado y el despliegue de la función de calidad ha validado dicho principio. El objetivo de esta etapa es obtener bocetos funcionales del SUPACS que cumplan con los requerimientos del producto.

### 2.3.1. D.M. del subsistema de captación

Para diseñar el conjunto de canaletas-techo es necesario determinar el caudal máximo de agua que puede ser captada por el techo de la vivienda.

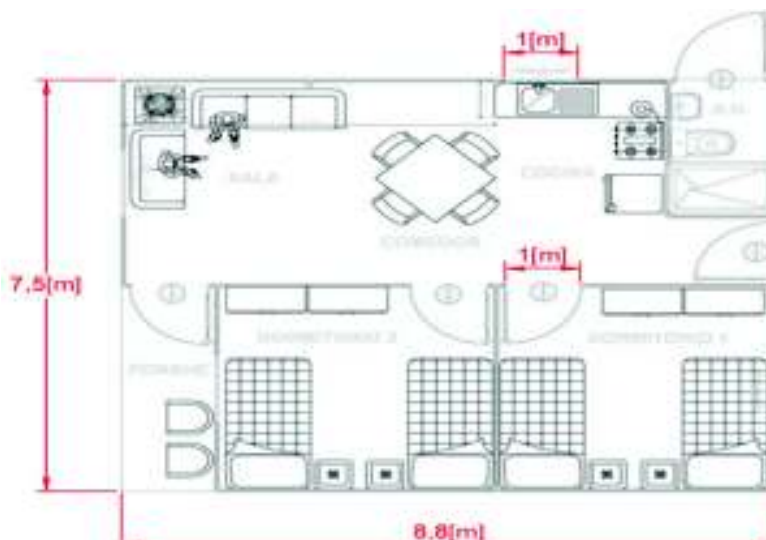


Figura 2.3. Plano de la vivienda con dimensiones. (Modificación de la Figura 1.10)  
Dado que el techo, en la mayoría de los casos es de Eternit; se tiene un excedente de aproximadamente 20 cm a cada lado. Por lo tanto, las dimensiones del área de captación sería un rectángulo de 7,9m x 9,2m.

El área de captación para áreas rectangulares se calcula utilizando la Ecuación 2.1.

Ecuación 2.1 Área de captación para bases rectangulares:

$$A_c = a * b$$

Donde:

$A_c$ : Área de captación de agua lluvia [ $m^2$ ]

$a$ : Lado 1 de la superficie rectangular de captación [ $m$ ]

$b$ : Lado 2 de la superficie rectangular de captación [ $m$ ]

En el presente caso, utilizando la Ecuación 2.1 se tiene que el área de captación de agua lluvia es de  $72,68m^2$ .

Considerando que el techo alimenta a dos canaletas independientes y similares en cuanto a la cantidad de agua que deben conducir debido a cuestiones de simetría se tiene:

$$A_{canaleta} = \frac{A_c}{2} = 36,64 m^2$$

Condición A

Se utiliza la Ecuación 2.2. para el cálculo del caudal que será manejado por canaleta del subsistema de captación.

Ecuación 2.2. Caudal captable por canaleta:

$$Q_{canaleta} = (A_{canaleta} * \zeta * K) / t_p$$

Donde:

$Q_{canaleta}$ : Caudal captable por canaleta [ $l/s$ ]

$t_p$ : Tiempo de duración de la precipitación [ $s$ ]

$A_{canaleta}$ : Área de captación de agua lluvia por canaleta [ $m^2$ ]

$\zeta$ : Precipitación [ $mm$ ]

$K = 0,95$ : Coeficiente de escorrentía para el Eternit (Tabla 1.11)

Se puede determinar las dimensiones de las canaletas usando la Ecuación 1.1. Las canaletas a utilizarse serán las de tipo J debido a su abundancia en el mercado nacional y su bajo costo, según puede observarse en la Figura 2.4. El valor del coeficiente de

Manning corresponde a 0,015, según la Figura de anexos 5; y la pendiente recomendada es de 0,005. [20]

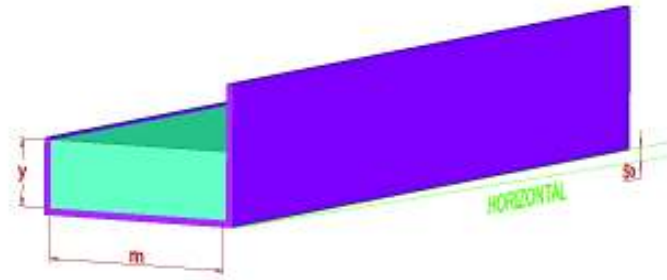


Figura 2.4. Canaleta tipo J.

Dado que el área transversal para canaletas tipo J está definida por la Ecuación 2.3:

Ecuación 2.3. Área transversal de canaletas tipo J:

$$A_t = m * y$$

Donde:

$A_t$ : Área transversal[m<sup>2</sup>]

$m$ : Base de la canaleta[m]

$y$ : Altura de la pared más pequeña[m]

Y el perímetro mojado a su vez está definido por la Ecuación 2.4:

Ecuación 2.4. Perímetro mojado:

$$P = m + 2y$$

Donde:

$P$ : Perímetro mojado[m]

$m$ : Base de la canaleta[m]

$y$ : Altura de la pared más pequeña[m]

Entonces utilizando la Ecuación 1.1:

$$Q_{canaleta} = \frac{a}{n} * A_t * (R_h)^{\frac{2}{3}} * S_o^{0,5}$$

Se reemplaza al valor del caudal colectado según la Ecuación 2.2 para despejar el término del área de captación:

$$A_{canaleta} = \frac{a * t_p}{n * \zeta * K} * A_t * (R_h)^{\frac{2}{3}} * S_o^{0,5}$$

Sabiendo que el radio hidráulico está definido por la Ecuación 1.2, el área transversal está definida por la Ecuación 2.3 y el perímetro mojado está definido por la Ecuación 2.4 se tiene:

Ecuación 2.5 Ecuación de diseño para el subsistema de captación:

$$A_{canaleta} = \frac{(m * y)^{\frac{5}{3}} * a * t_p * S_o^{0,5}}{(m + 2y)^{\frac{2}{3}} * n * \zeta * K}$$

Tomando como parámetro de diseño la máxima precipitación fluvial registrada de los últimos 42 años ( $\zeta = 65mm$ ) con una duración de 2 horas con 20 minutos [12] ( $t_p = 8400s$ ), se procede a utilizar un método de iteración donde se asignan valores a  $m$  e  $y$  en la Ecuación 2.5 que cumplan con la Condición A. Se tomó un coeficiente de Manning de 0,015 (ANEXO II) correspondiente a una superficie de acero revestido, así como las magnitudes de los parámetros ya descritos salvo las dimensiones de la canaleta. Los resultados constan en la Tabla 2.2. Cabe mencionar que en el mercado existen canaletas tipo J de 10, 12, 15 y 17 cm de base. Además, es posible fabricar canaletas a la medida bajo pedido.

Tabla 2.2. Iteración de valores de  $m$  e  $y$  según el área de captación por canaleta tipo J para la máxima precipitación fluvial registrada.

$A_{canaleta} [m^2]$		$m [cm]$			
		10	12	15	17
$y [cm]$	1	26,36	32,23	41,07	46,98
	1,25	37,21	45,67	58,44	66,98
	1,5	49,12	60,50	77,71	89,24
	1,75	61,93	76,53	98,66	113,50
	2	75,51	93,61	121,08	139,54
	2,25	89,76	111,60	144,81	167,16
	2,5	104,60	130,40	169,72	196,22
	2,75	119,96	149,92	195,69	226,58
	3	135,78	170,10	222,63	258,13
	3,25	152,00	190,85	250,44	290,77
	3,5	168,60	212,14	279,05	324,41
	3,75	185,52	233,90	308,40	358,97
	4	202,75	256,11	338,43	394,39
	4,25	220,24	278,71	369,08	430,60
	4,5	237,99	301,68	400,31	467,54

De la Tabla 2.2 se pueden obtener varias soluciones; sin embargo, se toma aquella que represente el menor perímetro mojado. Esto debido a que dicha condición representaría la menor cantidad de masa por unidad de longitud ahorrando costos. Pese a que la Condición A se cumple satisfactoriamente para una canaleta tipo J de dimensiones  $m =$

10cm,  $y = 1,25cm$  con un perímetro mojado máximo de  $P = 12,5cm$ , se decidió por emplear un  $y = 2cm$  con un perímetro mojado máximo de  $P = 14cm$  para superar aquellas circunstancias adversas relacionadas con la presencia de sólidos gruesos (ramas, insectos, hojas, basuras, entre otros). Los planos de la vivienda y las dimensiones que las canaletas deben tener están descritos en la Figura 2.5.

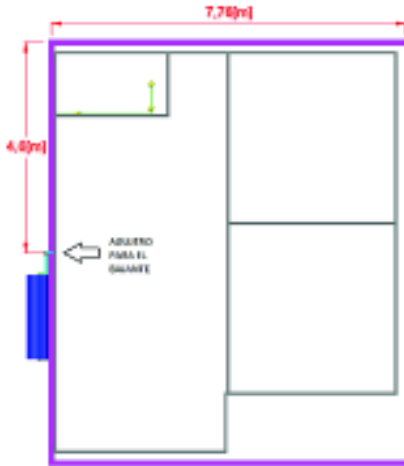


Figura 2.5. Dimensiones de las canaletas, Vista superior.

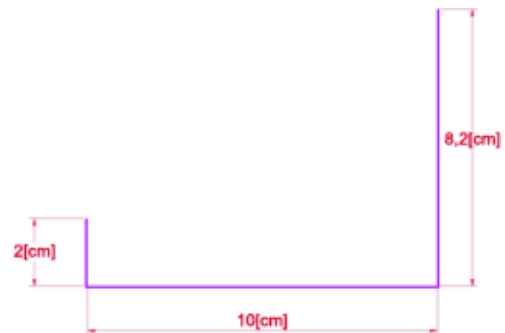


Figura 2.6. Dimensiones de las canaletas, Vista sección transversal.

Hay que tomar en cuenta que las Figura 2.5 y Figura 2.6 se trazan sin considerar el espesor de la chapa metálica de la que está compuesta la canaleta que se construye de tol galvanizado de 0,6mm de espesor. La Figura 2.5 muestra también un agujero para la conexión de un bajante que se conectará con el subsistema de almacenamiento.

Dado que la pendiente necesaria en las canaletas para que el flujo se dirija al bajante es de 0,005, la longitud de las canaletas hasta el punto de desfogue es de 12,36m, y el valor  $y = 0,02m$ , se tiene una diferencia de alturas entre el borde del techo y el agujero de 0,082m (este valor es la dimensión del borde lateral exterior de las canaletas). Al restar este valor de la altura del filo del techo con respecto del suelo de 2,46m (Figura 2.7) se determina una altura de 2,38m desde el suelo al desfogue de las canaletas utilizando la Ecuación 2.6.

Ecuación 2.6 Altura al desfogue de la canaleta:

$$H_c = H_t - y - S_0 * R$$

Donde:

$H_c$ : Altura al desfogue de la canaleta [m]

$H_t$ : Altura al borde del techo [m]

$y$ : Altura del lado menor de la canaleta tipo J [m]

$S_0$ : Pendiente

$R$ : Recorrido de la canaleta hasta el desfogue [m]



Figura 2.7. Vista frontal de la vivienda.

Resolviendo la Ecuación 2.2 para el caso de la máxima precipitación fluvial sobre la vivienda se obtendrá un caudal captable de 0,5343 l/s sin dejar de tomar en cuenta que existirán dos canaletas que transportarán la misma cantidad de agua.

### 2.3.2. D.M. del subsistema de almacenamiento

Para realizar el trabajo del subsistema de almacenamiento se ha seleccionado un tanque a sobre- nivel. Como primer paso del dimensionamiento es necesario calcular el volumen que el tanque debe almacenar.

El requerimiento de consumo de  $30 \frac{lacs}{persona \cdot día}$  (Tabla 2.1) implica que el volumen del tanque varía con respecto al número de habitantes de la vivienda y de cuantos días de almacenamiento se desee en el tanque.

Ecuación 2.7. Volumen de consumo diario

$$V_{ad} = C * n$$

Donde:

$V_{ad}$ : Volumen consumo diario [l/día]

$C$ : Consumo  $\left[ \frac{lacs}{habitante \cdot día} \right]$

$n$ . Número de habitantes [habitantes]

Tal que:

$$V_{ad} = 30 \frac{lacs}{habitantes * día} * 4 habitantes$$

$$V_{ad} = 120 \frac{l}{día}$$

Es necesario establecer cuanto tiempo de reserva de agua va a soportar el tanque. Para que el SUPACS pueda cumplir con su función, este debe trabajar incluso en las condiciones más extremas. Para ello se hace uso de los datos de Tabla 1.1.

Tabla 2.3. Meses con menos precipitación y media entre el 2009 y el 2013 de la ciudad de Quito. (Fragmento de la Tabla 1.1)

Mes	Precipitación mensual [mm]	Días con precipitación
jul-09	7,1	9
ago-10	52,5	7
jun-11	61,4	14
jun-12	10,6	7
jul-13	8,3	4
Media	27,98	8,2

Con los datos de la Tabla 2.3 se tiene que la precipitación mínima promedio es de 27,98 mm al mes. Utilizando la Ecuación 2.8 es posible calcular el volumen captable mínimo promedio en ese mes.

Ecuación 2.8. Volumen captable mínimo promedio:

$$\bar{V}_c min = A_c * \bar{\zeta} min * K$$

Donde:

$\bar{V}_c min$ : El volumen captable mínimo promedio [l]

$A_c$ : El área de captación de agua lluvia [ $m^2$ ]

$\bar{\zeta} min$ : La precipitación mensual media [mm]

$K$ : El coeficiente de escorrentía

De esta forma se tiene:

$$\bar{V}_c min = 72,68m^2 * 27,98mm * 0,95$$

$$\bar{V}_c min = 1931,91 l \text{ en un mes de seco.}$$



Tabla 2.4. Media de precipitación mensual y media general entre 2009 y 2013 en la ciudad de Quito (Fragmento y desarrollo de la Tabla 1.1)

Mes	Media de precipitación mensual [mm]
Enero	155,46
Febrero	188,28
Marzo	169,16
Abril	212,54
Mayo	109,56
Junio	46,08
Julio	60,16
Agosto	44,34
Septiembre	41,1
Octubre	144,44
Noviembre	114,7
Diciembre	157,94
Media	120,31

De la Tabla 2.4 se tiene que en promedio se puede captar 120,31 mm mensualmente. Haciendo uso de la Ecuación 2.8 se puede calcular el volumen captable promedio mensual.

$$\bar{V}_c = A_c * \bar{\zeta} * K$$

$$\bar{V}_c = 72,68m^2 * 120,3mm * 0,95$$

$$\bar{V}_c = 8306,23 l$$

Tabla 2.5. Media de días con precipitación por mes y media general entre 2009 y 2013 en la ciudad de Quito. (Fragmento y desarrollo de la Tabla 1.1)

Mes	Media de días con precipitación
Enero	17
Febrero	22,8
Marzo	21,6
Abril	24,8
Mayo	19,8
Junio	12
Julio	10,6
Agosto	9
Septiembre	10,4
Octubre	19
Noviembre	16
Diciembre	18,8
Media	16,8

Con la Tabla 2.5 obtenida a partir de los datos de la Tabla 1.1 se tiene que en Quito llueve en promedio 17 días al mes. Esto implica que llueve después del transcurso de

1 día. Se calculó que en promedio se puede captar 8306,23 l mensuales. Con estos datos se determina que diariamente se puede captar 488,6 l cada día de lluvia.

Se determinó que el volumen de almacenamiento diario necesario es de 200 l y si llueve después de haber pasado un día, bajo condiciones promedio el tanque necesita tener un tiempo de reserva de 2 días como mínimo para poder trabajar el día que no llueve. Sin embargo, durante los meses con menos precipitación solo se puede captar 1931,91 l mensualmente y en promedio llueve 8,2 días. Esto implica que, se puede captar 235,6 l cada día que llueve y llueve cada 4to día. De esto sabemos que se debe tener capacidad para reservar 5 días en los meses más secos. Usando la Ecuación 2.9 se puede calcular el volumen de almacenamiento para ambos casos:

Ecuación 2.9. Volumen de almacenamiento.

$$V_a = V_{ad} * t$$

Donde:

$V_a$ : Volumen de almacenamiento [l]

$V_{ad}$ : Volumen de consumo diario [l/día]

$t$ : Tiempo de reserva [días]

Tal que para el caso promedio:

$$V_{a1} = 120 \frac{l}{día} * 2 \text{ día}$$
$$V_{a1} = 240 \text{ l}$$

Tal que para el caso extremo:

$$V_{a2} = 120 \frac{l}{día} * 5 \text{ día}$$
$$V_{a2} = 600 \text{ l}$$

Para determinar el volumen de diseño se debe dibujar una línea de volumen contra tiempo. Esto permite visualizar si los requerimientos están siendo cumplidos.



Figura 2.8. Volumen almacenado vs Tiempo en época de sequía 600l.

La Figura 2.8 muestra el volumen almacenado en el tanque con respecto a la variación de tiempo en época de sequía (lluvia de 235,6 l cada 5to día), en el caso de elegir un tanque con capacidad de 600l. Aunque empiece la época de sequía con el tanque a su máxima capacidad, la tendencia se estabiliza en un ciclo donde permanece en operaciones únicamente por dos días.



Figura 2.9. Volumen almacenado vs Tiempo condiciones promedio 600l.

La Figura 2.9 muestra como utilizando el mismo tanque de 600l en condiciones promedio (lluvia de 488,6 l cada 2do día) hay una reserva constante de 480l que no se aprovecha. Dado que el espacio disponible no es ilimitado, no es viable sobredimensionar el tanque de tal forma que en épocas con lluvia se acumule suficiente para las épocas de sequía.

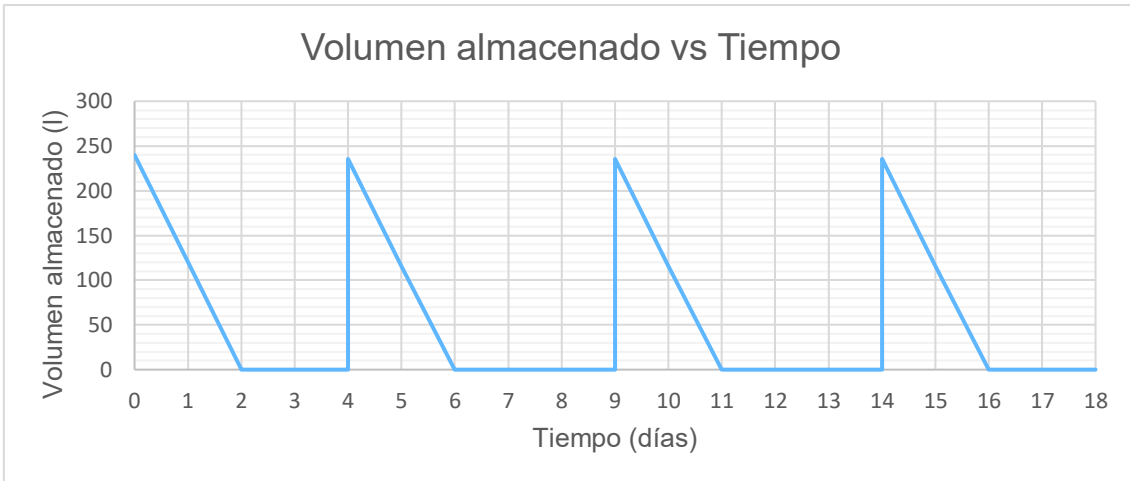


Figura 2.10. Volumen almacenado vs Tiempo en época de sequía 240l.

La Figura 2.10 muestra el volumen almacenado en el tanque con respecto a la variación de tiempo en época de sequía (lluvia de 235,6 l cada 5to día) en el caso de elegir un tanque con capacidad de 240l. Es notable que, aunque el tanque empiece la época de sequía a su máxima capacidad, se estabiliza en un ciclo donde permanece en operaciones únicamente por dos días hasta que vuelva a llover.

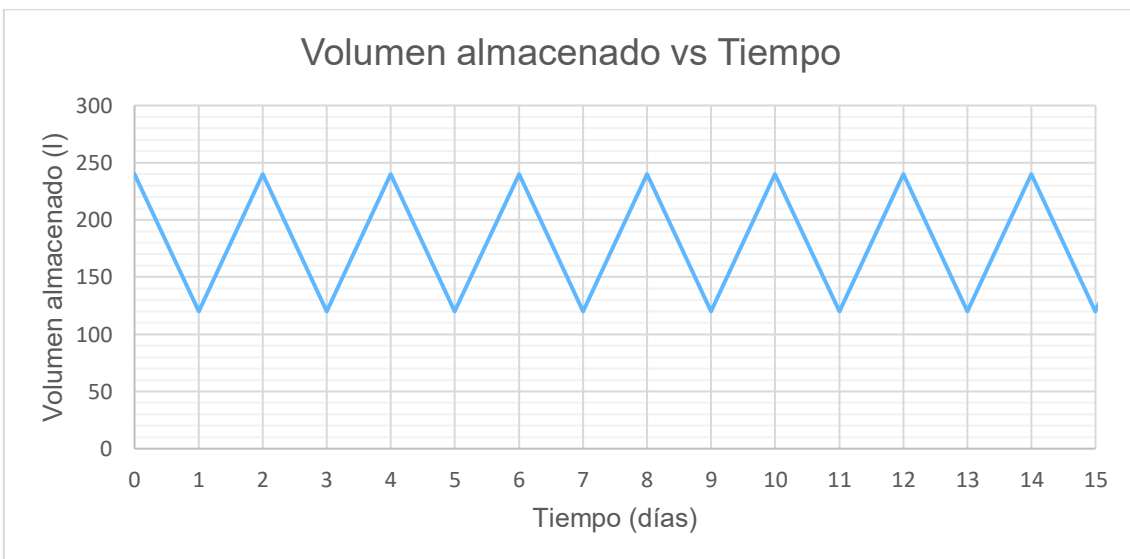


Figura 2.11. Volumen almacenado vs Tiempo condiciones promedio 240l.

La Figura 2.11 muestra como utilizando el mismo tanque de 240l en condiciones promedio (lluvia de 488,6 l cada 2do día) hay una reserva constante de 120l. Con esta reserva no se puede afrontar un día entero sin lluvia en el caso de una variación imprevista debido a que, el tanque quedaría vacío y se tendría que esperar un día más para que el agua se haya acondicionado térmicamente. Si el agua captada no necesita de ser acondicionada térmicamente, sí puede ser usada.

De los datos de las Figura 2.8, Figura 2.9, Figura 2.10 y Figura 2.11 se propone un tanque con capacidad de 3 días de almacenamiento cuyo comportamiento está descrito en las Figura 2.12 y Figura 2.13.

