

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON UN VERMIFILTRO PARA LA EMPRESA DE RASTRO

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
QUÍMICA**

DIANA PATRICIA ROSERO CLAVIJO

**DIRECTORA: ING. LUCÍA MONTENEGRO, M.Sc.
CODIRECTOR: ING. MARCELO SALVADOR, M.Sc.**

Quito, mayo 2022

© Escuela Politécnica Nacional 2022
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Diana Patricia Rosero Clavijo, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Diana Patricia Rosero Clavijo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la señorita Diana Patricia Rosero Clavijo

Ing. Lucía Montenegro, M.Sc.
DIRECTORA DE PROYECTO

Ing. Marcelo Salvador, M.Sc
CODIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a mis hermanos Miguel Ángel y Gabriel por acompañarme durante todo este trayecto, por apoyarme, siempre darme ánimos a su manera y nunca dudar de mí, son mi ejemplo de perseverancia y dedicación.

Agradezco a mis padres por su esfuerzo y sacrificio que me permitió estudiar y lograr culminar esta carrera, por enseñarme a ser disciplinada y persistente.

Agradezco eternamente a mis amigos Jota, Paz, Rodrigo y Emi, por su apoyo, sus palabras y ánimos, por esa grata compañía que permitió ser más llevadero este proceso y por todos esos momentos duros y lleno de emociones, no hubiera sido lo mismo sin ustedes.

Agradezco al Ing. Marcelo Salvador y a la Ing. Lucía Montenegro por su paciencia y apoyo, por todos esos conocimientos que compartieron conmigo y me ayudaron a finalizar este trayecto.

DEDICATORIA

A mis hermanos Miguel Ángel y Gabriel, a mis padres Martha y Patricio y a mis queridos peludos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	PÁGINA
RESUMEN	xv
INTRODUCCIÓN	xvi
1. JUSTIFICACIÓN	1
1.1. Antecedentes y descripción del problema	1
1.2. Tecnología aplicada al tratamiento de agua residuales	2
1.3. Tamaño y localización de la planta	3
2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	6
2.1. Sistema de tratamiento del efluente de la empresa de rastro	6
2.1.1. Separación de sólidos gruesos	6
2.1.2. Igualación de caudal	6
2.1.3. Retención de aceites y grasas	7
2.1.4. Vermifiltración o filtración con lombrices	7
2.2. Sistema de tratamiento de sólidos de la empresa de rastro	8
2.2.1. Recolección de residuos sólidos	8
2.2.2. Pasteurización y trituración	8
2.2.3. Biodigestor	9
2.3. Vermifiltros una nueva tecnología	9
2.3.1. Lombrices características	10
2.3.2. Condiciones de hábitat	11
2.3.2.1. Humedad	11
2.3.2.2. Potencial de hidrógeno	12
2.3.2.3. Características del sustrato	12
2.3.2.4. Temperatura	12
2.3.2.5. Concentración de oxígeno	13
2.4. Mecanismo de trabajo de las lombrices	13
2.4.1. Molienda	13
2.4.2. Acción de las enzimas	13
2.4.3. Refuerzo de microorganismo para la descomposición	14
2.4.4. Generación de humus	14
3. CRITERIOS DE DISEÑO	15
3.1. Criterio de diseño para el tratamiento de efluente líquido	16
3.1.1. Criterio de diseño para el canal de ingreso del efluente	16

3.1.1.1. Área húmeda del canal	18
3.1.1.2. Altura del líquido	18
3.1.1.3. Pendiente del canal	19
3.1.2. Criterio de diseño para el sistema de cribaje	19
3.1.2.1. Área libre de la criba	21
3.1.2.2. Área libre total de la criba	22
3.1.2.3. Ancho de la criba	22
3.1.2.4. Cabeza de pérdida de las rejillas	22
3.1.2.5. Número de rejillas	23
3.1.2.6. Material retenido por las rejillas	23
3.1.3. Criterios de diseño para el tanque de igualación	24
3.1.3.1. Área del tanque de igualación	25
3.1.3.2. Presión de operación y presión de diseño en el tanque de igualación	25
3.1.3.3. Espesor del tanque de igualación	26
3.1.3.4. Sistema de agitación del tanque de igualación	27
3.1.4. Criterio de diseño de la trampa de grasas	30
3.1.4.1. Porcentaje de remoción de grasa	31
3.1.4.2. Volumen del líquido de la trampa de grasas	32
3.1.4.3. Ancho de la trampa de grasas	33
3.1.4.4. Largo de la trampa de grasas	33
3.1.4.5. Área superficial de la trampa de grasas	33
3.1.4.6. Carga superficial de la trampa de grasas	34
3.1.5. Criterio de diseño del vermifiltro	34
3.1.5.1. Eficiencia del vermifiltro	36
3.1.5.2. Carga hidráulica del vermifiltro	37
3.1.5.3. Tiempo de retención hidráulico del vermifiltro	37
3.1.5.4. Capas del vermifiltro	38
3.1.5.5. Sistema de ventilación y aspersión	39
3.2. Criterios de diseño para el tratamiento de residuos sólido	39
3.2.1. Criterio de diseño del tanque de almacenamiento de residuos sólidos	41
3.2.1.1. Volumen del tanque de almacenamiento de residuos sólidos	41
3.2.1.2. Espesor del tanque de almacenamiento de residuos sólidos	43
3.2.2. Criterio de diseño de tanque de trituración	43
3.2.3. Criterio de diseño de tanque de pasteurización	44
3.2.3.1. Volumen del tanque de pasteurización	44
3.2.3.2. Espesor del tanque de pasteurización	46
3.2.3.3. Sistema de agitación del tanque de pasteurización	46
3.2.3.4. Estructura del tanque de pasteurización	46
3.2.4. Criterio de diseño del biodigestor anaerobio	47
3.2.4.1. Volumen del metano producido por el biodigestor	49

3.2.4.2.	Coefficiente cinético de producción de biogás	50
3.2.4.3.	Volumen del biogás generado por el biodigestor	50
3.2.4.4.	Volumen de lodo a tratar en el biodigestor y volumen del biodigestor	51
3.2.4.5.	Dimensiones de la tapa del biodigestor	52
3.2.4.6.	Energía obtenida del biodigestor	52
3.2.4.7.	Energía requerida para el calentamiento de los lodos	53
3.2.4.8.	Sistema de agitación del biodigestor	55
3.3.	Criterio de diseño para el dimensionamiento del sistema de tuberías	56
3.3.1.	Cabeza de pérdidas por accesorios	57
3.3.2.	Cabeza de pérdidas por fricción	58
3.3.3.	Caída de presión en el interior de las tuberías	59
3.3.4.	Presión de operación en el interior de la tubería	61
3.3.5.	Presión de diseño en el interior de la tubería	61
3.3.6.	Temperatura de operación en el interior de la tubería	62
3.3.7.	Temperatura de diseño en el interior de la tubería	62
3.4.	Sistemas auxiliares	60
3.4.1.	Criterio de diseño para el dimensionamiento de la banda transportadora	60
3.4.2.	Criterio de diseño para el dimensionamiento del transportador helicoidal	63
3.4.2.1.	Área transversal del transportador helicoidal	64
3.4.2.2.	Velocidad del transportador helicoidal	64
3.4.2.3.	Capacidad de transporte del transportador helicoidal	66
3.4.2.4.	Potencia requerida del transportador helicoidal	66
3.4.3.	Criterio de diseño para el dimensionamiento de bombas para impulsión de fluidos líquidos	67
3.4.3.1.	Presión de succión y presión de descarga	67
3.4.3.2.	Altura dinámica total	68
3.4.3.3.	Potencia necesaria de la bomba	68
3.4.4.	Criterio de diseño para el dimensionamiento del compresor para el transporte de biogás	69
3.4.4.1.	Trabajo por compresión	69
3.4.4.2.	Potencia del compresor	70
4.	DISEÑO DE LA PLANTA	71
4.1.	Balance de masa	71
4.2.	Balance de energía	72
4.2.1.	Balance de energía para el tratamiento de lodos de la EMRAQ-EP	72
4.2.2.	Balance de energía en los equipos electrificados de la	74

PTAR de la EMRAQ-EP

4.3.	Diseño y selección de los equipos propuestos	76
4.3.1.	Diseño del canal de ingreso del efluente	77
4.3.1.1.	Determinación del área transversal de la tubería de descarga de la EMRAQ- EP	78
4.3.1.2.	Determinación del área húmeda del canal	79
4.3.1.3.	Determinación de la altura del canal	79
4.3.1.4.	Determinación de la pendiente del canal	80
4.3.2.	Diseño del sistema de cribaje	82
4.3.2.1.	Determinación del área libre del sistema de cribaje	82
4.3.2.2.	Determinación del área libre total de la criba	83
4.3.2.3.	Determinación del ancho de la criba	84
4.3.2.4.	Determinación de la cabeza de pérdida de las rejillas	84
4.3.2.4.	Determinación del número de rejillas	85
4.3.3.	Diseño del tanque de igualación	85
4.3.3.1.	Determinación de volumen del tanque de igualación	86
4.3.3.2.	Determinación del diámetro y altura del tanque de igualación	88
4.3.3.3.	Determinación del área superficial del tanque de igualación	89
4.3.3.4.	Determinación de la presión hidrostática del agua en el tanque de igualación	89
4.3.3.5.	Determinación de la presión de operación del tanque de igualación	90
4.3.3.6.	Determinación de la presión de diseño del tanque de igualación	90
4.3.3.7.	Determinación del espesor del tanque de igualación	91
4.3.3.8.	Determinación del sistema de agitación en el tanque de igualación	92
4.3.4.	Diseño de la trampa de grasas	94
4.3.4.1.	Determinación del porcentaje de remoción de grasa	94
4.3.4.2.	Determinación volumen de la trampa de grasas	95
4.3.4.3.	Determinación del ancho de la trampa de grasas	96
4.3.4.4.	Determinación del largo de la trampa de grasas	96
4.3.4.5.	Determinación del área superficial de la trampa de grasas	97
4.3.4.6.	Determinación de la altura de la trampa de grasas	97
4.3.4.7.	Determinación del volumen de la trampa de grasas	97
4.3.4.8.	Determinación de la carga superficial de la trampa de grasas	98
4.3.5.	Diseño del vermifiltro	98
4.3.5.1.	Determinación de la eficiencia del vermifiltro	99

4.3.5.2. Determinación del área superficial del vermifiltro	100
4.3.5.3. Determinación de la profundidad del lecho del sustrato	101
4.3.5.4. Determinación de la altura de las capas del vermifiltro	102
4.3.5.5. Determinación del largo y ancho de los módulos del vermifiltro	104
4.3.6. Diseño del tanque de recolección y tanque de trituración	104
4.3.6.1. Determinación del volumen del tanque de recolección y tanque de trituración	105
4.3.6.2. Determinación del diámetro y altura del tanque de recolección y tanque de trituración	106
4.3.6.3. Determinación de la presión hidrostática del lodo en el tanque de recolección y tanque de trituración	107
4.3.6.4. Determinación de la presión de operación del tanque de recolección y tanque de trituración	107
4.3.6.5. Determinación de la presión de diseño del tanque de recolección y tanque de trituración	107
4.3.6.6. Determinación del espesor del tanque de recolección y tanque de trituración	108
4.3.7. Diseño del tanque de pasteurización	109
4.3.7.1. Determinación de la densidad del lodo en el tanque de pasteurización	110
4.3.7.2. Determinación del volumen del tanque de pasteurización	110
4.3.7.3. Determinación de la altura y diámetro del tanque de pasteurización	111
4.3.7.4. Determinación de presión hidrostática del lodo en el tanque de pasteurización	112
4.3.7.5. Determinación de presión de operación del tanque de pasteurización	112
4.3.7.6. Determinación de presión de diseño del tanque de pasteurización	113
4.3.7.7. Determinación del espesor del tanque de pasteurización	113
4.3.7.8. Determinación del sistema de agitación del tanque de pasteurización	114
4.3.8. Dimensionamiento del biodigestor anaerobio	116
4.3.8.1. Determinación total diario de producción de masa biológica (Px)	116
4.3.8.2. Determinación del volumen de metano producido	117
4.3.8.3. Determinación del volumen de biogás producido	119
4.3.8.4. Determinación del volumen del lodo en el biodigestor	120
4.3.8.5. Determinación de las dimensiones del biodigestor	120
4.3.8.6. Determinación energía obtenida del biodigestor	122
4.3.8.7. Determinación de energía requerida para el calentamiento de los lodos	123
4.3.9. Dimensionamiento de la banda transportadora	126

4.3.10.	Dimensionamiento del transportador helicoidal	127
4.3.10.1.	Determinación del área transversal del transportador helicoidal	128
4.3.10.2.	Determinación de la velocidad del transportador helicoidal	128
4.3.10.3.	Determinación de la capacidad de transporte del transportador helicoidal	129
4.3.10.4.	Determinación de la potencia requerida del transportador helicoidal	129
4.3.11.	Dimensionamiento del sistema de tuberías	130
4.3.11.1.	Dimensionamiento de tuberías en el sistema A (sistema de cribaje-tanque de igualación)	133
4.3.11.2.	Dimensionamiento de tuberías en el sistema B (tanque de igualación – trampa de grasas)	144
4.3.11.3.	Dimensionamiento de tuberías en el sistema C (trampa de grasas – vermifiltro)	149
4.3.11.4.	Dimensionamiento de tuberías en el sistema D (tanque de pasteurización – biodigestor anaerobio)	165
4.3.11.5.	Dimensionamiento de tuberías en el sistema E (tanque de pasteurización – biodigestor anaerobio)	165
4.3.11.6.	Dimensionamiento de tuberías en el sistema F (biogás – tanque de pasteurización)	166
4.3.12.	Dimensionamiento de bombas y compresores	167
4.3.12.1.	Dimensionamiento de la bomba del sistema A (sistema de cribaje – tanque de igualación)	167
4.3.12.2.	Dimensionamiento de la bomba del sistema C (tanque de igualación – trampa de grasas)	171
4.3.12.3.	Dimensionamiento de la bomba del sistema D (tanque de pasteurización – biodigestor anaerobio)	173
4.3.12.4.	Dimensionamiento de la bomba del sistema (extracción de lodo de biodigestor anaerobio)	175
4.3.12.5.	Dimensionamiento del compresor del sistema F (biogás – tanque de pasteurización)	176
4.3.13.	Hojas de especificación de los equipos seleccionados	177
4.4.	Planificación de la producción	195
4.5.	Diagrama de bloques (BFD) y diagrama de flujo (PFD)	197
4.6.	Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)	201
4.7.	Disposición en planta (layout) y planos de elevación (vistas)	1201
5.	ESTUDIO DE LA PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA	209

5.1.	Costos de inversión	209
5.2.	Costos de operación	213
5.3.	Costos por multas	216
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	218
6.1.	Conclusiones	218
6.2.	Recomendaciones	219
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	220
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Animales faenados por año de la EMRAQ-EP	4
Tabla 3.1.	Caracterización inicial del efluente generado por la EMRAQ-EP	15
Tabla 3.2.	Parámetros de diseño de un canal	17
Tabla 3.3.	Parámetros de diseño del sistema de cribaje	20
Tabla 3.4.	Material retenido según abertura de rejillas	24
Tabla 3.5.	Parámetros de diseño tanque igualación	24
Tabla 3.6.	Presión de operación y presión de diseño tanque de almacenamiento	25
Tabla 3.7.	Espesores mínimos para tanques según diámetro nominal	27
Tabla 3.8.	Valores de k del agitador según el régimen del fluido	29
Tabla 3.9.	Parámetros de diseño trampa de grasas	31
Tabla 3.10.	Parámetros de diseño filtros percoladores	35
Tabla 3.11.	Porcentaje de altura de capa en vermifiltro	39
Tabla 3.12.	Mensual de faenamiento por especie EMARQ-EP 2019	40
Tabla 3.13.	Relación residuo-animal EMRAQ-EP	41
Tabla 3.14.	Parámetros de operación biodigestor anaerobio de lodos	49
Tabla 3.15.	Coefficientes para digestión anaeróbica (20 °C)	51
Tabla 3.16.	Coefficiente global de transmisión de calor típicos	55
Tabla 3.17.	Rango de velocidades en interior de tuberías	56
Tabla 3.18.	Caída de presión permisible dentro de tuberías para líquidos	56
Tabla 3.19.	Caída de presión permisible dentro de tuberías para gases	57
Tabla 3.20.	Constante por pérdidas de acoples y válvulas en tuberías	58

Tabla 3.21.	Rugosidad de materiales	63
Tabla 3.22.	Velocidad máxima de banda transportadora	61
Tabla 3.23.	Factor de relleno según el tipo de carga	65
Tabla 3.24.	Capacidad de transporte transportador helicoidal	65
Tabla 3.25.	Factores para determinación de potencia nominal de una bomba	69
Tabla 3.26.	Eficiencia aproximadas para compresores	70
Tabla 4.1.	Resultados del balance de masa de la PTAR (agua residual)	71
Tabla 4.2.	Resultados del balance de masa de la PTAR (lodo residual)	72
Tabla 4.3.	Flujos calóricos sistema de lodos de la EMRAQ-EP	73
Tabla 4.4.	Lista de equipos electrificados en la PTAR de la EMRAQ-EP	74
Tabla 4.5.	Consumo energético de la PTAR	75
Tabla 4.6.	Equipos requeridos y operación principal de la PTAR de la EMRAQ-EP	77
Tabla 4.7.	Resultado del diseño del canal	78
Tabla 4.8.	Resultado del diseño de la criba	82
Tabla 4.9.	Resultado del diseño del tanque de igualación	86
Tabla 4.10.	Resultado del diseño de la trampa de grasas	94
Tabla 4.11.	Resultado del diseño de un módulo de vermifiltro	99
Tabla 4.12.	Resultado del diseño de tanques de almacenamiento	105
Tabla 4.13.	Resultado del diseño del tanque de pasteurización	109
Tabla 4.14.	Resultado del diseño del biodigestor anaerobio	116
Tabla 4.15.	Clasificación de sistemas de tubería de la PTAR	131
Tabla 4.16.	Especificaciones de las líneas de tuberías en la PTAR de la EMRAQ-EP	131

Tabla 4.17.	Caudales a lo largo del sistema de tuberías de los aspersores	159
Tabla 4.18.	Velocidades a lo largo del sistema de tuberías de los aspersores	160
Tabla 4.19.	Cabeza de pérdidas por accesorios a lo largo del sistema de tuberías de los aspersores	161
Tabla 4.20.	Cabeza de pérdidas por fricción a lo largo del sistema de tuberías de los aspersores	162
Tabla 4.21.	Resultados obtenidos del dimensionamiento de tuberías Sistema D	162
Tabla 4.22.	Resultados obtenidos del dimensionamiento de tuberías Sistema E	166
Tabla 4.23.	Resultados obtenidos del dimensionamiento de tuberías Sistema F	167
Tabla 4.24.	Resultados obtenidos para determinación de potencia de bomba Sistema D	174
Tabla 4.25.	Resultados obtenidos para determinación de potencia de bomba Sistema E	175
Tabla 4.26.	Resultados obtenidos para determinación de potencia de bomba Sistema F	177
Tabla 4.27.	Hoja de especificación del sistema de cribaje	179
Tabla 4.28.	Hoja de especificación de tanque de igualación	180
Tabla 4.29.	Hoja de especificación de trampa de grasas	181
Tabla 4.30.	Hoja de especificación de vermifiltro	182
Tabla 4.31.	Hoja de especificación del tanque de recolección	183
Tabla 4.32.	Hoja de especificación del tanque de trituración	184
Tabla 4.33.	Hoja de especificación de tanque de pasteurización	185
Tabla 4.34.	Hoja de especificación del biodigestor anaerobio	186
Tabla 4.35.	Hoja de especificación banda transportadora	187
Tabla 4.36.	Hoja de especificación transportador helicoidal	188

Tabla 4.37.	Hoja de especificación bomba centrífuga	189
Tabla 4.38.	Hoja de especificación bomba centrífuga para manejo de lodos	190
Tabla 4.39.	Hoja de especificación compresor	191
Tabla 4.40.	Hoja de especificación agitador por aspiración	192
Tabla 4.41.	Hoja de especificación intercambiador de tubos concéntricos	193
Tabla 4.42.	Hoja de especificación intercambiador de calor de doble tubo	194
Tabla 5.1.	Costo total por equipos de la PTAR de la EMRAQ-EP	210
Tabla 5.2.	Costo obra civil secundaria	211
Tabla 5.3.	Costo de bombas y compresor	211
Tabla 5.4.	Costo de tuberías y accesorios de la PTAR de la EMRAQ-EP	212
Tabla 5.5.	Costo mensual de personal	213
Tabla 5.6.	Costo consumo de energía por equipo de la PTAR de la EMRAQ-EP	214
Tabla 5.7.	Costos totales por operación PTAR	215
Tabla 5.8.	Sanción monetaria según impacto ambiental	216
Tabla AI.1.	Densidades de sólidos retenidos en criba	233
Tabla AI.2.	Concentraciones de aceite en trampa de grasas escala laboratorio	233
Tabla AII.1	Resumen de especies faenadas por mes	245
Tabla AIII.1.	Costos del cerramiento total del terreno	252
Tabla AIII.2.	Costos para el replanteo de vías de acceso e interiores	252
Tabla AIII.3.	Costos de la casa de control y guardianía	253
Tabla AIII.4.	Costo del sistema de cribado	253

Tabla AIII.5	Costos de la instalación de bombas centrífugas hacia el tanque de igualación	254
Tabla AIII.6.	Costos de la construcción del tanque de igualación	254
Tabla AIII.7.	Costos de la construcción de trampa de grasas	254
Tabla AIII.8.	Costos del sistema de bombeo hacia las piscinas	255
Tabla AIII.9.	Costos para la construcción de los vermifiltros	255
Tabla AIII.10.	Costos de la construcción del tanque de recolección	256
Tabla AIII.11.	Costos de la banda transportadora	256
Tabla AIII.12.	Costos de la construcción del tanque de trituración	257
Tabla AIII.13.	Costos de construcción de un tornillo sin fin	257
Tabla AIII.14.	Costos para la construcción del tanque de pasteurización	258
Tabla AIII.15.	Costos para la instalación de las bombas centrífugas hacia el biodigestor anaeróbico	258
Tabla AIII.16.	Costos de instalación de las bombas de lodos	259
Tabla AIII.17.	Costos para la construcción del tanque biodigestor anaeróbico	260
Tabla AIII.18.	Costos del sistema de bombeo de biogás desde el biodigestor anaeróbico	255

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Mapa de la ubicación de la EMRAQ-EP	4
Figura 2.1.	Lombriz <i>Eisenia Foetida</i>	10
Figura 3.1.	Sección de canal	18
Figura 3.2.	Sistema de cribado	20
Figura 3.3.	Impulsor palas inclinadas	28
Figura 3.4.	Relación geométrica para impulsor placas inclinadas	28
Figura 3.5.	Esquema de trampa de grasas	31
Figura 3.6.	Esquema de vermifiltro	36
Figura 3.7.	Esquema de tanque de almacenamiento de residuos sólidos	42
Figura 3.8.	Esquema tanque de pasteurización	45
Figura 3.9.	Esquema tapa toriesférica	45
Figura 3.10.	Esquema digester anaerobio tasa alta una etapa	48
Figura 4.1.	Esquema sistema de tuberías planta de agua	130
Figura 4.2.	Esquema sistema de tuberías planta de lodos	131
Figura 4.3.	Esquema tubería sistema C	157
Figura 4.4.	Esquema tubería sistema A	168
Figura 4.5.	Esquema tubería sistema D	174
Figura 4.6.	Esquema tubería sistema E	171
Figura 4.7.	Esquema tubería sistema E (vista superior)	176
Figura 4.8.	Diagrama de Gantt de la PTAR de la EMRAQ-EP	196
Figura 4.9.	Diagrama bloques del proceso de la PTAR de la EMRAQ-EP	197

Figura 4.10.	Diagrama PFD de la PTAR	194
Figura 4.11.	Simbología utilizada en el diagrama PFD de la PTAR	200
Figura 4.12.	Diagrama P&ID de la PTAR	202
Figura 4.13.	Simbología utilizada en el diagrama P&ID de la PTAR	204
Figura 4.14.	Layout de la PTAR (vista superior)	205
Figura 4.15.	Vista frontal 3D PTAR EMRAQ-EP	208
Figura AI.1.	Características químicas biogás	234
Figura AI.2.	Diámetros nominales tubería PVC	235
Figura AI.3.	Propiedades físicas químicas del agua	236
Figura AII.1.	Diagrama de funcionamiento del sistema de cribado	237
Figura AII.2.	Diagrama de funcionamiento del tanque de igualación	239
Figura AII.3.	Diagrama de funcionamiento de la trampa de grasas	240
Figura AII.4.	Diagrama de funcionamiento del vermifiltro	243
Figura AII.5.	Diagrama de funcionamiento del tanque de recolección de sólidos	248
Figura AII.6.	Diagrama de funcionamiento del tanque trituración	249
Figura AII.7.	Flujos en el tanque de pasteurización	249
Figura AII.8.	Flujos en el biodigestor anaerobio	250
Figura AIV.1.	Cotización tanque de la PTAR	261
Figura AIV.2.	Catálogo para selección de bombas centrífugas	262
Figura AIV.3.	Catálogo para selección de bombas para traslado de lodos	263
Figura AIV.4.	Catálogo para selección del compresor	263
Figura AIV.5.	Catálogo intercambiador de calor de doble tubo HRS DTR	264
Figura AIV.6.	Catálogo intercambiador de calor tubos concéntricos HRS SERIE K	265

Figura V.1. Diagrama de Moody

265

RESUMEN

El trabajo realizado tuvo como objetivo el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con un vermifiltro para la Empresa Metropolitana de Rastro de Quito (EMRAQ-EP) que se encuentra ubicada en la Parroquia de Guamaní de la ciudad de Quito. El caudal de diseño para la empresa de rastro a tratar estimado es de 620 m³/d, valor que corresponde a un incremento del caudal del 24 % del valor actual que genera la empresa para prever un tratamiento adecuado con el pasar de los años (10 años) sin riesgo de que el agua no sea tratada en su totalidad.