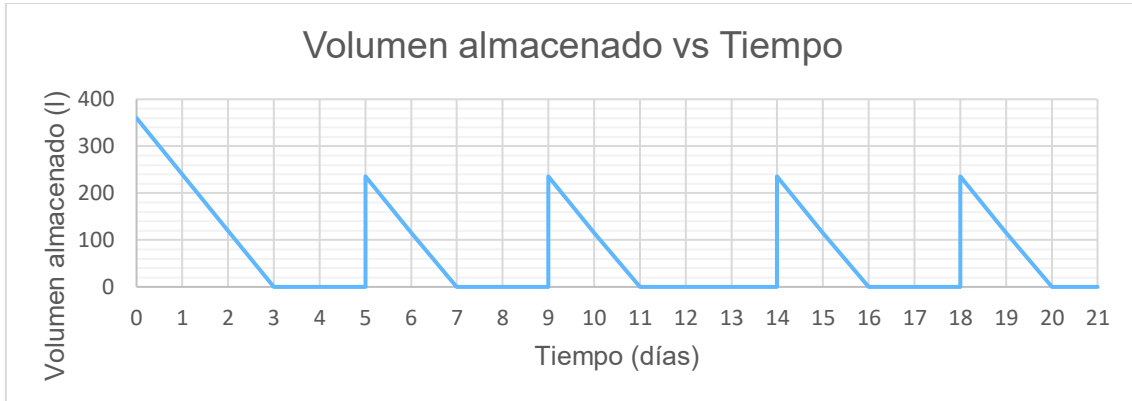


Figura 2.12. Volumen almacenado vs Tiempo en época de sequía 360l.

La Figura 2.12 y Figura 2.10 muestra el volumen almacenado en el tanque con respecto a la variación de tiempo en época de sequía (lluvia de 235,6 l cada 5to día) en el caso de elegir un tanque con capacidad de 360 l. Es notable que, aunque el tanque empiece la época de sequía a su máxima capacidad, se estabiliza en un ciclo donde permanece en operaciones únicamente por dos días. Pero a diferencia del tanque de 600l, solo se tiene un volumen de 120 l sin operaciones en esta época.

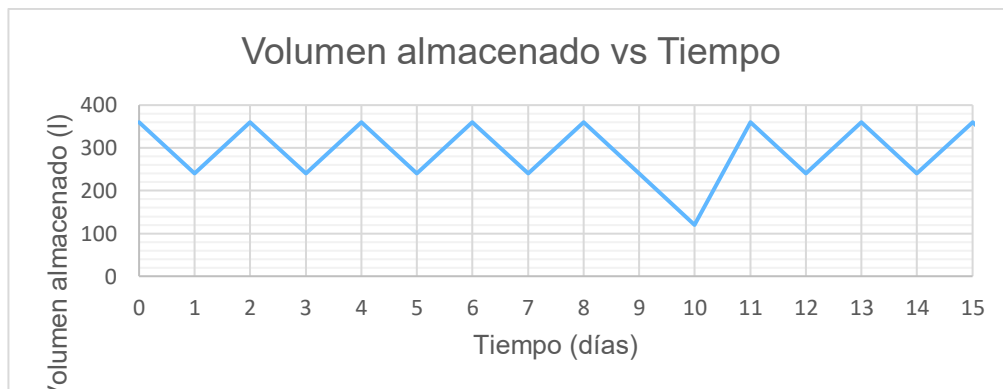


Figura 2.13. Volumen almacenado vs Tiempo condiciones promedio 360l.

La Figura 2.13 muestra como utilizando el mismo tanque de 360l en condiciones promedio (lluvia de 488,6 l cada 2do día) hay una reserva constante de 240l. Con esta reserva se puede afrontar un día entero sin lluvia en el caso de una variación imprevista. El tanque además tendrá siempre un volumen de 120l que servirá como acumulador de energía para que el agua nueva no necesite un largo tiempo para alcanzar las condiciones de uso.

El tanque se dimensionará como un cilindro ubicado de manera horizontal. Esta forma ayuda que se evite la acumulación de precipitados al no haber esquinas, distribuye la carga uniformemente, es fácil de manufacturar y es sencillo de diseñar un soporte que lo sostenga. La altura mínima a la que puede estar el tanque es de 1,8m, altura a la que se encuentra la toma de la ducha. En el D.M. del subsistema de captación se determinó que el desfogue de la canaleta se encuentra a una altura de 2,38m. Esto nos da una diferencia de 0,53m. Se propone un diámetro de cilindro de 40 cm para disponer de una holgura de 13 cm en la instalación.

Ecuación 2.10. Volumen de un cuerpo de sección constante:

$$V = A * L$$

Donde:

V: Volumen [l]

A: Área de la sección [dm<sup>2</sup>]

L: Longitud [dm]

Utilizando la Ecuación 2.10 se puede encontrar la longitud del tanque con la variación presentada en la Ecuación 2.11. Sea el área circular definida por la Ecuación 2.12.

Ecuación 2.11. Longitud de un cuerpo de sección constante.

$$L = \frac{V}{A}$$

Donde:

V: Volumen [l]

A: Área de la sección [dm<sup>2</sup>]

L: Longitud [dm]

Ecuación 2.12. Área de un círculo.

$$A = 0,25 * d^2 * \pi$$

Donde:

A: Área de una sección circular [dm<sup>2</sup>]

d: Diámetro [dm]

$\pi$ : pi [3,14159...]

Tal que:

$$L = \frac{360l}{0,25 * (4 \text{ dm})^2 * \pi}$$

$$L = 28,65 \text{ dm}$$

$$L = 2,86 \text{ m}$$

Las dimensiones del tanque cilíndrico son de un diámetro de 40cm y una longitud de 2,86m. Además de las dimensiones se necesita posicionar agujeros en el tanque para cumplir con las siguientes funciones:

- Entrada de agua captada.
- Entrada de agua potable cuando el volumen baje del mínimo.
- Salida de distribución.
- Purga de aire.

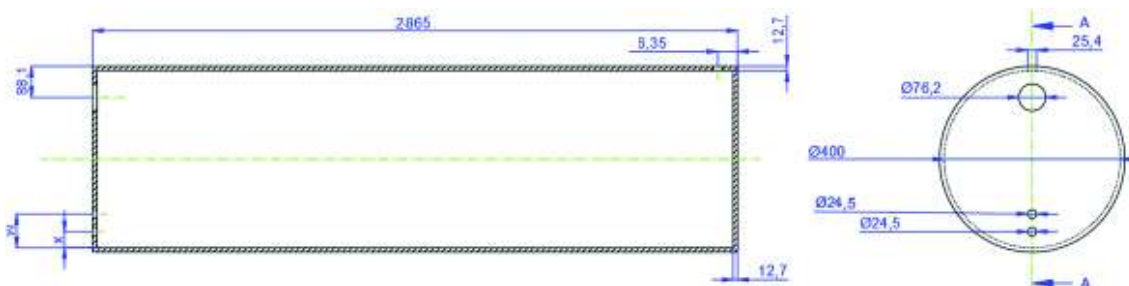


Figura 2.14. Vista radial del tanque y corte A-A.

En la Figura 2.14 nótese que las dimensiones  $x$  y  $w$  no están definidas. " $x$ " Corresponde al posicionamiento de la salida de consumo. La razón por la cual esta dimensión no está definida es que puede variar el diámetro del agujero una vez calculado el diámetro de la tubería para el subsistema de distribución. " $w$ " corresponde al posicionamiento de la entrada de agua potable en caso de que la altura de agua sea menor a la mínima necesaria. La razón por la cual esta dimensión no esté definida es que el cálculo de la altura mínima de agua en el tanque se lo realizará en el D.M. del subsistema de distribución.

El tanque presentará una inclinación en su eje longitudinal de 5:1000 con el objetivo de impedir la existencia de burbujas de aire en su interior y favorecer su salida por la purga de aire cuando el tanque cilíndrico se llene. [20]

Si bien las canaletas que traen el agua lluvia captada se encuentran juntas a la pared de la casa, el tanque necesita conservar una distancia de la edificación mínima de 10 cm por la estructura que lo sostendrá a la altura requerida.

### 2.3.3. D.M. del subsistema de acondicionamiento térmico

Se estimará que la temperatura del agua captada es equivalente a la temperatura mínima promedio anual del ambiente.

Tabla 2.6. Temperaturas máxima promedio, mínima promedio y promedio de la ciudad de Quito. (Desarrollo de la Tabla 1.3)

Mes	T máxima promedio °C	T mínima promedio °C	T promedio °C
Enero	18,42	6,64	12,53
Febrero	17,7	7,36	12,53
Marzo	18,34	7,02	12,68
Abril	17,96	7,02	12,49
Mayo	18,4	6,62	12,51
Junio	18,62	6,08	12,35
Julio	18,96	6,02	12,49
Agosto	19,32	5,44	12,38
Septiembre	19,58	5,98	12,78
Octubre	18,88	6,44	12,66
Noviembre	18,6	5,96	12,28
Diciembre	18,34	6,56	12,45
<b>Media</b>	<b>18,59</b>	<b>6,43</b>	<b>12,51</b>

El área de captación inicial se calcula con la relación presente en la Ecuación 1.11. Esta área, si bien puede ser utilizada directamente para la implementación del sistema de colección solar, se la utiliza como base de cálculo para un área que asegure satisfacer la demanda energética.

$$50 < \frac{V}{A_c} < 180$$

$$\frac{V}{180} < A_c$$

$$A_c > \frac{120}{180} = 0,667$$

El área de captación inicial debe ser mayor a  $0,667m^2$ . Se debe hacer uso de la fracción solar térmica con el fin de calcular el área de colección real a partir de la demanda energética para llevar el agua a los requisitos del sistema (Tabla 2.1). Para



ello es necesario primero el cálculo de la carga térmica diaria necesaria con el uso de la Ecuación 1.4.

Para este cálculo se partirá con una temperatura inicial correspondiente a la media de las mínimas promedio según la Tabla 2.6 y una temperatura final de 60 °C, correspondiente a las capacidades del colector solar [43].

$$E_a = V * \rho * C_p * (T_f - T_o)$$

$$E_a = 0,120 \text{ m}^3 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (60^\circ\text{C} - 6,428^\circ\text{C})$$

$$E_a = 26910,29 \text{ kJ}$$

Conocida la carga energética diaria necesaria y el área inicial; además que se selecciona un colector solar plano de cubierta simple, se procede a calcular la fracción solar térmica con el uso de las Ecuación 1.7, Ecuación 1.8, Ecuación 1.9, Ecuación 1.10 y Ecuación 1.6. Donde la radiación solar aplicable es la suma de la radiación solar directa (Figura 1.3) más la difusa (Figura 1.4) debido a que un colector solar plano aprovecha ambas.

$$X = A_c * \frac{F_r U_L \frac{F_r'}{F_r} (100 - \bar{T}_a) * \Delta t}{E_{am}}$$

$$X = 0,667 * \frac{7 * 1 * (100 - 12,51) * (30 * 24 * 3600)}{26910287 * 30}$$

$$X = 1,31153$$

$$Y = A_c * \frac{F_{r(\tau\alpha)_n} \frac{F_r'}{F_r} \left(\frac{\tau\alpha}{\tau\alpha_n}\right) * N_M \bar{H}_T}{E_{am}}$$

$$Y = 0,667 * \frac{0,8 * 1 * 0,95 * 30 * \left(\frac{2100 + 800}{365} * 3600000\right)}{(26910287 * 30)}$$

$$Y = 0,5388$$

$$X_c = X * \left(\frac{V}{75}\right)^{-0,25}$$

$$X_c = 1,312 * \left(\frac{120}{75}\right)^{-0,25}$$

$$X_c = 1,166$$

$$X_{cc} = X_c * \frac{11,6 + 1,18 T_{ACS} + 3,68 T_{red} - 2,32 T_a}{100 - T_a}$$

$$X_{cc} = 1,166 * \frac{11,6 + 1,18 * 60 + 3,68 * 6,428 - 2,32 * 12,511}{100 - 12,511}$$

$$X_{cc} = 1,0267$$

$$f = 1,929Y - 0,065X_{cc} - 0,245Y^2 + 0,0018X_{cc}^2 + 0,0215Y^3$$

$$f = 1,929 * (0,53880142) - 0,065 * 1,02671988 - 0,245 * (0,53880142)^2 + 0,0018 * 1,02671988^2 + 0,0215(0,53880142)^3$$

$$f = 0,9067$$

Una vez conocido el valor de la fracción solar térmica ya se puede obtener la energía que realmente debe ser aportada diariamente por el colector solar plano mediante la Ecuación 1.5.

$$E_a = f * E_c$$

Tal que:

$$E_c = \frac{E_a}{f}$$

$$E_c = \frac{26910,287kJ}{0,9067}$$

$$E_c = 29677,85 kJ$$

La energía que debe ser aportada por el colector solar plano en teoría es igual a la energía colectada; sin embargo, este proceso de intercambio energético no es ideal y en la realidad su eficiencia anual está contemplada por la Ecuación 1.12.

$$\eta = F_r(\tau\alpha)_n - F_r U_L \frac{(T_e - T_a)}{I_s/t}$$

$$\eta = 0,8 - 7 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * \frac{(6,428 - 12,511)^\circ C}{\frac{(2100000 + 800000) \frac{Wh}{m^2}}{365 * 12h}}$$

$$\eta = 0,85$$

Finalmente, haciendo uso de la Ecuación 1.3 se puede calcular el área real de colección.

$$E_c = \eta * I_s * A_c$$

Tal que:

$$A_c = \frac{E_c}{\eta * I_s}$$
$$A_c = \frac{(29677,854 * 0,000277778) kWh}{0,85 * \frac{(2100 + 800) \frac{kWh}{m^2}}{365}}$$
$$A_c = 1,17 m^2$$

Se ha calculado que el colector solar plano de un solo fluido de cubierta siempre necesita un área de colección mínima de  $1,17m^2$ . De tal forma que como propuesta para el SUPACS se impone un colector solar plano de dimensiones  $1m \times 1,5m$ . El colector solar plano más pequeño disponible en el mercado, que cumple con las condiciones que se han tomado en cuenta para el cálculo, tiene un área de colección solar útil de  $1,78m^2$  y cuyas dimensiones son  $2,009 \times 1,009 m$  tomado del catálogo de la marca Termocan [44]. Este último es el que se usará para el dimensionamiento final del sistema.

#### 2.3.4. D.M. del subsistema de distribución

Para cumplir con un correcto funcionamiento por parte de este subsistema, se va a encontrar la relación más adecuada entre la presión necesaria del agua, su caudal y la sección transversal del tubo que la conduce. A continuación, se describen las consideraciones pertinentes tomadas para este análisis:

- A parte de la ducha, que es el principal destino de diseño, se tomará en cuenta en los cálculos la presencia de dos conexiones en T correspondientes a bifurcaciones de flujo para su suministro al lavamanos del baño y a otro en el cual se considera las distintas aplicaciones que el usuario puede dar al agua acondicionada excluyendo su disposición en la cocina de la vivienda para evitar su consumo como agua para beber.
- Se considerará que los destinos descritos no serán usados simultáneamente. Es así como a continuación se evaluará solamente la línea más crítica: la de la ducha.
- Se identifica que el caudal para el consumo de ACS en la ducha debe estar cercano a  $Q = 0,1 l/s$  (Tabla 2.1).

- Las cargas de velocidad en el tanque son despreciables, mientras que a la salida ya son involucradas en el coeficiente de pérdidas de la ducha “ $K_{ducha}$ ” [14].
- Las presiones barométricas tanto a la entrada como a la salida de la línea de distribución son iguales.
- La viscosidad del agua corresponderá a la temperatura de 20°C, a esta temperatura el líquido tendrá mayor dificultad para circular [14].

$$\nu = 1,004E - 6 \text{ m}^2/\text{s}$$

- Todas las conexiones son roscadas.
- Los tubos serán del material plástico PP.
- Se requiere de la presencia de una válvula a continuación del tanque de almacenamiento que cumplirá con la función de cortar el flujo de agua frente a circunstancias adversas en la línea de distribución.

Puede observarse en la Figura 2.15, la ducha se encuentra al mismo nivel que el borde inferior del tanque de almacenamiento. En el procedimiento siguiente se buscará la mínima diferencia de alturas ( $dz$ ), en metros de columna de agua, entre la acometida del tanque y la línea que satisfaga el caudal mínimo referido.



Figura 2.15. Definición del parámetro  $dz$ , y de los puntos de entrada y salida de la línea.

El procedimiento siguiente es un cálculo iterativo realizado en el “software EES” en el cual se necesitó de la Ecuación 2.13, Ecuación 2.14, Ecuación 2.15, Ecuación 2.16, Ecuación 2.17 y Ecuación 2.18, conjuntamente con la información expuesta más adelante para evaluar el desempeño del subsistema al utilizar tubos de media y de una pulgada de diámetro. Las incógnitas para el sistema de ecuaciones propuesto son:

$h_L$ ; Pérdidas de carga totales [m]

$dz$ ; Diferencia de alturas entre los puntos 1 y 2 [m]

$Re_{d1}$ ; Número de Reynolds

$V_{d1}$ ; Velocidad del flujo en el interior de la línea [m/s]

$f_{d1}$ ; Factor de fricción de Darcy-Weisbach

Para la tubería de una pulgada de diámetro se identifica la necesidad de una reducción a media pulgada y de un tramo corto de tubo de esta sección para poder anexar a la ducha a este mismo subsistema. Es entonces que para este caso se describen tres variables más correspondientes al flujo después de la reducción identificadas según el subíndice "d1", para el tramo de una pulgada y "d2", para el de media pulgada de diámetro:

$Re_{d2}$ ; Número de Reynolds

$V_{d2}$ ; Velocidad del flujo en el interior de la línea [m/s]

$f_{d2}$ ; Factor de fricción de Darcy-Weisbach

De esta forma, las ecuaciones en las que se identifican estas variables (Ecuación 2.13, Ecuación 2.16 y Ecuación 2.14 ó Ecuación 2.15) para ambas secciones de tubería en el caso del análisis de la línea de una pulgada serán duplicadas agrandando al sistema de ecuaciones a resolver. La Ecuación 2.18, definida más adelante, también será duplicada en vista de ser la relación directa entre el diámetro de la sección del tubo y el caudal circulante.

Según sea la naturaleza del flujo determinada por la magnitud del número de Reynolds al hacer uso de la Ecuación 2.13, se hará uso de la Ecuación 2.14 si el flujo es laminar o de la Ecuación 2.15 para cuando el flujo sea turbulento. En el segundo caso, el valor de la rugosidad de las paredes internas del tubo ( $\epsilon$ ) fue tomado de la Figura de anexos 7. "En la mayoría de las condiciones prácticas, el flujo en una tubería circular es laminar para  $Re_d \leq 2300$ , turbulento para  $Re_d \geq 4000$ , y transicional entre ellos" [14].

Ecuación 2.13. Número adimensional de Reynolds:

$$Re_d = \frac{V_d * d}{\nu}$$

Ecuación 2.14. Factor de fricción de Darcy-Weisbach para flujo laminar:

Fuente: [25]

$$f_d = \frac{64}{Re_d}$$

Ecuación 2.15. Factor de fricción de Darcy-Weisbach para flujo turbulento:

Fuente: [25]

$$\frac{1}{f_d^{1/2}} = -2 * \log\left(\frac{\epsilon/d}{3,7} + \frac{2,51}{Re_d * f_d^{1/2}}\right)$$

Donde:

$Re_d$ : Número adimensional de Reynolds en función del diámetro

$V_d$ : Velocidad del fluido [m/s]

$d$ : Diámetro correspondiente al tramo de tubo de sección circular [m]

$\nu = 1,004E - 6$  [m<sup>2</sup>/s] : Viscosidad cinemática del fluido

$f_d$ : El factor de fricción de Darcy-Weisbach

$\epsilon = 0,0015$  mm: Rugosidad de las paredes internas de la tubería

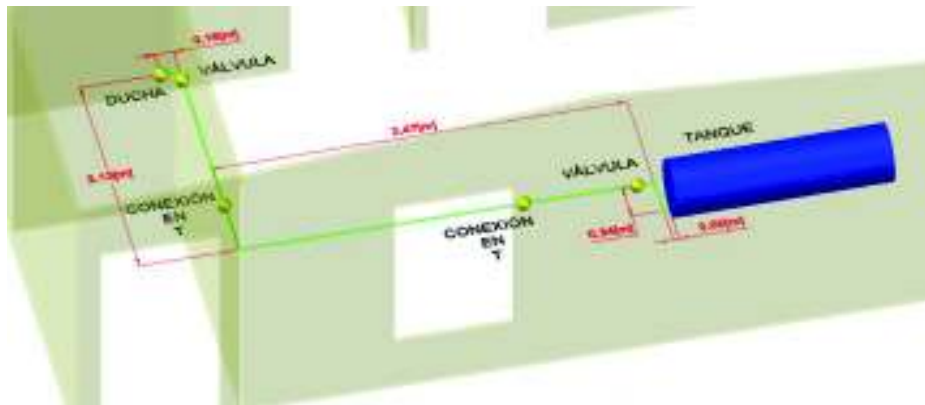


Figura 2.16. Trazo de la línea de distribución.

El valor de pérdidas a lo largo de toda la línea se encuentra tras la suma de las pérdidas mayores y las menores según puede identificarse en la Ecuación 2.16. Las pérdidas mayores son las que se producen en tramos rectos de tubería dependiendo de la longitud y el diámetro de la tubería, así como de la viscosidad y la velocidad del fluido. Las pérdidas menores son las que se producen en cualquier perturbación que encuentra la corriente en alguna sección: ensanchamiento, estrangulación, válvulas, codos, curvas, orificios de entrada y de salida, entre otros [14].

Ecuación 2.16. Ecuación de pérdidas de carga:

Fuente: [25]

$$h_L = h_f + \sum h_m = \frac{V_d^2}{2 * g} * \left(\frac{f_d * L_d}{d} + \sum K\right)$$

Donde:

$h_f$ : Las pérdidas mayores [m]

$h_m$ : Las pérdidas menores [m]

$V_d$ : La velocidad del flujo a través de la línea [m/s]

$g = 9,8 \frac{m}{s^2}$ ; La aceleración de la gravedad

$f_d$ : El factor de fricción de Darcy-Weisbach

$L_d$ : La longitud de la línea correspondiente al tramo de diámetro definido [m]

$d$ : El diámetro del tubo [m]

$K$ : El coeficiente de pérdida puntual para cada uno de los dispositivos de la línea

El número de dispositivos presentes en este subsistema es claramente apreciable en la Figura 2.16. Además, sus coeficientes de pérdida se encuentran tabulados en la Figura de anexos 6.

El coeficiente de pérdidas de la contracción súbita  $K_{SC}$  únicamente tendrá un valor para el análisis al caso en que se use un diámetro de tubo superior a media pulgada de diámetro debido al requerimiento de la ducha presente al final de la línea. Su magnitud es definida a partir de la Figura de anexos 5.

Las válvulas identificadas en la Figura 2.16 son válvulas de bola cuyo coeficiente de pérdidas es despreciable.