La planta de tratamiento propuestas cuenta además con un proceso para el tratamiento de los sólidos que la EMRAQ-EP genera, con el fin de evitar la contratación de gestores externos. El proceso principal de la PTAR propuesta es el proceso de vermifiltración, que consiste en filtros percoladores que contienen lombrices en su capa principal para de esta manera disminuir la carga orgánica presente. Para complementar el proceso se cuenta con sistema de cribaje, igualación de caudal y trampa de grasas, debido a, que por medio de su aplicación previa al agua residual permite obtener una disminución considerable de los contaminantes presentes.

En cuanto al proceso de tratamiento de sólidos, este cuenta con un proceso de recolección, trituración, pasteurización y estabilización del lodo formado en un biodigestor anaerobio. La PTAR debe funcionar y operar las 24 horas al día los 7 días de la semana, en dos turnos de trabajo, de esta manera el agua residual generada logrará la remoción del 88,52 % de la carga orgánica presente.

Del estudio de prefactibilidad económica de la implementación de la planta se obtuvo que la inversión estimada es de 2 960 350,02 USD; donde, se establece que el costo del tratamiento del agua será de 0,52 m³/d; que resulta mucha más accesible que comparado con un proceso de tratamiento típico.

INTRODUCCIÓN

La escasez de recursos hídricos que satisfagan la cada vez más creciente demanda de agua ha llevado a la implementación de estrategias que permitan su conservación, restauración y preservación. Actualmente, normativas ambientales exigen el tratamiento de aguas residuales producidas por procesos industriales, tal como el faenamiento, antes de su reincorporación en efluentes naturales. El faenamiento es un proceso crucial de la agroindustria del cual se producen efluentes líquidos con alto contenido de materia orgánica. Empresas de rastro como la EMRAQ-EP cuentan con una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) obsoleta que ya no abastece para degradar la incrementada producción de materia orgánica. Con esto en mente, en el presente proyecto de titulación se propone una alternativa eficiente, innovadora y de bajo costo para dar solución a esta problemática.

El manejo de las aguas residuales provenientes de las empresas de rastro o camales es un tema que se ha investigado en el país en los últimos años. Este tipo de industrias genera residuos contaminantes como: sangre, contenido ruminal y del sistema gastrointestinal, agua de aseo, orina, estiércol y sólidos. Esta carga contaminante altera la calidad del agua donde son descargados, lo que provoca el aumento de la demanda de oxígeno y la posible eutrofización de las fuentes de descarga, junto con la aparición de agentes patógenos (Romero, 2016, p. 66)

En el año 2011, Lara (2011, p.12) realizó un estudio en el camal municipal de Baños de Agua Santa por el motivo de que los efluentes generados eran descargados directamente al río Pastaza. Estas acciones provocaron contaminación y proliferación de bacterias en el cuerpo de agua. Se identificó que el agua residual presentaba altos contenidos de DBO, DQO, SST y sólidos sedimentables; por lo que propuso el diseño de una planta conformada por un tratamiento anaeróbico (reactor UASB) como corazón de esta. Lara (2011, p.12), explica además que la relación DQO/DBO de estas aguas de matadero, luego de ser tratadas, se encuentran entre 1,5 y 2,0; lo que indica que sus contaminantes son fácilmente biodegradables.

Una investigación más reciente, del año 2014, realizada para el camal municipal del cantón Alausí, presentó resultados similares de contaminación en sus aguas residuales, tal como en el caso de Baños. La diferencia entre ambos casos de estudio fue que en el diseño de la planta propuesta se trabajó con un tanque de sedimentación, con un tratamiento biológico de tipo aerobio y en conjunto con un tratamiento fisicoquímico (coagulación-floculación) para la remoción de SST, DBO, DQO, coliformes totales y fecales (Espín, 2014, pp. 28-40). Como resultado de la investigación de Espín (2014, p.29), se logró una disminución significativa de las concentraciones de los contaminantes presentes, lo que permitió que dichas concentraciones no sobrepasen los límites permisibles estipulados por el TULSMA (Espín, 2014).

Las dos investigaciones citadas anteriormente trabajaron con procesos convencionales para la disminución de la materia orgánica presente. Sin embargo, dichos tratamientos resultan inconvenientes en muchas circunstancias; principalmente por costos, espacio o ampliaciones de la PTAR. Existen alternativas para tratar aguas residuales que contengan altas cantidades de materia orgánica, como, por ejemplo, por medio de la aplicación de un sistema alternativo de vermifiltro o también llamado sistema Tohá.

1. JUSTIFICACIÓN

1.1. ANTECEDENTES Y DESCRIPCION DEL PROBLEMA

La EMRAQ-EP se encarga del faenamiento de animales de tipo bovino, ovino y porcino, con el objetivo de que sean aptos para el consumo humano. El proceso realizado genera efluentes líquidos con alto contenido de materia orgánica (Chango y Simbaña, 2016, p. 6). Actualmente, la EMRAQ-EP cuenta con su planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), cuyo objetivo es la disminución de las concentraciones de los contaminantes generados bajo los límites permisibles de la normativa ambiental vigente (Normativa Técnica para el control de descargas líquidas NT002) (Secretaría de Ambiente, 2016).

La planta lleva en correcto funcionamiento durante 20 años sin haber presentado ningún problema; trabajan jornadas de 24 horas, los 7 días de la semana para una capacidad de 160 m³/d (Mendoza, 2017, p. 36). Debido al incremento de producción, los efluentes generados han aumentado hasta alcanzar 530 m³/d, por lo que la planta no da abasto. Además, en los informes de monitoreo trimestral de la EMRAQ-EP, se observa que parámetros normados como la demanda biológica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), aceites y grasas sobrepasan su valor con respecto a límites permisibles estipulados en la normativa ambiental vigente.

Previamente, se realizó un estudio de los efluentes generados por la EMRAQ-EP por Ruiz (2020). En dicho estudio, se explica que la PTAR requiere una ampliación de su infraestructura actual o un cambio total de sus procesos de tratamiento, para lograr resultados que no perjudiquen al entorno aledaño de su ubicación. Si la EMRAQ-EP optará por la primera solución, se debería aplicar métodos convencionales para tratar el agua residual con la capacidad deseada de operación, se necesitaría un terreno aproximado entre 3 500 a 5 000 m², terreno que la empresa no tiene disponible (Galeano y Rojas, 2016, p.60; García, et al., 2013,

p.39). Por lo que es necesario buscar una alternativa compacta, de bajo costo, fácil manejo y mantenimiento para dar solución al problema actual (Ruiz, 2020, p.22).

La EMRAQ-EP necesita dar solución al problema medio ambiental que se produce, debido a las altas cantidades de efluente que no se tratan y la baja capacidad que tiene su actual PTAR. Una alternativa para la empresa de rastro es la ampliación de su planta, pero se debe tener en cuenta que el espacio que se tiene es limitado, alrededor de 825 m² (Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable, 2017, p. 2). Los costos de esta operación serían altos, porque se deberá adquirir nuevos equipos de mayor capacidad y a su vez contratar gente especializada para la utilización de estos (Chango y Simbaña, 2016, p. 6).

1.2. TECNOLOGÍA APLICADA AL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Hasta el momento, en el país no se ha estudiado el tratamiento de aguas residuales provenientes de camales que utilicen vermifiltros, sin embargo, existen estudios recientes realizados en Riobamba, donde efluentes provenientes de industrias lácteas, que presentan altos contenidos de materia orgánica, fueron sometidos a un proceso a escala laboratorio de vermifiltros.

Este procedimiento constó de un biofiltro compuesto de grava gruesa, grava fina, arena, aserrín y lombrices. Por medio de goteo, se dispersó el agua a tratar y el proceso duró 66 días. Como resultado se obtuvo la disminución significativa de la carga contaminante en el experimento, donde se removió la DQO en un 77 %, turbidez en un 68 %, sólidos suspendidos en un 65 % y aceites y grasas en un 63 % (Orozco y Sánchez, 2020, p. 12).

Cuando se trata de la implementación de nueva infraestructura en una empresa, se espera siempre la mejor relación costo/beneficio, una PTAR es considerada un gasto extra, por lo que la EMRAQ-EP busca una alternativa de tratamiento eficiente y que no sea muy costosa (Castro, 2019, p. 66). Como se mencionó anteriormente,

al implementar sistemas de tratamientos no convencionales como un vermifiltro, acompañado de sistemas sencillos como una trampa de grasa, se lograría mejorar la calidad del agua, se disminuirían sus contaminantes a valores que cumplan con la norma, además se conoce que los tratamientos mencionados son económicos en su implementación, uso y mantenimiento, y con el beneficio adicional de que no se generan lodos inestables (Ruiz, 2020, p. 32).

Además, los estudios sobre el tratamiento con lombrices necesarios para el tratamiento de este tipo de efluentes son escasos, por lo que tratarlo con esta tecnología poco utilizada resulta una alternativa no solo accesible, sino que también compatible con el medio ambiente. Asimismo, al demostrar su efectividad se podrá promover la implementación de sistemas sustentables en industrias ecuatorianas (Xiomi, 2018, p. 61).

Finalmente, la implementación de la PTAR con un vermifiltro ahorraría a la empresa el pago de multas, suspensiones y hasta revocaciones de su permiso de funcionamiento, ya que estaría acatando las normativas ambientales vigentes.

1.3. TAMAÑO Y LOCALIZACION DE LA PLANTA

La EMRAQ-EP se encuentra ubicada en la ciudad de Quito en el sector de Turubamba de Monjas II, en las calles Camilo Orejuela, Quito 170140, en la Figura 1.1 se presenta el mapa de la ubicación de la planta de rastro (EMRAQ-EP, 2021).

La planta de tratamiento actual se encuentra ubicada dentro del interior del terreno que dispone la empresa, sin embargo, se sabe que el diseño de la planta existente solo abastece 160 m³/d de agua residual y actualmente se genera 530 m³/d. La planta ya sea de tipo convencional o no convencional que se vaya a implantar requerirá un área de trabajo mucho mayor, pero deberá estar ubicada en el mismo lugar o cerca para evitar costos por transporte del efluente.

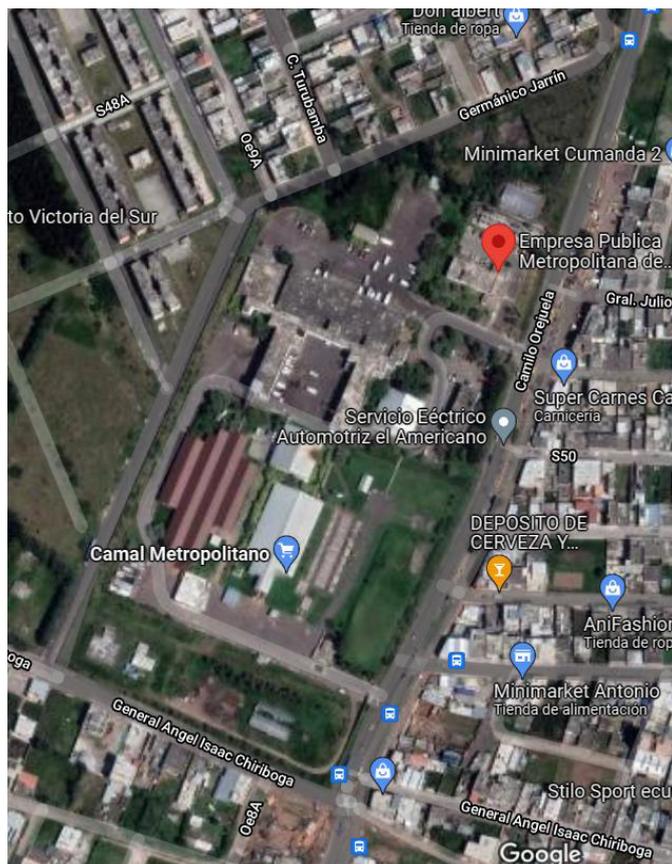


Figura 1.1. Mapa de la ubicación de la EMRAQ-EP
(Google, s.f.)

La propuesta de la planta de tratamiento de aguas y lodos residuales se la diseñará con base en un caudal de diseño de 620 m³/d de efluente, el proyecto se espera que tendrá una vida útil de 10 años con posibilidades de agrandamiento. El caudal de diseño seleccionado se lo realizó en función del comportamiento de faenamiento de la EMRAQ-EP en los últimos años, en la Tabla 1.1 se presenta la cantidad de animales faenados por año de producción.

Tabla 1.1. Animales faenados por año de la EMRAQ-EP

Año	Tipo de especie		
	Bovino	Porcino	Ovino
2014	64 114	79 320	20 253
2015	56 995	83 746	18 367
2016	57 027	88 146	19 204
2017	60 951	85 561	21 214

Tabla 1.1. Animales faenados por año de la EMRAQ-EP (continuación...)

2018	69 205	87 878	21 752
2019	68 727	85 305	19 146
2020	59 841	71 504	9 650

(EMRAQ-EP, 2021)

Como se observa en la Tabla 1.1 el faenamiento por año de animales en la planta no ha aumentado significativamente, esto se debe a que también influye la capacidad de la planta de faenamiento, por lo que se consideró que un aumento del 17 % en la descarga actual bastará para trabajar en el tiempo estimado de operación.

El comportamiento del año 2020 de producción fue descartado para la estimación del caudal de diseño, puesto que, en ese año surgieron amenazas externas (pandemia) y por lo tanto la producción fue menor.

2. DESCRIPCION DEL PROCESO

2.1. SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL EFLUENTE DE LA EMPRESA DE RASTRO

La etapa de ingreso del agua a tratar involucra fenómenos de transporte, por tal razón se deberá trasladar el agua residual hacia el inicio de la planta de tratamiento. Las aguas serán bombeadas a una velocidad específica y guiadas por un canal rectangular con las condiciones de inclinación estipuladas en la norma CPE INEN 5 "Norma para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes" (INEN, 1992, p. 299). Después, el agua a tratar pasará por las siguientes etapas.

2.1.1. SEPARACIÓN DE SÓLIDOS GRUESOS

Esta etapa del proceso permitirá retener sólidos como huesos, pelos, pellejos, entre otros residuos sólidos con tamaño de partícula mayor a 50 mm por medio de una rejilla de barrotes verticales que será de limpieza manual, con el propósito de disminuir costos y a su vez buscar un proceso amigable con el medio ambiente (INEN, 1992, p. 230).

2.1.2. IGUALACIÓN DE CAUDAL

El proceso en adelante requiere que el caudal de trabajo sea constante y para ello se demanda la implementación de un tanque de igualación. El agua a tratar tendrá un tiempo de residencia máximo de 12 horas dentro del tanque con el fin de amortiguar las variaciones de caudal que puedan generarse a lo largo del día y de esta forma mejorar su tratabilidad, se considera que no existirán altos cambios de carga contaminantes según los estudios realizados en otras empresas y el comportamiento de la EMRAQ-EP (Romero, 2016, p. 305).

2.1.3. RETENCIÓN DE ACEITES Y GRASAS

Según los datos presentados en el informe de monitoreo trimestral de la PTAR de la EMRAQ-EP, el efluente exhibe un contenido de grasas y aceites superior a los límites permisibles estipulados por la normativa, por lo que es necesario la implementación de una trampa de grasas.

El efluente contaminado ingresará a un tanque de flotación pequeño (trampa de grasas) con un caudal de diseño establecido, lugar donde se realizará la decantación por gravedad del aceite o grasa presente en el agua y quedará atrapada, el tiempo de retención se obtendrá de la investigación de Ruiz, dato que permitirá el desarrollo del diseño del equipo (2020, p. 27). La grasa flotará en la superficie libre del agua, mientras que el agua sin presencia de grasa o aceite continuará su recorrido, dirigiéndose al biofiltro. El residuo de este proceso es una acumulación de grasa o aceite que deberá ser removida cada semana de forma manual y dirigida hacia el tanque de recepción que se encuentra en el proceso secundario (Romero, 2016, p. 729).

2.1.4. VERMIFILTRACIÓN O FILTRACIÓN CON LOMBRICES

El agua residual sin grasa será dirigida al proceso de biofiltración a partir de lombrices (*Eisenia feotida*). El biofiltro estará compuesto por las siguientes capas: la primera de humus y lombrices, la segunda de cascarilla de arroz para obtener mejores resultados, según la investigación de Ruiz (2020, p. 27) como medio filtrante, la tercera capa es de gravilla y la última de piedras bolones, en el orden mencionado de manera descendente (Guzmán, 2004, p. 33).

El agua residual será distribuida por medio de aspersores sobre el filtro, donde alrededor del 95 % del material orgánico quedará retenido, principalmente sobre las cascarillas de arroz. El objetivo de la mezcla generada de cascarilla y partículas orgánicas (sustrato), es actuar como alimento de las lombrices que se encuentran en la parte superior. Las lombrices al alimentarse del sustrato existente oxidarán la

materia orgánica y generarán una rica flora bacteriana donde se formará humus como residuo (Guzmán, 2004, p. 34).

2.2. SISTEMA DE TRATAMIENTO DE SÓLIDOS DE LA EMPRESA DE RASTRO

Se consideró que los residuos sólidos generados por la EMRAQ-EP son similares a residuos que se obtienen en otras empresas de rastro (Linnenberg, Hernández, Amador y Viquez, 2012, p. 19)

Los residuos sólidos poseen un tamaño de partícula superior a 50 mm, estos residuos en su mayoría son separados previamente del efluente desechado. Sin embargo, quedan restos, los cuales son arrastrados junto con el efluente y retenidos en una criba (Linnenberg, et al., 2012, p. 24). Para tratar los residuos sólidos de la EMRAQ-EP se empleará el siguiente proceso.

2.2.1. RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

El contenido ruminal es bombeado directamente a un tanque de recepción (T1), el mismo que presenta un sistema de agitación sumergible para que no se sedimenten ni floten partículas (Linnenberg, et al., 2012, p. 28).

2.2.2. PASTEURIZACIÓN Y TRITURACIÓN

Todos los residuos sólidos generados en un día serán recolectados en un tanque (tanque de recolección) para luego ser llevado por una banda transportadora a un proceso de trituración. Posteriormente los residuos sólidos serán sometidos a un proceso de pasteurización con el fin de eliminar cualquier tipo de patógeno. Para ello se los dirigirá a un tanque de calentamiento que aumentará su temperatura

hasta alcanzar 70 °C por una hora según lo recomendado por Linnenberg, et al. (2012, p. 29).

2.2.3. BIODIGESTOR

El lodo pasteurizado será bombeado al biodigestor, este será de tipo anaerobio, tasa alta y una sola etapa, en forma de tanque cilíndrico y con tapa elíptica; presentará además agitación y calentamiento. El biodigestor además contará con un sistema de agitación por propulsión interna y un intercambiador de tubos concéntricos (Tamayo, 2019, p. 52).

El lodo obtenido del proceso anterior se dosificará de manera continua al biodigestor con el propósito de que se dé una conversión bioquímica de la materia sin la presencia de oxígeno. El proceso logrará que se forme biogás en conjunto con un efluente o lodo con presencia de menor contenido de materia orgánica degradable (Morales, 2018, p. 17).

2.3. VERMIFILTROS

Los vermifiltros o lombrifiltro son un tipo de filtración biológica por percolación, este método fue desarrollado por primera vez en Chile en 1998 enfocado en el tratamiento para agua servidas. El método de tratamiento también recibe el nombre de sistema Tohá en honor a su inventor y presenta una combinación de mecanismos entre químicos, físicos, macro y microbiológicos con el fin de remover la carga orgánica que se encuentran en el agua residual (Ramón, León, y Castillo, 2015, p. 47)

La implementación de un sistema de vermifiltración permite tratar agua servidas sin el acompañamiento de tratamientos primarios, secundarios ni terciarios. Se evita el problema de la saturación del medio filtrante, debido a que el movimiento de las lombrices permitirá que este medio no se compacte, es ecológico por dos razones

claves; no requiere el uso de aditivos químicos ni consumo de energía para su funcionamiento. Enfocado en su eficiencia, un vermifiltro consigue una remoción de la carga orgánica (DBO₅) y sólidos suspendidos hasta del 96 %, es económico ya que su construcción es simple y su mantenimiento accesible (Ramón, et al., 2015, p. 47-48). El proceso de remoción de la carga orgánica por el mecanismo de las lombrices no genera ningún residuo ni lodos y el agua percolada del proceso no requiere un tratamiento posterior para ser descargada hacia las fuentes hídricas.

2.3.1. LOMBRICES CARACTERÍSTICAS

El sistema Tohá tiene como base de su funcionamiento la participación de lombrices, las lombrices más selectivas con las que se trabaja son las de tipo *Eisenia foetida*. Estas lombrices presentan una estructura alargada y cilíndrica con anillos entre 94 a 96, es por medio de sus anillos que se mueven al momento de que estos se contraen junto con sus músculos. En la Figura 2.1 se muestra una imagen de las lombrices de tipo *Eisenia foetida* (Salazar, 2005, p.63).



Figura 2.1. Lombriz *Eisenia Foetida*
(Lara, 2019)

Las lombrices *Eisenia Foetida* cuentan con 6 riñones, 5 corazones y 182 aparatos excretores, no poseen sentido de la vista, sin embargo, son muy sensibles a la luz del sol, no cuentan con dientes ni mandíbulas por lo que no tienen la capacidad de moler los alimentos.

En cuanto a su crecimiento y reproducción, las lombrices de este tipo se hacen adultas a los 3 meses de edad y son capaces de reproducirse por medio de un anillo denominado clitelo por medio de apareamiento a pesar de que son hermafroditas. La fecundación dura alrededor de 14 a 21 días y nacen entre 2 a 21 lombrices (Salazar, 2005, p. 63). Para la crianza de lombrices no se puede trabajar con cualquier especie, porque existen lombrices que requieren condiciones del medio muy particulares, por ello es que las lombrices mencionadas son las que mejor se adaptan a diversos medios incluyendo el cautiverio. La alimentación de estas lombrices es de tipo eurípagos, lo que quiere decir que su dieta es muy variada, es ahí donde entran los desechos en especial de tipo orgánicos.

La capacidad de las lombrices para ingerir alimentos es igual al equivalente a su peso y expelen el 60 % en forma de humus, el restante es lo que consumen para sus procesos vitales. La ventaja de trabajar con lombrices de tipo *Eisenia foetida* está en su adaptación al medio, toleran las aglomeraciones entre las mismas especies (4000 a 50000 lombrices/m²), alta tasa de reproducción donde cada 3 meses su población aumentara en el doble (Salazar, 2005, p. 64).

2.3.2. CONDICIONES DEL HABITAT

El hábitat de las lombrices es muy importante para su desarrollo y reproducción por lo que existen varios factores a controlar, es importante tener en cuenta que las lombrices californianas (*eisenia foetida*) son muy sensibles a las condiciones externas en las que se encuentran, cambios bruscos del medio pueden interferir radicalmente en su condición de vida. Los factores críticos que se deben considerar para una buena crianza de lombrices son los siguientes:

2.3.2.1. Humedad

La respiración de la lombriz se da por medio de su piel por lo que es fundamental que exista humedad en su medio, la humedad óptima se encuentra entre el 70 -

90 % y con circulación de agua. La humedad del medio influirá directamente con tasa de reproducción de las lombrices, humedad del medio debajo del 70 % serán condiciones de vida desfavorables, mientras que a humedades inferiores del 50 % provocará la muerte de estas (Salazar, 2005, p.65).

2.3.2.2. Potencial de hidrógeno

El potencial de hidrógeno (pH) adecuado para que viva una lombriz se encuentra entre 5 a 9, fuera de ese rango las lombrices mueren debido a que las condiciones de vida no son óptimas. El pH de un medio con alta materia orgánica se encuentra entre 6,5 a 8,5; la presencia de las lombrices genera un cambio común en el medio llevándolos a un valor de pH de 7, que es el pH regular de los vermicompost.

2.3.2.3. Características del sustrato

La característica principal que se evalúa para el funcionamiento de un vermifiltro es la porosidad del medio donde vivirán las lombrices, es necesario que el medio sea altamente poroso para que la oxigenación sea buena, normalmente se mezcla tierra con sustratos como aserrín, o cascarillas de ciertos granos.

Lo usual ha sido trabajar con aserrín como medio para el hábitat de las lombrices, puesto que, es un medio fácil de conseguir y retiene alta cantidad de humedad. A pesar de ello, se han realizado estudios sobre la crianza de lombrices californianas sobre otros medios orgánicos y se han obtenidos resultados exitosos (Jiménez, 2016).

2.3.2.4. Temperatura

El rango de tolerancia de temperatura para una lombriz de tipo *Eisenia foetida* oscila entre 1 a 42 °C, sin embargo, se estableció que los rangos de temperatura óptimos

para que las lombrices presenten un desarrollo adecuado van entre 20 a 25 °C, donde se presenta mayor expansión poblacional.

2.3.2.5. Concentración de oxígeno

Las lombrices son muy sensibles a medios anaerobios, por lo que su medio debe presentar oxigenación constante, se debe evitar que el sustrato este compactado. El ingreso de aire al sustrato determinará la profundidad a la que estos animales ingresen para realizar su trabajo (Bravo, 2019, p. 17). Las lombrices californianas pueden vivir sin ningún problema hasta profundidades de 2 m con el proposito de estar resguardadas de predadores como son los pájaros.

2.4. MECANISMO DE TRABAJO DE LAS LOMBRICES

2.4.1. MOLIENDA

Las lombrices presentan un solo orificio como boca por donde consumen sus alimentos, en su interior estos son humedecidos con una secreción que generan y trasladados por medio de su faringe desde su esófago donde neutraliza ácidos y llegan a la molleja. La molleja y el intestino de la lombriz actúa como un pequeño reactor, donde entran los residuos ingeridos en un tamaño de partícula alrededor de los 3 micrones (Bravo, 2019, p. 17).

2.4.2. ACCIÓN DE LAS ENZIMAS

Las lombrices tienen la capacidad de secretar ciertas enzimas (amilasa, celulosa entre otras) con las cuales es posible la degradación inmediata de material celulósico o proteico y convertirlos en un residuo más estable (orgánicos) (Bravo, 2019, p. 17).

2.4.3. REFUERZO DE MICROORGANISMO PARA LA DESCOMPOSICIÓN

Las lombrices durante su proceso de alimentación y generación de humus trabajan de manera sinérgica con microorganismos descomponedores lo que aumenta la descomposición del material orgánico presente. Las excretas de las lombrices presentan alto contenido de nitrógeno y fósforo este es el motivo por el cual atraen a microbios, que le acompañan en el proceso (Bravo, 2019, p. 17).

2.4.4. GENERACION DE HUMUS

El humus no es más que partículas grandes de complejos coloidales que contienen material fenólico. Este material es utilizado principalmente como abono para plantas, actualmente es alta su demanda debido a que permite la fertilización de suelos donde antes no era posible que crecieran plantas (Bravo, 2019, p. 17).

3. CRITERIOS DE DISEÑO

La EMRAQ-EP es una empresa que no solo genera aguas residuales, además se producen residuos sólidos por lo que el diseño de la planta de tratamiento se enfocará en ambos factores. Para el tratamiento del agua emitida se diseñó un proceso con la información de la experimentación presentada en el proyecto “Estudio de un sistema de tratamiento con base en un biofiltro utilizando lombrices *Eisenia foetida*, para el tratamiento de efluentes provenientes de la Empresa Pública Metropolitana de Rastro EMRAQ-EP” (Ruiz, 2020, p 8).

En el proyecto mencionado se encuentran las características del agua residual con la que se va a trabajar, junto con las dimensiones utilizadas a escala laboratorio de una trampa de grasas y de un vermifiltro. Los cuales lograron la disminución de los contaminantes de tal manera que cumplan con los límites permisibles expuestos en la Normativa Técnica para el control de descargas líquidas NT002 (Secretaría de Ambiente, 2016). En la Tabla 3.1 se observan las características iniciales del efluente industrial y los límites máximos permisibles.

Tabla 3.1. Caracterización inicial del efluente generado por la EMRAQ-EP

	DBO₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	Aceites y grasas (mg/L)	SST (mg/L)
Promedio	1 612	4 537	1 478	1 958
Desviación estándar	389	912	149	1 014
Valores norma	170	350	70	120
Cumplimento	No	No	No	No

(Ruiz, 2020)

Para el tratamiento de los sólidos remantes se utilizaron referencias bibliográficas y se adaptaron a las condiciones de la empresa de rastro. La secuencia de procesos seleccionados va a permitir que el efluente líquido pueda ser descargado en el alcantarillado cumpliendo con la normativa, mientras que los sólidos residuales que actualmente no tienen ningún tratamiento previo serán aprovechados en un

biodigestor. Para el diseño total de la planta se realizó previamente un balance de masa que está expuesto en el Anexo II.

El caudal de diseño de toda la planta de tratamientos será de 620 m³/d, sin embargo, al trabajar con un caudal tan grande el dimensionamiento de los equipos también serán grandes. Por lo que se estableció dividir la planta en dos de iguales características y todo el dimensionamiento establecido en el documento será solo para una de las plantas, con un caudal de 310 m³/d.

3.1. CRITERIO DE DISEÑO PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTE LÍQUIDO

3.1.1. CRITERIO DE DISEÑO PARA EL CANAL DE INGRESO DEL EFLUENTE

El efluente descargado por la EMRAQ-EP sale por una tubería de diámetro de 0,20 m y se dirigirá a la criba por medio de un canal. El objetivo del canal será dirigir al efluente líquido hacia el inicio del proceso y a su vez, permitirá que el efluente alcance la velocidad que recomienda la norma CPE INEN 5 INEN “Norma para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes” (INEN, 1992, p. 229). En la Tabla 3.2 se presentan los parámetros que se utilizarán para dimensionar el canal.

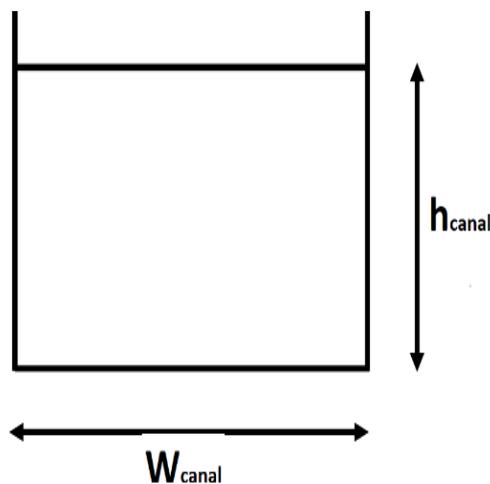
Para el dimensionamiento del canal se trabajará con un caudal de diseño de 310 m³/d, se conoce que la empresa descarga el efluente durante 8 horas al día y se trabajará con un factor de resistencia del material de 0,13.

El factor de resistencia es un término usado para hacer referencia a la condición de la superficie del canal y por consiguiente a la rugosidad de este, depende directamente del material por donde recorre el fluido (Mott, 2006, p. 448). En la Figura 3.1 se representa la sección transversal de canal a diseñar.

Tabla 3.2. Parámetros de diseño de un canal

Parámetro	Valor
Material del canal	Hormigón
Forma del canal	Rectangular
Velocidad del flujo (m/s)	0,60
Borde libre (m)	0,40
Factor de resistencia	0,13

(INEN, 1992, p. 229; Solís, 2014, p. 55)

**Figura 3.1.** Sección de canal
(Fuente propia)

El área mínima transversal del canal debe ser igual o mayor que el área de la tubería para que el agua pueda fluir sin ninguna interrupción, por lo que, se debe comprobar que el área del canal determinada ingrese en ese rango.

Se utilizará la ecuación del área de un cilindro (Ecuación 3.1) para conocer el área de la tubería.

$$A_{t \text{ tubería}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_d^2 \quad [3.1]$$

Donde:

$A_{t \text{ tubería}}$: área transversal de una tubería (m²)

D_d : diámetro interno de la tubería (m)

3.1.1.1. Área húmeda del canal

Para conocer el área húmeda del canal se utilizará la relación existente entre el caudal y la velocidad del flujo. La norma INEN recomienda que la velocidad de acercamiento del flujo hacia las rejillas sea de 0,6 m/s; por lo que dicho valor será utilizado. De la relación caudal con la velocidad se obtendrá el área que ocupa el líquido dentro del canal con la Ecuación 3.2 (INEN, 1992, p.229, Russel, 2012, p.48).

$$Q_d = v_a \cdot A_{\text{húmeda}} \quad [3.2]$$

Donde:

- Q_d : caudal de diseño (m³/s)
- v_a : velocidad de acercamiento (m/s)
- $A_{\text{húmeda}}$: área húmeda del canal (m²)

3.1.1.2. Altura del líquido

Con el área húmeda definida se calculará la altura que ocupa el líquido en el canal. Se considera el canal de forma rectangular con un ancho de 30 cm, ancho mínimo para que la tubería de descarga conecte al inicio del proceso sin derrames. Se utilizará la Ecuación 3.3 para la obtención de la altura del líquido (Russel, 2012, p.48).

$$A_{\text{húmeda}} = W_{\text{canal}} \cdot h_{\text{lámina}} \quad [3.3]$$

Donde:

- $A_{\text{húmeda}}$: área húmeda del canal (m²)
- W_{canal} : base del canal (m)
- $h_{\text{lámina}}$: altura del agua (m)

3.1.1.3. Pendiente del canal

Como el flujo tiene un trayecto desde la salida de la planta de faenamiento hacia el inicio de PTAR, el canal tendrá una inclinación para que fluya por gravedad. La ecuación de Manning permite relacionar la velocidad de un líquido que fluye por un canal abierto y su pendiente (Mott, 2006, p. 448), con esta ecuación se determinará la pendiente óptima del canal. La ecuación de Manning es la Ecuación 3.4.

$$v = \frac{1 \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad [3.4]$$

Donde:

- v : velocidad promedio del fluido (m/s)
- R : radio hidráulico (m)
- S : pendiente del canal (m/m)
- n : coeficiente de rugosidad

En la ecuación de Manning interviene la forma por donde fluye el líquido, por lo que es necesario determinar el radio hidráulico que tiene dicho canal. El radio hidráulico no es más que la relación existente entre el área húmeda y el perímetro húmedo que ocupa el fluido (Mott, 2006, p. 448).

En el caso de un canal rectangular abierto la fórmula del radio hidráulico se presenta en la Ecuación 3.5 (Mott, 2006, p. 454).

$$R = \frac{W_{\text{canal}} \cdot h_{\text{canal}}}{W_{\text{canal}} + 2 \cdot h_{\text{canal}}} \quad [3.5]$$

3.1.2. CRITERIO DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE CRIBAJE

El efluente residual ingresará a la planta de tratamiento a través de un sistema de cribaje, donde retendrán los sólidos de mayor tamaño. Se considerará dos cribas fijas en paralelo con el propósito de que el flujo sea continuo en la PTAR, de tal

manera, que se podrá dar mantenimiento a los equipos sin interrumpir el proceso, ambos equipos tienen las mismas dimensiones. En Figura 3.2 se presenta un esquema de la criba que se va a diseñar (Romero, 2016, p 291).

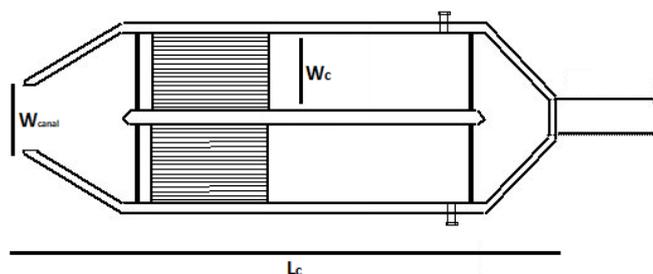


Figura 3.2. Sistema de cribado
(Romero, 2016, p 291)

Las cribas son rectangulares con varillas verticales de hierro y de limpieza manual. El canal al ingresar al sistema de cribaje se dividirá en dos para que el flujo vaya hacia una u otra criba (la que esté en funcionamiento). En la Tabla 3.3 se presentan los parámetros de diseño de una criba. Los valores presentados son datos bibliográficos y recomendados para la evaluación del diseño del sistema de cribaje.

Tabla 3.3. Parámetros de diseño del sistema de cribaje

Característica	De limpieza manual	De limpieza mecánica
Ancho de las barras (cm)	0,5 – 1,5	0,5 – 1,5
Profundidad de las barras (cm)	2,5 – 7,5	2,5 – 7,5
Espaciamiento (cm)	2,5 – 5,0	1,5 – 7,5
Pendiente de la vertical (°)	30 – 45	0 – 30
Velocidad de acercamiento (m/s)	0,3 – 0,6	0,6 – 1,0
Pérdida máxima de carga permisible (cm)	15,0	15,0

(Romero, 2016, p 288)

La parte fundamental del sistema de cribaje es la separación que tienen las barras verticales, ya que estas se encargan de la retención de los sólidos. Para el dimensionamiento de las cribas de la PTAR se seleccionará la separación más pequeña de 2,5 cm de tal manera, que se retendrán la mayor cantidad de sólidos posibles y un espesor de ellas de 0,01 m, valor que se encuentra dentro del rango

recomendado (Romero, 2016, p. 288), de esta manera las barras resistirán los sólidos que arrastrará el efluente descargado por la EMRAQ-EP.

Otro punto importante para el dimensionamiento del sistema de cribaje es la velocidad de acercamiento. Se seleccionará la velocidad máxima recomendada de 0,6 m/s; así el equipo podrá trabajar adecuadamente incluso con el flujo en su máxima velocidad.

Para evaluar si el sistema no se taponará inmediatamente con los sólidos gruesos se determinará la pérdida de carga permisible, según Romero este valor no debe exceder 15 cm (2016, p. 288). Las pérdidas de cargas permisible equivalen a la pérdida de energía que el fluido tiene al momento de atravesar las rejillas y depende de la forma que estas tengan (Romero, 2016, 288).

3.1.2.1. Área libre de la criba

Para dimensionar el sistema de cribaje se calculará el área libre que ocupa el fluido cuando atraviesa el equipo, este valor no es más que la relación entre el caudal y la velocidad de acercamiento del fluido, con este valor se conocerá el área necesaria que deberá tener la rejas por la cual está atravesando el fluido y donde se deberán quedar todos los residuos sólidos de tamaño considerable como huesos, pellejos, pelos entre otros residuos similares del proceso. Por medio de la Ecuación 3.6 se determinará el área libre (Romero, 2016, p. 288).

$$A_l = \frac{Q_d}{v_a} \cdot f \quad [3.6]$$

Donde:

A_l : área libre (m²)

Q_d : caudal de diseño (m³/s)

v_a : velocidad de acercamiento (m/s)

f : factor de seguridad

3.1.2.2. Área libre total de la criba

El área libre total es el área mínima que deberá tener la zona transversal de la criba para que funcione correctamente (Hendricks, 2016, p. 79). Al reemplazar en la Ecuación 3.7 el valor que resulta en la Ecuación 3.6 junto con la separación y espesor de las barras se determinará el área libre total (Hendricks, 2016, p. 81).

$$A_T = \frac{A_l}{\frac{D_b}{D_b + e}} \quad [3.7]$$

Donde:

- A_T : área total (m²)
- D_b : separación de barras (m)
- e : espesor de barras (m)

3.1.2.3. Ancho de la criba

El ancho de la criba se lo calculará con la Ecuación 3.8, el ancho de la criba debe ser mayor al ancho del canal para que el fluido pueda continuar el recorrido sin problema (Hendricks, 2016, p.81).

$$W_c = \frac{A_T}{b} \quad [3.8]$$

Donde:

- W_c : ancho de la criba (m)
- W_{canal} : ancho del canal (m)

3.1.2.4. Cabeza de pérdida de las rejillas

La manera adecuada para evaluar el dimensionamiento del sistema de cribaje es por medio de la determinación de la pérdida de energía que existe en función de la

forma de las barras. Este valor según Romero (2016, p. 288), no debe ser superior a 15 cm. El factor de forma de la rejilla se seleccionará de acuerdo con la forma de las barras que son rectangulares de caras rectas (Grupp, 2010, p.13) Con la Ecuación 3.9 se determinará la pérdida de carga de las rejillas (Hendricks, 2016, p. 81).

$$H = \beta \cdot \left(\frac{e}{D_b}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \frac{v_a^2}{2 \times g} \cdot \sin(\theta) \quad [3.9]$$

Donde:

- H : cabeza de pérdida de las rejillas (cm)
- B : factor de forma de la rejilla
- θ : ángulo de inclinación de la base (°)
- g : aceleración de gravedad (m/s²)

3.1.2.5. Número de rejillas

Al reemplazar los datos de ancho del canal y separación de barras en la Ecuación 3.10 se obtendrá el número de barra verticales que debe tener cada criba (Solís, 2014, p. 60)

$$N = \frac{W_{\text{canal}} - D_b}{D_b - e} \quad [3.10]$$

Donde:

- N: número de rejillas horizontales

3.1.2.6. Material retenido por las rejillas

La norma INEN “Norma para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes” presenta la cantidad de material retenido según la separación seleccionada entre

barras, en la Tabla 3.4 se presenta dicha información (INEN, 1992, p. 229). Con la información que se obtiene de la norma y una abertura entre rejillas de 25 mm se determinará la cantidad de material retenido.

Tabla 3.4. Material retenido según abertura de rejillas

Abertura (mm)	Cantidad (L/m ³)
20	0,038
25	0,023
35	0,012
40	0,009

(INEN, 1992, p. 228)

3.1.3. CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL TANQUE DE IGUALACION

El tanque de igualación es instalado en la planta con el propósito de que esta trabaje de manera continua con un caudal constante durante todo el día, se estableció que no existirá variación de carga orgánica que llegase a influir en el diseño del tanque puesto que desde un inicio se trabajó con un caudal de diseño sobredimensionado.

Además, se busca que el agua residual este homogeneizada para que los procesos posteriores no presenten variabilidad de cargas contaminantes. En la Tabla 3.5 se presentan los parámetros de diseño recomendados.