De esta forma, la Ecuación 2.16 para el caso en que se evalúa a la tubería de una pulgada de diámetro se expresa de la siguiente forma (nótese una segunda parte en su desarrollo correspondiente al segundo tramo de tubería identificada por los subíndices):

$$h_L = \frac{V_{d1}^2}{2 * g} * \left( \frac{f_{d1} * L_{d1}}{d1} + (\#_{codos-d1} * K_{codos-d1} + \#_{CxT} * K_{CxT} + K_{SC}) \right) + \frac{V_{d2}^2}{2 * g} * \left( \frac{f_{d2} * L_{d2}}{d2} + (\#_{codos-d2} * K_{codos-d2} + K_{ducha}) \right)$$

Donde:

$h_L$ : Pérdidas de carga totales [m]

$V_{d1}$ : Velocidad del flujo para el primer tramo [m/s]

$V_{d2}$ : Velocidad del flujo para el segundo tramo [m/s]

$f_{d1}$ : El factor de fricción de Darcy-Weisbach para el primer tramo

$f_{d2}$ : El factor de fricción de Darcy-Weisbach para el segundo tramo

$L_{d1} = 5,90 \text{ m}$ ; La longitud del primer tramo de la línea crítica

$L_{d2} = 0,25 \text{ m}$ ; La longitud del segundo tramo de la línea crítica

$g = 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ; La aceleración de la gravedad

$d1 = 0,0254 \text{ m}$ ; El diámetro del primer tramo

$d2 = 0,0127 \text{ m}$ ; El diámetro del segundo tramo

$\#_{\text{codos-d1}} = 3$ ; El número de codos de  $90^\circ$  presente en el primer tramo

$K_{\text{codos-d1}} = 1,5$ ; Coeficiente de pérdidas de codos comunes de  $90^\circ$  de una pulgada de diámetro.

$\#_{\text{codos-d2}} = 1$ ; El número de codos de  $90^\circ$  presente en el primer tramo

$K_{\text{codos-d2}} = 2$ ; Coeficiente de pérdidas de codos comunes de  $90^\circ$  de una pulgada de diámetro.

$\#_{\text{CxT}} = 2$ ; El número de conexiones en T (flujo en línea)

$K_{\text{CxT}} = 0,9$ ; Coeficiente de pérdidas de conexión en T en la dirección del flujo

$K_{\text{ducha}} = 12$ ; Coeficiente de pérdidas de la ducha [14]

$K_{\text{SC}} = 0,315$ ; Coeficiente de pérdidas de la contracción súbita

El comportamiento del flujo en una tubería está descrito por la Ecuación 2.17 en donde se relaciona presiones estáticas, velocidades del flujo en los extremos de la línea, alturas relativas y pérdidas energéticas bajo el principio de conservación de la energía en un volumen de control dado.

Ecuación 2.17. Ecuación de la energía para flujo en estado estable:

Fuente: [25]

$$\frac{P_A}{\rho * g} + \alpha_A * \frac{V_A^2}{2 * g} + z_A = \frac{P_B}{\rho * g} + \alpha_B * \frac{V_B^2}{2 * g} + z_B + h_L$$

Donde:



Los subíndices  $A$  y  $B$  corresponden a las características del fluido en los dos puntos extremos considerados según la Figura 2.15 a lo largo de la tubería.

$P_A$  y  $P_B$ : Presión del fluido [Pa]

$V_A$  y  $V_B$ : Velocidad del fluido [m/s]

$\alpha_A$  y  $\alpha_B$ : Coeficiente de pérdida a la entrada y a la salida de la línea. Sus valores son de 1,06 para flujo turbulento y de 2 para flujo laminar [14]

$g = 9,8 \frac{m}{s^2}$ ; Aceleración de la gravedad

$\rho$ : Densidad del agua 1000 [kg/m<sup>3</sup>]

$z_A$  y  $z_B$ : Cotas de los niveles de agua a la entrada y a la salida [m]

$h_L$ : Valor de pérdidas a lo largo de toda la línea [m]

La Ecuación 2.31 debido a las consideraciones de velocidad del flujo en los puntos extremos, así como la nulidad de variación en la presión barométrica en los mismos determinadas al comienzo de este subcapítulo sufrirá la siguiente simplificación:

$$\frac{P_A}{\rho * g} + \alpha_A * \frac{V_A^2}{2 * g} + z_A = \frac{P_B}{\rho * g} + \alpha_B * \frac{V_B^2}{2 * g} + z_B + h_L$$

$$z_A = z_B + h_L$$

Como:

$$dz = z_A - z_B$$

Entonces:

$$dz = h_L$$

El caudal que fluye a través de la sección circular se encuentra relacionado directamente en la Ecuación 2.18 con el diámetro del tubo y la velocidad con que se desplaza.

Ecuación 2.18. Caudal para un tubo de sección circular:

$$Q = V_d * \left( \frac{1}{4} * \pi * d^2 \right)$$

Donde:

$Q$ : Caudal [m<sup>3</sup>/s]

$V_d$ : Velocidad del fluido [m/s]

$d$ : Diámetro del tubo [m]

De esta forma, para el análisis a una línea principal de media pulgada de diámetro se tiene un sistema de cinco ecuaciones lineales con cinco incógnitas mientras que para el caso de la tubería de una pulgada un sistema de ocho ecuaciones con ocho incógnitas. A continuación, se muestran los resultados devueltos por el software EES en la Tabla 2.7 tanto para el análisis realizado para una tubería de una pulgada de diámetro como de media pulgada de diámetro.

Tabla 2.7. Primeros resultados para el subsistema de distribución.

	$h_L$ [m]	$dz$ [m]	$Re_{d1}$	$Re_{d2}$	$V_{d1}$ [m/s]	$V_{d2}$ [m/s]	$f_{d1}$	$f_{d2}$
Tubería de media pulgada	2,098	2,098	9986	---	0,7894	---	0,03099	---
Tubería de una pulgada	0,4914	0,4914	4993	9986	0,1974	0,7894	0,03747	0,03108

Apartando el caso de la tubería de media pulgada, una columna de agua de 0,5 m no puede aplicarse en este diseño. Al ser el caudal de 0,1 l/s una especificación del tipo “deseo”, puede ser ignorado siempre y cuando se consiga un adecuado y satisfactorio flujo del agua.

Mediante simples mediciones de caudal en varias duchas comunes se ha encontrado que un caudal de 0,044 l/s es aceptable. De este valor se partirá nuevamente con el proceso descrito anteriormente cuyos resultados se identifican en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Resultados definitivos para el subsistema de distribución.

	$h_L$ [m]	$dz$ [m]	$Re_{d1}$	$Re_{d2}$	$V_{d1}$ [m/s]	$V_{d2}$ [m/s]	$f_{d1}$	$f_{d2}$
Tubería media pulgada	0,4317	0,4317	4394	---	0,3473	---	0,03888	---
Tubería de una pulgada	0,09704	0,09704	2197	4394	0,08684	0,3473	0,04803	0,03895

Se escoge el uso de un tubo de una pulgada de diámetro para la red de distribución, así como una diferencia de alturas mínima de 0,1 m. De esta forma se describen las siguientes condiciones:

- La conexión del tanque a la línea de distribución, al igual que la ducha, se encontrará a una altura de  $1,8m$ .
- El tanque deberá presentar un nivel inferior mínimo de agua  $dz \geq 0,1 m$ . Es así como la entrada del suministro auxiliar de agua al tanque, proveniente de la red pública de agua potable, deberá estar en una posición que garantice este parámetro.

### **2.3.5. D.M. del subsistema de saneamiento del agua lluvia**

Cabe mencionar nuevamente que el agua lluvia captada no será destinada para el consumo de los usuarios (beber), sino para su uso en la ducha, el lavamanos del baño y otras aplicaciones que no requieran de exigencias considerables en cuanto a calidad.

Retomando el curso del diseño: ambas canaletas (anteriormente dimensionadas) se juntan para guiar al agua lluvia al interior del tanque por medio del bajante [20].

A partir del caudal captable máximo de  $0,5343 l/s$ , encontrado en el D.M. del subsistema de captación, se pretende definir un método de saneamiento pre-almacenamiento del agua lluvia. Esto se hace con la intención de obtener una calidad del agua que cumpla con las especificaciones del producto (Tabla 2.1).

El estudio de Collantes Hidalgo y Pillo Flores [2] para potabilizar al agua lluvia no puede ser tomado en cuenta para este diseño debido al bajo caudal que puede circular por el filtro de arena que resultó ser de  $0,1321 GPM$  ( $0,00815 l/s$ ) con una presión de suministro de  $2 m.c.a.$  En el mercado se encontró una serie de filtros que también no pueden ser aplicados por motivo de la presión mínima que requieren de la línea, la cual no debe ser inferior a  $5 m.c.a.$  A modo de ejemplo para el entendimiento de esta situación se describe que el cartucho comercial “Rotoplas FES 0.1-R” necesita de una presión de  $7 kgf/cm^2$  ( $70 m.c.a.$ ) para mantener un caudal de  $24 l/min$  ( $0,4 l/s$ ) [45].

Los filtros de materiales alternativos, aun presentando un impedimento no tan considerable para el flujo del agua a diferencia de los otros dos ya mencionados, también resultan ser bastante inadecuados según puede observarse en la Figura 2.17 en la que constan los resultados de caudal circulante en una sección de una pulgada para una presión de  $3 m.c.a.$  En el mejor de los casos se tiene a la tela de algodón que, al estar dispuesta en 10 capas se identifica un flujo de agua de  $1,92 l/min$  ( $0,032 l/s$ ) [41].

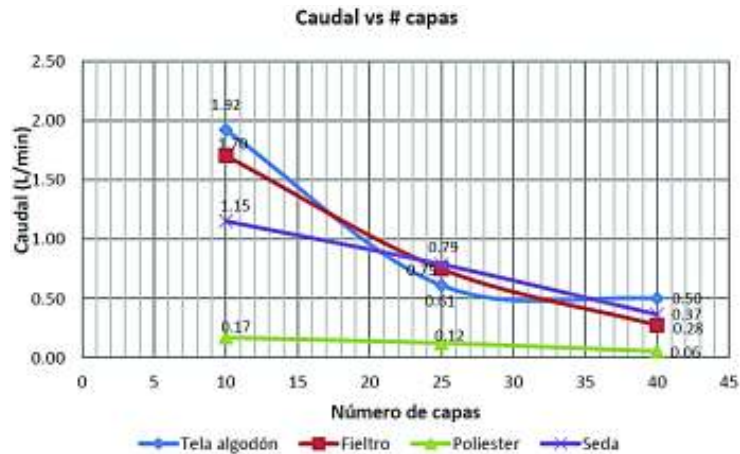


Figura 2.17. Curvas de caudal para filtros de materiales alternativos.  
Fuente: [41]

Debido a no poder añadir un filtro de pre-almacenamiento en el sistema, se opta por implementar un dispositivo de evacuación del primer flujo (Figura 1.33). Este elemento constará de una cámara denominada “tanque de primeras lluvias” que contendrá y aislará adecuadamente a las primeras aguas que acarrearán la mayor cantidad de sólidos contaminantes. Según la Figura 2.18, el bajante raíz que irá dirigido a este dispositivo presentará dos direccionamientos: el primero que transportará al agua limpia hacia el interior del tanque de almacenamiento y el otro que terminará siendo el bajante secundario encargado de eliminar el exceso de agua una vez el tanque de almacenamiento se haya llenado.

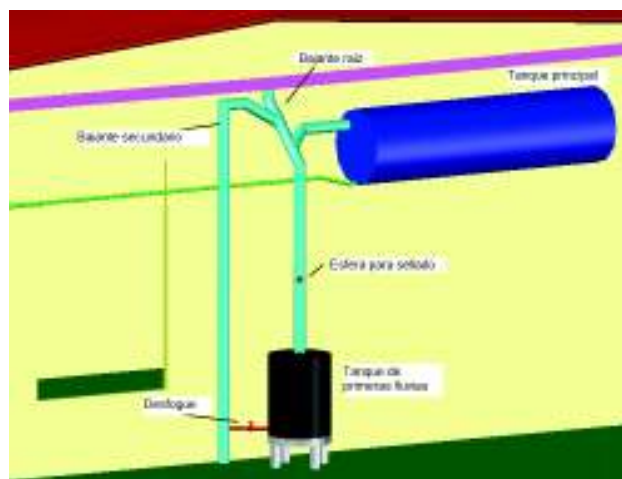


Figura 2.18. Subsistema de Saneamiento.

El bajante, como comúnmente suele hacerse, será del material PVC y será de diámetro 3 pulgadas según la Tabla 1.12 y la Tabla 1.13. Los elementos para participar en la constitución del bajante son codos de 90° y 45°, y bifurcaciones en “Y” o en cruz.

Ya explicado el funcionamiento del subsistema de saneamiento, se requiere que el tanque en toda su longitud se encuentre a un nivel inferior del brazo por el que nace el bajante secundario dirigido preferiblemente a un sumidero (Figura 2.19). Es así como se describe la Condición B:

$$\xi > 0$$

Condición B

Además, la purga de aire que cumple con la función de expulsar el aire del tanque conforme este se llena deberá satisfacer la Condición C para asegurar que el agua excedente baje por el bajante secundario (Figura 2.18 y Figura 2.19).

$$\psi > 0$$

Condición C

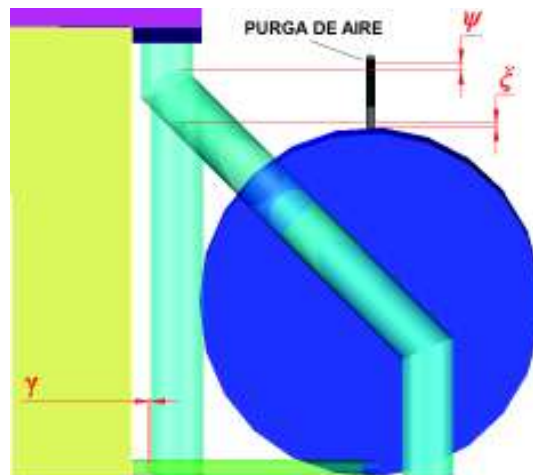


Figura 2.19. Condiciones para el diseño del subsistema de saneamiento de agua lluvia.

También se debe considerar la limitación en cuanto a qué tan cerca de la pared el bajante secundario puede estar. La línea principal de distribución regida por un tubo de una pulgada de diámetro, con un diámetro exterior de 32 mm, definirá la Condición D según puede evidenciarse en la Figura 2.19.

$$\gamma > 0$$

Condición D

La purga de aire es un elemento que puede ser parte íntegra del tanque principal o que puede ser añadida utilizando tubos de polipropileno de media pulgada dispuestos en forma de arco (Figura 2.20). Su función es eliminar el aire cuyo espacio está siendo ocupado por el agua que ingresa al tanque.

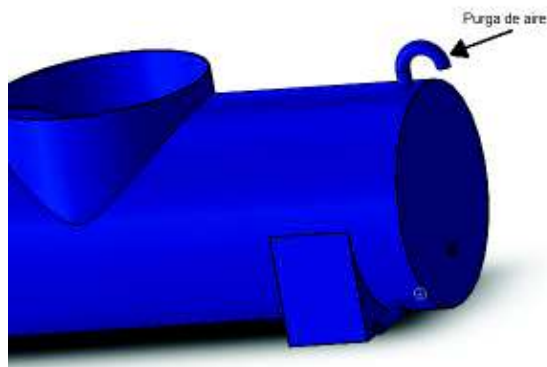


Figura 2.20. Purga de aire.

La esfera es un elemento cuya importancia radica en la separación del agua sucia (primeras aguas) y el agua limpia que está en camino a su almacenamiento. Una vez lleno el tanque de primeras lluvias, este elemento ascenderá con el nivel por el bajante raíz hasta encontrarse con un tope para impedir la contaminación del agua limpia a ser almacenada (Figura 2.21).

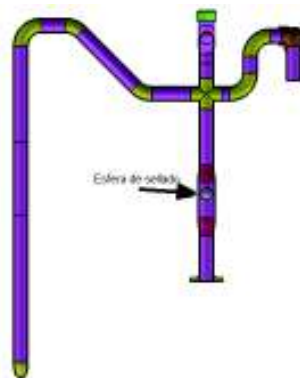


Figura 2.21. Esfera de sellado.

El tanque de primeras lluvias es el dispositivo encargado de almacenar al agua inicial. La Ecuación 1.13, para la superficie de captación de  $72,68 \text{ m}^2$ , sugiere que se separen  $145,36 \text{ l}$  correspondientes a las primeras aguas lluvia.

Estos últimos resultados implican que para cada día de lluvia se descartarán los primeros  $145,36 \text{ l}$ . En conjunto con los resultados obtenidos en el D.M. del subsistema de almacenamiento se tiene entonces que cada día común de lluvia en el cual se pueden captar  $488,6 \text{ l}$  de agua, el tanque de almacenamiento dimensionado tanto para 2 y 3 días de reserva se llenará. Durante la época seca cuando se puede captar  $235,6 \text{ l}$  solo será posible almacenar  $90,4 \text{ l}$  cada 5to día en que llueve.

El desfogue no es más que una conexión entre el tanque de primeras lluvias y el bajante secundario para drenar al agua sucia contenida una vez haya dejado de llover.

## 2.4. Diseño de detalle

El diseño de detalle es la etapa de diseño donde se toman los bocetos funcionales del diseño de materialización y se le añade practicidad. Esto quiere decir que se toman en cuenta materiales, tolerancias, acabados, modos de fabricación y procesos de ensamblaje. Al finalizar el diseño de detalle se obtienen planos de cada una de las piezas que conforman el sistema y un plano de conjunto definitivo.

### 2.4.1. D.D. del subsistema de captación

El subsistema de captación está compuesto por la superficie captadora y una red de canaletas. La superficie captadora, que es el techo de la vivienda, no admite cambios o modificaciones; sin embargo, la red de canaletas sí. Las dimensiones de las canaletas ilustradas en las Figura 2.5 y Figura 2.6 ya toman en cuenta circunstancias adversas de funcionamiento. En la industria ecuatoriana las canaletas son fabricadas de tol galvanizado material que también es el seleccionado para el SUPACS. Dado que el SUPACS no está compuesto por ninguna pieza en movimiento no se requieren acabados especiales. Para su ensamblaje es necesario realizar perforaciones cada 0,5m para su sujeción en el techo y en la pared. Con estas consideraciones se obtiene el plano de la red de canaletas en el ANEXO VI.

### 2.4.2. D.D. del subsistema de almacenamiento

El tanque se construirá de HDPE. Este debe ser ubicado sobre un soporte de superficie plana y horizontal. De esta manera la única carga que soporta el mismo es la presión hidrostática interna. La norma ASME en su sección VIII (que tiene algunos polímeros como el HDPE en su alcance) especifica que si la carga de presión interna de un tanque es única o mucho más representativa que otras cargas, el espesor se debe calcular con la Ecuación 2.19 o Ecuación 2.20 [46].

Ecuación 2.19. Espesor de un tanque cilíndrico si la presión no excede 0,385SE:

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P}$$

Ecuación 2.20. Espesor de un tanque cilíndrico si la presión no excede 1,25SE:

$$t = \frac{PR}{SE + 0,4P}$$

Donde:

t: Espesor [m]

$P$ : Presión [Pa]

$R$ : Radio [m]

$SE$ : Esfuerzo de fluencia [Pa]

La presión hidrostática de un fluido puede ser calculada con la Ecuación 2.21.

Ecuación 2.21. Presión hidrostática de un líquido:

$$P = \rho * g * h$$

Donde:

$P$ : Presión [Pa]

$\rho$ : Densidad del fluido [ $kg/m^3$ ]

$h$ : Altura del fluido [m]

$g$ :  $9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ , aceleración de la gravedad

Con el uso de la Ecuación 2.21 se determina que la presión hidrostática interna es de  $4905 Pa$  y el esfuerzo de fluencia del HDPE es de  $22,1 MPa$  dando una relación de  $2,22E - 4$ . Con esta relación el espesor mínimo del tanque se calcula con la Ecuación 2.19 dando como resultado un espesor mínimo de  $1,11E - 4 m$ .

La transferencia de calor a través de las paredes del tanque hacia el ambiente al caer la noche es un fenómeno que debe ser analizado para determinar cuánto tiempo después el agua sigue estando en condiciones de uso. Para ello se asume que el tanque es un cilindro perfecto y se desprecian cambios de geometría como tapas, tomas de agua y soportes. Los extremos del tanque se asumen como paredes planas uniformes.

Para el cálculo del flujo de calor se utilizan las Ecuación 2.22, Ecuación 2.23, Ecuación 2.24, Ecuación 2.25. [47]

Ecuación 2.22. Resistencia térmica por conducción en una pared plana:

$$R_{cond-p} = \frac{e}{k * A}$$

Ecuación 2.23. Resistencia térmica por convección en una pared plana:

$$R_{conv-p} = \frac{1}{h * A}$$



Ecuación 2.24. Resistencia térmica por conducción en un cilindro hueco:

$$R_{cond-c} = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{X * 2 * \pi * k}$$

Ecuación 2.25. Resistencia térmica por convección en un cilindro hueco:

$$R_{conv-c} = \frac{1}{2 * \pi * r * h * X}$$

Donde:

$R_{cond-p}$ : Resistencia térmica por conducción en una pared plana [K/W]

$R_{conv-p}$ : Resistencia térmica por convección en una pared plana [K/W]

$R_{cond-c}$ : Resistencia térmica por conducción en un cilindro hueco [K/W]

$R_{conv-c}$ : Resistencia térmica por convección en un cilindro hueco [K/W]

$e$ : Espesor de la pared plana [m]

$k$ : Conductividad térmica [W/mK]

$A$ : Área de la pared plana [m<sup>2</sup>]

$h$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m<sup>2</sup> K]

$r_o$ : Radio externo del cilindro hueco [m]

$r_i$ : Radio interno del cilindro hueco [m]

$X$ : Longitud del cilindro [m]

Ecuación 2.26. Flujo de calor en función de la variación de temperatura y resistencia total:

$$q' = \frac{\Delta T}{R_{tot}}$$

Donde:

$q'$ : Transferencia de calor por unidad de longitud [W/m]

$\Delta T$ : Variación de temperatura [K]

$R_{tot}$ : Resistencia térmica total [K/W]

La transferencia de calor total es el resultado de sumar la transferencia a través de la pared cilíndrica y por las paredes planas en la base y tope del cilindro. Para el cálculo

se asume que la temperatura del agua en el interior es de  $40^{\circ}\text{C}$ . Esto para promediar los comportamientos que se dan cuando el agua cambia su temperatura desde  $60^{\circ}\text{C}$  hasta  $20^{\circ}\text{C}$ .

$$R_p = \frac{e}{k * A} + \frac{1}{h * A}$$

$$R_c = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{X * 2 * \pi * k} + \frac{1}{X * 2 * \pi * r * h}$$

$$q'_{tot} = q'_p + q'_c$$

$$q'_{tot} = 2 * \frac{\Delta T}{R_p} + \frac{\Delta T}{R_c}$$

$$q'_{tot} = \Delta T \left( \frac{2}{R_p} + \frac{1}{R_c} \right)$$

$$q'_{tot} = \Delta T \left( \frac{2}{\frac{e}{k * A} + \frac{1}{h * A}} + \frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{r}{r_i}\right)}{2 * \pi * k} + \frac{1}{2 * \pi * r * h}} \right)$$

Condición E

Con la Condición E es posible estudiar el comportamiento del flujo de calor en todo el tanque para diferentes espesores del mismo. Comportamiento que es evidenciable en la Figura 2.22.