Tabla 3.5. Parámetros de diseño tanque igualación

Parámetro	Valor
Tiempo de retención (h)	12 -24
Potencia de mezcla (W/m ³)	4 a 8
Profundidad (m)	4,5
Borde libre (m)	0,9
Nivel mínimo de operación (m)	1,5

(Valdez y Vázquez, 2003, p. 137)

3.1.3.1. Área del tanque de igualación

El área que ocupará el tanque de igualación se lo determinará con la Ecuación 3.11, y el tiempo de residencia adecuado será 12 horas, debido a que el fluido a tratar no presenta alta variabilidad de cargas contaminantes (Valdez y Vázquez, 2003, p. 138).

$$A_{TH} = \frac{V_{MAXI}}{H_{TH}} \quad [3.11]$$

Donde:

A_{TH} : área del tanque igualación (m^2)

H_{TH} : altura del tanque igualación (m)

V_{MAX} : volumen máximo del tanque de igualación (m^3)

3.1.3.2. Presión de operación y presión de diseño en el tanque de igualación

Para el cálculo posterior del espesor del tanque es necesario determinar la presión de operación y presión de diseño a la cual está sometido el tanque, en la Tabla 3.6 se presentan las presiones de diseño en relación con la presión de operación (American Society of Mechanical Engineers, 2010). La presión de operación se determinará con la Ecuación 3.12 y la Ecuación 3.13.

Tabla 3.6. Presión de operación y presión de diseño tanque de almacenamiento

Presión de operación (psi)	Presión de diseño (psi)
< 250	Po máx. + 25 psi
250 – 580	110 % Pop máx.
580 – 1160	Pop máx. + 58 psi
1160	105 % Pop máx.

(American Society of Mechanical Engineers , Código B31.3-2010: Tuberías de proceso, 2010)

$$P_o = P_{atm} + P_e \quad [3.12]$$

$$P_e = \rho_e \cdot g \cdot h_e \quad [3.13]$$

Donde:

P_o : presión de operación en el interior del tanque (MPa)

P_{atm} : presión atmosférica, en Quito es de 0,72 atm (MPa)

P_e : presión hidrostática que ejerce el efluente dentro del tanque (MPa)

3.1.3.3. Espesor del tanque de igualación

Para la determinación adecuada del espesor del tanque de igualación se considerará que el material del equipo es de acero al carbono de tipo ASTM A36 (American Petroleum Institute, 2012).

Todo material tiene la capacidad de soportar cierta cantidad de fuerza ejercida sobre este antes de romperse, por ello es importante conocer el límite de esta fuerza para establecer el espesor necesario o también conocida como tensión a la rotura (Towler y Sinnott, 2008, p. 985)

El material seleccionado tiene una tensión a la rotura (S_m) entre 400 a 550 MPa, lo que indica que es un material adecuado para soportar la presión generada por el agua almacenada. Se trabajará con la Ecuación 3.14 para la determinación del espesor mínimo requerido en el cuerpo del tanque en función a la presión que se ejercerá desde su interior (Towler y Sinnott, 2008, p.986).

$$t_{TH} = \frac{P_i \cdot D_{TH}}{2 \cdot S_m \cdot E - 1,2 P_i} + c \quad [3.14]$$

Donde:

t_{TH} : espesor del tanque de igualación (mm)

P_i : presión interna del tanque (MPa)

D_{TH} : diámetro interno del tanque (mm)

S_m : tensión máxima permisible del material (MPa)

- E : eficiencia de soldadura
 c : tolerancia por corrosión (mm)

La eficiencia de soldadura de un tanque u objeto depende de muchos factores como la preparación previa del material, la técnica de soldadura y los parámetros de soldadura. Como el diseño de los equipos es ingeniería conceptual y básica se seleccionará una eficiencia de soldadura del 80 % ya que es un valor común para la determinación de espesores de tanques (Jeffus, 2009, p. 493).

El espesor del tanque se lo relaciona con el diámetro nominal que tendrá, la norma API 650 recomienda dicho espesor y esta información se presenta en la Tabla 3.7, sin embargo, por efectos futuros de corrosión se agrega un espesor extra. El valor seleccionado asegura que el tanque sea capaz de soportar la presión y tensión que se ejerza sobre sus paredes (American Petroleum Institute, 2012, p.60)

Tabla 3.7. Espesores mínimos para tanques según diámetro nominal

Diámetro nominal (m)	Espesor mínimo (mm)
1,0	5
1,0 – 2,0	7
2,0 – 2,5	9
2,5 – 3,0	10
3,0 – 3,5	12

(Towler y Sinnott, 2008, p.986)

3.1.3.4. Sistema de agitación del tanque de igualación

El sistema de agitación seleccionado es de tipo turbina con impulsor de palas inclinadas (Figura 3.3), siendo este sistema suficiente para la agitación del agua residual. El tipo de agitación seleccionado provoca que el flujo se mueva de manera axial y radial dentro del tanque, lo que ayuda a que los sólidos suspendidos no sedimenten (Castillo, 2013, p. 30). Para el diseño del sistema de agitación se utilizará semejanza geométrica que existen entre todas las partes. La condición

primordial para aplicar semejanza geométrica es que la relación altura de líquido con el diámetro del tanque sea lo más cercano a uno, es decir ambas dimensiones deben ser muy parecidas de tamaño.

En la Figura 3.4 se presenta los símbolos de las dimensiones que tiene un tanque con impulsor tipo placa planas.

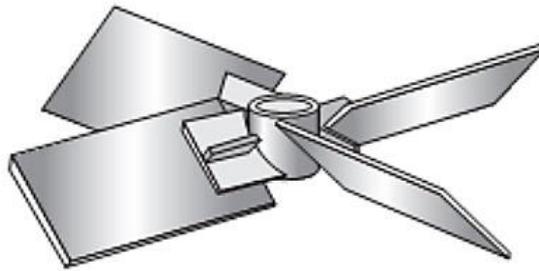


Figura 3.3. Impulsor palas inclinadas
(Castillo, 2013, p. 30)

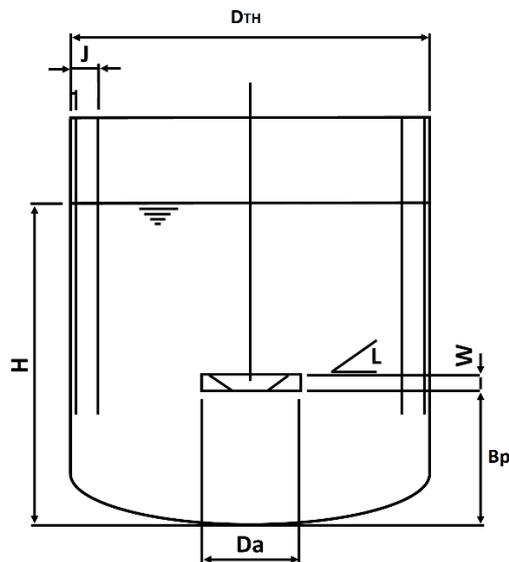


Figura 3.4. Relación geométrica para impulsor placas inclinadas
(Castillo, 2013, p. 30)

Desde la Ecuación 3.15 hasta la Ecuación 3.19, se presentan las relaciones que existen entre las dimensiones de un tanque con sistema de agitación, con estas ecuaciones se determinarán las dimensiones generales del sistema de agitación del tanque de igualación (Castillo, 2013, p. 30).

$$\frac{H}{D_{TH}} = 1 \quad [3.15]$$

$$\frac{D_a}{D_{TH}} = 0,337 \quad [3.16]$$

$$\frac{B_p}{D_{TH}} = 0,5 \quad [3.17]$$

$$\frac{J}{D_{TH}} = 0,1 \quad [3.18]$$

$$\frac{W}{D_a} = 0,2 \quad [3.19]$$

Donde:

H : altura del líquido (m)

D_a : largo de las paletas (m)

B_p : distancia entre base de tanque y paletas (m)

W : ancho de paletas (m)

J : ancho del deflector (m)

Normalmente los sistemas de agitación en tanques que almacenan aguas residuales trabajan con un régimen turbulento, por lo que con la Ecuación 3.20 se determinará la potencia del impulsor. Se tomó como velocidad de giro un valor de 0,4 rev/s para evitar un sobre esfuerzo en el motor del agitador y una constante del agitador (k agitador) de 1,65 que se la obtiene por el tipo de impulsor (Metcalf y Eddy, 2003, p. 245).

En la Tabla 3.8 se encuentran los valores de la constante k agitador para los diferentes tipos de impulsores que existen y es de ahí donde se seleccionó el valor de la constante a utilizar (Metcalf y Eddy, 2003, p. 246).

$$P_{\text{agitador}} = k_{\text{agitador}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot n^3 \cdot D_a^5 \quad [3.20]$$

Donde:

P_{agitador} : potencia necesaria del agitador (W)

k_{agitador} : constante del agitador

n : velocidad de giro (rev/s)

Tabla 3.8. Valores de k del agitador según el régimen del fluido

Impulsor	Régimen laminar	Régimen turbulento
Hélice, paso cuadrado, 3 palas	41,00	0,32
Hélice, paso de dos, 3 palas	43,50	1,00
Turbina, 6 palas planas	71,00	6,30
Turbina, 6 palas curvas	70,00	4,80
Turbina ventilador, 6 palas	70,00	1,65
Turbina, 6 palas en punta de flecha	71,00	4,00
Paleta plana, 6 palas	36,50	1,70
Turbina cerrada, 2 palas curvas	97,50	1,08
Turbina cerrada con estator (sin deflectores)	172,50	1,12

(Metcalf y Eddy, 2003, p 246)

3.1.4. CRITERIO DE DISEÑO DE LA TRAMPA DE GRASAS

El efluente contaminado después de ser homogeneizado entrará a la trampa de grasas, de esta manera, se decantará por gravedad la grasa presente en el agua y quedará atrapada para posteriormente ser recolectada. La trampa de grasas tiene una conexión directa con la tubería de salida del tanque de igualación. Esta tubería se conecta a la trampa de grasas por la parte superior, y se encuentra a 0,15 m bajo el nivel de agua según la recomendación de la CEPIS (2003, p. 8).

La tubería de salida del fluido de la trampa de grasas se encuentra ubicada a 0,080 m del fondo; valor que se encuentra dentro del rango que recomienda la CEPIS. La ubicación de las tuberías de ingreso y de salida según lo recomendado permite que

la grasa retenida flote. En la Figura 3.5 se presenta el esquema de la trampa de grasas diseñada y en la Tabla 3.9 se encuentran los parámetros de diseño utilizados.

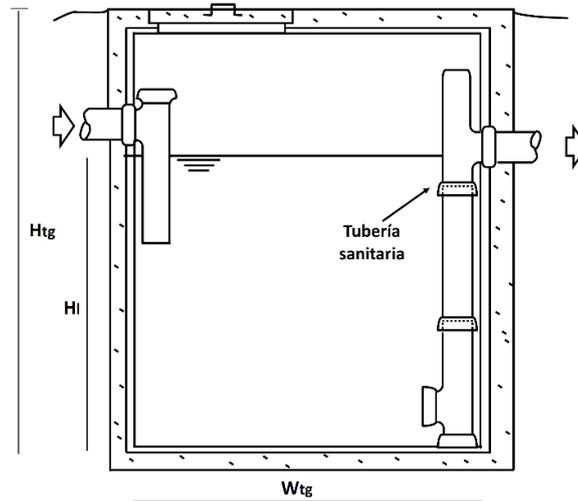


Figura 3.5. Esquema de trampa de grasas
(Romero, 2016, p. 729)

Tabla 3.9. Parámetros de diseño trampa de grasas

Parámetro	Valor
Carga superficial ($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$)	24 – 38
Relación largo – ancho	2:1 – 3:2
Espacio sobre el nivel del líquido (m)	> 0,30
Pendiente ($^\circ$)	45 – 60
Tiempo de retención (min)	0,25 – 0,50
Profundidad (m)	> 0,8

(CEPIS, 2003, p. 8)

3.1.4.1. Porcentaje de remoción de grasa

Para el dimensionamiento de una trampa de grasas es importante conocer la cantidad de grasa que presenta inicialmente el fluido y ver cómo se comporta por medio de la experimentación dentro de una trampa de grasas a nivel laboratorio.

Por medio de la información obtenida por Ruiz (2020, p. 35) y con la Ecuación 3.21 se determinará el porcentaje de remoción de grasas posibles con el agua a tratar (Solís, 2014, p. 30).

$$\text{Remoción grasa} = 100 - \frac{100 \cdot C_{gf}}{C_{fo}} \quad [3.21]$$

Donde:

Remoción grasa : porcentaje de remoción de aceites y grasas (%)

C_{go} : concentración inicial de aceites y grasas (mg/L)

C_{gf} : concentración final de aceites y grasas (mg/L)

El funcionamiento de una trampa de grasas apropiada se la obtiene cuando el tiempo de retención hidráulico es el adecuado juntamente con un buen diseño hidráulico, se buscará siempre la mejor remoción de las grasas en un tiempo óptimo y que ocupe un área relativamente pequeña (Romero, 2016, p.729).

3.1.4.2. Volumen del líquido de la trampa de grasas

La Ecuación 3.22 permitirá el cálculo del volumen del agua que retendrá la trampa de grasas en relación con el caudal de diseño y el tiempo de retención hidráulica, valor obtenido de la investigación de Ruiz (2020, p.41), que fue de 1,63 min. Se deberá considerar que el tiempo obtenido de la investigación mencionada se realizó para un proceso escala laboratorio, por lo que, si el equipo resulta muy pequeño de dimensiones, se seleccionará el tiempo mínimo recomendado.

$$V_l = Q_d \cdot TRH_{tg} \quad [3.22]$$

Donde:

V_l : volumen de líquido en la trampa de grasas (m³)

Q_d : caudal de diseño (m³/h)

TRH_{tg} : tiempo de retención hidráulico de la trampa de grasas (h)

3.1.4.3. Ancho de la trampa de grasas

Con la Ecuación 3.23 se determinará el ancho del canal, el cual será de forma rectangular, se estableció además una relación ancho-largo de 0,5 y una altura estándar de 1,25 m (Romero, 2016, p. 729).

$$W_{tg} = \frac{\sqrt{V_1 \cdot R_{L-W}}}{P_1} \quad [3.23]$$

Donde:

W_{tg} : ancho de la trampa de grasas (m)

R_{L-W} : relación largo – ancho

P_1 : profundidad del líquido en la trampa de grasas (m)

3.1.4.4. Largo de la trampa de grasas

Derivado de la relación largo y ancho de la trampa de grasas, con la Ecuación 3.24 se determinará la longitud de esta (Solís, 2014, p. 32).

$$L_{tg} = \frac{W_{tg}}{R_{L-W}} \quad [3.24]$$

Donde:

L_{tg} : longitud de la trampa (m)

3.1.4.5. Área superficial de la trampa de grasas

Con la Ecuación 3.25 se determinará el área superficial de la trampa de grasas (Solís, 2014, p. 32).

$$A_{tg} = L_{tg} \cdot W_{tg} \quad [3.25]$$

Donde:

A_{tg} : área superficial de la trampa de grasas (m^2)

3.1.4.6. Carga superficial de la trampa de grasas

La carga superficial es la relación existente entre el caudal que ingresa a un sistema y el área superficial de este, cuanto mayor es la carga superficial, menor es la superficie necesaria requerida. Por lo tanto, al conocer la carga superficial se puede establecer el volumen del equipo según los valores que se recomienda bibliográficamente (CEPIS, 2003, p. 7).

La Ecuación 3.26 permitirá el cálculo de la carga superficial de la trampa de grasas diseñada (Solís, 2014, p. 32).

$$C_i = \frac{Q_d}{A_{tg}} \quad [3.26]$$

Donde:

C_i : carga superficial para la trampa de grasas ($m^3/m^2 d$)

3.1.5. CRITERIO DE DISEÑO DEL VERMIFILTRO

El vermifiltro es considerado un filtro biológico aeróbico cuyo comportamiento es similar a los filtros percoladores de este modo se considerarán los mismos parámetros de diseño, lo cuales se encuentran expuestos en la Tabla 3.10.

Se considerará la división del vermifiltro en varios módulos, con el fin de que el control y remoción de humus sea manejable por el personal que se encargará de ese proceso, la cantidad de módulos se decidirá en función del área total requerida para tratar el caudal de diseño. El efluente proveniente de la trampa de grasas será bombeado y repartido de manera homogénea hacia todos los módulos del

vermifiltro. La descarga del efluente se lo realizará por medio de un sistema de tuberías que se encontrarán en la parte inferior de todos los módulos del vermifiltro y subirán, para que, de esta manera ser expulsado por medio de aspersores sobre la capa superior (sustrato) de forma ordenada, de acuerdo con la cantidad de área superficial que se tenga y la capacidad de los aspersores.

Todos los módulos estarán constituidos por una capa denominada sustrato (cascarilla de arroz más tierra con lombrices) y tres capas más constituidas de piedras de diferentes tamaños (arena, grava y piedras bolones) con el propósito de mejorar la eficiencia de la percolación (Romero, 2016, p. 553). En la Figura 3.6 se presenta un esquema del vermifiltro.

Luego el agua percolará las diferentes capas y los contaminantes orgánicos quedarán retenidos en el sustrato del lecho filtrante principal (Guzmán, 2004, p.34). Las lombrices consumirán la materia orgánica presente junto con la flora bacteriana que se ha generado por su proceso de digestión (Salazar, 2005, p. 67).

Para un funcionamiento adecuado del vermifiltro, se deberá contar con un sistema de ventilación, ya que las lombrices requieren de una alta presencia de oxígeno para que puedan trabajar correctamente, el sistema será simplemente tubos de PVC colocados de forma vertical y con orificios en su extensión.

Tabla 3.10. Parámetros de diseño filtros percoladores

Características	Tasa baja	Tasa intermedia	Tasa alta
Carga hidráulica (m ³ /m ² d)	1 – 4	4 – 9	9 – 37
Carga orgánica (kg DBO ₅ /m ³ d)	0,08 – 0,32	0,24 – 0,48	0,32 – 1,80
Profundidad (m)	1,5 – 3,0	1,0 – 2,5	0,9 – 2,5
Medio	Piedra-escoria	Piedra-escoria	Piedra-escoria sintético
Relación de circulación	0	0,5 – 2,0	0,5 – 4,0
% remoción de DBO	85 – 85	50 – 70	40 – 80

(Romero, 2013, p 560)

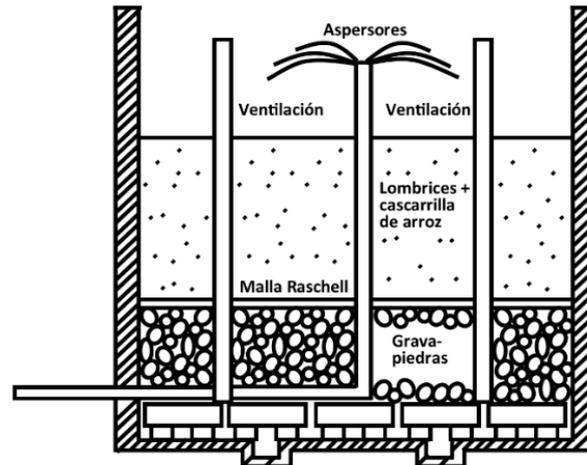


Figura 3.6. Esquema de vermifiltro
(Fuente propia)

3.1.5.1. Eficiencia del vermifiltro

Para la determinación de la eficiencia del vermifiltro se trabajará con la información obtenido del proceso a escala laboratorio realizado por Ruiz (2020, p. 45) donde presenta el valor de DBO₅ inicial y el valor obtenido al final del proceso. Con la Ecuación 3.27 se determinará la eficiencia que tiene el vermifiltro (Manyuchi, Kadzungura y Boka, 2013, p. 13).

$$E_r = \frac{C_{DBO_0} - C_{DBO_f}}{C_{DBO_0}} \quad [3.27]$$

Donde:

E_r : eficiencia de remoción de DBO₅

C_{DBO_0} : concentración inicial DBO₅ de la caracterización del agua residual
(mg/L)

C_{DBO_f} : concentración final DBO₅ después de tiempo óptimo de retención
(mg/L)

En el diseño de un vermifiltro existen dos factores críticos que determinarán la calidad del agua tratada y son el tiempo de retención hidráulico (HRT) y la carga

hidráulica (HLR) (Manyuchi, et al., 2013, p. 16). El tiempo de retención hidráulico se refiere al tiempo requerido para que el efluente atraviese todas las capas del filtro, por otro lado (Manyuchi, et al., 2013, p. 16).

Para el diseño del vermifiltro se utilizará el valor de $1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$ como valor de HLR, este valor seleccionado es el máximo recomendado para el diseño de un vermifiltro. El propósito es que la relación caudal/área permitirá que las lombrices puedan realizar correctamente su trabajo sin el inconveniente de que se tenga áreas superficiales demasiado extensas y no existan estancamientos del agua (Castro, 2019, p. 34).

3.1.5.2. Carga hidráulica del vermifiltro

Con la Ecuación 3.28 se determinará el volumen del vermifiltro en función de la carga hidráulica (Manyuchi, et al., 2013, p. 16).

$$\text{HLR} = \frac{V_{\text{ar}}}{A_v \cdot t} \quad [3.28]$$

Donde:

- HLR : tasa de carga hidráulica ($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$)
- V_{ar} : volumen de agua residual (m^3)
- A_v : área de material filtrante (m^2)
- t : tiempo que demora en escurrir (d)

3.1.5.3. Tiempo de retención hidráulico del vermifiltro

El tiempo de retención hidráulico se conoce debido a las experimentaciones previas realizadas por Ruiz (2020), quien obtuvo que durante 24 horas de contacto entre el agua residual y la columna del lecho se obtienen los valores más bajos de DBO_5 al

trabajar con cascarilla de arroz como sustrato y el agua residual de la EMRAQ-EP. Se trabajará con un HRT de 24 horas.

Con la Ecuación 3.29 se calculará la altura que debe tener el lecho donde se encuentran las lombrices a partir de la relación tiempo de retención hidráulica y volumen del vermifiltro (Castro, 2019, p 34).

$$\text{HRT} = \frac{V_s \cdot p}{Q_v} \quad [3.29]$$

Donde:

HRT : tiempo de retención hidráulico (h)

V_s : volumen de sustrato donde se encuentran las lombrices (m^3)

Q_v : caudal que ingresa al vermifiltro (m^3/h)

p : porosidad del medio (%)

3.1.5.4. Capas del vermifiltro

Para el cálculo del balance de masa se trabajará con la cantidad proporcional de lombrices utilizadas por Ruiz (2020) en función del volumen del vermifiltro. La cantidad de lombrices usadas fue de 120 g para un volumen de 30 L.

Cada módulo de vermifiltro será una construcción de estructura de hormigón, de forma rectangular y con altura máxima de 3,00 m, valor recomendado para el funcionamiento adecuado de filtros percoladores. De esta manera se podrá retirar sin dificultad el humus generado y facilitar el movimiento de la tierra superior, estos procesos se deberán realizar continuamente para el funcionamiento del vermifiltro (Bravo, 2019, p. 26). En la Tabla 3.11 se presenta el porcentaje que deben tener las diferentes capas en la altura del vermifiltro.

El efluente percolado en el vermifiltro caerá sobre una canaleta inferior, esta deberá tener una inclinación de 0,60 cm por cada 3,00 m de canaleta, con el fin de dar

dirección al efluente hacia su descarga final (Bravo, 2019, p. 27). Cada módulo será construido sobre bases de hormigón separadas 10,00 cm para dar paso al efluente tratado que caerá sobre la canaleta como se observa en la Figura 3.7.

Tabla 3.11. Porcentaje de altura de capa en vermifiltro

Tipo de capa	Profundidad (%)
Biológica	60
Arena y gravilla	16
Grava	8
Piedras bolones	16

(Bravo, 2019, p 19)

3.1.5.5. Sistema de ventilación y aspersión

Como se mencionó previamente, el vermifiltro deberá contar con un sistema de ventilación, según Bravo (2019, p.28) los aspersores adecuados son de baja presión tipo *Wobbler* con alcance de 2,25 m a la redonda y por cada aspersor se recomienda que se tenga 6 tubos de ventilación, de esta manera se asegurará que el oxígeno esté en abundancia.

Todo el sistema de vermifiltración funcionará bajo un galpón así se podrá evitar el acceso de las aguas lluvias al sistema, de radiación y a su vez controlar la humedad, que se mantenga alrededor de un 75 % (Bravo, 2019, p. 30).

3.2. CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDO

Para el proceso de tratamiento de residuos sólidos se calculará la materia prima que se va a tratar diariamente, para ello se trabajará con la información entregada por la EMRAQ-EP en su informe de gestión anual del 2019. Se requiere obtener un valor real de consumo y en el 2020 las condiciones de operación fueron

especiales por circunstancias externas. En la Tabla 3.12 se presenta la cantidad de animales faenados en el 2019 por la EMRAQ-EP (Empresa Pública Metropolitana de Rastro Quito, 2019, p. 8)

Tabla 3.12. Mensual de faenamiento por especie EMARQ-EP 2019

	BOVINO	OVINO	PORCINO	LLAMAS
ENERO	6 106	1 736	7 096	39
FEBRERO	5 504	1 540	6 133	37
MARZO	5 592	1 540	6 310	34
ABRIL	5 642	1 484	7 125	24
MAYO	6 094	1 749	7 101	39
JUNIO	5 535	1 539	6 547	32
JULIO	6 428	1 624	7 690	43
AGOSTO	5 759	1 642	7 072	33
SEPTIEMBRE	5 710	1 654	7 382	22
OCTUBRE	5 737	1 365	7 311	24
NOVIEMBRE	5 359	1 671	6 825	36
DICIEMBRE	5 261	1 602	8 712	35
PROMEDIO	5 727	1 596	7 109	33
TOTAL ANUAL	68 727	19 146	85 304	398

(Empresa Pública Metropolitana de Rastro Quito, 2019, p.8)

Se trabajará con el promedio de los animales faenados para tener un estimado del valor mensual de la cantidad de animales consumidos en el 2019. Para la determinación de la cantidad de residuos sólidos generados por animal se realizará una relación con la cantidad de residuos generados en ese año y la cantidad de animales faenados en relación con el caudal de diseño.

Se asumirá además que los desechos más relevantes que se van a tener y con los que se va a trabajar para el tratamiento de lodos van a ser estiércol, contenido ruminal y decomisos, se considera como decomiso los residuos del animal que no pueden ser ingeridos por los humanos debido a la presencia de patógenos, se considera que la densidad de esta mezcla es igual a 784 kg/m³ (Fuel, 2018, p. 75).

Para la determinación de la cantidad de los residuos sólidos generados en la EMRAQ-EP se trabajará con las relaciones obtenidas por Fuel (2018, p. 61).

En la Tabla 3.13 se presenta la relación de generación de estiércol, contenido ruminal y decomisos en función del animal faenado. La cantidad de residuos que se calcularán por animal, también estará incluida la cantidad de sólidos que se obtendrán de la criba y la trampa de grasas derivado de la PTAR para que todos los desechos sean tratados.

Tabla 3.13. Relación residuo-animal EMRAQ-EP

Residuo	Cantidad (kg/animal)
Estiércol	5,00
Contenido ruminal	23,81
Decomisos	0,41

(Fuel, 2018, pp. 61-62).

3.2.1 CRITERIOS DE DISEÑO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS

Los tanques de almacenamiento van a ser de forma cilíndrica con fondo semi elíptico y sin tapa, el material seleccionado es ASTM A36. Se requiere dos tanques de almacenamiento de mismas dimensiones, el primero para la recolección de los residuos sólidos por día y el segundo tanque de almacenamiento es el que va a estar anclado a la trituradora para recolectar los residuos que se someterán a reducción de tamaño. En la Figura 3.7 se presenta un esquema del tanque de almacenamiento a utilizar.

3.2.1.1. Volumen del tanque de almacenamiento de residuos sólidos

Para la determinación del volumen del tanque de almacenamiento de residuos sólidos se calculará la capacidad del tanque en función del tiempo de retención de los sólidos con un sobredimensionamiento del 25%, el sobredimensionamiento

seleccionado es el recomendado con el propósito de evitar derrames o accidentes. Se utilizará la Ecuación 3.30 (American Petroleum Institute, 2012).

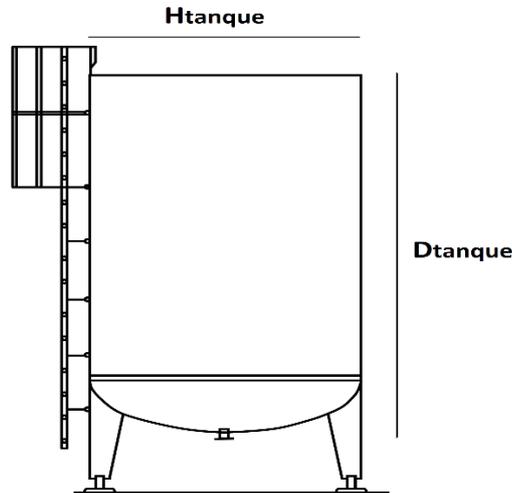


Figura 3.7. Esquema de tanque de almacenamiento de residuos sólidos
(Fuente propia)

$$V_{\text{Tanque}} = Q_{\text{sólidos}} \cdot TR_{\text{ta}} \cdot (1 + f_{\text{Tanque}}) \quad [3.30]$$

Donde:

V_{Tanque} : volumen del tanque de almacenamiento (m^3)

$Q_{\text{sólidos}}$: caudal de sólidos (m^3/d)

TR_{ta} : tiempo de retención en el tanque almacenamiento (d)

f_{Tanque} : factor sobredimensionamiento

Para la determinación de las dimensiones del tanque se dividirá al cuerpo y al fondo del tanque en dos figuras geométricas, el cuerpo estará constituido por un cilindro metálico, mientras que, la base será un cuerpo en forma de cono, de esta manera se asegurará que el fluido en su interior resbale. Se utilizará la Ecuación 3.31 (Bardera y Gómez, 2016, p.5).

$$V_{\text{Tanque}} = V_{\text{cilindro}} + V_{\text{cónico}}$$

$$V_{\text{Tanque}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot h_{\text{cilindro}} + \frac{\pi \cdot D_i^3}{24} \quad [3.31]$$

3.2.1.2. Espesor del tanque de almacenamiento de residuos sólidos

Como se requiere determinar el espesor del cuerpo del tanque, previo se necesita conocer la presión ejercida dentro de este por parte de los lodos almacenados. Para el cálculo de la presión de diseño y la presión de operación se trabajará con las mismas ecuaciones utilizadas en el tanque de igualación (Ecuación 3.12 y Ecuación 3.13).

Para determinar el espesor que deben tener los tanques se utilizará la Ecuación 3.16 para el cuerpo del tanque y la Ecuación 3.32 para el fondo semi elíptico (Towler y Sinnott, 2008, p.991).

$$t_{bc} = \frac{P_i \cdot D_i}{2 \cdot S_m \cdot E - 0,2 \cdot P_i} \quad [3.32]$$

Donde:

- t_{bc} : espesor de la base del tanque de almacenamiento (mm)
- P_i : presión interna del tanque (MPa)
- D_i : diámetro interno del tanque (mm)
- S_m : tensión máxima permisible del material (MPa)
- E : eficiencia de soldadura
- c : tolerancia por corrosión (mm)

3.2.2 CRITERIOS DE DISEÑO DE TANQUE DE TRITURACIÓN

Para el proceso de tratamiento de sólidos se considerará necesario la homogeneización de los residuos por medio de una trituración previa al ingreso de estos al tanque de pasteurización. El tanque que recolectará toda la materia triturada presentará las mismas dimensiones que el tanque de almacenamiento de residuos sólidos, por lo que los criterios de diseño serán los mismos. La diferencia del tanque de trituración es la presencia de una trituradora para residuos cárnicos

ubicada en la parte superior. Para la selección de la trituradora se seleccionará de catálogo en función de la capacidad de residuos sólidos que se van a tratar por día determinados previamente.

3.2.3. CRITERIOS DE DISEÑO DE TANQUE DE PASTEURIZACION

Se aplicará un pretratamiento para la generación de biogás, por lo que previo al tanque del biodigestor anaerobio se encontrará un tanque de pasteurización. La pasteurización de residuos sólidos se lo realiza según normativa internacional, con la intención de evitar el brote y propagación de organismos patógenos que están presentes en los residuos cárnicos (Power y Ware, 2015, p. 503).

Según la Comisión Europea existen tres categorías de residuos a considerar para uso en la formación de biogás y los residuos cárnicos provenientes de la industria alimenticia y desechos de mataderos de animales aptos para el consumo humano se encuentran categorizados de tipo 3 (bajo riesgo). Lo que significa que pueden ser usados para producción de biogás solo si son tratados previamente con una temperatura mínima de 70 grados centígrados durante 60 minutos (Power y Ware, 2015, p. 504).

El tanque de pasteurización que se utilizará es de tipo enchaquetado para lograr alcanzar la temperatura adecuada y con agitación mecánica para homogeneizar el lodo tanto en concentración como en temperatura. Al tanque van a ingresar dos flujos, los sólidos triturados y una cantidad de agua en relación 1:2 sólidos-agua para de esta manera obtener un flujo menos viscoso y pueda ser trasladado sin problema al tanque del biodigestor (Benavides, 2020, p. 59).

3.2.3.1. Volumen del tanque de pasteurización

Para lograr que los residuos alcancen las condiciones establecidas por las normas internacionales, se procederá a utilizar un tanque cilíndrico con chaqueta de

calentamiento (Figura 3.8) con tapa toriesférica (Figura 3.9) de material ASTM A36 las paredes externas del tanque tendrán un recubrimiento de lana de vidrio como aislante térmico (Palomo, 2017, p.38). El tanque se sobredimensionará en un 20 %, para determinar el volumen del tanque interno se utilizará la Ecuación 3.33 (American Petroleum Institute, 2012).

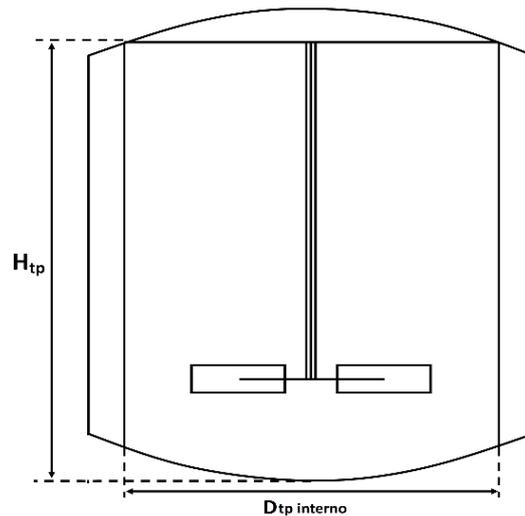


Figura 3.8. Esquema tanque de pasteurización
(Fuente propia)

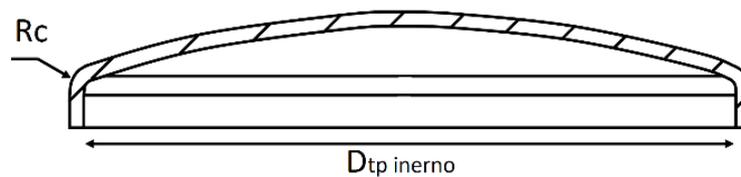


Figura 3.9. Esquema tapa toriesférica
(Towler y Sinnott, 2008, p. 990)

$$V_{tp} = Q_{sólidos} \cdot TR_{tp} \cdot (1+f_p) \quad [3.33]$$

Donde:

V_{tp} : volumen del tanque de pasteurización (m^3)

$Q_{sólidos}$: caudal de residuos sólidos (m^3/h)

TR_{tp} : tiempo de residencia de residuos sólidos (h)

f_p : factor de sobredimensionamiento en el tanque de pasteurización

3.2.3.2. Espesor del tanque de pasteurización

Para la determinación de las dimensiones de la tapa del tanque se calculará el espesor y para ello se utilizará la Ecuación 3.34 (Towler y Sinnott, 2008, p. 990).

$$t_{\text{tpt}} = \frac{0,885 \cdot P_i \cdot R_c}{S \cdot E \cdot 0,1 \cdot P_i} + C \quad [3.34]$$

Donde:

t_{tpt} : espesor tapa de tanque de pasteurización (mm)

R_c : radio del curvado (mm)

El radio de curvatura de la tapa no debe ser mayor al diámetro de la sección cilíndrica, las tapas de tipo toriesféricas suelen no tener soldaduras ni juntas por lo que la eficiencia de soldadura será igual a uno (Towler y Sinnott, 2008, p. 990).

3.2.3.3. Sistema de agitación del tanque de pasteurización

El tanque de pasteurización es de forma cilíndrica con agitación por aspas, por lo que el diseño se rigió bajo los criterios de las relaciones geométricas utilizado para el diseño del tanque de igualación. Se utilizarán las Ecuaciones 3.15 a 3.19 y la Ecuación 3.20 para la determinación de la potencia del agitador.

3.2.3.4 Estructura del tanque de pasteurización

La estructura interna del tanque será igual al establecido en la Figura 3.8, sin embargo, la estructura externa del tanque será de forma cilíndrica con fondo redondeado por donde ingresará el gas al quemador del intercambiador de calor previamente obtenido del biodigestor, este proveerá el calor necesario para mantener al lodo interno con una temperatura de 70 °C.

Para asegurar una adecuada transferencia de calor la altura del tanque exterior debe ser mayor o igual a la altura del tanque interior, por lo tanto, se establecerá que ambas alturas, tanto interna como externa sean iguales. En cuanto a la sección anular existente, se recomienda que el diámetro exterior debe ser por lo menos un 20 % más grande que el diámetro interior, de esta manera se garantiza que no va a existir interferencias en la transferencia de calor en la estructura del tanque (Benavides, 2020, p. 60).

3.2.4. CRITERIOS DE DISEÑO DEL BIODIGESTOR ANAEROBIO

El lodo obtenido del proceso de pasteurización al ser el resultado de los residuos sólidos generados por la EMRAQ-EP están compuestos por materia orgánica y por lo tanto son más susceptibles a ser descompuestos. Si se los somete a un proceso de digestión en ausencia de oxígeno se logrará estabilizar los lodos con presencia de microorganismos patógenos y su desecho será más adecuado (Romero, 2016, p. 787).

La biodigestión anaerobia es un proceso de descomposición de materia orgánica a compuestos más simples (ácidos grasos volátiles) por ausencia de oxígeno, los ácidos grasos volátiles formados son consumidos por microorganismos metanogénicos que se encargan de convertirlos en metano y dióxido de carbono. Como resultado se obtiene un lodo estable y biogás (Basauri y Terrones, 2018, p. 20).

Para el diseño del biodigestor anaeróbico se considerará un reactor tipo tasa alta y una sola etapa. Los reactores de tasa alta funcionan con mezcla completa del lodo y calentado, de esta manera se reduce el tiempo de residencia de alrededor de 15 días hasta que estén estabilizados para funcionar en forma continua. Se trabajará con un reactor de una sola etapa, lo que indica que no se recolectará el líquido sobrenadante del lodo para un proceso posterior de generación de gas residual, si no, que se extraerá el lodo en su totalidad para su desecho final (Metcalf y Eddy, 2003, p. 480).

Los biodigestores anaeróbicos generan biogás a través de un proceso de fermentación, donde actúan dos tipos de bacterias, las acidógenas y las metanogénicas. Las mencionadas en primer lugar no afectan su comportamiento para generar ácidos volátiles debido a cambios en el medio, en cambio, las bacterias metanogénicas donde existen las metanogénicas termofílicas y las metanogénicas mesofílicas si actúan de una u otra manera dependiendo especialmente de la temperatura de medio. Las bacterias metanogénicas termofílicas actúan en un rango de temperatura entre 50 a 60 °C y las bacterias metanogénicas mesofílicas entre 30 a 40 °C (Ferrer y Pérez, 2017, p. 16).

Inicialmente se consideró trabajar a una temperatura mesofílica de 35 °C según Alarcón (2016) pero estudios más recientes de Benavides (2020, p. 59) para tratar los lodos de la EMRAQ-EP específicamente, la temperatura de operación óptima del biodigestor fue de 50 °C con una relación residuo-agua 1:2, y se obtuvo una concentración de metano de 65,44 %; por lo que se trabajará con estas condiciones de operación y se considerará que se obtendrá la misma concentración de metano.

En la Figura 3.10 se presenta el esquema de un biodigestor de tasa alta y una sola etapa.

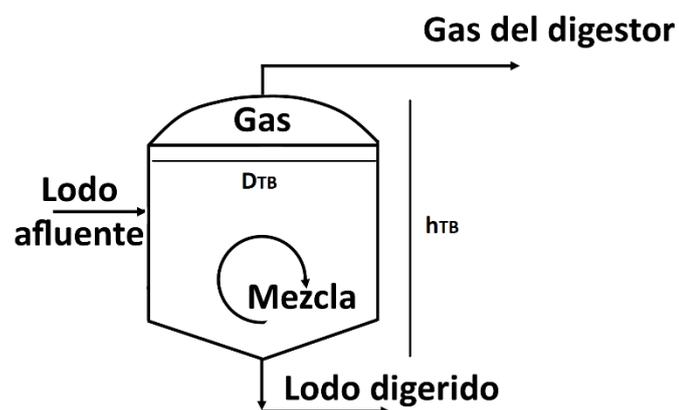


Figura 3.10. Esquema digestor anaerobio tasa alta una etapa
(Romero, 2016, p. 790)

El biodigestor anaerobio requiere mantenerse caliente constantemente por lo que su diseño contará con un intercambiador de calor de doble tubo que utilizará agua a temperatura ambiente para enfriar el lodo, debido a que el proceso previo enviará un lodo a 70 °C. El reactor contará con un sistema de agitación por propulsión

interna para que el lodo almacenado se mezcle correctamente y la temperatura se mantenga homogénea (Tamayo, 2019, p. 46). La relación diámetro altura debe estar entre 0,3 y 0,7 para que el biodigestor funcione apropiadamente (Tamayo, 2019, p. 45). Los parámetros para la operación del biodigestor recomendados y obtener un buen funcionamiento se encuentran expresados en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14. Parámetros de operación biodigestor anaerobio de lodos

Parámetros	Tasa baja	Tasa alta
Temperatura (°C)	30 – 35	30 – 35
Tiempo de retención (d)	30 – 60	≤ 15
Carga de sólidos (kg SV/m ³ d)	0,5 – 1,6	1,6 – 8,0
Dosificación	Intermitente	Intermitente o continuo
Extracción	Intermitente	Intermitente o continuo
Mezcla	No (estratificado)	Si (homogeneización)

(Romero, 2016, p.789)

3.2.4.1. Volumen del metano producido por el biodigestor

Para el dimensionamiento del tanque de biodigestión será necesario la determinación del metano que se produce en su interior, para ello se utilizará la Ecuación 3.35 la cual entrega resultados a condiciones normales (0 °C y 1 atm). Posterior a su determinación es necesario transformar el resultado a las condiciones de presión atmosférica de Quito (0,72 atm) y temperatura de operación del biodigestor (50 °C) por medio de la ley combinada de los gases (Metcalf y Eddy, 2003, p.924).

$$V_{CH_4} = 0,3516 \cdot \left[Q \cdot (S_o - S) \cdot \frac{1}{1000} - 1,42 \cdot P_x \right] \quad [3.35]$$

Donde:

Q : caudal de efluente que trata la planta de tratamiento (m³/d)

V_{CH4} : volumen de metano producido en condiciones estándar (0 °C y 1 atm)

- S_o : DBO inicial del afluente (mg/L)
 S_f : DBO final del efluente (mg/L)
 P_x : masa total diaria de producción de masa biológica (g SSV/d)

Para el cálculo total diario de producción de masa biológica (P_x) se utilizará la Ecuación 3.36 (Metcalf y Eddy, 2003, p 925).

$$P_x = \frac{Y \cdot (S_o - S_f) \cdot \frac{Q}{1000}}{1 + k_d \cdot \theta_c} \quad [3.36]$$

Donde:

- Y : coeficiente cinético de producción de biogás (kgSV/kgDBO)
 k_d : constante de descomposición microbiana (d^{-1})
 θ_c : tiempo de residencia de los lodos (d)

3.2.4.2 Coeficiente cinético de producción de biogás

El coeficiente cinético de producción de biogás y la constante de descomposición microbiana dependen del tipo de sustrato que se va a digerir en el reactor. Los residuos sólidos de la EMRAQ-EP son de origen animal, ricos en proteínas, por lo que se trabajará con los valores de $Y = 0,075$ kgSV/kgDBO y $k_d = 0,014$ d^{-1} .

En la Tabla 3.15 se presentan los valores de coeficientes cinéticos para digestión anaeróbica a 20 °C para diferentes sustratos de lodos según Romero (2016, p. 797).

3.2.4.3. Volumen del biogás generado por el biodigestor

Una vez obtenido el volumen de metano se procederá con la determinación del volumen total del biogás, se conoce que la concentración de metano representa el 65,44 % del volumen total del gas (Benavides, 2020, p. 75). Además, se asumirá para los cálculos del balance de energía, que el poder calorífico del biogás es de 22 400 kJ/m³, valor referente para biogás de concentración de 60 % de metano,

concentración cercana a la concentración que se obtiene del proceso (Romero, 2016, p.794).

Tabla 3.15. Coeficientes para digestión anaeróbica (20 °C)

Sustrato	Coefficiente	Unidades	Rango	Recomendado
Lodo doméstico	Y	g SSV/g DBO	0,04-0,10	0,060
	k_d	d^{-1}	0,02-0,04	0,030
Ácido graso	Y	g SSV/g DBO	0,04-0,07	0,050
	k_d	d^{-1}	0,03-0,05	0,040
Carbohidratos	Y	g SSV/g DBO	0,02-0,04	0,024
	k_d	d^{-1}	0,025-0,035	0,030
Proteína	Y	g SSV/g DBO	0,05-0,09	0,075
	k_d	d^{-1}	0,01-0,02	0,014

(Romero, 2016, p.797)

3.2.4.4. Volumen de lodo a tratar en el biodigestor y volumen del biodigestor

Para determinar el volumen de los lodos que se encuentran en el biodigestor se trabajará con el tiempo de residencia de los lodos y la masa de estos producidos diariamente por la planta. La Ecuación 3.37 permitirá el cálculo del volumen del biodigestor en relación con los parámetros de tiempo y flujo (Tamayo, 2019, p.48).

$$V_L = \theta_c \cdot m_{\text{lodo}} \quad [3.37]$$

Donde:

V_L : volumen de lodos en el biodigestor (m^3)

m_{lodo} : masa de lodos producidas diariamente por la planta (kg/d)

Una vez determinado el volumen del lodo presente en el tanque, se podrá determinar que este representa el 75 % del tanque total del biodigestor y el resto corresponde al volumen libre que tendrá el gas (Gadhamshetty, Giri, Khanal, y Nitayavardhana, 2017, p. 268).