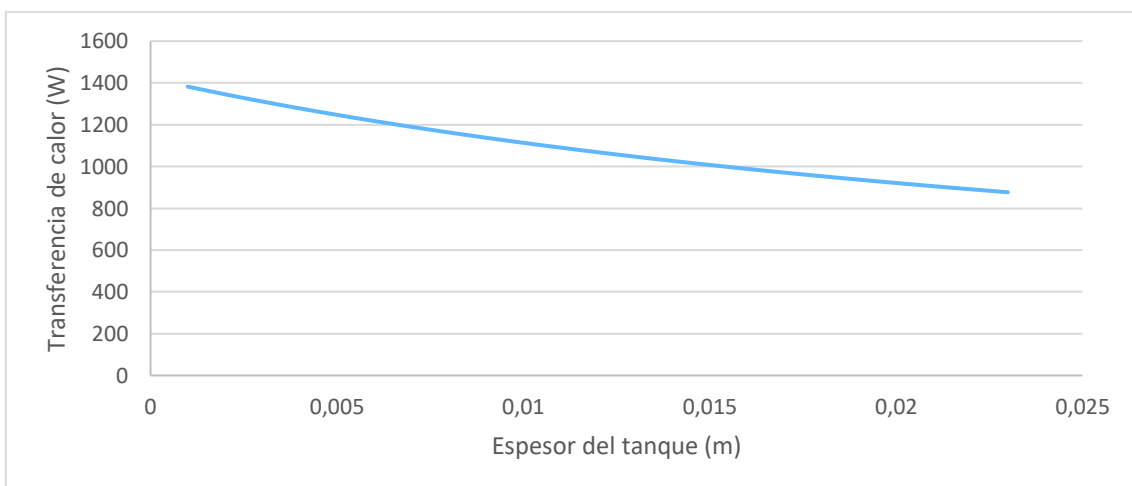


Figura 2.22. Transferencia de calor vs. Espesor del tanque.

Si bien es apreciable en la figura Figura 2.22 un decremento de la transferencia de calor al incrementar el espesor del tanque asumiendo el peor de los casos ( $h = 25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ). Al tener un espesor de  $5\text{mm}$  se ha logrado disminuir la transferencia de calor en alrededor de  $140\text{W}$ . Se selecciona un espesor de  $2\text{mm}$  únicamente por facilidad de fabricación y por ser espesores comunes en tanques comerciales.

Con el espesor seleccionado se tiene una transferencia de calor de  $1345,7\text{W}$  durante la noche. La potencia se define como la razón entre la energía y el tiempo como se describe en la Ecuación 2.27; y siendo la energía definida por la Ecuación 1.4, se puede obtener la variación de temperatura en función del tiempo.

Ecuación 2.27. Definición de potencia:

$$P = \frac{E}{t}$$

Donde:

$P$ : Potencia [ $W$ ]

$E$ : Energía [ $J$ ]

$t$ : Tiempo [ $s$ ]

$$P = \frac{V * \rho * C_p * (\Delta T)}{t}$$

$$\Delta T = \frac{P}{V * \rho * C_p}$$

$$\Delta T = \frac{1345,7\text{W}}{0,240\text{m}^3 * \frac{1000\text{kg}}{\text{m}^3} * 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}}}$$

$$\Delta T = 0,00134 \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}}$$

$$\Delta T = 4,82 \frac{^\circ\text{C}}{\text{h}}$$

Se ha calculado de la diferencia de temperatura en función del tiempo es de  $4,82 \frac{^\circ\text{C}}{\text{h}}$ . Desde los  $60^\circ\text{C}$  hasta los  $25^\circ\text{C}$  hay una diferencia de  $35^\circ\text{C}$  que requerirían de  $7,25\text{h}$  para que dicho cambio de temperatura ocurra. El período de tiempo sin incidencia de radiación solar es de  $12\text{h}$ . Por lo tanto. Se determina que el agua es apta para su uso durante casi toda la noche sin necesidad de ofrecer un aislamiento adicional al tanque.

De los resultados del D.M. del subsistema de distribución se coloca la boya de regulación de mínimo nivel a 10cm desde el fondo del tanque. Además, gracias a añadir un sistema de regulación de nivel mínimo ya no es necesario un tanque con capacidad para 3 días sino únicamente para 2. Esto hace que utilizando las Ecuación 2.11 y Ecuación 2.12 la nueva longitud del tanque sea de 1,91m. Adicionalmente, se considera las conexiones de 1/2" como roscadas FPT y un agujero para una tapa con el propósito de dar mantenimiento y ensamblaje en el interior del tanque. Estas consideraciones se constatan en el plano del tanque en el ANEXO VI.

La boya de regulación del nivel mínimo alimentará al tanque cuando el nivel de agua en su interior sea menor a 10cm para evitar que el tanque se vacíe en su totalidad.

### **2.4.3. D.D. del subsistema de distribución**

La línea de distribución, encargada de transportar al agua acondicionada constará de tubos de polipropileno (PP). A diferencia de los dos ramales que parten como bifurcaciones, en las que instantáneamente presentan reducciones a media pulgada, la línea principal de una pulgada que abastece directamente a la ducha presentará lo más cercano posible a su final la respectiva reducción y luego la válvula de esfera.

Siendo las paredes de la vivienda prefabricadas, el subsistema de distribución no podrá ser contenido en el interior de las mismas. Es así como tanto la línea principal como los ramales requieren de elementos de sujeción a la pared cada metro, así como también alrededor de cada válvula y en cada bifurcación. La línea principal solo atravesará una vez dichas paredes en su curso según puede observarse en la Figura 2.16.

La dilatación lineal que sufrirá la línea de distribución debe considerarse en la localización de los puntos de sujeción, es por esta razón que debe evitarse la colocación de las abrazaderas del tubo cerca de los cambios de dirección del flujo reduciendo aquellas tensiones generadas por este fenómeno.

Si bien es cierto que el subsistema de almacenamiento cumple satisfactoriamente al preservar al agua con una temperatura caliente durante toda la noche. Es necesario conocer la influencia de la línea de distribución en cuanto al enfriamiento del agua durante su curso desde el tanque hasta su principal destino: la ducha.

Para el siguiente estudio se retoman nuevamente la Ecuación 2.13, Ecuación 2.15, Ecuación 2.16, Ecuación 2.17 y Ecuación 2.18 usadas en Diseño de Materialización de este mismo subsistema (con sus respectivos datos en cuanto a dispositivos,

simplificaciones y una viscosidad cinemática del agua de  $4,968E - 7 \text{ m}^2/\text{s}$  correspondiente a la temperatura de  $60^\circ\text{C}$ ) por su vital importancia en la definición de la naturaleza del flujo en conjunto además de otras ecuaciones referentes a la transferencia de calor en un nuevo cálculo iterativo realizado en el “software EES”. Asumiendo condiciones de estado estable con un nivel de agua de  $0,1 \text{ m}$  en el tanque, una línea principal de tubos de polipropileno de 1 pulgada de diámetro con una longitud de  $5,9 \text{ m}$  y con una terminación de  $0,25 \text{ m}$  correspondiente a tubos de media pulgada de diámetro, y nulidad de viento en los alrededores se analizará el escenario nocturno con una temperatura del agua almacenada de  $60^\circ\text{C}$  para identificar el decremento máximo de temperatura que esta puede sufrir en su curso por la línea de distribución.

En el ámbito concerniente a la transferencia de calor se interpretará a la línea íntegra como si fuese en su totalidad de una sección de una pulgada en vista de que el tramo correspondiente a la sección de media pulgada en el diseño es apenas un 4% de toda esta línea a evaluar (es decir, se la ignora). Esto no quiere decir que se desprecia la influencia del tramo de tubo de media pulgada en la caracterización del flujo porque en este ámbito afecta completamente a los resultados. Es entonces que el número de Reynolds, encontrado para el flujo de agua en la sección de una pulgada en la caracterización de la naturaleza del flujo, será tomado para el análisis térmico.

Se identifican tres resistencias térmicas según puede observarse en la Figura 2.23 correspondientes a la convección interna, a la conducción a través de las paredes del tubo, y a la transferencia de calor con el exterior.

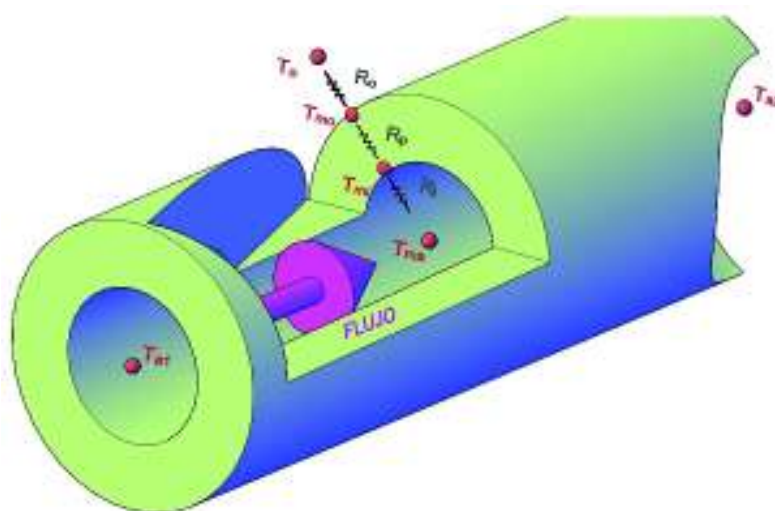


Figura 2.23. Interpretación del análisis térmico del subsistema de distribución.

Es entonces que se desarrollan las siguientes expresiones encargadas de describir las relaciones de flujo de calor en el subsistema:

Ecuación 2.28. Escape de energía interna por convección interna:

$$P = (1/R_i) * (T_{ma} - T_{mi})$$

Ecuación 2.29. Escape de energía interna por conducción:

$$P = (1/R_p) * (T_{mi} - T_{mo})$$

Ecuación 2.30. Escape de energía interna por transferencia de calor al exterior:

$$P = (1/R_o) * (T_{mo} - T_o)$$

Ecuación 2.31. Energía interna perdida:

$$P = Cp * \dot{m} * (T_{a1} - T_{a2})$$

Donde:

$P$ : El calor perdido que fluye hacia el exterior [ $W$ ]

$R_i$ : Resistencia térmica por convección interna [ $K/W$ ]

$R_p$ : Resistencia térmica por conducción en un cilindro hueco [ $K/W$ ]

$R_o$ : Resistencia térmica por transferencia de calor al exterior [ $K/W$ ]

$Cp = 4184 J/kg K$ : El calor específico del agua

$T_{ma}$ : Temperatura media del agua [ $K$ ]

$T_{mi}$ : Temperatura media de las paredes internas del tubo [ $K$ ]

$T_{mo}$ : Temperatura media de las paredes externas del tubo [ $K$ ]

$T_o = 279,6 K$ : Temperatura del aire exterior y alrededores

$T_{a1} = 333,2 K$ : Temperatura del agua de ingreso a la línea de distribución

$T_{a2}$ : Temperatura de salida del agua de la línea de distribución [ $K$ ]

$\dot{m}$ : Flujo másico del agua [ $kg/s$ ]

Es entonces que, existiendo un flujo de agua portador de energía térmica, se utilizarán las temperaturas medias de todo el subsistema considerando la disminución en la temperatura del agua desde su punto de partida hasta el destino propuesto. De esta forma se identificarán las resistencias térmicas y el flujo de calor perdido usando las

diferencias de temperaturas medias entre cada interfase expuestas en la Figura 2.23. La temperatura media del agua a través de la línea de distribución queda definida según la Ecuación 2.32.

Ecuación 2.32. Temperatura media del agua:

$$T_{ma} = \frac{T_{a1} + T_{a2}}{2}$$

Las resistencias térmicas se encuentran a partir de la Ecuación 2.33, Ecuación 2.34, y Ecuación 2.35. La resistencia por transferencia de calor al exterior no es más que la acción conjunta de otras dos resistencias en paralelo correspondientes a los fenómenos de convección con el aire exterior y a la transferencia de calor por radiación con los alrededores identificadas en la Ecuación 2.36 y la Ecuación 2.37.

Ecuación 2.33. Resistencia térmica por conducción en un cilindro hueco:

$$R_p = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2 * k * \pi * L}$$

Ecuación 2.34. Resistencia térmica en un cilindro por convección interna:

$$R_i = \frac{1}{h_i * (2 * r_i * L)}$$

Ecuación 2.35. Resistencia térmica por transferencia de calor con el exterior:

$$R_o = \frac{1}{\frac{1}{R_{co}} + \frac{1}{R_{rad}}}$$

Ecuación 2.36. Resistencia térmica en un cilindro por convección externa:

$$R_{co} = \frac{1}{h_{co} * (2 * r_o * L)}$$

Ecuación 2.37. Resistencia térmica en un cilindro por radiación:

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} * (2 * r_o * L)}$$

Donde:

$R_p$ : Resistencia térmica por conducción en un cilindro hueco [K/W]

$R_i$ : Resistencia térmica por convección interna [K/W]

$R_o$ : Resistencia térmica por transferencia de calor con el exterior [K/W]

$R_{co}$ : Resistencia térmica por convección externa [K/W]

$R_{rad}$ : Resistencia térmica por radiación con el exterior  $[K/W]$

$r_o = 1,6E - 2 \text{ m}$  : Radio externo del tubo

$r_i = 1,27E - 2 \text{ m}$  : Radio interno del tubo

$k = 0,167 \text{ W/m K}$  : Conductividad térmica del polipropileno

$L = 6,15 \text{ m}$  : La longitud de la línea

$h_i$ : Coeficiente de convección interna  $[W/m^2 K]$

$h_{co}$ : Coeficiente de convección externa  $[W/m^2 K]$

$h_{rad}$ : Coeficiente de radiación con el exterior  $[W/m^2 K]$

Los coeficientes de convección dependen completamente de la naturaleza del fluido/flujo. Es por esta razón que son hallados a través de métodos diferentes. Se asume que la temperatura de la película del fluido de la cual se determinan sus propiedades es la misma de la superficie interna y externa para  $h_i$  y  $h_{co}$ , respectivamente.

El primero de ellos encuentra su deducción en la Ecuación 2.38 y en la Ecuación 2.39. Cabe destacar que, en base a los resultados del Diseño de Materialización de este subsistema, el flujo de agua siempre se encontrará en régimen turbulento.

Ecuación 2.38. Número de Nusselt para régimen turbulento y flujo de calor hacia el exterior:

$$Nu_i = 0,023 * (Re_d)^{4/5} * Pr_i^{0,3}$$

Ecuación 2.39. Coeficiente de convección interna:

$$h_i = \frac{Nu_i * k_i}{2 * r_i}$$

Donde:

$Nu_i$ : Número de Nusselt en la pared interna del tubo

$Re_d$ : Número de Reynolds

$Pr_i = 3,15$ : Número de Prandtl para el agua

$h_i$ : Coeficiente de convección interna  $[W/m^2 K]$

$k_i = 650E - 3 \text{ W/m K}$ : Conductividad térmica del agua



$r_i = 1,27E - 2 \text{ m}$  : Radio interno del tubo

El coeficiente de convección externa es desarrollado en la Ecuación 2.40, Ecuación 2.41, Ecuación 2.42, Ecuación 2.43 y Ecuación 2.44 en base a principios de convección natural.

Ecuación 2.40. Coeficiente de expansión:

$$\beta = \frac{2}{\widehat{T}_{mo} + \widehat{T}_o}$$

Ecuación 2.41. Número de Grashof:

$$Gr_o = \frac{(2 * r_o)^3 * \beta * g * (\widehat{T}_{mo} - \widehat{T}_o)}{\nu_o^2}$$

Ecuación 2.42. Número de Rayleigh:

$$Ray_o = Gr_o * Pr_o$$

Ecuación 2.43. Número de Nusselt para  $10^4 < Ray < 10^9$ :

$$Nu_o = 0,53 * (Ray_o)^{0,25}$$

Ecuación 2.44. Coeficiente de convección externa:

$$h_{co} = \frac{Nu_o * k_o}{2 * r_o}$$

Donde:

$\beta$ : Coeficiente de expansión [1/K]

$\widehat{T}_{mo}$ : Temperatura media de las paredes externas del tubo [K]

$\widehat{T}_o = 279,6 \text{ K}$ : Temperatura media de las paredes externas del tubo

$Gr_o$ : Número de Grashof

$r_o = 1,6E - 2 \text{ m}$ ; Radio externo del tubo

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$ : Aceleración de la gravedad

$\nu_o = 1,589E - 5 \text{ m}^2/\text{s}$ : Viscosidad cinemática del aire

$Pr_o = 0,707$ : Número de Prandtl para el aire exterior

$Ray_o$ : Número de Rayleigh para el aire exterior

$Nu_o$ : Número de Nusselt para el aire exterior

$h_{co}$ : Coeficiente de convección externa [ $W/m^2 K$ ]

$k_o = 26,3E - 3 W/m K$ : Conductividad térmica del aire

Cabe destacar que para los casos tanto de las temperaturas medias internas y externas de las paredes del tubo ( $\widehat{T}_o$  y  $\widehat{T}_{mo}$ ) es imperativo el uso de temperaturas absolutas. Razón por la cual estos parámetros llevan el acento sobre sus símbolos.

El coeficiente de radiación con el exterior es definido a partir del desarrollo de la expresión de la ley de Stefan–Boltzmann expresado en la Ecuación 2.45 [47].

Ecuación 2.45. Coeficiente de radiación con el exterior:

$$h_{rad} = \varepsilon * \sigma * (\widehat{T}_{mo}^2 + \widehat{T}_o^2) * (\widehat{T}_{mo} + \widehat{T}_o)$$

$h_{rad}$ : Coeficiente de radiación con el exterior [ $W/m^2 K$ ]

$\varepsilon = 0,95$ : Emisividad del polipropileno

$\sigma = 5,67E - 8 W/m^2 K^4$ : Constante de Stefan–Boltzmann

$\widehat{T}_{mo}$ : Temperatura media de las paredes externas del tubo [ $K$ ]

$\widehat{T}_o = 279,6 K$ : Temperatura media de las paredes externas del tubo

La última relación por mencionar es la Ecuación 2.46 para el flujo másico a través de una sección circular.

Ecuación 2.46. Flujo másico en un tubo de sección circular.

$$\dot{m} = V * \rho_i * (\pi * r_i^2)$$

Donde:

$\dot{m}$  : Flujo másico de agua [ $kg/s$ ]

$V$  : Velocidad lineal del agua [ $m/s$ ]

$\rho_i = 984,25 kg/m^3$  : Densidad del agua

$r_i = 1,27E - 2 m$  : Radio interno del tubo

Contando desde la Ecuación 2.28 hasta la Ecuación 2.46 se tienen 19 ecuaciones correspondientes al área de transferencia de calor que sumadas a las 8 ecuaciones que describen la naturaleza del flujo se tiene un sistema de 27 ecuaciones para encontrar las 27 incógnitas listadas en la Tabla 2.9 con los respectivos resultados devueltos por el software “EES”. Cabe recalcar que el caudal, a diferencia del cálculo

realizado en el Diseño de Materialización, ahora es una incógnita porque el parámetro  $dz = 0,1m$  ya consta de un valor definido.

Tabla 2.9. Resultados para el subsistema de distribución.

1	$V_{d1}[m/s]$	0,08895	10	$P[W]$	339,4	19	$T_{mo}[K]$	319,1
2	$V_{d2}[m/s]$	0,3558	11	$R_i[K/W]$	0,002908	20	$h_{rad}[W/m^2 K]$	5,804
3	$Re_{d1}$	4547	12	$R_p[K/W]$	0,03579	21	$h_{co}[W/m^2 K]$	8,084
4	$Re_{d2}$	9095	13	$R_o[K/W]$	0,1165	22	$\beta[1/K]$	0,003341
5	$f_{d1}$	0,0385	14	$R_{co}[K/W]$	0,2001	23	$Gr_o$	167828
6	$f_{d2}$	0,03185	15	$R_{rad}[K/W]$	0,2787	24	$Ray_o$	118654
7	$h_L[m]$	0,1	16	$T_{ma}[K]$	332,2	25	$Nu_o$	9,837
8	$\dot{m}[kg/s]$	0,04436	17	$T_{a2}[K]$	331,3	26	$h_i[W/m^2 K]$	700,7
9	$Q[m^3/s]$	4,51E-05	18	$T_{mi}[K]$	331,2	27	$Nu_i$	27,38

En vista del decremento en la temperatura del agua de  $1,9^\circ C$  desde el tanque hasta su destino se determina que los tubos de polipropileno son más que suficientes para impedir que el líquido no se vea considerablemente afectado en cuanto a su temperatura. Es más, como este análisis fue realizado para el caso en que se favorece completamente a la transferencia de calor por partir con agua a  $60^\circ C$  y la temperatura mínima promedio del ambiente de  $6,43^\circ C$ , se puede afirmar que el agua nunca experimentará una reducción considerable en su temperatura durante su curso por la línea de distribución una vez se haya alcanzado el estado estable en este proceso de transporte.

#### 2.4.4. D.D. del subsistema de saneamiento del agua lluvia

Los tubos encargados del transporte del agua lluvia al tanque, al tanque de primeras lluvias y/o al sumidero no admiten cambios u modificaciones de lo antes ya descrito en el D.M. Las correspondientes longitudes de los tramos de tubo recto son las más favorables en cuanto al nivel o altura del tanque (la más alta posible), y constan en el plano en el ANEXO VI.

El tanque de primeras lluvias será un tanque cilíndrico de radio  $25\text{ cm}$  y alto de  $76,4\text{ cm}$ . Según la Ecuación 2.21, y conociendo que la columna de agua por sobre la base de este dispositivo es de  $2\text{ m}$  se tiene una presión de  $19600\text{ Pa}$ . Ya conocido el esfuerzo de fluencia del polietileno de alta densidad de  $22,1\text{MPa}$ , se usa la Ecuación 2.19 para determinar que el acumulador de primeras aguas lluvia debe tener una pared de espesor mínimo de  $2,2187E - 4\text{ m}$ . Siendo ajeno al mercado trabajar con tanques cuyo espesor de pared tan reducidos, se aceptará para esta aplicación todo tipo de recipiente, tanque, balde o contenedor.

La esfera, el bajante raíz, el asiento y el tope son elementos que se encontrarán bastante relacionados en cuanto a sus dimensiones. Siendo el bajante de 3 pulgadas de diámetro, una pelota de tenis de mesa de 50 mm de diámetro servirá adecuadamente. Esto implicará que tanto el tope como el asiento (cortes de láminas de caucho común) en sí deban ser de un espesor no inferior a 1,4 cm para que limiten el desplazamiento de la esfera (Figura 2.24).

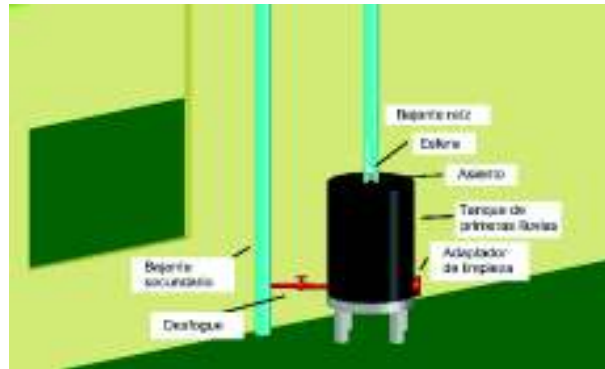


Figura 2.24. Esquema del tanque de primeras lluvias para el SUPACS.

A diferencia del tope que no será más que un anillo adherido con silicón después del último direccionamiento hacia el tanque de primeras lluvias, el asiento deberá permitir el paso del agua a pesar de que la esfera se encuentre descansando sobre él. Es así como dicho elemento deberá verse recortado según puede observarse en la Figura 2.25.



Figura 2.25. Asiento e interacción con la esfera.

El desfogue será un tubo de una pulgada con la correspondiente válvula de bola. Además, se incluirá en el tanque de primeras lluvias un adaptador de limpieza como recurso de prevención de obstrucciones en este proceso de purga.

Finalmente, la purga de aire que cumple la Condición E y la Condición C no admite cambios u modificaciones.

## 2.5. Construcción

La construcción es la etapa final de un proceso de diseño. En esta se crea un prototipo que puede o no ser a escala del diseño original. Esto depende de lo que se intente conseguir con su construcción. El demostrar que su funcionamiento es el adecuado es el fin principal de la construcción de un prototipo a escala.

### 2.5.1. El escalamiento

Conociendo las dimensiones de  $6$  y  $2m$  correspondientes a los lados “ $a$ ” y “ $b$ ”, la superficie de colección planteada según la Ecuación 2.1 resultó ser de  $12m^2$ .

Siendo el techo del prototipo de una sola caída, basta con una sola canaleta. Es entonces que esta área de colección es también el área asignada a dicha canaleta.

$$A_{canaleta} = A_c$$

Con un coeficiente de escorrentía  $K = 0,9$  correspondiente a una superficie de colección metálica según la Tabla 1.11, y los datos de la precipitación fluvial más intensa ( $\zeta = 65mm$ ,  $t_p = 8400s$ ) [12], de la Ecuación 2.2 se obtiene un caudal a captar por la canaleta de  $0,0835 l/s$ .

Siendo su magnitud demasiado diminuta, las dimensiones de la canaleta (“ $y$ ” y “ $m$ ”) son también bastante pequeñas como para no poder usar la Tabla 2.2. Sin afectar la integridad de este estudio se va a tratar con un tubo PVC de tres pulgadas de diámetro adecuadamente cortado para que cumpla con este propósito.

Dada una pendiente del canal de  $0,005$ , un coeficiente de Manning de  $0,015$  (ANEXO II), una canaleta de sección circular con un diámetro de  $0,075 m$  cortada a la mitad, tomando en consideración las relaciones pertinentes para encontrar el área de la sección transversal ( $A_t$ ) y el radio hidráulico ( $R_h$ ), se hace uso de la Ecuación 1.1 para encontrar el máximo caudal en canal abierto que podrá ser conducido por esta canaleta:

$$Q = 0,745 l/s$$

De esta forma la canaleta a usar es más que suficiente para satisfacer la conducción del agua lluvia para el peor de los casos.

Es evidente que la cantidad del agua lluvia colectada es directamente proporcional al área de captación, entonces queda en plena evidencia que tanto el volumen del tanque

de almacenamiento como el del tanque de primeras lluvias también son proporcionales a este parámetro.

Como el diseño ya realizado para la casa tipo “Sierra-Oriente 2” (Figura 1.9) identifica unos volúmenes de 240 l y de 150 l correspondientes al tanque de almacenamiento y al tanque de primeras lluvias para un área de captación de 72,68 m<sup>2</sup>, se tiene entonces que para el sistema trabaje óptimamente con un área de 12 m<sup>2</sup> ambos elementos deben tener las capacidades de 40 l y de 25 l.

### 2.5.2. Preparación de la estructura

El proceso de construcción comenzó por el mantenimiento correctivo de una estructura metálica ubicada en la terraza del edificio de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Los elementos de esta que no pudieron ser reparados fueron reemplazados por nuevos. Los perfiles fueron soldados a las varillas y estas a su vez a las placas base de la estructura (Figura 2.24). Los perfiles que conforman la estructura fueron lijados y pintados con pintura anticorrosiva (Figura 2.27). Para evitar corrosión y fortificar la estructura y se fundieron plintos de concreto alrededor de cada base de columna (Figura 2.26).



Figura 2.26. Base de la estructura.



Figura 2.27. Recubrimiento anticorrosivo.



Figura 2.28. Plinto de concreto.

### 2.5.3. Construcción subsistema de captación

El subsistema de captación se construyó utilizando como superficie de captación un techo construido de planchas de zinc. En total se utilizaron 9 planchas de 2,4 m de longitud por un ancho aprovechable de 0,7m dando una superficie de captación total del prototipo de  $15,12m^2$  (Figura 2.29 y Figura 2.30). El sistema de canaletas del diseño original fue reemplazado por un tubo de PVC de 3 pulgadas de diámetro y el extremo de la tubería fue sellado con una tapa (Figura 2.31, Figura 2.32).



Figura 2.29. Construcción de la superficie de captación prototipo (A).



Figura 2.30. Construcción de la superficie de captación prototipo (B).



Figura 2.31. Canaletas del prototipo.



Figura 2.32. Tapa de canaleta.

#### 2.5.4. Construcción subsistemas de almacenamiento y saneamiento

Los subsistemas de almacenamiento y saneamiento se construyeron en simultáneo. Para el tanque de almacenamiento se utilizó un tanque de 15 galones (58,6 l) y para el tanque de primeras lluvias se utilizó un tanque de 20 l. El bajante utilizado corresponde a tubería de PVC de 2 pulgadas. En vez de lo que se había identificado anteriormente como “la esfera”, “el tope” y “el asiento”, se utilizaron dos reducciones concéntricas de 3 a 2 pulgadas de diámetro y una botella plástica para cumplir satisfactoriamente con la función de sellar el bajante principal una vez el tanque de primeras lluvias se haya llenado (Figura 2.33 y Figura 2.34).



Figura 2.33. Sello del tanque de primeras lluvias.



Figura 2.34. Bajante.

El tanque de almacenamiento cuenta con ocho conductos que lo comunican con la entrada de agua, la distribución, entrada y salida del colector solar plano, entrada de agua del suministro público, dos conexiones a un visor de nivel y una purga de aire (Figura 2.35, Figura 2.36 y Figura 2.37).





Figura 2.35. Tanque de almacenamiento, visor de nivel y salida a la distribución.



Figura 2.36. Purga de aire y entrada de agua captada.



Figura 2.37. Entrada y salida al colector solar plano y entrada de agua del suministro público.

El tanque de primeras lluvias posee tres aberturas que corresponden a la entrada de agua contaminada de 2 pulgadas de diámetro, una toma de agua para uso no sanitario de 1 pulgada de diámetro y un tapón para mantenimiento de 3 pulgadas de diámetro.



Figura 2.38. Tanque de primeras lluvias, entrada de agua contaminada, toma de agua no sanitaria y tapón de mantenimiento.

### 2.5.5. Construcción de los subsistemas de distribución y acondicionamiento térmico

El subsistema de distribución se construyó con las especificaciones exactas del diseño original incluyendo las mismas dimensiones y accesorios (Figura 2.39). No se construyó un subsistema de acondicionamiento térmico, únicamente se ensambló un colector solar plano, propiedad del laboratorio, ya construido que cumpla con los requerimientos mínimos del diseño original.



Figura 2.39. Construcción del subsistema de distribución.

La Figura 2.40 muestra la vista posterior del ensamblaje final de los subsistemas de captación con su bajante, de almacenamiento, de saneamiento y de acondicionamiento térmico.



Figura 2.40. Bajante y subsistemas de almacenamiento, saneamiento y acondicionamiento térmico vista posterior.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resultados

Se ha obtenido el diseño del SUPACS para la vivienda tipo “Sierra-Oriente 2” (Figura 1.10) además de la construcción de un prototipo de prueba en la terraza del edificio de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Conformado por 4 subsistemas principales y 1 subsistema de apoyo siendo estos el subsistema de captación, el subsistema de almacenamiento, el subsistema de acondicionamiento térmico, el subsistema de distribución y el subsistema de saneamiento.

##### 3.1.1. Subsistema de captación

El subsistema de captación está compuesto por el techo de la vivienda que consta con un área de captación de agua lluvia de  $72,68m^2$  de material Eternit y de una red de canaletas tipo J de sección  $20 \times 100 \times 82$  en milímetros de  $0,6mm$  de espesor y una longitud total de  $24,6m$  de material tol galvanizado. Los planos de la red de canaletas se encuentran en el ANEXO VI.

##### 3.1.2. Subsistema de almacenamiento

El subsistema de almacenamiento está compuesto exclusivamente por un tanque a sobre-nivel ubicado en el lado izquierdo de la vivienda. El tanque es cilíndrico y se encuentra a  $1,75m$  desde el piso. Tiene un diámetro interno de  $500mm$ , una longitud de  $1,22m$  y un espesor de  $2mm$ . Consta de una entrada de 2 pulgadas de diámetro, cuatro tomas de media pulgada de diámetro correspondientes al suministro auxiliar del agua potable, al subsistema de acondicionamiento térmico y a la purga de aire, y una toma de una pulgada de diámetro para la línea de distribución, todas roscadas bajo el estándar FPT. Los planos del tanque y la tapa respectiva se encuentran en el ANEXO VI.

Las pruebas de campo con el prototipo se visualizan en la Tabla 3.1 que muestra el nivel de agua que se ha captado con las precipitaciones ocurridas durante el período de prueba.

Tabla 3.1. Resultados de captación de agua lluvia.

Fecha	Altura de columna de agua acumulada en el tanque
13/12/2018	Lleno
21/12/2018	10 cm
6/1/2019	Lleno

7/1/2019	Lleno
10/1/2019	4 cm
12/1/2019	0 cm
13/1/2019	0 cm

### 3.1.3. Subsistema de acondicionamiento térmico

El subsistema de acondicionamiento térmico está compuesto de un colector solar plano y dos ramales de tubería de 0,5 pulgadas de diámetro para su conexión con el subsistema de almacenamiento. El colector solar plano de cubierta simple debe tener un área efectiva de  $1,5m^2$  o mayor. Los ramales de tubería son del PP para altas temperaturas.

### 3.1.4. Subsistema de distribución

El subsistema de distribución se encuentra regido por una línea principal de tubos de polipropileno de diámetro 1 *plg* que va dirigido a la ducha del baño para satisfacer la especificación de caudal de 0,1 *l/s* en este dispositivo. Irá sujeto a la pared de la vivienda con abrazaderas. Se dispondrá de una válvula a la salida del tanque para las respectivas acciones de mantenimiento y reparación de este subsistema. No requiere de aislamiento térmico debido a las prestaciones del material y dimensiones del tubo común a utilizar. Sus correspondientes planos se comparten en el ANEXO VI. El comportamiento del caudal en función de la altura de agua en el tanque se visualiza en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Tiempos transcurridos para que un litro de agua fluya según diferentes niveles de agua en el tanque.

Altura [ <i>m. c. a</i> ]	Tiempo de llenado [ <i>s</i> ]	Caudal [ <i>l/s</i> ]
0,05	31	0,032
0,06	24	0,041
0,07	23	0,043
0,08	23	0,043
0,09	23	0,043
0,10	21	0,048
0,11	21	0,048
0,12	20	0,050
0,13	19	0,053
0,14	19	0,053
0,15	19	0,053

0,16	18	0,056
0,17	18	0,056
0,18	18	0,056
0,19	18	0,056

Tras el calentamiento respectivo del agua en el interior del tanque se procedió a evaluar el gradiente de temperatura que el agua experimenta en su curso hacia la ducha. Tomando un tiempo aproximado de 2 minutos con 30 segundos para alcanzar el estado estable en la línea de distribución, partiendo con una temperatura uniforme de los 0,1 m. c. a. de agua a 49,7 °C en el tanque y una temperatura ambiente de 17,3 °C se obtuvo una temperatura final del agua de 48,4 °C. Esto implicó entonces una variación final de temperatura en el agua de 1,3 °C.

### 3.1.5. Subsistema de saneamiento

El subsistema de saneamiento, involucrando completamente a los bajantes de agua lluvia de tubos de PVC de 3 pulgadas, consiste en un tratamiento pre-almacenamiento en el cual se direccionan a las primeras aguas lluvia al tanque de primeras lluvias que no es más que un acumulador. Este dispositivo de capacidad de 140 l, en su uso será drenado gracias a una conexión en su base con un tubo de una pulgada de diámetro después de cada precipitación fluvial para favorecer a la calidad del agua almacenada en las posteriores lluvias. Los planos correspondientes a este subsistema se encuentran en el ANEXO VI.

En la Figura 3.1 se visualiza una muestra del agua del tanque principal a la izquierda y una muestra del agua del tanque de primeras lluvias a la derecha obtenidas del prototipo de pruebas.



Figura 3.1. Muestras de agua del tanque (izquierda) y del tanque de primeras lluvias (derecha)

El plano de conjunto del SUPACS está presentado en el ANEXO VI.

### 3.1.6. Costos

Los resultados obtenidos en el Diseño de Materialización en su Figura 2.11 muestran que bajo condiciones promedio el sistema trabaja satisfactoriamente. Bajo las condiciones de sequía solo será posible almacenar 90,4 l cada día de lluvia implicando que se consumirán aproximadamente 2860 l de agua de la red municipal durante un mes.

El número de meses secos, en que el SUPACS no almacenará la cantidad de agua lluvia requerida, puede ser identificado tras comparar la media de precipitación mensual (Tabla 2.4) con  $\zeta_{lim}$  cuyo valor será encontrado a partir de la Ecuación 3.1, la misma que toma los parámetros pertinentes ya calculados en el D.M. del subsistema de captación y en el D.M. del subsistema de almacenamiento conjuntamente con los datos de la Tabla 2.4 y la cantidad de agua lluvia rechazada a ser contenida en el tanque de primeras lluvias (145,36 l).

Ecuación 3.1. Precipitación mensual límite para poder almacenar la cantidad de agua lluvia requerida:

$$\zeta_{lim} = \frac{30 \text{ días} * V_{ad} + 145,36 \text{ l} * 8,2 \text{ días de lluvia}}{A_c}$$

$$\zeta_{lim} = 66 \text{ [mm]}$$

Donde:

$\zeta_{lim}$ : Precipitación mensual límite para poder almacenar la cantidad de agua lluvia requerida [mm]

$V_{ad} = 120 \text{ l/día}$ : Volumen consumo diario

$A_c = 72,68 \text{ m}^2$ : Área de captación de agua lluvia

De esta forma se distinguen 4 meses secos (junio a septiembre) en los cuales el SUPACS necesitará del suministro del agua potable de la red municipal. Es decir que, sabiendo el costo del agua potable de 0,48 \$/m<sup>3</sup>, el agua obtenida de la red para ser usada como ACS implicará un costo de \$5,49 anuales para el SUPACS, y de \$20,74 anuales para los otros sistemas de calentamiento que se abastecen completamente del agua de la red municipal de agua potable.

El tiempo de vida del proyecto es de 10 años. El SUPACS tiene un costo de inversión de \$1342,00 como se despliega en la Tabla 3.3 y un costo de operación y mantenimiento de \$25,00 anuales. A la fecha, tanto el costo del equipo como el de la respectiva instalación de un sistema de calentamiento de agua por calefón a gas es de \$ 500. El costo del tanque de 15kg de GLP bordea los \$ 25,00 sin tomar en cuenta el subsidio vigente (con subsidio bordea los \$ 2,50) sumándose también un costo de mantenimiento de \$ 100 anuales. El costo y la instalación de un calefón eléctrico representa una cifra de \$400. El costo de la energía eléctrica es de 0,0933 \$/kWh. El consumo energético medio mensual de un calefón eléctrico es de 51,0408 kWh [48, 49].

Tabla 3.3. Costos de inversión del SUPACS.

Inversiones	Costos
Colector solar plano	\$800
Tanque	\$200
Tanque de primeras lluvias	\$40
Tubería y accesorios	\$50
Esfera	\$2
Canaletas	\$100
Bajante	\$50
Mano de obra	\$100
Total	\$1.342

Se Calcula el Valor Actual Neto o “VAN” para comparar la viabilidad del SUPACS frente al uso de un calefón eléctrico y a gas en la Tabla 3.4. La tasa de interés comercial ordinaria es de 8,2% [50].

Tabla 3.4. VAN para los distintos tipos de calentamiento de agua en un periodo de 10 años.

	SUPACS	CALEFÓN GAS SIN SUBSIDIO	CALEFÓN ELÉCTRICO CON SUBSIDIO	CALEFÓN GAS CON SUBSIDIO
Costo Inicial	\$1.342,00	\$500,00	\$400,00	\$500,00
Mantenimiento anual	\$25,00	\$100,00	\$100,00	\$100,00
Costo agua para ACS	\$5,49	\$20,74	\$20,74	\$20,74
Costo anual de los cilindros	\$0,00	\$300,00	\$0,00	\$30,00
Costo anual luz eléctrica	\$0,00	\$0,00	\$57,15	\$0,00
Costo anual total por operación y mantenimiento (1er año)	\$30,49	\$420,74	\$177,89	\$150,74
VAN	\$1.544,76	\$3.297,91	\$1.582,96	\$1.502,42

### 3.1.7. Discusión

Los diseños del subsistema de captación y del subsistema de almacenamiento son adecuados. El volumen que se ha utilizado para el prototipo se encuentra en la misma relación con la superficie de captación que el tanque del diseño original con su superficie de captación correspondiente.

Si bien, el tanque que se ha diseñado sería el óptimo para el SUPACS requerido, su fabricación es viable únicamente si la producción es masiva y si se crea un plan de implementación general en la región. Para aplicaciones individuales se puede utilizar tanques comerciales con características similares al diseñado. Adicionalmente, aunque se ha calculado que un aislamiento térmico no es necesario para el tanque se recomienda implementar el diseño propuesto por Peñaherrera y Sarzosa [43]. De igual forma, el acumulador de primeras aguas lluvia puede ser un bidón, tanque o recipiente comercial adecuadamente sellado con características semejantes al diseñado en el presente proyecto.

Aún con un caudal de 0,048 l/s definido por una columna de agua de 0,1 m.c.a., el diseño del subsistema de distribución satisface con un flujo adecuado para el elemento de mayor interés: la ducha.

El colector solar plano puede ser fabricado o comprado de una marca comercial local. Es importante notar que, si se implementa un plan para la implementación de este sistema a nivel local o nacional, la cantidad de empleo en industrias locales se incrementaría y el desarrollo de tecnologías a base de energía solar tendría un despunte que puede llegar a incentivar el avance científico y tecnológico del país.

La calidad del agua captada por el SUPACS, en su tanque principal, tiene una diferencia notable con la retenida por el tanque de primeras lluvias (Figura 3.1). Mientras que la muestra del tanque principal muestra una turbidez imperceptible al ojo humano, la del tanque de primeras lluvias es mínima. Por esto se determina que el agua captada por el SUPACS puede reemplazar cualquier aplicación para uso sanitario en una residencia, con la única excepción del consumo humano.

El SUPACS obtenido está diseñado para una actividad constante a lo largo del año entero. Para su funcionamiento se necesita únicamente de energía solar y agua procedente de las precipitaciones fluviales. La ausencia de dispositivos eléctrico, electrónicos o de consumo de combustibles fósiles hace de este diseño una alternativa funcional y eficiente que aporta con la prevención de emisión de gases de efecto invernadero. Adicionalmente, tanto el tanque, las tuberías, el colector solar plano y las canaletas tiene tiempos entre mantenimientos de un año o superiores según los



fabricantes. Solamente el tanque de primeras aguas del subsistema de saneamiento requiere de una purga después de cada lluvia.

Es relativamente minúscula la diferencia entre los VAN obtenidos para los diferentes sistemas de calentamiento de agua. Sin embargo, El SUPACS mantiene la ventaja al no verse implicado en la quema de combustibles.

## 4. CONCLUSIONES

- Se diseñó exitosamente un SUPACS utilizando el método de diseño concurrente.
- En la Tabla 3.1 se identifica una anomalía con respecto a la frecuencia de las precipitaciones fluviales puesto que solo se registraron siete días de lluvia. En la Tabla 2.5 consta claramente una media de 18,8 días con precipitación para el mes de diciembre.
- La ciudad de Quito tiene una cantidad de radiación incidente tal que la energía puede ser aprovechable para la implementación de sistemas que funcionen con energía solar.
- La cantidad de precipitación fluvial en la ciudad de Quito es suficiente para un trabajo continuo del SUPACS a lo largo del año con un tiempo de reserva de 2 días.
- El tanque, al igual que la tubería, no necesitan de aislamiento térmico.
- El tanque de primeras lluvias es un dispositivo altamente eficaz en cuanto a separar las impurezas que tienden a acumularse en la superficie de captación del agua lluvia siempre y cuando sea purgado después de la precipitación fluvial.
- La aplicación del SUPACS en una vivienda de una planta, sin contar con un sistema de bombeo, está limitada en cuanto a la purificación del agua lluvia captada. La presión que pudiera ejercer una columna de agua en dichas condiciones es insuficiente para filtrarla por medios convencionales.

## 5. RECOMENDACIONES

- La ducha puede ser reemplazada por una ducha eléctrica a resistencia o de inducción como medida alternativa bajo condiciones climáticas desfavorables para el subsistema de calentamiento.
- Tanto la ducha eléctrica alternativa como el sistema de control de nivel del tanque pueden ser automatizados electrónicamente.
- Realizar un estudio predictivo de las condiciones climáticas a largo plazo para un dimensionamiento más acertado y favorable del tanque de acumulación. Si bien se constata en los resultados de este proyecto y en la tendencia histórica de las precipitaciones fluviales, su frecuencia tiene una tendencia decreciente.
- Para la independencia del SUPACS debe implementarse un sistema de control electrónico que automatice la purga del tanque de primeras lluvias bajo un reconocimiento adecuado de la culminación de la precipitación fluvial.
- Se debe impulsar con gran fuerza el desarrollo de las energías renovables puesto que nuestro país es bastante favorecido en cuanto a este tipo de recursos.
- Este trabajo puede ser aplicado no solo en Quito, sino en regiones que presenten características climáticas similares o más favorables en cuanto a la frecuencia e intensidad de las precipitaciones fluviales.
- El agua acumulada en el tanque de primeras lluvias puede ser usada para el riego de cultivos agrícolas.

## **6. TRABAJOS DERIVADOS RECOMENDADOS**

- Diseño de un sistema para la distribución de agua a presión, auxiliar al suministro municipal de agua potable para potenciar el SUPACS. De esta forma se conseguirá satisfacer un mayor número de aplicaciones para el agua lluvia colectada.
- Diseño y construcción de un pluviómetro. Así se podrá estudiar el comportamiento y las tendencias climáticas en cuanto al ámbito de las precipitaciones fluviales.