3.2.4.5. Dimensiones de la tapa del biodigestor

El tanque del biodigestor seleccionado es de forma cilíndrica con una tapa elíptica. Para que se dé un buen proceso de digestión anaerobia es necesario que el reactor este completamente cerrado y la tapa a utilizar se recomienda el uso de la tapa elíptica para evitar puntos de presión por el biogás generado en su interior y se pueda colocar adecuadamente el sistema de agitación (American Petroleum Institute, 2012).

El volumen total del tanque será la sumatoria entre el volumen de cuerpo cilíndrico y el volumen de la tapa elíptica, la altura que tendrá el reactor será de 3,2 m, esta altura es la recomendada bibliográficamente para que el proceso de digestión sea el adecuado (Tamayo, 2019, p.48).

El diámetro del tanque se lo calculará al despejarlo de la suma de los volúmenes del cuerpo y tapa elíptica, para ello se trabajará con el Ecuación 3.38 (Bardera y Gómez, 2016, p. 5).

$$V_{TB} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{TB}^2 \cdot h_{TB} + \frac{\pi}{24} \cdot D_{TB}^3 \quad [3.38]$$

Donde:

V_{TB} : volumen del tanque del biodigestor (m^3)

D_{TB} : diámetro del tanque del biodigestor (m)

h_{TB} : altura del tanque del biodigestor (m)

3.2.4.6. Energía obtenida del biodigestor

Para conocer la cantidad de energía que se obtendrá a partir de los lodos para utilizarlo en el abastecimiento del tanque de pasteurización se utilizará la Ecuación 3.39.

$$Q_b = PC_b \cdot V_b \quad [3.39]$$

Donde:

Q_b : flujo calorífico generado por el biogás (W)

PC_b : poder calorífico del biogás (J/m^3)

3.2.4.7. Energía requerida para el calentamiento de los lodos

La energía que requerirá el tanque de pasteurización, se la determinará por medio del cálculo de la energía necesaria para mantener caliente el lodo en su interior, además se considerará que existen pérdidas por convección y por radiación al medio. La energía que requiere el tanque de pasteurización se la determinará con la Ecuación 3.40.

$$Q_{\text{necesario}} = Q_{\text{lodo}} + Q_{\text{pérdidas}} \quad [3.40]$$

Donde:

$Q_{\text{necesario}}$: flujo calórico que requiere el tanque (W)

Q_{lodo} : flujo calórico que requiere el lodo (W)

$Q_{\text{pérdidas}}$: flujo calórico que se pierde en el ambiente (W)

Para la determinación del calor que requieren los lodos dentro del tanque se asumirá que el poder calorífico de estos es igual al del agua ($4\ 200\ J/kg\ ^\circ C$) puesto que es una mezcla de dos porciones de agua y una de lodos. También, se considerará que la temperatura en la que se va a encontrar el lodo al ingresar a al tanque de pasteurización será a la temperatura promedio de Quito de $13,9$ grados centígrados (Weather Spark, 2021).

La temperatura del lodo en el tanque de pasteurización deberá alcanzar una temperatura de $70\ ^\circ C$, hay que tener en cuenta que a más del flujo de lodo también ingresará un flujo agua al tanque de pasteurización con un caudal del doble del valor que el flujo de lodo a temperatura ambiente ($13,9\ ^\circ C$). La ecuación para el cálculo del flujo calórico que requerido para calentar los lodos es la Ecuación 3.41 (Metcalf y Eddy, 2003, p. 940)

$$Q_{\text{lodo}} = m_{\text{lodo}} \cdot c_{p_{\text{lodo}}} + (T_D - T_{\infty}) \quad [3.41]$$

Donde:

- $c_{p_{\text{lodo}}}$: capacidad calórica del lodo (J/kg °C)
- T_D : temperatura de diseño del equipo (°C)
- T_{∞} : temperatura del medio (°C)

Para determinar el calor perdido a través de la estructura de los tanques se conoce que el tanque de pasteurización y la tapa del biodigestor estarán hechos de acero ASTM A36, mientras que el biodigestor se construirá de hormigón armado. Las pérdidas de calor que existen a través de las diferentes paredes de los equipos se calcularán con la Ecuación 3.42 (Metcalf y Eddy, 2003, p 940).

$$Q_{\text{pérdidas}} = \sum U \cdot A \cdot \Delta T \quad [3.42]$$

Donde:

- U: coeficiente global de transmisión de calor (W/m² °C)
- A: área de la sección transversal por donde atraviesa el flujo de calor por pérdidas (m²)
- ΔT : variación de temperatura entre el interior y el medio externo del equipo (°C)

Metcalf y Eddy indican valores típicos de coeficientes globales de transmisión de calor utilizados para el diseño de tanques según el material de su estructura, en la Tabla 3.16 se presentan dichos valores, el material seleccionado es relevante puesto que, si el material permite la transferencia de calor fácilmente se consumirá mucha más energía para mantener caliente los lodos como es lo requerido (2003, p. 941).

Se considerará que el coeficiente global de transmisión de calor será de 0,71 W/m² °C para las paredes, 1,25 W/m² °C para el suelo y 4,68 W/m² °C para el techo. Por otro lado, el tanque de pasteurización tendrá un coeficiente global de transmisión de calor será de 4,68 W/m² °C por el material de su estructura (Metcalf y Eddy, 2003, p. 941).

Tabla 3.16. Coeficiente global de transmisión de calor típicos

Estructura tanque	Coeficiente global de transmisión de calor ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
Muro hormigón en masa (por encima del terreno) 300 mm de espesor, sin aislamiento.	4,74 – 5,10
Muro hormigón en masa (por encima del terreno) 300 mm de espesor, con cámara de aire y revestimiento de ladrillo.	1,83 – 2,38
Muro hormigón en masa (por encima del terreno) 300 mm de espesor, con aislamiento	0,62 – 0,79
Muro de hormigón en masa (por debajo del terreno), tierra seca	0,57 – 0,68
Muro de hormigón en masa (por debajo del terreno), tierra húmeda	1,08 – 1,42
Solera hormigón en masa, tierra seca	0,28 – 0,39
Solera hormigón en masa, tierra húmeda	0,57 – 0,68
Cubierta flotante fija hormigón, 100 mm espesor con impermeabilización sin aislamiento	3,97 – 4,99
Cubierta flotante fija hormigón, 100 mm espesor con tableros de madera como aislamiento	1,19 – 1,59
Cubierta flotante fija hormigón, 25 mm espesor	3,00 – 3,57
Cubierta fija de acero, 6 mm espesor	3,97 – 5,39

(Metcalf y Eddy, 2003, p.941)

3.2.4.8. Sistema de agitación del biodigestor

La agitación en el interior del biodigestor será por medio de propulsión interna del lodo, de esta manera se obtendrá una mezcla homogénea y se evitará la variación de temperatura en todo el lodo. Se colocarán 4 agitadores por propulsión interna repartidos en el tanque, estos se instalarán en el techo y succionarán el lodo de la base para luego expulsarlo por la parte superior. (Tamayo, 2019, p. 52).

3.3. CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TUBERÍAS

La mayor parte del proceso trabaja con fluidos líquidos por lo que para su transporte durante las diferentes etapas serán por medio de tuberías. Las tuberías seleccionadas serán de policloruro de vinilo (PVC) al ser el efluente un agua y esta puede corroer otro tipo de materiales, solo la tubería destinada al transporte de biogás será de polietileno, los diámetros seleccionados serán según la norma ASTM 53 (American Society for Testing and Materials, 2019).

Para una correcta selección del diámetro de las tuberías requeridas se asegura que las velocidades de operación del flujo en el interior de la tubería y las caídas de presión sean las adecuadas en la Tabla 3.17 se presentan los valores de velocidades permisibles en el interior de tuberías para la succión y descarga del fluido y en la Tabla 3.18 se presentan las caídas de presión permisibles para líquidos. Para un dimensionamiento adecuado de las tuberías se deberá aceptar que los resultados ingresen dentro de los parámetros de velocidad y caída de presión (Towler y Sinnott, 2008, p. 257).

Tabla 3.17. Rango de velocidades en interior de tuberías.

Fluido	Dirección del fluido	Velocidad (m/s)
Líquido de baja viscosidad	Succión	0,30 – 0,90
	Descarga	1,20 – 3,00
	Drenaje	0,15 – 0,30
Gases	-	9,00 – 30,00

(Towler y Sinnott, 2008, p. 257)

Tabla 3.18. Caída de presión permisible dentro de tuberías para líquidos

Dirección del flujo	Caída de presión (psi)
Succión	< 0,25
Descarga	< 4,00
Drenajes	< 0,25

(Towler y Sinnott, 2008, p. 257)

Durante el proceso del tratamiento de los sólidos se va a generar biogás, este gas será enviado al intercambiador de calor del tanque de pasteurización de igual manera que los líquidos por medio de tuberías. En la Tabla 3.19 se presentan los valores de presiones internas y caídas de presión que debe tener una tubería que transporta gas (Towler y Sinnott, 2008, p. 257).

Tabla 3.19. Caída de presión permisible dentro de tuberías para gases

Trayectoria del flujo	Rango de presión (psi)	Caída de presión (psi)
Succión	0 – 10	0,050 – 0,125
	10 – 50	< 0,125
	50 – 100	< 0,250
	>200	0,500
Descarga	< 50	0,125 – 0,250
	50 – 100	0,250 – 0,500
	>200	0,500 – 1,000

(Towler y Sinnott, 2008, p. 257)

3.3.1. Cabeza de pérdidas por accesorios

Tanto las tuberías para el agua residual, lodos y biogás serán dimensionadas en función de las pérdidas por fricción y por presencia de accesorios en la línea. Las pérdidas por accesorios se las determinará con la Ecuación 3.43 (Mott, 2006, p. 385).

$$h_{acc} = \frac{k_{acc} \cdot v^2}{2 \cdot g} \quad [3.43]$$

Donde:

h_{acc} : cabeza de pérdidas por accesorios (m)

k_{acc} : constante de pérdidas por accesorios

v : velocidad del fluido (m/s)

g : aceleración de la gravedad (m/s²)

En la Tabla 3.20 se presentan las constantes por accesorios más comunes que pueden estar presentes a lo largo de las tuberías dependiendo el requerimiento y el flujo a transportar. Comúnmente se presentan pérdidas por accesorios por el ingreso y salida de las tuberías a los equipos, también cuando existe una bomba dentro de la línea de tubería se recomienda que antes de esta se encuentre una válvula de bola y después una válvula de bola y válvula de retención con el propósito de asegurar que los flujos tengan la velocidad apropiada y no existan caídas de presión muy alta o bajas que puedan dañar el sistema de tuberías (Towler y Sinnott, 2008, p. 241).

Tabla 3.20. Constante por pérdidas de acoples y válvulas en tuberías

Accesorio	k_{acc}
Codo estándar 45°	0,35
Codo radio largo 45°	0,20
Codo radio estándar 90°	0,80
Codo estándar largo 90°	0,45
Codo base cuadrada 90°	1,50
Tee	1,80
Uniones y acoples	0,04
Pérdidas a la entrada	0,50
Pérdidas a la salida	1,00
Válvula de compuerta totalmente abierta	6,00
Válvula de globo totalmente abierta	9,00
Válvula de tapón	0,40
Válvula de bola	4,00
Válvula retención	2,75
Válvula de control	3,00

(Fuente: Towler y Sinnott, 2020, p. 249)

3.3.2. Cabeza de pérdidas por fricción

Las pérdidas en las tuberías generadas por la fricción se la determinarán por medio del uso de la Ecuación 3.44 (Mott, 2006, p. 385).

$$h_f = f \cdot \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} \quad [3.44]$$

Donde:

h_f : cabeza por pérdidas de fricción (m)

f : factor de Darcy

L : longitud de la tubería (m)

D : diámetro interno de la tubería (m)

Para la determinación del factor de Darcy se trabajará con el diagrama de Moddy, el cual se encuentra en el Anexo V. Al diagrama de Moddy se ingresa con los datos de número de Reynolds y rugosidad relativa del material de la tubería, con la Ecuación 3.45 se determinará el número de Reynolds (Mott, 2006, p. 386).

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D}{\mu} \quad [3.45]$$

Donde:

Re : número de Reynolds

ρ : densidad del fluido (kg/m^3)

μ : viscosidad del fluido (kg/m s)

D : diámetro interno de la tubería (m)

v : velocidad del fluido en el interior de la tubería (m/s)

La rugosidad relativa de material de la tubería es la relación que existe entre la rugosidad del material y el diámetro interno de la tubería. En la Tabla 3.21 se presentan los valores de rugosidad (e') en función de los tipos de materiales existentes en el mercado (Streeter, 2000, p.300).

Para determinar la rugosidad relativa se utilizará la Ecuación 3.46.

$$e = \frac{e'}{D} \quad [3.46]$$

Donde:

e: rugosidad relativa

e': rugosidad del material (mm)

Tabla 3.21. Rugosidad de materiales

Material	Rugosidad (mm)
Vidrio, plástico	0,000
Concreto	0,900 – 9,000
Duela de madera	0,500
Caucho aislado	0,010
Tubo de cobre o latón	0,0015
Hierro fundido	0,260
Hierro galvanizadas	0,150
Hierro forjado	0,046
Acero inoxidable	0,002
Acero comercial	0,045

(Streeter, 2000, p. 305)

3.3.3. Caída de presión en el interior de las tuberías

Para la determinación de las caídas de presión en el interior de las tuberías se utilizará la Ecuación 3.47 conocida como ecuación de Bernoulli, es la relación existente entre dos puntos por el cual atraviesa un fluido y donde existe influencia de la velocidad que tiene, la presión que este ejerce en la tubería y la altura que deberá alcanzar (Mott, 2006, p. 419).

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + h_{acc} + h_f \quad [3.47]$$

Donde:

P₁ : presión del fluido en el punto 1 (Pa)

ρ : densidad del fluido (kg/m³)

g : aceleración de gravedad (m/s²)

- v_1 : velocidad del fluido en el punto 1 (m/s)
 z_1 : altura del punto 1 con respecto a un punto de referencia (m)
 P_2 : presión del fluido en el punto 2 (Pa)
 v_2 : velocidad del fluido en el punto 2 (m/s)
 z_2 : altura del punto 2 con respecto a un punto de referencia (m)
 h_{acc} : pérdidas por accesorios (m)
 h_f : pérdidas por fricción (m)

Una vez determinado la caída de presión se procede a evaluar si los resultados obtenidos ingresan dentro de los rangos permisibles.

3.3.4. Presión de operación en el interior de la tubería

La presión de operación es la presión que tienen los equipos o tuberías durante la operación normal de estos. La presión de operación dentro de las tuberías se considera que antes de la bomba será la presión que tiene el equipo previo y después de la bomba será la presión del equipo hacia donde está dirigido el flujo (Mott, 2006, p. 162).

3.3.5. Presión de diseño en el interior de la tubería

La presión de diseño se considera que es la presión máxima interna o externa que se utiliza para determinar el espesor mínimo de tuberías y se expresa normalmente como 10 % más de la presión de operación. Para la determinación de la presión de diseño de tuberías que son impulsadas por bombas o compresores se utiliza la Ecuación 3.48 (Mott, 2006, p. 162). Hay que tener en cuenta que la presión de diseño es la presión es la presión máxima a la que podrá tolerar la tubería a medida el fluido este atravesádola.

$$P_{\text{diseño}} = P_{\text{op}} \cdot 1,1 \quad [3.48]$$

Donde:

$P_{\text{diseño}}$: Presión de diseño (psi)

P_{op} : Presión de operación (psi)

3.3.6. Temperatura de operación en el interior de la tubería

La temperatura de operación es la temperatura que tiene el fluido durante la operación normal de los procesos. Se considera que existen dos de casos de tuberías, el primer caso es cuando las tuberías se encuentran en condiciones normales y el segundo caso cuando estas presentan recubrimientos para actuar como aislantes, la selección de uno u otro caso depende del proceso (Mott, 2006, p. 162).

3.3.7. Temperatura de diseño en el interior de la tubería

La temperatura de diseño corresponde a la temperatura que tendrá el fluido en las condiciones más críticas a las que estará expuesto.

Para la determinación de la temperatura se utilizan la Ecuación 3.49 para tuberías sin aislamiento y la Ecuación 3.50 para tuberías con aislamiento donde se considera que la temperatura no diferirá más de un 5 % del valor de la temperatura de operación (Mott, 2006, p. 162).

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{op}} + 10 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad [3.49]$$

Donde:

$T_{\text{diseño}}$: temperatura de diseño ($^\circ\text{C}$)

T_{op} : temperatura de operación ($^\circ\text{C}$)

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{op}} \cdot 1,05 \quad [3.50]$$

3.4. SISTEMAS AUXILIARES

3.4.1. CRITERIO DE DISEÑO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA BANDA TRANSPORTADORA

Se requiere una banda transportadora para trasladar los residuos y lodos del tanque de recolección hacia el tanque de trituración. Para la selección de la velocidad de la banda se utilizarán los valores recomendados en la Tabla 3.22 (Rodríguez, 2021).

Tabla 3.22. Velocidad máxima banda transportadora

Ancho de la banda (mm)	Velocidad máxima (m/s)			
	Materiales ligeros (0,5 a 1,0 t/m ³)	Materiales no abrasivos (1,0 a 1,5 t/m ³)	Materiales abrasivos (1,0 a 2,0 t/m ³)	Materiales abrasivos y pesados (max 2,0 t/m ³)
400	2,50	2,30	2,00	1,65
500				
650	3,00	2,75	3,38	2,00
850	3,50	3,20	3,75	2,35
1 000	4,00	3,65	3,15	2,65
1 200				
1 400	4,50	4,00	3,50	3,00
1 600				
1 800	5,00	4,50	4,50	4,00
2 000				
2 200	6,00	5,00	4,50	4,00

(Rodríguez, 2021)

La potencia de la banda transportadora se lo determinará con la Ecuación 3.51, esta ecuación relaciona el comportamiento que tendrá la banda cuando se encargue de mover el lodo o material indicado (Rodríguez, 2021).

$$P_{ct} = \frac{L \cdot \sin \varphi \cdot Q_m}{367} + 0,8 \cdot v_{ct} + 0,3 \cdot v_{ct} \cdot B + 0,16 \cdot v_{ct} \cdot L_f \quad [3.51]$$

Donde:

- P_{ct} : potencia de la banda (kW)
- L: longitud de la banda transportadora (m)
- φ : ángulo de inclinación de la banda (°)
- v_{ct} : velocidad de avance de la banda (m/s)
- L_f : longitud de la guía o faldones (m)
- Q_m : capacidad que transporta la cinta (t/h)
- B: ancho de la banda transportadora (m)

Con el valor de la potencia de la banda transportadora se podrá seleccionar de catálogo una banda adecuada según el requerimiento necesario.

3.4.2. CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL TRANSPORTADOR HELICOIDAL

Los residuos sólidos triturados se los va a transportar desde el tanque de trituración hacia el biodigestor de manera continua. Por lo que se requiere un transportador helicoidal o también conocida como tornillo sinfín.

3.4.2.1. Área transversal del transportador helicoidal

La determinación del área transversal del transportador helicoidal se establecerá con la Ecuación 3.52 (Rodriguez, 2021).

$$A_T = \gamma \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad [3.52]$$

Donde:

- A_T : área transversal del transportador (m²)
- γ : factor de relleno de la sección transversal
- D : diámetro del transportador helicoidal (m)

En la Tabla 3.23 se presentan los factores de relleno según el tipo de carga a transportar.

Tabla 3.23. Factor de relleno según el tipo de carga

Tipo de carga	Factor de relleno
Pesado y abrasivo	0,125
Pesada y poco abrasiva	0,250
Ligero y poco abrasiva	0,320
Ligera y no abrasiva	0,400

(Rodríguez, 2021)

3.4.2.2. Velocidad del transportador helicoidal

Es necesario conocer además la velocidad lineal en el tornillo para ello se utilizará la Ecuación 3.53 (Rodríguez, 2021).

$$v = \frac{p \cdot n}{60} \quad [3.53]$$

Donde:

v: velocidad lineal del transportador (m/s)

p: paso de tornillo (m)

n: velocidad angular del transportador (rpm)

En la Tabla 3.24 se presenta la capacidad de transporte de tornillo sinfín según el diámetro del tornillo sinfín.

Tabla 3.24. Capacidad de transporte transportador helicoidal

Diámetro tornillo (mm)	160	200	250	315	400	500	630	800
Paso de hélice (mm)	160	200	250	300	335	400	450	500
Velocidad angular (rpm)	70	65	60	55	50	45	40	35
Capacidad en horizontal 100% (m³/h)	14	26	45	78	130	217	217	525

(Rodríguez, 2021)

3.4.2.3. Capacidad de transporte del transportador helicoidal

La capacidad de transporte en un tonillo sinfín se la determina con el fin de comprobar que el diámetro seleccionado es el adecuado al relacionarlo con la velocidad calculada, mientras más inclinado se encuentre el tornillo presentará mayor dificultad para transportar, eso se lo estima por medio de un coeficiente de disminución, para ello se utilizará la Ecuación 3.54.

$$C_t = 3\,600 \cdot A_T \cdot v \cdot \rho \cdot i \quad [3.54]$$

Donde:

C_t : capacidad de transporte (t/h)

ρ : densidad del material (t/m³)

i : coeficiente de disminución

3.4.2.4. Potencia requerida del transportador helicoidal

La potencia del transportador helicoidal se la calculará con la Ecuación 3.55, donde se conoce que, la potencia dependerá directamente al factor de oposición que ejerce el material sobre ella por la fricción, a la distancia que deberá recorrer el material, por ende, la distancia del transportador helicoidal y a la altura que deberá llegar (Rodríguez, 2021).

$$P = \frac{Q \cdot C_o \cdot L + H}{367} + \frac{D \cdot L}{20} \quad [3.55]$$

Donde:

P : potencia del transportador (kW)

C_o : factor de resistencia del material

L : longitud del transportador (m)

H : altura de descarga (m)

3.4.3. CRITERIO DE DISEÑO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE BOMBAS PARA IMPULSIÓN DE FLUIDOS LÍQUIDOS

El proceso para tratar las aguas residuales requiere de la impulsión del fluido en las diferentes etapas del tratamiento, se utilizarán bombas centrífugas para las siguientes líneas de tubería:

- Línea de tubería criba - tanque de igualación (con bomba de respaldo)
- Línea de tubería trampa de grasas – vermifiltro
- Línea de tubería tanque pasteurización – biodigestor anaerobio (con bomba de respaldo)
- Línea de tubería salida biodigestor anaerobio (con bomba de respaldo)

Todas las bombas en el sistema de tuberías contarán con una bomba de respaldo, para de esta manera precautelar el funcionamiento continuo de la planta y además poder realizar los mantenimientos adecuados.

Las bombas que impulsarán el efluente hacia los módulos del vermifiltro no presentarán bomba de respaldo puesto que se trabajará con bombas en paralelo para la distribución apropiada hacia los aspersores de los vermifiltros.

Para ello es necesario la selección de las bombas adecuadas, por lo que se debe calcular la presión de succión y la presión de descarga de la bomba y su diferencia la cual se la denomina altura dinámica total (TDH), que se interpreta como la resistencia que debe vencer un fluido al ser bombeado para que logre alcanzar la distancia total del sistema (Mott, 2006, p. 410).

3.4.3.1. Presión de succión y presión de descarga

La presión de succión se considera como la presión que ejerce el equipo previo a la bomba, mientras que la presión de descarga es la presión existente después del trabajo que ejerce la bomba en el fluido, esta presión se la determinará con la Ecuación 3.56 (Mott, 2006, p. 380).

$$P_d = P_o + \Delta H \quad [3.56]$$

Donde:

P_d : presión de descarga (psi)

ΔH : pérdidas totales de presión en la tubería (psi)

3.4.3.2. Altura dinámica total

El TDH se calculará con la Ecuación 3.57 (Mott, 2006, p. 380).

$$TDH = P_d - P_s \quad [3.57]$$

Donde:

TDH: Altura dinámica total (psi)

3.4.3.3. Potencia necesaria de la bomba

La potencia que necesita una bomba se lo determinará con la Ecuación 3.58, normalmente se considera que la eficiencia de estas es del 85 % para bombas centrífugas, siendo un valor común a nivel industrial, por lo que será este, el valor para utilizar para el dimensionamiento de estos equipos (Mott, 2006, p.383).

$$P_{\text{bomba}} = \frac{Q \cdot TDH}{n} \quad [3.58]$$

Donde:

P_{bomba} : potencia de la bomba (W)

Q: caudal del fluido (m^3/s)

n: eficiencia de la bomba

La potencia que se obtendrá requiere ser elevada con el propósito de que se tenga un excedente para que no existan sobrecargas. Según la potencia de la bomba obtenida se tiene un factor de sobredimensionamiento, a la potencia sobredimensionada se la denomina potencia nominal (Amador, 2013). En la Tabla 3.25 se presentan los factores de seguridad correspondientes según la potencia de la bomba (Amador, 2013).

Tabla 3.25. Factores de seguridad de una bomba

Potencia bomba	Factor
Menor a 1,5 kW	1,50
De 1,5 kW a 4,0 kW	1,25
De 4,0 kW a 7,5 kW	1,20
De 7,5 kW a 40,0 kW	1,15
Mayor a 40,0 kW	1,10

(Amador, 2013)

3.4.4. CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL COMPRESOR PARA EL TRANSPORTE DE BIOGÁS

Para transportar el biogás generado desde el tanque del biodigestor hasta el tanque de pasteurización se utilizará un compresor, se considerará que el gas se comportará de manera ideal y este no presentará variación de temperatura durante su transporte.

3.4.4.1. Trabajo por compresión

Para el dimensionamiento de un compresor se deberá conocer la energía requerida por el equipo, es decir el trabajo por compresión por unidad de masa requerida, para ello se trabajará con la Ecuación 3.59 (Towler y Sinnott, 2008, p.111).

$$W = \frac{R \cdot T}{m} \cdot \ln\left(\frac{P_d}{P_s}\right) \quad [3.59]$$

Donde:

W : trabajo por compresión por unidad de masa (J/kg)

R : constante de los gases ideales (8,31 J/mol K)

T : temperatura del gas (K)

m : masa molecular del gas (kg/mol)

3.4.4.2. Potencia del compresor

Una vez determinado el trabajo por compresión que deberá realizar el compresor, con la Ecuación 3.60 se determinará su potencia (Towler y Sinnott, 2008, p.111).

$$P_{\text{compresor}} = \frac{W \cdot M}{n} \quad [3.60]$$

Donde:

$P_{\text{compresor}}$: potencia del compresor (W)

M : flujo másico (kg/s)

n : eficiencia del compresor

Las eficiencias según la potencia del compresor se expresan en la Tabla 3.26.

Tabla 3.26. Eficiencia aproximadas para compresores

Tamaño (kW)	Eficiencia (%)
5	80
15	85
75	90
200	92
750	95
>4 000	97

(Towler y Sinnott, 2008, p.111)

La presión de succión y la presión de descargar se las obtiene de la misma menara en la que se determinar para el cálculo de la potencia de una bomba.

4. DISEÑO DE LA PLANTA

4.1. BALANCE DE MASA

La PTAR al tener un caudal del efluente líquido grande ($620 \text{ m}^3/\text{d}$), para el diseño de los equipos que tratarán el agua residual se trabajará con la mitad del caudal, es decir $310 \text{ m}^3/\text{d}$. Por lo tanto, se propone la elaboración de dos procesos con la mitad de la capacidad del efluente de descarga de la EMRAQ-EP para tratar toda el agua residual de forma paralela.

Los equipos de ambos procesos de tratamiento serán de iguales dimensiones, mientras que, para tratar el lodo generado, solo se tendrá un proceso. En la Tabla 4.1 se presentan los resultados de los balances de masa de cada flujo de ingreso y salida de todos los equipos que conforman un sistema de tratamiento del efluente líquido de la Empresa Metropolitana de Rastro Quito, los mismos flujos tendrá el sistema en paralelo propuesto. En la Tabla 4.2. se presentan los resultados del balance de masa de cada flujo de ingreso y salida de todos los equipos que conforman el sistema de tratamiento del lodo de la EMRAQ-EP.

Tabla 4.1. Resultados del balance de masa de la PTAR (agua residual)

Nro Corriente	Descripción	Flujo másico (kg/h)	Tiempo de evacuación del fluido al día (h)
1	Efluente entrada a la planta	38 724,04	8
2	Salida agua residual del cribaje	38 724,04	8
3	Sólidos gruesos	0,55	8
4	Salida agua residual tanque igualación	12 908,01	24
5	Salida efluente trampa de grasas	12 903,24	24
6	Grasas retenidas	4,77	24
7	Humus	13,05	24
8	Salida de agua residual vermifiltro	12 890,19	24

Tabla 4.2. Resultados del balance de masa de la PTAR (lodo residual)

Nro Corriente	Descripción	Flujo másico (kg/h)	Tiempo de evacuación del fluido al día (h)
RS total	Residuos sólidos totales	688,67	24
9	Sólidos recolectados	688,67	24
10	Sólidos triturados	688,67	24
11	Flujo de agua	1 377,34	24
12	Lodo caliente	2 066,00	24
G	Biogás generado	12,93	24
13	Lodo digerido	2 053,08	24

Como se observa en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 existen diferentes tiempos de evacuación del efluente, debido a, es que al inicio del proceso la planta de tratamiento se deberá adaptar al tiempo de descarga del efluente de la EMRAQ-EP. La EMRAQ-EP trabaja en horarios de 8 horas al día, al contar la PTAR con un tanque de igualación se pretende lograr posterior a ella una distribución del efluente las 24 horas del día. Los cálculos realizados para la obtención de la información plasmada en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 se encuentran en el Anexo I.

4.2. BALANCE DE ENERGÍA

El balance de energía de la PTAR de la EMRAQ-EP se enfoca en dos secciones, la primera sección es la energía que se intercambia en el proceso de tratamiento de los lodos y la segunda sección que es la energía necesaria para el funcionamiento de todos lo equipo electrificados.

4.2.1. BALANCE DE ENERGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS DE LA EMRAQ-EP

Para el tratamiento de los lodos como se mencionó anteriormente, se trabajará con un proceso de pasteurización que requerirá mantener al lodo a una temperatura de

70 °C y un biodigestor anaerobio donde la temperatura del mismo lodo deberá estar a 50 °C.

El tanque de pasteurización trabajará con un intercambiador de calor de tubos concéntricos, cuya fuente de energía será el biogás generado en el biodigestor, este calor que entregará el gas calentará el agua que ingresará a temperatura ambiente de Quito (13,9 °C), el agua caliente pasará por un sistema de tanque enchaquetado para entregar su calor al lodo que se encuentre en el interior del tanque.

Por otro lado, el lodo que estará en el biodigestor requiere de un enfriamiento, puesto que el lodo ingresará a 70 °C y será necesario la disminución de este en 20 °C para que funcione adecuadamente a una temperatura termofílica. Para el enfriamiento del lodo se trabajará con un intercambiador de calor de doble tubo por el cual estará recirculando el lodo en el interior del biodigestor y por el otro lado agua a temperatura ambiente de Quito.

Para todo el proceso se asumirá la existencia de pérdidas al ambiente, todos los cálculos de balance de energía para el tratamiento de lodos se encuentran en el Anexo II. En la Tabla 4.3 se presentan los resultados obtenidos del balance de energía de los lodos.

Tabla 4.3. Flujos calóricos sistema de lodos de la EMRAQ-EP

Proceso	Flujo calórico (kW)
Flujo calórico generado por el biogás	113,27
Flujo calórico requerido por el tanque de pasteurización	137,10
Flujo calórico requerido por el biodigestor anaerobio	-0,17

Como se observa en la Tabla 4.3 la energía requerida para que el equipo de pasteurización funcione es de 137 kW aproximados, se propuso utilizar para calentar el equipo el biogás generado por el proceso de biodigestión de los lodos.

Pero según lo determinado, la energía que podrá entregar el biogás es menor a la energía requerida.

Se propone entonces usar de manera alternativa otro combustible que alimente el flujo calórico en el intercambiador, una opción y la más adecuada sería el diésel siendo un combustible industrial y de costo accesible. Por otro lado se podría realizar un proceso extra entre la recolección y el transporte del biogás, este proceso sería una refinación del gas con el propósito de aumentar su poder calórico y de esta manera obtener más energía.

Se debe tener en cuenta que la materia prima que se alimenta a la planta de lodos (residuos sólidos) fue estimada y por medio de ella se determinó la cantidad de biogás generado. Por lo tanto, la cantidad de biogás no es un valor constante y la utilización de este dentro del proceso de tratamiento deberá ser recalculada cuando el proyecto entre en marcha para cerciorarse de que la energía disponible abastezca.

4.2.2. BALANCE DE ENERGÍA EN LOS EQUIPOS ELECTRIFICADOS DE LA PTAR DE LA EMRAQ-EP

La segunda sección se enfoca en el balance de energía de los equipos eléctricos que se utilizaran durante todo el tratamiento. La PTAR propuesta cuenta con los equipos electrificados enlistados en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Lista de equipos electrificados en la PTAR de la EMRAQ-EP

Equipo	Cantidad total
Agitador mecánico tanque de igualación	2
Aspersores módulos vermifiltro	72
Cinta transportadora	1
Transportador helicoidal	1
Agitador mecánico tanque de pasteurización	1
Agitador por propulsión interna biodigestor	4

Tabla 4.4. Lista de equipos electrificados en la PTAR de la EMRAQ-EP (continuación...)

Bombas centrífugas	12
Compresor para biogás	1
Intercambiador de calor biodigestor	1
Intercambiador de calor tanque pasteurización	1

En la Tabla 4.5 se presentan los requerimientos energéticos de la planta de agua y de lodos, los cálculos para la determinación de la energía requerida se encuentran expresada detalladamente en esta sección.

Tabla 4.5. Consumo energético de la PTAR

Equipo	Cantidad	Potencia (hp)	Potencia (kW)	Consumo (kW-h)
Bomba T.I.*	4	1,34	1,00	96,00
Agitador T.I.*	2	1,41	1,05	25,20
Bomba V.*	4	0,50	0,37	35,52
Cinta transportadora	1	8,53	6,36	152,64
Trituradora	1	49,62	37,00	888,00
Transportador helicoidal	1	0,12	0,09	2,16
Agitador T.P.*	1	0,01	0,01	0,24
Bomba T.P.*	2	20,12	15,00	720,00
Bomba lodo	2	0,50	0,37	17,76
Agitador por aspiración	5	2,00	1,49	35,76
Compresor	1	50,01	37,29	894,96
Consumo energía por día (kW-h)				2 868,24
Consumo energía mensual (kW-h)				86 047,20

*T.I.: Tanque de igualación

*V.: Vermifiltro

*T.P.: Tanque de pasteurización

Como se observa la cantidad mensual que requerirá la PTAR para su funcionamiento continuo será de 86 047,20 kW-h. Para un mejor entendimiento de la energía que se va a requerir en la PTAR se determinará el consumo de energía

por cantidad residuos a tratar, para esto se utilizará la Ecuación 4.1, donde se conoce que la cantidad de agua a tratar corresponde 38 724,04 kg/h mientras que la cantidad de residuos sólidos que se recogerán será de 688,67 kg/h (Chen, Cheng, Lee, Li, y Peng, 2020, p. 3).

$$CE = \frac{\text{Consumo total energía}}{\text{Total de efluente tratado}} \quad [4.1]$$

Donde:

CE: Consumo de energía específico (kW-h/kg d⁻¹)

$$CE = \frac{72\,021,60 \text{ [kW-h]}}{38\,724,04 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot 8 \left[\frac{\text{h}}{\text{d}} \right] + 38\,724,04 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{d}} \right]}$$

$$CE = \frac{72\,021,60 \text{ [kW-h]}}{309\,792,32 \left[\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right] + 16\,528,08 \left[\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right]}$$

$$CE = 0,22 \left[\frac{\text{kW-h}}{\text{kg/d}} \right]$$

Como se observa se tiene un CE de 0,22, siempre se busca tener un consumo lo más bajo posible. Por lo que el valor obtenido resulta ser apropiado en cuanto a la energía que se va a utilizar, lo que indica que el proceso no va a representar un sistema de alto consumo energético. Esto se debe principalmente a que como la fuente principal para el tratamiento es un sistema de vermifiltros que son procesos sustentables, entonces no se requerirá de varios equipos eléctricos.

4.3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS PROPUESTOS

La información proporcionada en el Capítulo 3 fue con la que se trabajó para el diseño y dimensionamiento de todos los equipos principales para la propuesta de la planta de tratamiento de aguas residuales y lodos generados por la EMRAQ-EP.

En la Tabla 4.6 se presenta una lista de los equipos y su funcionalidad dentro de la planta.

Tabla 4.6. Equipos requeridos y operación principal de la PTAR de la EMRAQ-EP

Operación	Equipo	Cantidad
Retención de sólidos	Canal	2
	Sistema cribaje	2
Igualación de caudales	Tanque de igualación	2
	Bomba centrífuga cribas – tanque igualación	4
Remoción de grasas	Trampa de grasas	2
Filtración	Módulo de vermifiltro	12
	Bomba centrífuga trampa de grasas – módulos	4
Almacenamiento de sólidos	Tanque de recolección de sólidos	1
Trituración de sólidos	Tanque de trituración	1
	Cinta transportadora almacenamiento – trituración	1
Pasteurización	Tanque de pasteurización	1
	Transportador helicoidal trituración – pasteurización	1
	Compresor biogás biodigestor – pasteurización	1
	Intercambiador de calor tubos concéntricos	1
Digestión de lodos	Biodigestor anaerobio	1
	Bomba de lodos	2
	Bomba centrífuga pasteurización - biodigestor	2
	Intercambiador de calor doble tubo	1

4.3.1. DISEÑO DEL CANAL DE INGRESO DEL EFLUENTE

El efluente que sale de la EMRAQ-EP es dirigido hacia el inicio de la PTAR por medio de un canal rectangular, de hormigón y con leve inclinación. La inclinación en el canal permite que el fluente se traslade de manera natural a través de este si el uso de sistemas de bombeos.

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados del diseño del canal.

Tabla 4.7. Resultado del diseño del canal

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Diámetro de tubería de descarga (in)	D_d	8,00
Velocidad de acercamiento (m/s)	v_a	0,60
Ancho del canal (m)	W_{canal}	0,30
Altura del canal (m)	h_{canal}	0,46
Pendiente del canal (o)	S	6,43
Borde libre (m)	b_L	0,30
Factor de resistencia	n	0,13

4.3.1.1. Determinación del área transversal de la tubería de descarga de la EMRAQ-EP

La determinación del área transversal de la tubería que descarga el efluente de la EMRAQ-EP se la determinó con la Ecuación 3.1.

Donde:

$A_{t \text{ tubería}}$: Área transversal de una tubería (m)

D_d : Diámetro interno de la tubería: 0,20 (m)

$$A_{t \text{ tubería}} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,20[m])^2$$

$$A_{t \text{ tubería}} = 0,03[m^2]$$

Como el área transversal mínima del canal debe ser igual o menor al área transversal de la tubería, se tomó como valor el resultado obtenido del área transversal de la tubería de descarga.

$$A_{t \text{ canal}} = A_{t \text{ tubería}}$$

$$A_{t \text{ canal}} = 0,03 [\text{m}^2]$$

4.3.1.2. Determinación del área húmeda del canal

Para establecer una altura del canal es necesario conocer el área húmeda que ocupa el líquido en el canal, para ello se utilizó la Ecuación 3.2.

Donde:

Q_d : caudal de diseño: 310 (m^3/d)

v_a : velocidad de acercamiento: 0,06 (m/s)

$A_{\text{húmeda}}$: área húmeda del canal (m^2)

$$A_{\text{húmeda}} = \frac{310 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{8[\text{h}]} \cdot \frac{1[\text{h}]}{3600[\text{s}]}}{0,6 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}$$

$$A_{\text{húmeda}} = \frac{0,01 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]}{0,60 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}$$

$$A_{\text{húmeda}} = 0,02 [\text{m}^2]$$

4.3.1.3. Determinación de la altura del canal

Como el ancho establecido del canal es de 0,30 m debido a que es el ancho mínimo para que la tubería de descarga pueda conectar con el sistema, es importante que ambas secciones tanto tubería como canal encajen para que de esta manera el fluido no sea desviado o existan fugas. Se estableció previamente que el canal es de forma rectangular y se determinó la altura de la lámina del líquido con la Ecuación 3.3.

Donde:

$A_{\text{húmeda}}$: área húmeda del canal: 0,02 (m²)

W_{canal} : base del canal: 0,30 (m)

$h_{\text{lámina}}$: altura del agua (m)

$$h_{\text{lámina}} = \frac{0,02[\text{m}^2]}{0,30[\text{m}]}$$

$$h_{\text{lámina}} = 0,07[\text{m}]$$

Por lo tanto la altura del canal resultó del valor obtenido de la altura de la lámina de agua junto con el borde libre recomendado que se presenta en la Tabla 3.3. para la determinación de la altura del canal se utilizó la Ecuación 4.2.

$$h_{\text{canal}} = h_{\text{lámina}} + b_L \quad [4.2]$$

Donde:

h_{canal} : altura del canal (m)

$h_{\text{lámina}}$: altura de la lámina de agua: 0,06 (m)

b_L : borde libre: 0,30 (m)

$$h_{\text{canal}} = 0,06[\text{m}] + 0,40[\text{m}]$$

$$h_{\text{canal}} = 0,46[\text{m}]$$

4.3.1.4. Determinación de la pendiente del canal

El canal dimensionado deberá presentar una leve inclinación para el movimiento del efluente hacia el inicio de la planta de tratamiento de aguas residuales. Primero se determinó el radio hidráulico que depende directamente de la forma del canal y la ecuación que se utilizó fue la Ecuación 3.5.

Donde:

W_{canal} : base del canal: 0,30 (m/s)

h_{canal} : altura del canal: 0,46 (m)

R : radio hidráulico (m)

$$R = \frac{0,30[\text{m}] \cdot 0,46[\text{m}]}{0,30[\text{m}] + 2 \cdot 0,46[\text{m}]}$$

$$R = 0,11[\text{m}]$$

Conocido el radio hidráulico se procedió con la determinación de la inclinación del canal, se utilizó la ecuación de Manning que se presenta en la Ecuación 3.4.

Donde:

v : velocidad promedio del fluido: 0,60 (m/s)

R : radio hidráulico: 0,11 (m)

S : pendiente del canal (m/m)

n : coeficiente de rugosidad: 0,13

Despejando S de la Ecuación 3.4 se obtiene la siguiente expresión.

$$S = \left(\frac{v \cdot n}{1 \cdot R^{2/3}} \right)^2$$

$$S = \left(\frac{0,60 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot 0,13}{1 \left[\frac{\text{m}^{1/3}}{\text{s}} \right] \cdot (0,11[\text{m}])^{2/3}} \right)^2$$

$$S = 0,12$$

Lo que indica un ángulo de inclinación del canal de $6,59^\circ$, este ángulo es aceptable ya que permitirá al efuente trasladarse a la velocidad de acercamiento deseada.

4.3.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE CRIBAJE

El sistema de cribaje es necesario debido a que la EMRAQ-EP como parte de sus desechos también tiene residuos sólidos, los cuales algunos no se logran remover de manera manual y fluyen con el efluente. El objetivo del sistema de cribaje es retener dichos sólidos y de esta manera que no afecten a las bombas ni válvulas en el resto de la planta de tratamiento. En la Tabla 4.8. se presentan las dimensiones obtenidas para el diseño del sistema de cribaje.

Tabla 4.8. Resultado del diseño de la criba

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Espesor de barras (m)	e	0,01
Separación de barras (m)	D_b	0,03
Inclinación de la base (°)	θ	45
Velocidad de acercamiento (m/s)	v_a	0,60
Factor de seguridad	f	4,00
Ancho canal (m)	W_{canal}	0,30
Ancho de la criba (m)	W_c	0,34
Largo de la criba (m)	L_c	3,00
Número de barras	N	19

4.3.2.1. Determinación del área libre del sistema de cribaje

El área de libre de la criba se determinó con el caudal de diseño y la velocidad de acercamiento recomendada de 0,6 m/s; junto con un factor de seguridad de 4, el factor de seguridad corresponde a un valor recomendado bibliográficamente para que el equipo trabaje sin riesgo de no tener la capacidad de abastecer el proceso adecuadamente (Romero, 2016, p. 288). El área libre se calculó con la Ecuación 3.6.

Donde:

A_l : área libre (m^2)

- Q_d : caudal de diseño: 310 (m³/d)
 v_a : velocidad de acercamiento: 0,60 (m/s)
 f : factor de seguridad: 4

$$A_l = \frac{310 \left[\frac{m^3}{d} \right] \cdot \frac{1[d]}{8[h]} \cdot \frac{1[h]}{3600[s]}}{0,60 \left[\frac{m}{s} \right]} \cdot 4$$

$$A_l = 0,07[m^2]$$

4.3.2.2. Determinación del área libre total de la criba

Para la determinación del área de total de la criba se utilizó la Ecuación 3.7, la determinación de esta área se la realiza con el propósito de que la criba retenga la mayor cantidad de sólidos a medida que el efluente se desplaza a través de ella.