## 7. REFERENCIAS

- [1] C. Field, V. Barros, D. Dokken, K. Mach y M. Mastrandrea, «Cambio Climático 2014 Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Obtenido de Grupo Intergubernamental sobre expertos en el Cambio Climático,» 2014. [En línea]. Available:  
[https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg2/ar5\\_wgII\\_spm\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf).
- [2] M. F. Collantes Hidalgo y M. V. Pillo Flores, Diseño, construcción y prueba de un prototipo de bajo costo para obtener agua potable a partir de agua lluvia mediante filtración y radiación solar, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2003.
- [3] «Programa de Saneamiento Ambiental para el Distrito Metropolitano de Quito,» Marzo 2011. [En línea]. Available:  
[https://www.aguaquito.gob.ec/sites/default/files/documentos/plan\\_maestro\\_agua\\_potable.pdf](https://www.aguaquito.gob.ec/sites/default/files/documentos/plan_maestro_agua_potable.pdf).
- [4] CEPAL, «Diagnóstico de las estadísticas del agua en Ecuador,» Quito, 2012.
- [5] UNESCO, «Agua para todos, agua para la vida,» Ediciones UNESCO, Mundi-Prensa, París, 2004.
- [6] INAMHI, «Anuario meteorológico 2009,» Quito, 2012.
- [7] INAMHI, «Anuario Meteorológico 2010,» Quito, 2012.
- [8] INAMHI, «Anuario Meteorológico 2011,» Quito, 2014.
- [9] INAMHI, «Anuario Meteorológico 2012,» Quito, 2015.
- [10] INAMHI, «Anuario Meteorológico 2013,» Quito, 2017.
- [11] INAMHI, «Boletín climatológico anual 2015,» Quito, 2016.
- [12] A. García, «El Comercio,» 15 Mayo 2017. [En línea]. Available:  
<https://www.elcomercio.com/actualidad/inamhi-registro-mayo-lluvias-quito.html>.

- [13] K. A. Mejía López, Estudio de factibilidad para la implementación de dos sistemas diseñados para el manejo de agua en el edificio EARME de la Escuela Politécnica Nacional, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [14] Y. Cengel y J. M. Cimbala, Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones, 7ma ed., México, D.F.: McGraw-Hill, 2006.
- [15] Ministerio-de-Energía-de-Chile,  
«Colectores solares para calefacción de agua caliente sanitaria en viviendas de la región metropolitana,» Santiago, 2014.
- [16] W. B. Group, «Global Solar Atlas,» 2016. [En línea]. Available: <http://globalsolaratlas.info>.
- [17] MIDUVI, «NEC-11. Cap14 Energías Renovables,» Quito, 2011.
- [18] MIDUVI, «NEC-11 Norma Hidrosanitaria NHE Agua,» 2011. [En línea]. Available: <https://inmobiariadja.files.wordpress.com/2016/09/nec2011-cap-16-norma-hidrosanitaria-nhe-agua-021412.pdf>.
- [19] MITCO-E, «Guía Técnica para el agua caliente sanitaria central,» 2010. [En línea]. Available: [www.idae.es/file/9897/download?token=MK9XdL3-](http://www.idae.es/file/9897/download?token=MK9XdL3-).
- [20] C. Despins, Guidelines for Residential Rainwater Harvesting Systems Handbook 1st Ed, Toronto: CMHC, 2012.
- [21] MIDUVI, «Programa nacional de vivienda social,» 2013. [En línea]. Available: [www.habitatyvivienda.gob.ec](http://www.habitatyvivienda.gob.ec).
- [22] MIDUVI, «Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/>.
- [23] G. González, «Permacultura México,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.permacultura.org.mx/es/herramientas/formulario/area-captacion-lluvia/>.
- [24] F. L. Nara, Sistema Colector Agua Lluvia: estudio de factibilidad para la aplicación residencial en el A.M.B.A, Buenos Aires: Instituto Tecnológico Buenos Aires, 2012.

- [25] F. White, Fluid Mechanics 4th Ed., Rhode Island: McGraw-Hill, 1998.
- [26] F. Mesa Claros, Colector Solar de Placa Plana, Bogotá: Universidad Nacional, 2002.
- [27] GSTRIATUM, «Energía solar: tipos de colectores solares,» 2010. [En línea]. Available:  
[http://www.gstriatum.com/energiasolar/articulosenergia/11\\_Colectores\\_solares.html](http://www.gstriatum.com/energiasolar/articulosenergia/11_Colectores_solares.html).
- [28] F. A. Saphier Sepulveda, Estudio de factibilidad económica para la instalación de colectores solares térmicos, para agua caliente sanitaria en los departamentos "Lomas del río Departamentos" con la ley N° 20365 de franquicia tributaria, Valdivia: Universidad Austral de Chile, 2013.
- [29] R. Herrera, Diseño de una cama calefactora para regiones frías, Lima: Universidad Católica de Perú, 2011.
- [30] «Universidad de Castilla-La Mancha,» [En línea]. Available: <https://www.uclm.es/>.
- [31] V. Salguero, Valoración de colectores solares térmicos planos de vacío para la producción de frío., Leganés: Universidad Carlos III de Madrid, 2008.
- [32] J. Duffie y W. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [33] G. M. PNUD, Sistema solar térmico termosifón para viviendas unifamiliares, Santiago, 2010.
- [34] [En línea]. Available: <http://ferreterialaspalmasnayon.com/>.
- [35] [En línea]. Available: <http://www.hidrovaltda.com>.
- [36] [En línea]. Available: <https://instalacionesyeficienciaenergetica.com/ahorro-energetico-con-aislamiento-termico-para-tuberias/>.
- [37] INEN, «NTE INEN 1108 Agua potable. Requisitos 4ta Ed,» Quito, 2014.
- [38] OMS, «Guías para la calidad del agua potable,» Génova, 2006.

- [39] Islaurbana, «Tlaloque Ficha Técnica,» 05 2017. [En línea]. Available: <http://islaurbana.mx/wp-content/uploads/2017/05/FICHA-TECNICA-TLALOQUE.pdf>.
- [40] E. Condorchem , «AGUASRESIDUALES.INFO,» 30 05 2014. [En línea]. Available: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/filtracion-mediante-membranas-para-el-tratamiento-de-las-aguas-residuales>.
- [41] C. L. Demera Charcopa y K. C. Pacheco Condo, Análisis de la utilización de materiales alternativos en la remoción de sólidos totales presentes en el agua cruda, Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2015.
- [42] C. Riba, Diseño Concurrente, Barcelona: ETSEIB-UPC, 2002.
- [43] F. A. Peñaherrera Vaca y H. A. Sarzosa Terán, Instalación de colectores solares planos para calentamiento de agua en la facultad de ingeniería mecánica y levantamiento del potencial energético para la instalación a gran escala, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2012.
- [44] Termocan, Catálogo de productos, Cantabria: Termocan, 2011.
- [45] Rotoplas, «Instructivo Filtro Estandar,» 2013. [En línea]. Available: <https://rotoplas.com.mx/wp-content/uploads/2017/07/Instructivo-Filtro-Estandar.pdf>.
- [46] ASME, «Rules For Construction of Pressure Vessels,» de *2004 ASME Boiler & Pressure Vessel Code*, New York, ASME, 2004, p. Sección VIII.
- [47] T. L. Bergman, D. P. Dewitt, F. P. Incropera y A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7th Ed.*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [48] O. F. Loayza Collaguazo y M. E. Mullo Pallo, Diseño y construcción de una ducha de inducción, Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi, 2017.
- [49] A. Alberto, «Alza de tarifas eléctricas busca bajar el subsidio,» *El Comercio*, 2018. [En línea]. Available: <https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/alza-de-tarifas-electricas-busca.html>. [Último acceso: 13 Enero 2019].
- [50] Banco Central del Ecuador, «TASAS DE INTERÉS EFECTIVAS VIGENTES,» [En línea]. Available:



<https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/SectorMonFin/TasasIntereses/TasasHistorico.htm>. [Último acceso: 15 03 2019].

## **8. ANEXOS**

## ANEXO I TIPOS DE CANALETAS



Figura de anexos 1. Canaleta tipo U  
Fuente: [34]



Figura de anexos 2. Canaleta tipo K  
Fuente: [34]



Figura de anexos 3. Canaleta tipo J  
Fuente: [34]

## ANEXO II COEFICIENTES DE MANNING

	<i>n</i>	Average roughness height $\epsilon$	
		ft	mm
<b>Artificial lined channels:</b>			
Glass	0.010 ± 0.002	0.0011	0.3
Brass	0.011 ± 0.002	0.0019	0.6
Steel, smooth	0.012 ± 0.002	0.0032	1.0
Painted	0.014 ± 0.003	0.0080	2.4
Riveted	0.015 ± 0.002	0.012	3.7
Cast iron	0.013 ± 0.003	0.0051	1.6
Cement, finished	0.012 ± 0.002	0.0032	1.0
Unfinished	0.014 ± 0.002	0.0080	2.4
Planed wood	0.012 ± 0.002	0.0032	1.0
Clay tile	0.014 ± 0.003	0.0080	2.4
Brickwork	0.015 ± 0.002	0.012	3.7
Asphalt	0.016 ± 0.003	0.018	5.4
Corrugated metal	0.022 ± 0.005	0.12	37
Rubble masonry	0.025 ± 0.005	0.26	80
<b>Excavated earth channels:</b>			
Clean	0.022 ± 0.004	0.12	37
Gravelly	0.025 ± 0.005	0.26	80
Weedy	0.030 ± 0.005	0.8	240
Stony, cobbles	0.035 ± 0.010	1.5	500
<b>Natural channels:</b>			
Clean and straight	0.030 ± 0.005	0.8	240
Sluggish, deep pools	0.040 ± 0.010	3	900
Major rivers	0.035 ± 0.010	1.5	500
<b>Floodplains:</b>			
Pasture, farmland	0.035 ± 0.010	1.5	500
Light brush	0.05 ± 0.02	6	2000
Heavy brush	0.075 ± 0.025	15	5000
Trees	0.15 ± 0.05	?	?

\*A more complete list is given in Ref. 3, pp. 110–113.

Figura de anexos 4 Coeficientes de Manning  
Fuente: [25]

## ANEXO III TUBERÍAS

	Nominal diameter, in									
	Screwed				Flanged					
	1/2	1	2	4	1	2	4	8	20	
Valves (fully open):										
Globe	14	8.2	6.9	5.7	13	8.5	6.0	5.8	5.5	
Gate	0.30	0.24	0.16	0.11	0.80	0.35	0.16	0.07	0.03	
Swing check	5.1	2.9	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
Angle	9.0	4.7	2.0	1.0	4.5	2.4	2.0	2.0	2.0	
Elbows:										
45° regular	0.39	0.32	0.30	0.29						
45° long radius					0.21	0.20	0.19	0.16	0.14	
90° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.50	0.39	0.30	0.26	0.21	
90° long radius	1.0	0.72	0.41	0.23	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10	
180° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.41	0.35	0.30	0.25	0.20	
180° long radius					0.40	0.30	0.21	0.15	0.10	
Tees:										
Line flow	0.90	0.90	0.90	0.90	0.24	0.19	0.14	0.10	0.07	
Branch flow	2.4	1.8	1.4	1.1	1.0	0.80	0.64	0.58	0.41	

Figura de anexos 5. Coeficientes de Pérdidas de dispositivos comunes en tuberías  
Fuente: [25]

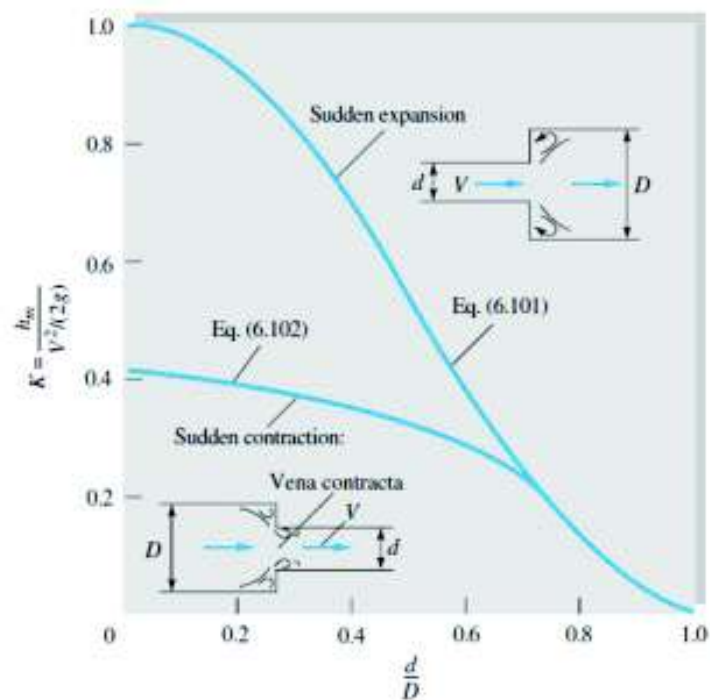


Figura de anexos 6. Coeficiente de Perdidas para expansiones y contracciones súbitas  
Fuente: [25]

Material	Condition	$\epsilon$		Uncertainty, %
		ft	mm	
Steel	Sheet metal, new	0.00016	0.05	± 60
	Stainless, new	0.000007	0.002	± 50
	Commercial, new	0.00015	0.046	± 30
	Riveted	0.01	3.0	± 70
Iron	Rusted	0.007	2.0	± 50
	Cast, new	0.00085	0.26	± 50
	Wrought, new	0.00015	0.046	± 20
	Galvanized, new	0.0005	0.15	± 40
Brass	Asphalted cast	0.0004	0.12	± 50
	Drawn, new	0.000007	0.002	± 50
Plastic	Drawn tubing	0.000005	0.0015	± 60
Glass	—	Smooth	Smooth	
	Concrete	Smoothed	0.00013	0.04
Concrete	Rough	0.007	2.0	± 50
	Rubber	Smoothed	0.000033	0.01
Wood	Stave	0.0016	0.5	± 40

Figura de anexos 7. Valores de rugosidad según el material  
Fuente: [25]

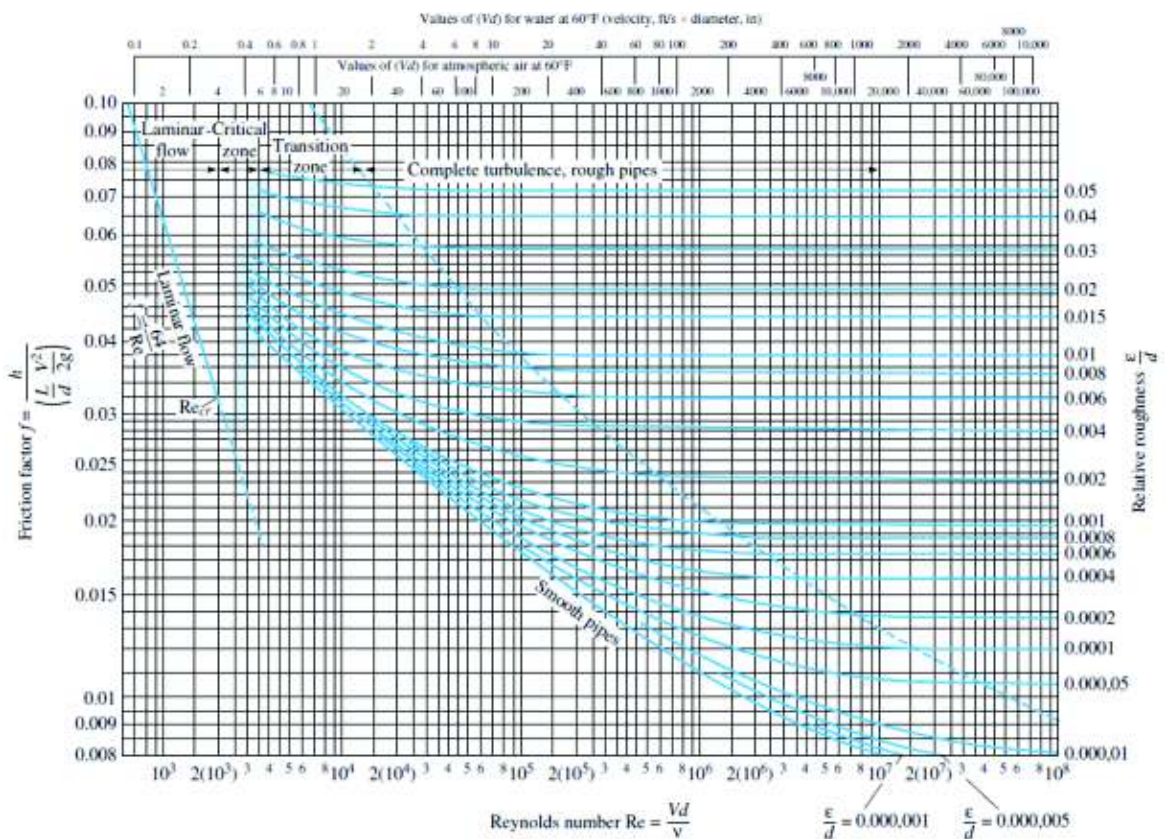


Figura de anexos 8. Diagrama de Moody  
Fuente: [25]

## ANEXO IV MATRICES DE PONDERACIÓN

### Subsistema de captación

Parámetros de análisis
Espacio
Peso
Costo
Mantenibilidad

Importancia
Costo>Espacio=Mantenibilidad>Peso

	Espacio	Peso	Costo	Mantenibilidad	$\Sigma+1$	Ponderación
Espacio		1	0	0,5	2,5	0,25
Peso	0		0	0	1	0,1
Costo	1	1		1	4	0,4
Mantenibilidad	0,5	1	0		2,5	0,25
				Total	10	

Costo	Canaletas al final del techo	Recolección Externa	$\Sigma+1$	Ponderación
Canaletas al final del techo		1	2	0,667
Recolección Externa	0		1	0,333
		Total	3	

Espacio	Canaletas al final del techo	Recolección Externa	$\Sigma+1$	Ponderación
Canaletas al final del techo		1	2	0,667
Recolección Externa	0		1	0,333
		Total	3	

Mantenibilidad	Canaletas al final del techo	Recolección Externa	$\Sigma+1$	Ponderación
Canaletas al final del techo		0,5	1,5	0,5
Recolección Externa	0,5		1,5	0,5
		Total	3	

Peso	Canaletas al final del techo	Recolección Externa	$\Sigma+1$	Ponderación
Canaletas al final del techo		1	2	0,667
Recolección Externa	0		1	0,333
		Total	3	

	Espacio	Peso	Costo	Mantenibilidad	Ponderación
Canaletas al final del techo	0,167	0,067	0,267	0,125	0,625
Recolección Externa	0,083	0,033	0,133	0,125	0,375

Mejor opción	Canaletas al final del techo
--------------	------------------------------

## Subsistema de almacenamiento (tipo de almacenamiento)

Parámetros de análisis
Capacidad
Espacio
Costo
Mantenibilidad
Presión

Importancia
Presión>Costo>Espacio>Mantenibilidad>Capacidad

	Capacidad	Espacio	Costo	Mantenibilidad	Presión	Σ+1	Ponderación
Capacidad	0	0	0	0	0	1	0,067
Espacio	1	0	0	1	0	3	0,2
Costo	1	1	0	1	0	4	0,267
Mantenibilidad	1	0	0	0	0	2	0,133
Presión	1	1	1	1	0	5	0,333
						Total	15

Capacidad	Subterráneo	Sobre nivel	Ras de suelo	Σ+1	Ponderación
Subterráneo	0	1	1	3	0,5
Sobre nivel	0	0	0,5	1,5	0,25
Ras de suelo	0	0,5	0	1,5	0,25
			Total	6	

Espacio	Subterráneo	Sobre nivel	Ras de suelo	Σ+1	Ponderación
Subterráneo	0	0	0	1	0,167
Sobre nivel	1	0	0	2	0,333
Ras de suelo	1	1	0	3	0,5
			Total	6	

Costo	Subterráneo	Sobre nivel	Ras de suelo	Σ+1	Ponderación
Subterráneo	0	0	0	1	0,167
Sobre nivel	1	0	1	3	0,5
Ras de suelo	1	0	0	2	0,333
			Total	6	

Mantenibilidad	Subterráneo	Sobre nivel	Ras de suelo	Σ+1	Ponderación
Subterráneo	0	0	0	1	0,167
Sobre nivel	1	0	0,5	2,5	0,417
Ras de suelo	1	0,5	0	2,5	0,417
			Total	6	

Presión	Subterráneo	Sobre nivel	Ras de suelo	Σ+1	Ponderación
Subterráneo	0	0	0	1	0,167
Sobre nivel	1	0	1	3	0,5
Ras de suelo	1	0	0	2	0,333
			Total	6	

	Capacidad	Espacio	Costo	Mantenibilidad	Presión	Ponderación
Subterráneo	0,033	0,033	0,044	0,022	0,056	0,189
Sobre nivel	0,017	0,067	0,133	0,056	0,167	0,439
Ras de suelo	0,017	0,1	0,089	0,056	0,111	0,372

Mejor opción	Sobre nivel
--------------	-------------



## Subsistema de almacenamiento (posicionamiento del tanque)

Parámetros de análisis
Espacio para el tanque
Altura del tanque (con respecto al suelo)
Cercanía al destino
Comodidad del usuario

Importancia
Espacio para el tanque>Altura del tanque>Cercanía al destino=Comodidad del usuario

	Espacio para el tanque	Altura del tanque (con respecto al suelo)	Cercanía al destino	Comodidad del usuario	$\Sigma+1$	Ponderación
Espacio para el tanque		1	1	1	4	0,4
Altura del tanque (con respecto al suelo)	0		1	1	3	0,3
Cercanía al destino	0	0		0,5	1,5	0,15
Comodidad del usuario	0	0	0,5		1,5	0,15
Total					10	

Espacio para el tanque	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0,667
Alternativa 2	0		1	0,333
Total			3	

Altura del tanque (con respecto al suelo)	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0,667
Alternativa 2	0		1	0,333
Total			3	

Cercanía al destino	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,333
Alternativa 2	1		2	0,667
Total			3	

Comodidad del usuario	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0,667
Alternativa 2	0		1	0,333
Total			3	

	Espacio para el tanque	Altura del tanque (con respecto al suelo)	Cercanía al destino	Comodidad del usuario	Ponderación
Alternativa 1	0,267	0,2	0,05	0,1	0,617
Alternativa 2	0,133	0,1	0,1	0,05	0,383

Mejor opción	Alternativa 1
--------------	---------------

## Subsistema de acondicionamiento térmico

Parámetros de análisis
Sanidad
Eficiencia
Costo
Mantenibilidad
Compatibilidad con subsistema anterior

Importancia
Costo>C.S.A>Eficiencia>Mantenibilidad>Sanidad

	Eficiencia	Sanidad	Costo	Mantenibilidad	C.S.A	$\Sigma+1$	Ponderación
Eficiencia		1	0	1	0	3	0,2
Sanidad	0		0	0	0	1	0,067
Costo	1	1		1	1	5	0,333
Mantenibilidad	0	1	0		0	2	0,133
C.S. A	1	1	0	1		4	0,267
Total						15	

Eficiencia	1 fluido tanque independiente	2 fluidos	1 fluido sin tanque independiente	$\Sigma+1$	Ponderación
1 fluido tanque independiente		1	1	3	0,5
2 fluidos	0		1	2	0,333
1 fluido sin tanque independiente	0	0		1	0,167
Total				6	

Sanidad	1 fluido tanque independiente	2 fluidos	1 fluido sin tanque independiente	$\Sigma+1$	Ponderación
1 fluido tanque independiente		0	0,5	1,5	0,25
2 fluidos	1		1	3	0,5
1 fluido sin tanque independiente	0,5	0		1,5	0,25
Total				6	

Costo	1 fluido tanque independiente	2 fluidos	1 fluido sin tanque independiente	$\Sigma+1$	Ponderación
1 fluido tanque independiente		1	0	2	0,333
2 fluidos	0		0	1	0,167
1 fluido sin tanque independiente	1	1		3	0,5
Total				6	

Mantenibilidad	1 fluido tanque independiente	2 fluidos	1 fluido sin tanque independiente	$\Sigma+1$	Ponderación
1 fluido tanque independiente		1	0	2	0,333
2 fluidos	0		0	1	0,167
1 fluido sin tanque independiente	1	1		3	0,5
Total				6	

C.S.A	1 fluido tanque independiente	2 fluidos	1 fluido sin tanque independiente	$\Sigma+1$	Ponderación
1 fluido tanque independiente		0,5	0	1,5	0,25
2 fluidos	0,5		0	1,5	0,25
1 fluido sin tanque independiente	1	1		3	0,5
Total				6	

	Eficiencia	Sanidad	Costo	Mantenibilidad	C.S.A	Ponderación
1 fluido tanque independiente	0,1	0,0167	0,111	0,0444	0,0667	0,3389
2 fluidos	0,0667	0,033	0,056	0,0222	0,0667	0,2444
1 fluido sin tanque independiente	0,033	0,017	0,167	0,067	0,133	0,417

Mejor opción	1 fluido sin tanque independiente
--------------	-----------------------------------

## Subsistema de distribución

Parámetros de análisis
Consumo energético
Eficiencia
Costo
Mantenibilidad
Saneamiento
Compatibilidad con subsistema anterior

Importancia
C.S.A>Costo>Eficiencia>C.E.>Mantenibilidad>Saneamiento

	Eficiencia	C.E.	Costo	Mantenibilidad	Saneamiento	C.S.A	$\Sigma+1$	Ponderación
Eficiencia	1	0	1	1	1	0	4	0,19
C,E	0	1	0	0,5	1	0	2,5	0,119
Costo	1	1	1	1	1	0	5	0,238
Mantenibilidad	0	0,5	0	1	0,5	0	2	0,095
Saneamiento	0	0	0	0,5	1	0	1,5	0,071
C.S.A	1	1	1	1	1	1	6	0,285
						Total	21	

	Bomba	Gravedad	$\Sigma+1$	Ponderación
Eficiencia				
Bomba	1	1	2	0,667
Gravedad	0	1	1	0,333
			3	

	Bomba	Gravedad	$\Sigma+1$	Ponderación
C.E				
Bomba	1	0	1	0,333
Gravedad	1	1	2	0,667
			3	

	Bomba	Gravedad	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo				
Bomba	1	0	1	0,333
Gravedad	1	1	2	0,667
			3	

	Bomba	Gravedad	$\Sigma+1$	Ponderación
Mantenibilidad				
Bomba	1	0	1	0,333
Gravedad	1	1	2	0,667
			3	

	Bomba	Gravedad	$\Sigma+1$	Ponderación
Saneamiento				
Bomba	1	1	2	0,667
Gravedad	0	1	1	0,333
			3	

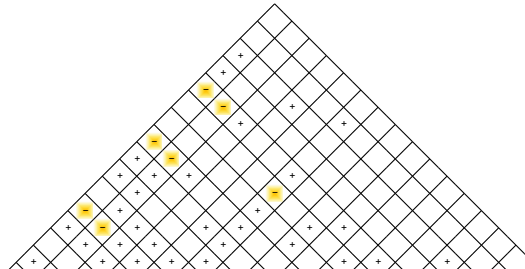
	Bomba	Gravedad	$\Sigma+1$	Ponderación
C.S.A				
Bomba	0,5	0,5	1,5	0,5
Gravedad	0,5	1,5	1,5	0,5
			3	

	Eficiencia	C.E.	Costo	Mantenibilidad	Saneamiento	C.S.A	Ponderación
Bomba	0,126	0,039	0,079	0,031	0,047	0,142	0,468
Gravedad	0,063	0,079	0,158	0,063	0,024	0,143	0,531

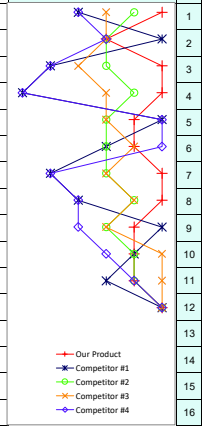
Mejor opción	Gravedad
--------------	----------

## ANEXO V FUNCIÓN DE LA CALIDAD

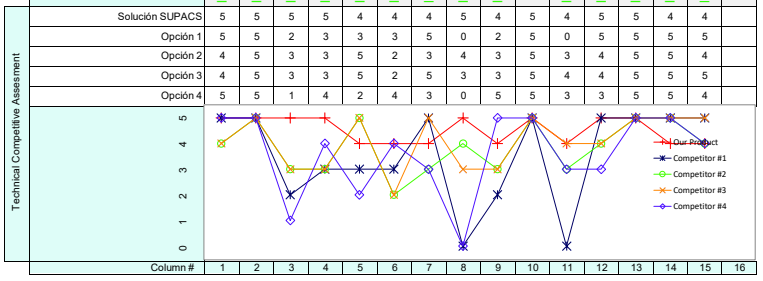
Correlations	
Positive	+
Negative	-
No Correlation	
Relationships	
Strong	●
Moderate	○
Weak	▽
Direction of Improvement	
Maximize	▲
Target	◇
Minimize	▼



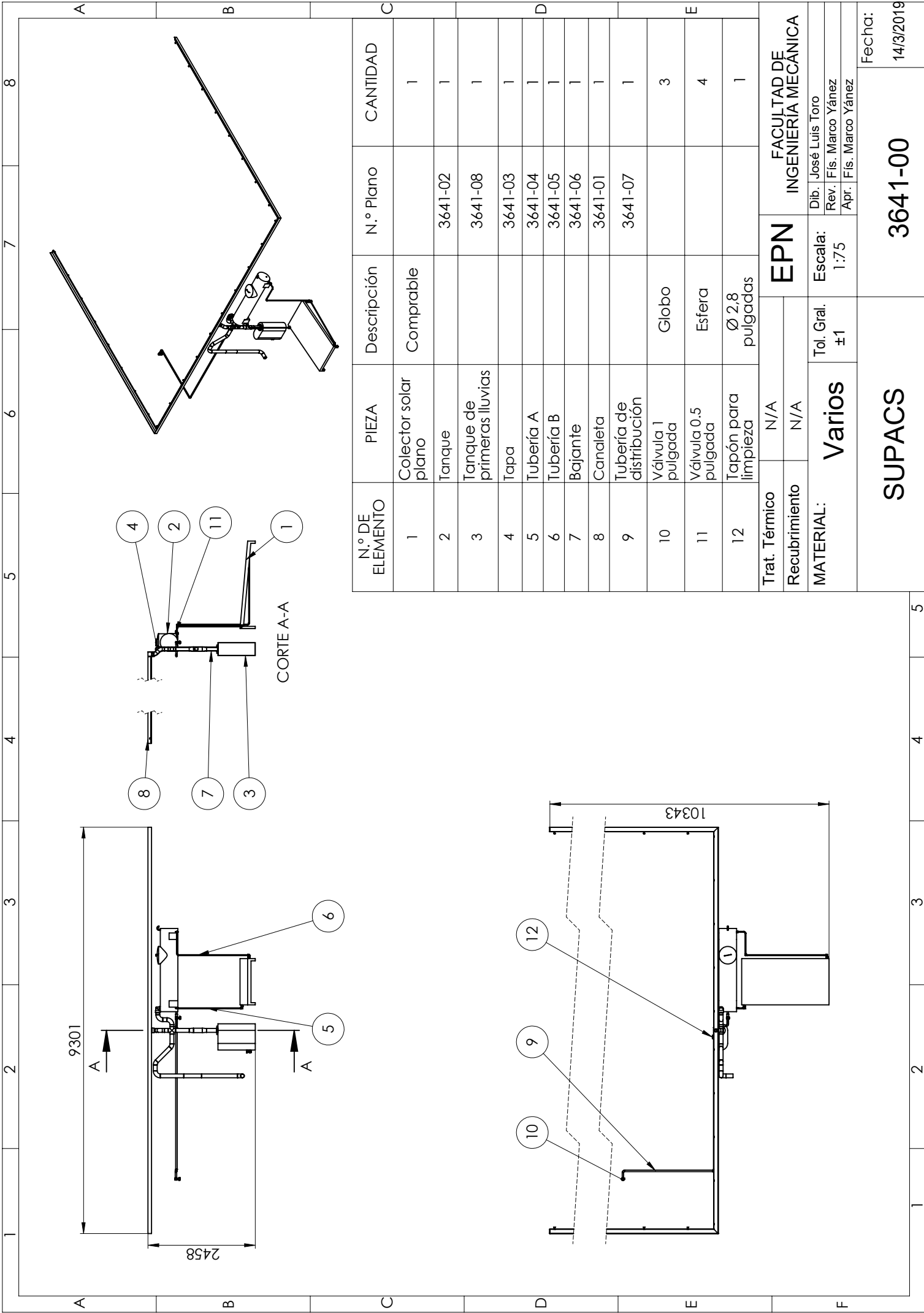
Row #	Weight Chart	Relative Weight	Customer Importance	Maximum Relationship	Customer Requirements (Explicit and Implicit)	Customer Competitive Assessment																				
						Column #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16				
					Functional Requirements	Volumen	Tempo de disponibilidad	Precio materiales	Mantenibilidad	Masa	Materiales	Tempo de estabilización	Versatilidad	Seguridad	Colores	Gama	Saludad	Caudal	Presión	Temperatura de agua de consumo	Solución SUPACS	Opcción 1	Opcción 2	Opcción 3	Opcción 4	
1		###	10	9	Poco espacio	●	●	○		●			●	○		▽		▽			5	3	4	3	2	
2		###	10	9	Mucha capacidad	●	●	○		●			●	○		○		●	●	○	3	5	3	3	3	
3		###	10	9	Bajo costo	○		●	▽		●	▽		○		○		▽			5	1	3	2	1	
4		2%	2	9	Facilidad de transporte	○			●	●	●		●	▽		○					5	0	4	3	0	
5		3%	3	9	Durabilidad			○	●		●		▽	○		●					4	5	3	3	5	
6		7%	6	9	Conservación de las propiedades de la materia prima		○	○	●		●	○				○	●		○		4	3	3	4	5	
7		3%	3	9	Adaptación al medio		○			●			○		▽	●					5	1	3	3	1	
8		8%	7	9	Seguridad del producto			●	○				○	●	▽	▽	●				5	2	4	4	2	
9		8%	7	9	Presentación visual del producto	▽		●	▽		○		○			○					4	5	3	3	2	
10		###	10	9	Limpieza del agua				●		●			●			●				4	4	4	5	3	
11		###	10	9	Agua caliente	○	○	▽		●	●								●		4	3	4	5	4	
12		###	10	9	Flujo suficiente	●	●											●	●		5	5	5	5	5	
13		0%																								
14		0%																								
15		0%																								
16																										



Target	>=250 L	2 días	<1000 \$	1 por año	<1000 kg	...	<4h	...	...	...	...	<= 5 NTU	>=10.2 L/s	>=3 m H2O	25-40 °C
Max Relationship	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Technical Importance Rating	389,8	473,9	365,9	258	327,3	545,5	134,1	409,1	288,6	82,95	200	246,6	204,5	215,9	156,8
Relative Weight	9%	11%	9%	6%	8%	13%	3%	10%	7%	2%	5%	6%	5%	5%	4%
Weight Chart															
Solución SUPACS	5	5	5	5	4	4	4	5	4	5	4	5	5	4	4
Opcción 1	5	5	2	3	3	3	5	0	2	5	0	5	5	5	5
Opcción 2	4	5	3	3	5	2	3	4	3	5	3	4	5	5	4
Opcción 3	4	5	3	3	5	2	5	3	3	5	4	4	5	5	5
Opcción 4	5	5	1	4	2	4	3	0	5	5	3	3	5	5	4



## ANEXO VI PLANOS



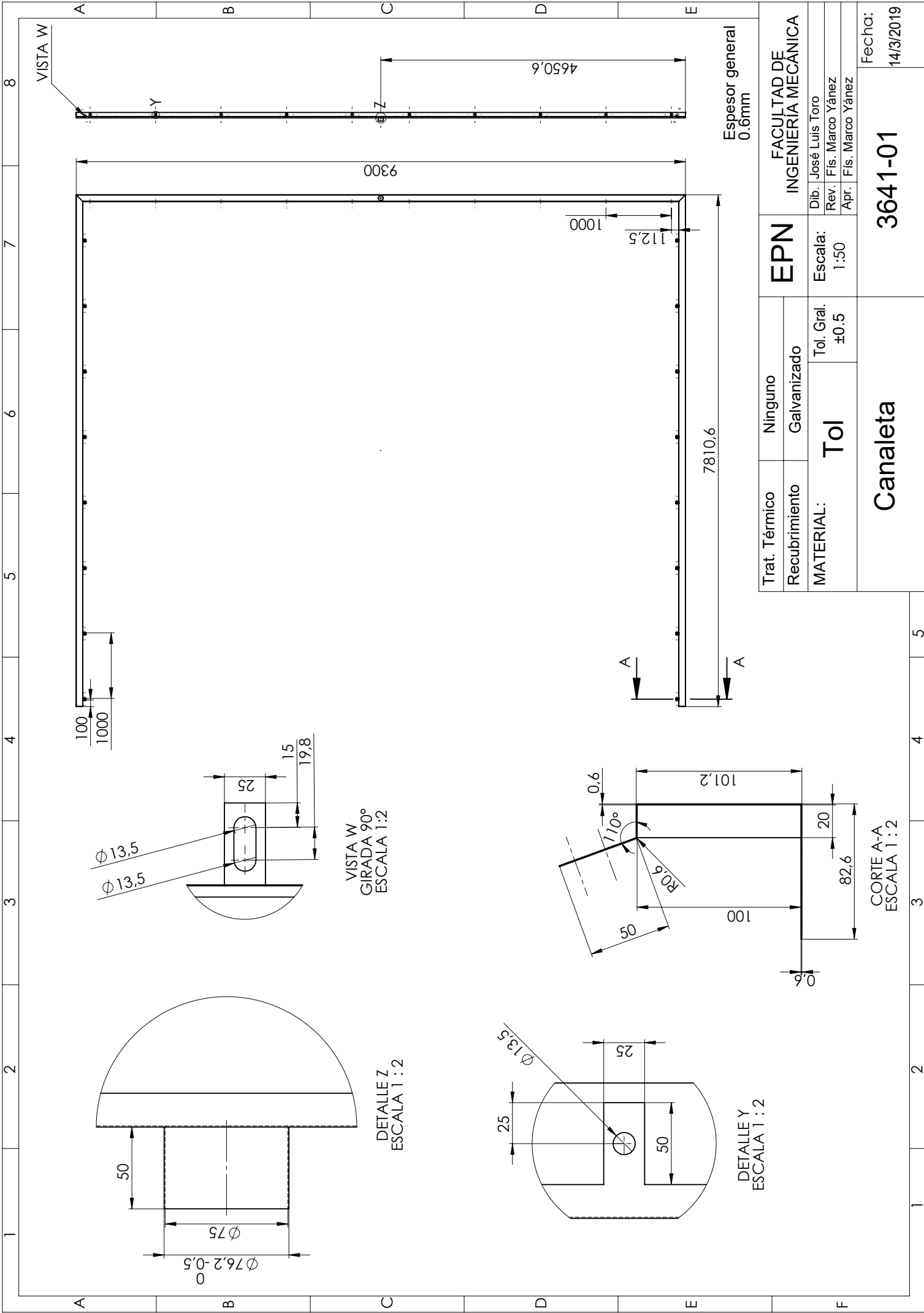
N.º DE ELEMENTO	PIEZA	Descripción	N.º Plano	CANTIDAD
1	Colector solar plano	Comprable		1
2	Tanque		3641-02	1
3	Tanque de primeras lluvias		3641-08	1
4	Tapa		3641-03	1
5	Tubería A		3641-04	1
6	Tubería B		3641-05	1
7	Bajante		3641-06	1
8	Canaleta		3641-01	1
9	Tubería de distribución		3641-07	1
10	Válvula 1 pulgada	Globo		3
11	Válvula 0.5 pulgada	Esfera		4
12	Tapón para limpieza	Ø 2.8 pulgadas		1

Trat. Térmico	N/A	<b>EPN</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA</b>	
Recubrimiento	N/A		Dib.   José Luis Toro Rev.   Fis. Marco Yáñez Apr.   Fis. Marco Yáñez	
<b>MATERIAL: Varios</b>		Tol. Gral. ±1	Escala: 1:75	Fecha: 14/3/2019

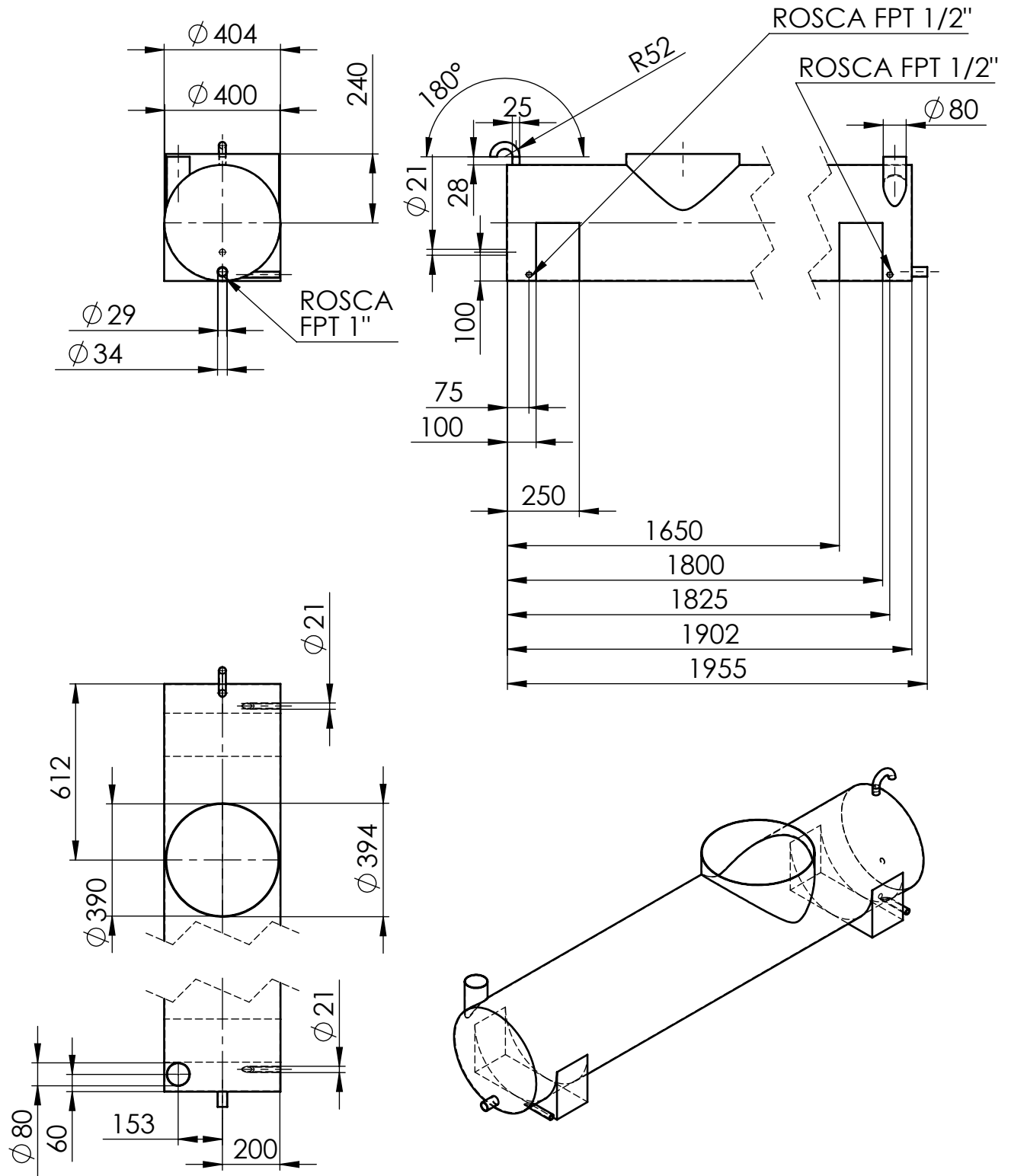
**SUPACS**

**3641-00**



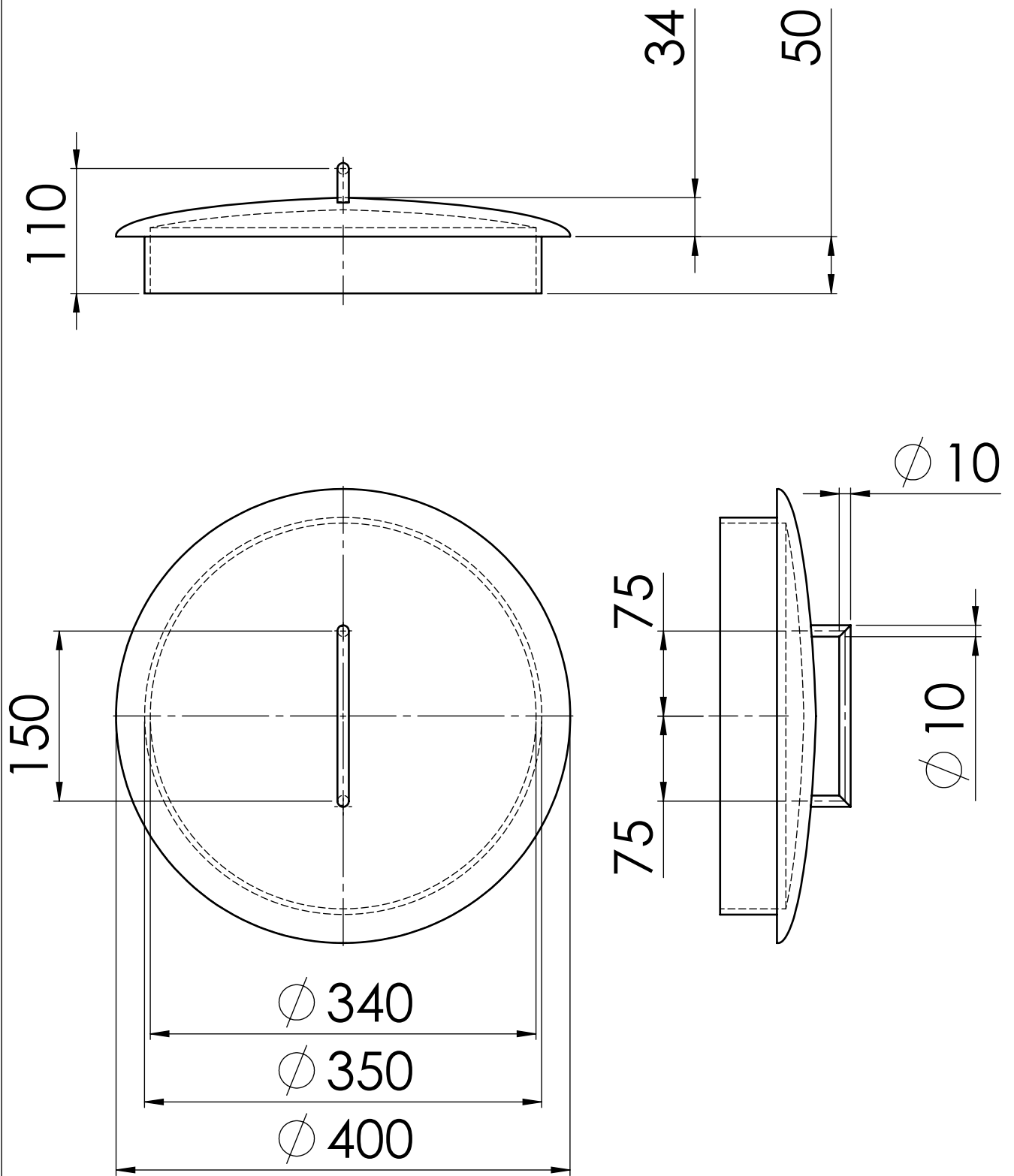


Trat. Térmico		Ninguno	
Recubrimiento		Galvanizado	
MATERIAL:		Tol	
Tol. Gral.		±0.5	
EPN		Escala: 1:50	
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		Dib. José Luis Toro	
		Rev. Fis. Marco Yáñez	
		Apr. Fis. Marco Yáñez	
Fecha:		14/3/2019	
3641-01		Canaleta	

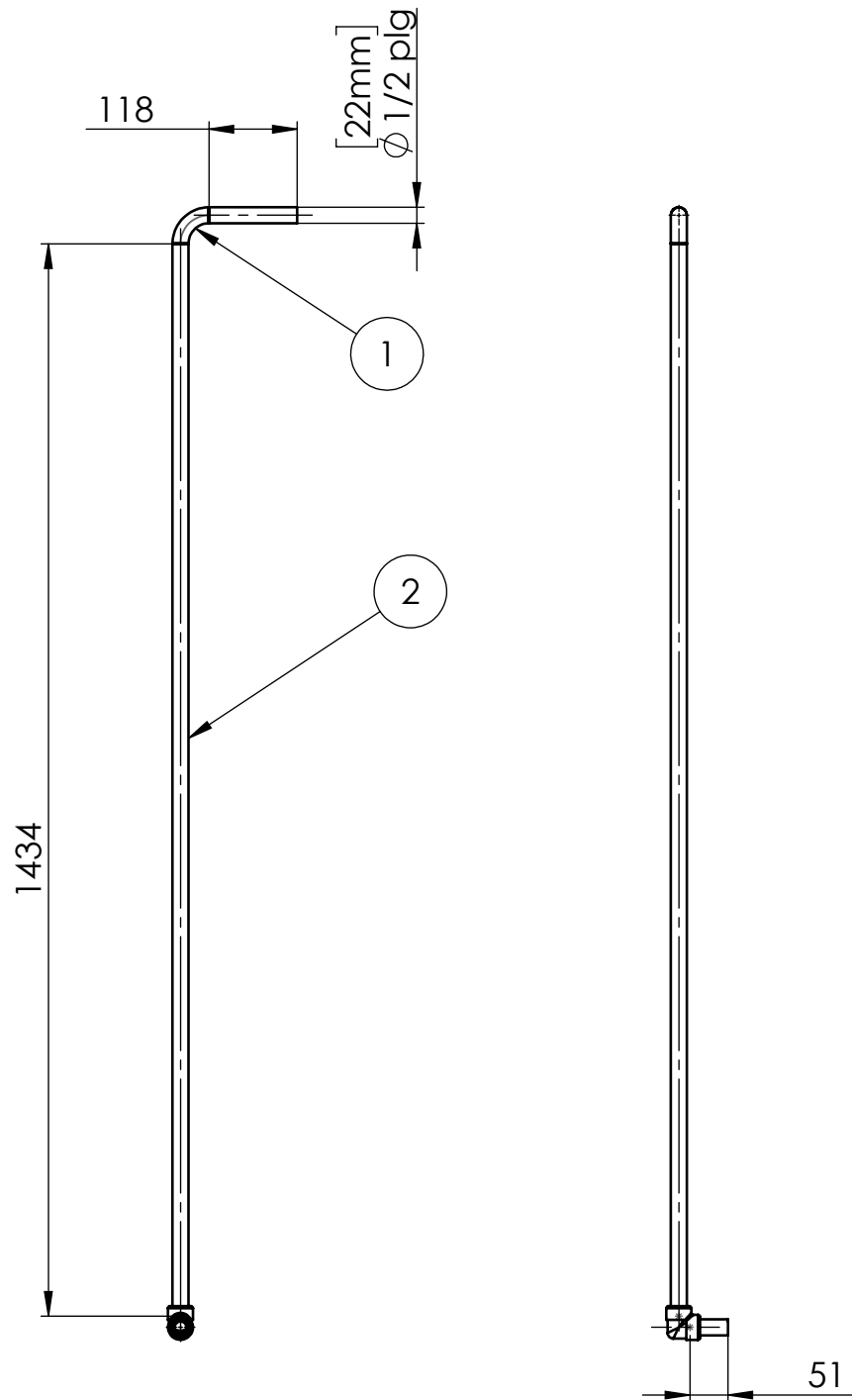


ESPEJOR  
GENERAL  
2mm

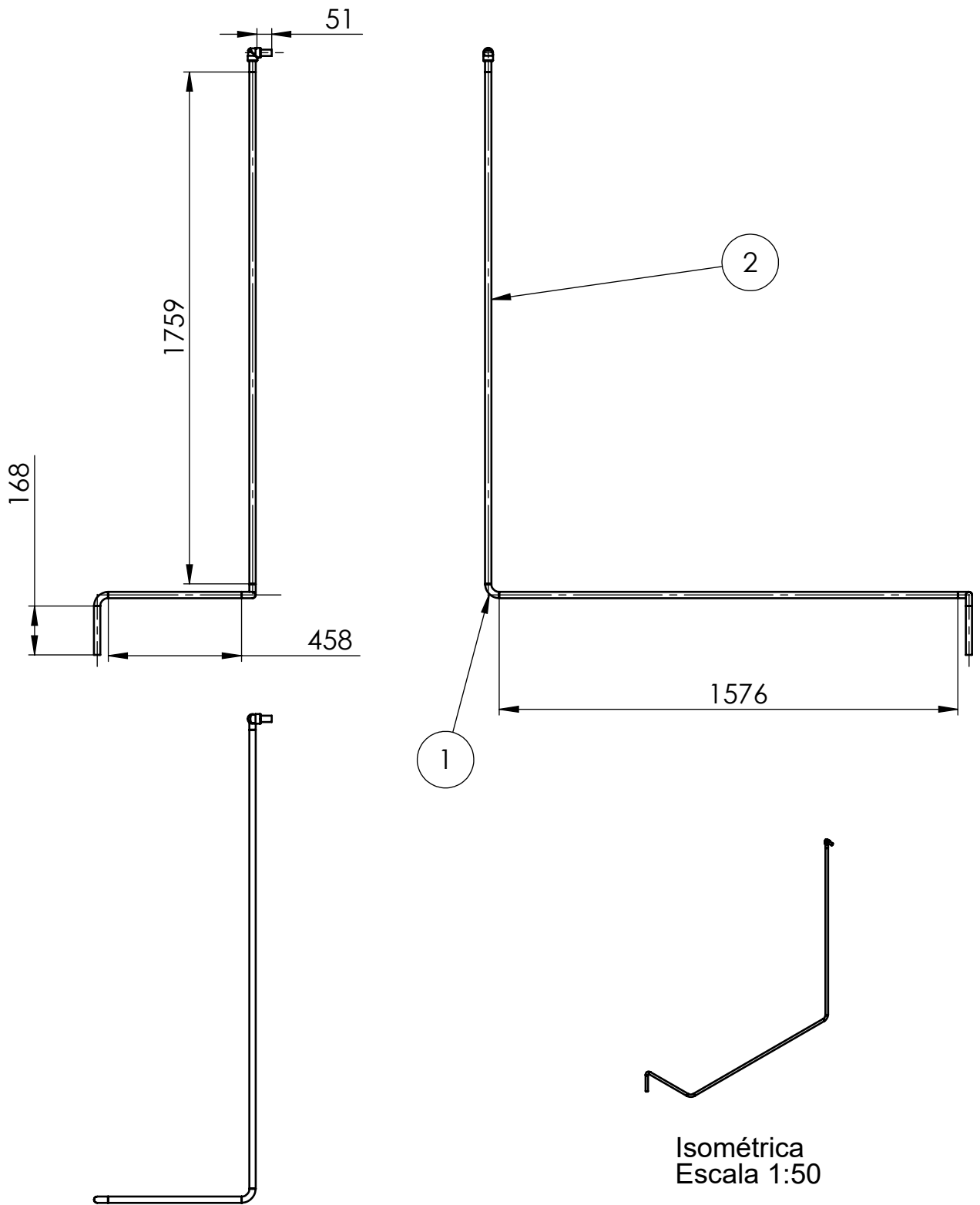
Trat. Térmico	Ninguno	<b>EPN</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno			
MATERIAL:	<b>HDPE</b>	Tol. Gral. ±1	Escala: 1:20	Dib. José Luis Toro
				Rev. Fís. Marco Yáñez
				Apr. Fís. Marco Yáñez
<b>Tanque</b>		<b>3641-02</b>		Fecha: 14/3/2019



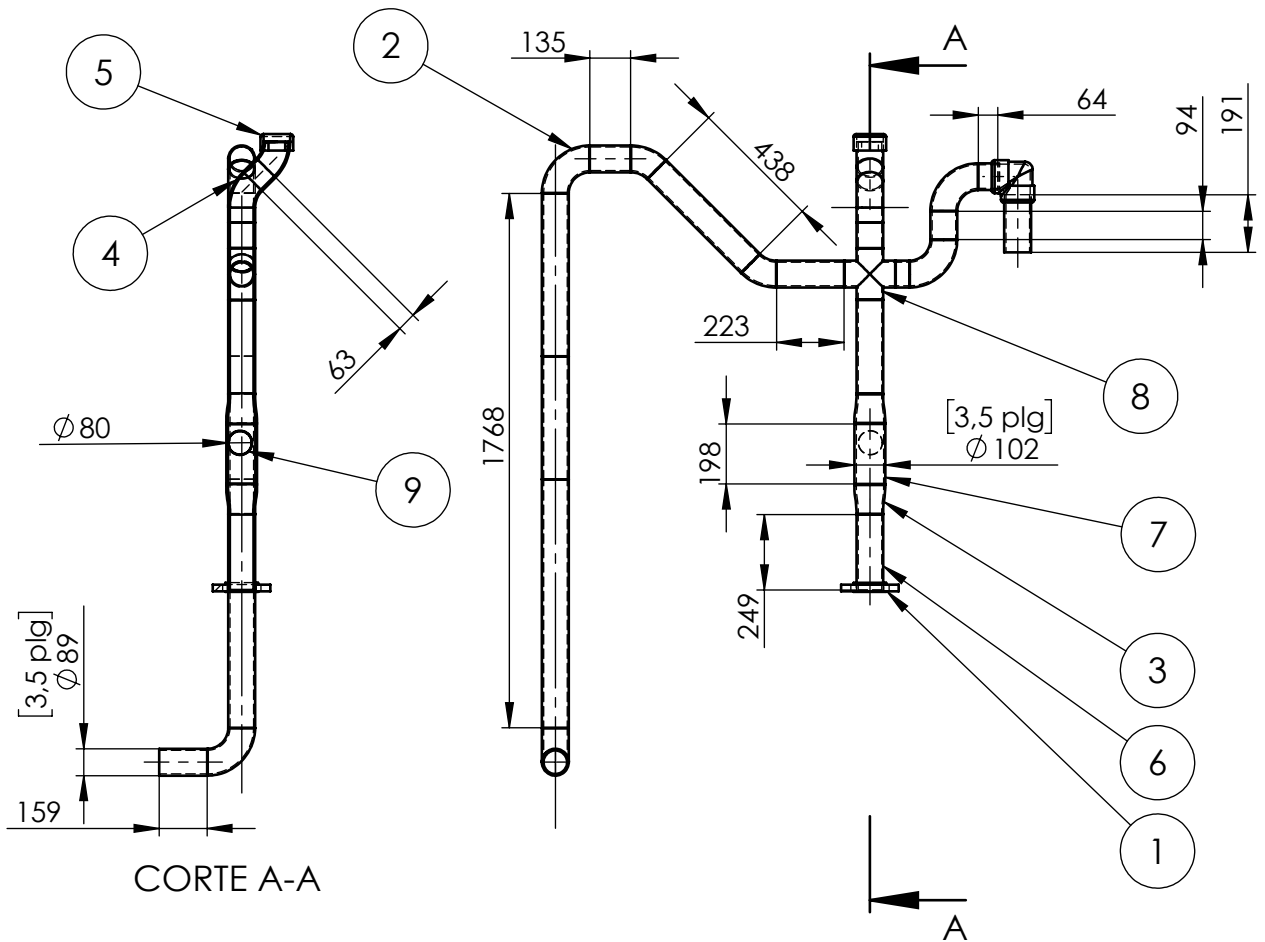
Trat. Térmico	Ninguno	<b>EPN</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno			
MATERIAL:	<b>HDPE</b>	Tol. Gral. $\pm 1$	Escala: 1:5	Dib. José Luis Toro
				Rev. Fís. Marco Yáñez
				Apr. Fís. Marco Yáñez
<b>Tapa</b>		<b>3641-03</b>		Fecha: 14/3/2019



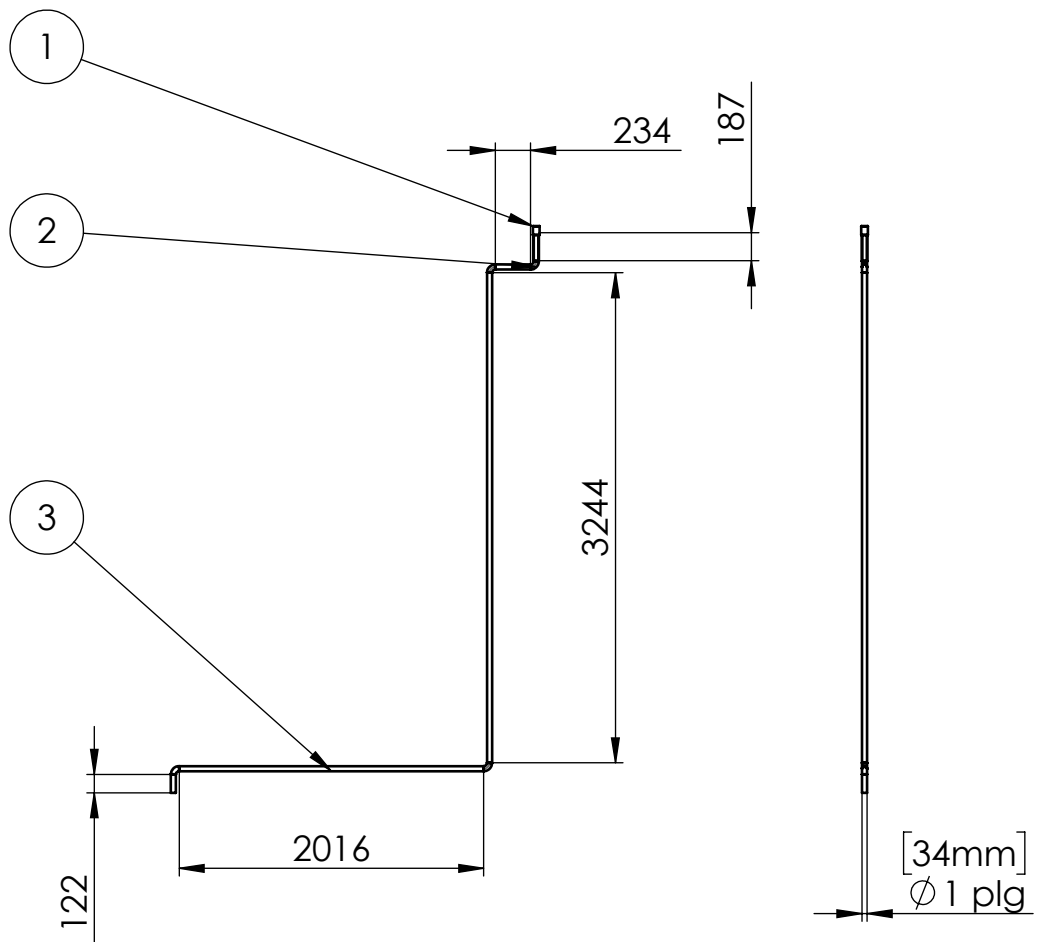
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	
1	CodoPP	0.5 pulg ø x 90°	2	
2	Tubería PP	0.5 pulg ø	1603mm	
Trat. Térmico	Ninguno	<b>EPN</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno			
MATERIAL:	<b>PP</b>	Tol. Gral. ±0.1	Escala: 1:10	Dib. José Luis Toro
				Rev. Fís. Marco Yánez
				Apr. Fís. Marco Yánez
<b>Tubería A</b>		<b>3641-04</b>		Fecha: 14/3/2019



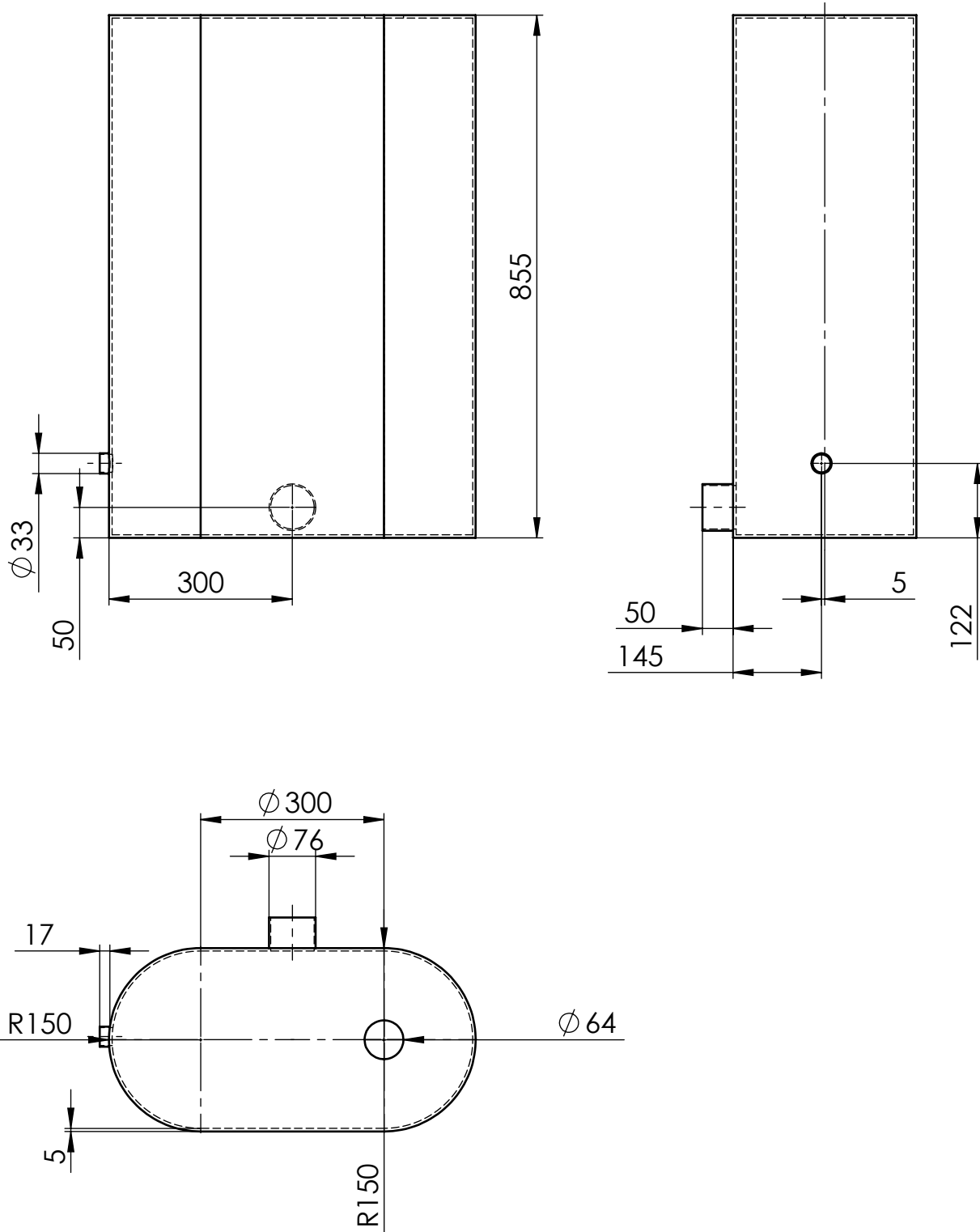
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Codo PP	0.5 pulg $\varnothing$ x 90°	4
2	Tubería PP	0.5 pulg $\varnothing$	4062.89mm
Trat. Térmico	Ninguno	<b>EPN</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
Recubrimiento	Ninguno		
MATERIAL: <b>PP</b>	Tol. Gral. $\pm 0.1$	Escala: 1:20	Dib. José Luis Toro Rev. Fís. Marco Yáñez Apr. Fís. Marco Yáñez
<b>Tubería B</b>		<b>3641-05</b>	Fecha: 14/3/2019



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	
1	Adaptador para tanques	3 plg ø	1	
2	Codo PVC	3plg ø x 90°	5	
3	Reductor	3,5 ø x 3 plg ø	2	
4	Codo PVC	3plg ø x 45°	4	
5	Acople para canaletas	3 plg de ø	1	
6	Tubería de PVC 3 pulg ø		4277mm	
7	Tubería de PVC 3,5 plg ø		199mm	
8	Cruz de	3 pulg ø	1	
9	Esfera de caucho	80mm ø	1	
Trat. Térmico	Ninguno	<b>EPN</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno			
MATERIAL:	<b>PVC</b>	Tol. Gral.	Escala:	Dib. José Luis Toro
		±1	1:25	Rev. Fís. Marco Yáñez
				Apr. Fís. Marco Yáñez
<b>Bajante</b>		<b>3641-06</b>		Fecha: 14/3/2019



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Unión roscada PP	1 pulg ø	1
2	Codo PP	1 pulg ø x 90°	4
3	Tubería PP	1 pulg ø	5992mm
Trat. Térmico	Ninguno	<b>EPN</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
Recubrimiento	Ninguno		
MATERIAL:	<b>PP</b>	Tol. Gral. ± 0,5	Escala: 1:50
			Dib. José Luis Toro Rev. Fís. Marco Yáñez Apr. Fís. Marco Yáñez
<b>Tubería de distribución</b>		<b>3641-07</b>	
			Fecha: 14/3/2019



Trat. Térmico	Ninguno	<b>EPN</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno			
MATERIAL:	<b>HDPE</b>	Tol. Gral. ±1	Escala:	Dib. José Luis Toro
			1:10	Rev. Fís. Marco Yáñez
			Apr. Fís. Marco Yáñez	
<b>Tanque de primeras lluvias</b>		<b>3641-08</b>		Fecha: 14/3/2019