El sistema de cribaje se consideró será de limpieza manual para tener un proceso más accesible, por lo tanto, la separación de las barras será de 0,025 m, valor más corto que pueda existir para de esta manera retener a los sólidos más pequeños y el espesor de estas es suficiente con ser de 0,01 m, los rangos permisibles se encuentran expresados en el Tabla 3.3.

Donde:

- A_T : área total (m²)
 D_b : separación de barras: 0,025 (m)
 e : espesor de barras: 0,010 (m)

$$A_T = \frac{0,07[m^2]}{\frac{0,025[m]}{0,025[m]+0,010[m]}}$$

$$A_T = 0,10[m^2]$$

4.3.2.3. Determinación del ancho de la criba

Para la determinación del ancho de la criba se utilizó la Ecuación 3.8.

Donde:

W_c : ancho de la criba (m)

A_T : área total: 0,10 (m²)

W_{canal} : ancho del canal: 0,30 (m)

$$W_c = \frac{0,10[m^2]}{0,30[m]}$$

$$W_c = 0,33[m]$$

4.3.2.4. Determinación de la cabeza de pérdida de las rejillas

El cálculo de la pérdida de carga de la rejilla se lo determinó con la Ecuación 3.9 y se trabajó con un ángulo de inclinación de 45°, una constante de forma de 2,42 para barras planas cuadradas (Metcalf y Eddy, 2003, p. 230)

Donde:

H : cabeza de pérdida de las rejillas (cm)

B : factor de forma de la rejilla: 2,42

θ : ángulo de inclinación de la base: 45 (°)

g : aceleración de gravedad: 9,81 (m/s²)

e : espesor de barras: 0,010 (m)

v_a : velocidad de acercamiento: 0,60 (m/s)

D_b : separación de barras (m): 0,025 (m)

$$H = 2,42 \cdot \left(\frac{0,010[m]}{0,025[m]} \right)^{\frac{4}{3}} \cdot \frac{\left(0,60 \left[\frac{m}{s} \right] \right)^2}{2 \times 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]} \cdot \text{sen}(45[^\circ])$$

$$H=0,009[m]=0,93[cm]$$

La pérdida de carga de la criba no debe exceder el valor de 15 cm, por lo que el resultado obtenido está dentro de los valores recomendados (Romero, 2016, p. 293).

4.3.2.5. Determinación del número de rejillas

El número de barras verticales que tendrá cada criba se lo determinó con la Ecuación 3.10. (Romero, 2016, p. 293)

Donde:

N : número de rejillas horizontales

W_{canal} : ancho del canal: 0,300 (m)

D_b : separación de barras: 0,025 (m)

e : espesor de barras: 0,010 (m)

$$N = \frac{0,300[m] - 0,025[m]}{0,025[m] - 0,010[m]}$$

$$N=18,33 \approx 19 \text{ barras}$$

Los valores obtenidos del sistema de cribaje corresponden a un solo equipo, como van a existir dos plantas para tratar el efluente líquido, las mismas dimensiones se utilizarán en ambas plantas.

4.3.3. DISEÑO DEL TANQUE DE IGUALACIÓN

La principal función del tanque de igualación en la PTAR propuesta es homogeneizar los caudales que entrarán al proceso. La EMRAQ-EP trabaja 8 horas

diarias, por lo que, las aguas residuales solo serán descargadas hacia la planta de tratamiento durante este tiempo.

Con el fin de que el proceso total sea continuo, el efluente descargado por la EMRAQ-EP ingresará al tanque de igualación durante 8 horas y será descargado durante las 24 horas del día en menor cantidad, de esta manera se tiene además que el dimensionamiento posterior de los equipos en el proceso será de menor capacidad y por lo tanto de menor tamaño. El tiempo de residencia mínimo del efluente en el tanque será de 2 horas, este tiempo es suficiente para mantener el agua homogeneizada (Chango y Simbaña, 2016). En la Tabla 4.9 se presentan los resultados del dimensionamiento del tanque de igualación.

Tabla 4.9. Resultado del diseño del tanque de igualación

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Tiempo de retención hidráulico (h)	TRH_{TH}	2,00
Altura del tanque (m)	H_{TH}	3,87
Diámetro del tanque (m)	D_{TH}	4,52
Volumen del tanque (m^3)	V_{TH}	62,00
Área superficial del tanque (m^2)	A_{TH}	13,35
Espesor del tanque (mm)	E_{TH}	12,00
Largo de las paletas (m)	Da	1,52
Distancia entre base del tanque y paleta (m)	Bp	2,26
Ancho de las paletas (m)	W	0,31
Ancho del deflector (m)	J	0,45
Potencia del agitador (W)	$P_{agitador}$	853,23

4.3.3.1. Determinación de volumen del tanque de igualación

La descarga de agua residual esperada por día será de $620 m^3$, como existirán dos plantas iguales para tratar toda el agua residual, el caudal de diseño para una planta de efluente líquido será de $310 m^3$. El comportamiento de descarga por hora del efluente actualmente de la EMRAQ-EP no es registrado, por lo que para el diseño

del tanque de igualación se utilizará el caudal de diseño mencionado previamente. El agua en el tanque solo deberá permanecer dentro de este por 2 horas, por lo que se consideró que el volumen del efluente que ingrese durante este tiempo será el volumen máximo del tanque que se requerirá.

Para la determinación del volumen del tanque se utilizó la Ecuación AII.2 obtenida en el balance de masa del equipo. Donde se conoce que el flujo de ingreso del efluente es 38,75 m³/h (310 m³/d) y el flujo de salida es de 12,92 m³/h, flujo determinado para distribuir el agua las 24 horas del día.

Donde:

ρ_{H_2O} : densidad del agua residual: 999,33 (kg/m³)

$V_{o_{TH}}$: volumen del líquido en el tanque de igualación a tiempo 0: 0,00 (m³)

$V_{f_{TH}}$: volumen del líquido en el tanque de igualación lleno (m³)

t_o : tiempo de llenado inicial: 0,00 (h)

t_f : tiempo de llenado final: 2,00 (h)

$$(38,75-12,92) \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot (2 - 0)[h] = V_{f_{TH}}$$

$$V_{f_{TH}} = 51,67[m^3]$$

El valor obtenido representa la cantidad de agua que habrá en el tanque, por lo que, para determinar el volumen total del tanque de igualación, es necesario aumentar su volumen por seguridad, para ello al valor se lo multiplica por un factor de sobredimensionamiento.

El factor seleccionado es de 0,2; lo que indica se sobredimensionará el equipo un 20 por ciento, por medio de la Ecuación 4.3 se determinó el volumen del tanque de igualación (American Petroleum Institute, 2012, p. 60).

$$V_{TH} = V_{f_{TH}} \cdot (1 + f) \quad [4.3]$$

Donde:

V_{TH} : volumen tanque de igualación (m³)

$V_{f_{TH}}$: volumen del líquido en el tanque de igualación lleno: 51,67 (m³)

f : factor de sobredimensionamiento: 0,20

$$V_{TH} = 51,67[m^3] \cdot 1,20$$

$$V_{TH} = 62,00[m^3]$$

4.3.3.2. Determinación del diámetro y altura del tanque de igualación

El tanque será de forma cilíndrico y tendrá en su interior un sistema de agitación para evitar que cualquier partícula se sedimente y que la carga contaminante se mantenga homogénea. Se recomienda para el diseño del sistema de agitación una relación diámetro/altura del líquido de 1 o cercana, de esta manera es factible la utilización de las relaciones geométricas para el diseño del sistema de agitación (Castillo, 2013).

Se eligió una relación diámetro/altura de 1,4 con el propósito de que la altura del tanque sea menor a la del diámetro y así tener un tanque estable estructuralmente. Para la determinación del diámetro del equipo se utilizó la Ecuación 4.4.

$$V_{f_{TH}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{TH}^2 \cdot h_l \quad [4.4]$$

Donde:

$V_{f_{TH}}$: volumen del líquido en el tanque de igualación (m³)

D_{TH} : diámetro del tanque igualación (m)

h_l : altura del líquido (m)

$$D_{TH} = \sqrt[3]{51,67[m^3] \cdot \frac{4 \times 1,4}{\pi}}$$

$$D_{TH} = 4,52[m]$$

$$\therefore h_l = \frac{4,52[m]}{1,4}$$

$$h_l = 3,23[m]$$

Como se agregó un 20% de sobredimensionamiento en la altura del tanque de igualación por seguridad, a continuación, se presenta la altura que deberá tener el tanque de igualación por medio del uso de la Ecuación 4.3 adaptada a los términos de la altura del tanque.

$$\therefore H_{TH} = h_l \cdot 1,20$$

$$H_{TH} = 3,23[m] \cdot 1,20$$

$$H_{TH} = 3,87[m]$$

4.3.3.3. Determinación del área superficial del tanque de igualación

Para la determinación del área que ocupará el equipo se utilizó la Ecuación 3.11.

$$A_{TH} = \frac{51,67[m^3]}{3,87[m]}$$

$$A_{TH} = 13,35[m^2]$$

4.3.3.4. Determinación de la presión hidrostática del agua en el tanque de igualación

Para conocer las presiones de operación y de diseño del tanque de igualación se determinó en primer lugar la presión que ejercerá el agua en el interior del tanque,

también conocida como presión hidrostática. Para la determinación de la presión hidrostática se utilizó la Ecuación 3.13.

Donde:

P_e : presión hidrostática que ejerce el efluente dentro del tanque (MPa)

ρ_e : densidad del efluente: 999,33 (kg/m³)

g : aceleración de la gravedad: 9,81 (m/s²)

h_l : altura del líquido: 3,23 (m)

$$P_{e_{TH}} = 999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot 3,23[\text{m}]$$

$$P_{e_{TH}} = 31\,666,21[\text{Pa}] = 0,032[\text{MPa}]$$

4.3.3.5. Determinación de la presión de operación del tanque de igualación

La presión de operación del tanque de igualación se la determinó con la Ecuación 3.12, para ello se trabajó la presión atmosférica de Quito (0,073 MPa).

$$P_{o_{TH}} = 0,073[\text{MPa}] + 0,032[\text{MPa}]$$

$$P_{o_{TH}} = 0,105[\text{MPa}] = 15,23[\text{psi}]$$

4.3.3.6. Determinación de la presión de diseño del tanque de igualación

Para la determinación de la presión de diseño del tanque de igualación, se seleccionó de la Tabla 3.6 recomendado según la presión de operación que tiene el equipo. En este caso como la presión de operación resultó ser menor a 250 psi, la presión de diseño será igual a la presión de operación con una adición de 25 psi. (American Society of Mechanical Engineers , Código B31.3-2010, 2010). La

determinación de la presión diseño del tanque de igualación se presenta a continuación:

$$P_{\text{diseño TH}} = 15,23[\text{psi}] + 25,00[\text{psi}]$$

$$P_{\text{diseño TH}} = 40,23[\text{psi}] = 0,28[\text{MPa}]$$

4.3.3.7. Determinación del espesor del tanque de igualación

El material del tanque de igualación será de acero tipo ASTM A36, se determinó su espesor con la Ecuación 3.14 y con una tolerancia a la corrosión de 2 mm, debido a que, este valor es el recomendado para tanques que almacenan agua o líquidos poco corrosivos (American Petroleum Institute, 2012, p. 60).

Donde:

t_{TH} : espesor del tanque de igualación (mm)

P_i : presión interna del tanque: 0,27 (MPa)

D_{TH} : diámetro interno del tanque: $4,52 \times 10^3$ (mm)

S_m : tensión máxima permisible del material: 400 (MPa)

E : eficiencia de soldadura: 0,80.

c : tolerancia por corrosión: 2,00 (mm)

$$t_{\text{TH}} = \frac{0,28[\text{MPa}] \cdot 4,52 \times 10^3[\text{mm}]}{2 \cdot 400[\text{MPa}] \cdot 0,80 - 1,2 \cdot 0,28[\text{MPa}]} + 2,00[\text{mm}]$$

$$t_{\text{TH}} = 3,91[\text{mm}]$$

Los espesores mínimos de un tanque de almacenamiento recomendados se presentan en la Tabla 3.7, como el valor que se obtuvo es bajo en relación con el diámetro del tanque, se estableció que el espesor mínimo incluido el espesor por corrosión deberá ser de 12 mm, por lo que se utilizó ese valor.

4.3.3.8. Determinación del sistema de agitación en el tanque de igualación

Para el diseño del sistema de agitación se utilizó las semejanzas simétricas expuestas por Castillo (2013, p.30). Se consideró como mejor opción que la relación diámetro/altura sea de 1,4 con el fin de tener un tanque estable.

Como la relación altura/diámetro es cercano a uno, se procedió con la aplicación de las demás relaciones geométricas para el dimensionamiento del sistema de total de agitación. Se utilizará como agitador palas inclinadas puesto que, la agitación será aplicada a agua residual con mínima cantidad de sólidos suspendidos y se consideró, además que la viscosidad del efluente es igual a la viscosidad del agua pura (Castillo, 2013, p. 30). Se determinó el largo de las paletas (D_a) del sistema de agitación con la Ecuación 3.16.

$$\frac{D_a}{D_{TH}} = 0,337$$

$$D_a = 0,337 \cdot 4,52[\text{m}]$$

$$D_a = 1,52[\text{m}]$$

Se determinó la distancia entre la base de tanque y paletas (B_p) del sistema de agitación con la Ecuación 3.17.

$$\frac{B_p}{D_{TH}} = 0,5$$

$$B_p = 0,5 \cdot 4,52[\text{m}]$$

$$B_p = 2,26[\text{m}]$$

Se determinó el ancho del deflector (J) del sistema de agitación con la Ecuación 3.18.

$$\frac{J}{D_{TH}} = 0,1$$

$$J = 0,1 \cdot 4,52[\text{m}]$$

$$J = 0,45[\text{m}]$$

Se determinó el ancho de las paletas (W) con la Ecuación 3.19.

$$\frac{W}{Da} = 0,2$$

$$W = 0,2 \cdot 1,52[\text{m}]$$

$$W = 0,31[\text{m}]$$

Al ser un proceso de agitación con deflectores en su interior se logra obtener un régimen en régimen turbulento del agua residual, por lo que la constante del agitador (k_{agitador}) se la eligió de la Tabla 3.8 en la sección de régimen turbulento. El valor para utilizar es 1,65 para agitadores tipo ventilador de 6 palas que corresponde a los agitadores de placas inclinadas (Metcalf y Eddy, 2003, p 246). Con la Ecuación 3.20 se determinó la potencia del motor para el sistema de agitación del tanque de igualación.

Donde:

P_{agitador} : potencia necesaria del agitador (W)

k_{agitador} : constante del agitador: 1,65

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$: densidad del agua residual: 999,33 (kg/m³)

n : velocidad de giro: 0,40 (rev/s)

Da : largo de las paletas: 1,52 (m)

$$P_{\text{agitador}} = 1,65 \cdot 999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \left(0,40 \left[\frac{\text{rev}}{\text{s}} \right] \right)^3 \cdot (1,52[\text{m}])^5$$

$$P_{\text{agitador}} = 856,23[\text{W}] = 1,15[\text{hp}]$$

4.3.4. DISEÑO DE LA TRAMPA DE GRASAS

El propósito de la trampa de grasas en la línea de tratamiento es retener la mayor cantidad de grasas y aceites presentes en el agua para no afectar el funcionamiento de las bombas ni taponar las tuberías de los procesos posteriores. El flujo que sale de la trampa de grasas se dirige por un sistema de bombeo por aspersión para ingresar al vermifiltro. En la Tabla 4.10 se presentan los resultados del diseño obtenidas de la trampa de grasas.

Tabla 4.10. Resultado del diseño de la trampa de grasas

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Carga superficial ($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$)	C_i	6,46
Tiempo de retención (h)	TRH_{tg}	0,25
Relacion largo ancho	R_{L-W}	2:1
Ancho de la trampa (m)	W_{tg}	1,00
Largo de la trampa (m)	L_{tg}	2,00
Altura de la trampa (m)	H_{tg}	1,55
Área superficial (m^2)	A_{tg}	2,00
Volumen de la trampa (m^3)	V_{tg}	3,10
Remoción de grasas (%)	Remoción grasa	85,91

Para dimensionar la trampa de grasas se utilizó la información obtenida por Ruiz (2020, p. 42), quien hizo un diseño a escala laboratorio del cual se determinó el tiempo de retención del líquido y la cantidad de grasas a la salida de la trampa.

4.3.4.1. Determinación del porcentaje de remoción de grasa

Se procedió a calcular en primer lugar el porcentaje de remoción de grasas y aceites con la Ecuación 3.21, para ello se conoce que la concentración de aceite inicial del

efluente (C_{go}) será de 429,82 mg/L y la concentración de salida (C_{fo}) esperada es de 60,56 mg/L; valor que no sobrepasa el límite permisible de la norma ambiental (Secretaría de Ambiente, 2016).

Donde:

Remoción grasa : porcentaje de remoción de aceites y grasas (%)

C_{go} : concentración inicial de aceites y grasas: 429,82 (mg/L)

C_{gf} : concentración final de aceites y grasas: 60,56 (mg/L)

$$\text{Remoción grasa} = 100 - \frac{100 \cdot 60,56 \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right]}{429,82 \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right]}$$

Remoción grasa = 85,91%

La remoción de grasas resulta alta y permite que el efluente salga del proceso bajo condiciones permisibles de la norma para descarga y se considera que el equipo funcionará adecuadamente.

4.3.4.2. Determinación volumen de la trampa de grasas

El volumen mínimo que debe tener la trampa de grasas se lo calculó con el caudal de diseño de 310 m³/d (12,92 m³/h). El tiempo de retención que obtuvo Ruiz (2020) fue de 1,63 minutos; sin embargo, al dimensionar el equipo con dicho resultado, el equipo sería inconsistente. Por lo que se utilizó el valor mínimo recomendado teórico de 0,25 h, que al ser un tiempo mayor de retención se serán removidas las grasas deseadas. Se determinó el volumen de la trampa de grasas con la Ecuación 3.22.

Donde:

V_l : volumen de líquido en la trampa de grasas (m³)

Q_d : caudal de diseño: 12,92 (m³/h)

TRH_{tg} : tiempo de retención hidráulico de la trampa de grasas: 0,25 (h)

$$V_l = 12,92 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot 0,25[h]$$

$$V_l = 3,23[m^3]$$

4.3.4.3. Determinación del ancho de la trampa de grasas

La relación ancho y largo de la trampa seleccionada fue de 0,5 y la profundidad del líquido de 1,25 m, este valor es el estándar y recomendado para trampas de grasas por lo que se toma como valor para el diseño del equipo (Romero, 2016, p. 729; CEPIS, 2003).

Con la Ecuación 3.23 se determinó el ancho de la trampa de grasas.

Donde:

W_{tg} : ancho de la trampa de grasas (m)

R_{L-W} : relación largo – ancho: 0,5

P_l : profundidad del líquido en la trampa de grasas: 1,25 (m)

V_l : volumen de líquido en la trampa de grasas: 3,23 (m^3)

$$W_{tg} = \frac{\sqrt{3,23 [m^3] \cdot 0,5}}{1,25 [m]}$$

$$W_{tg} = 1,02 [m] \sim 1,00 [m]$$

4.3.4.4. Determinación del largo de la trampa de grasas

Como se conoce el ancho de la trampa de grasas y la relación que existe con el largo del equipo, con la Ecuación 3.24 se determinó el largo de la trampa de grasas.

$$L_{tg} = \frac{1,02 \text{ [m]}}{0,5}$$

$$L_{tg} = 2,04 \text{ [m]} \sim 2,00 \text{ [m]}$$

4.3.4.5. Determinación del área superficial de la trampa de grasas

Se conoce el largo y ancho de la trampa de grasas por lo tanto con la Ecuación 3.25 se determinó el área superficial del tanque.

$$A_{tg} = 1,00 \text{ [m]} \cdot 2,00 \text{ [m]}$$

$$A_{tg} = 2,00 \text{ [m}^2\text{]}$$

4.3.4.6. Determinación de la altura de la trampa de grasas

Para determinar la altura de la trampa de grasas se debe tener en cuenta que debe existir un espacio sobre el nivel del líquido, este valor según la CEPIS (2003, p. 8) tiene que ser de 30 cm como mínimo. Por lo tanto, la altura del equipo (H_{tg}) será la altura que tiene el líquido en su interior más una altura libre de 30 cm.

$$H_{tg} = 1,25 \text{ [m]} + 0,30 \text{ [m]}$$

$$H_{tg} = 1,55 \text{ [m]}$$

4.3.4.7. Determinación del volumen de la trampa de grasas

La determinación del volumen final de la trampa de grasas será el resultado del producto entre el área superficial y la altura del equipo. A continuación, se presenta el cálculo que se realizó para conocer el volumen de la trampa de grasas.

$$V_{tg}=2,00[m^2] \cdot 1,55[m]$$

$$V_{tg}=3,10 [m^3]$$

4.3.4.8. Determinación de la carga superficial de la trampa de grasas

Finalmente se determinó la carga superficial que tiene la trampa de grasa, para ello se utiliza la Ecuación 3.26.

$$C_i = \frac{12,92 \left[\frac{m^3}{h} \right]}{2,00 [m^2]}$$

$$C_i = 6,46 \left[\frac{m^3}{m^2 h} \right] = 155,04 \left[\frac{m^3}{m^2 d} \right]$$

Como se observa, el valor obtenido fue de 155,04 ($m^3/m^2 d$), el valor recomendado según la CEPIS está entre 24 a 38 ($m^3/m^2 d$). Se obtuvo un valor mayor al esperado debido a que se trabajó con un tiempo de retención mayor al obtenido por Ruiz (2020), por lo tanto, el equipo estará sobredimensionado. Pero se toma como aceptable el valor y las dimensiones obtenidos debido a que se consideró la altura y tiempos de retención estándares del equipo y trabajar con un tiempo menor al recomendado podría generar mala separación de las grasas (CEPIS, 2003, p. 8).

4.3.5. DISEÑO DEL VERMIFILTRO

Como se conoce, los filtros biológicos ocupan grandes áreas superficiales para que puedan operar correctamente, por lo que se decidió dividir en 6 módulos por planta de tratamiento el vermifiltro para que de esta manera su control sea manejable al igual que su construcción.

La información necesaria para el dimensionamiento del vermifiltro se la obtuvo del equipo diseñado a escala laboratorio realizado por Ruiz (2020) y de los parámetros de diseño para filtros percoladores expuestos en la Tabla 3.10. De la investigación citada se utilizó el tiempo de retención óptimo de 24 h, ya que fue con ese tiempo que se obtuvo la mayor disminución de la carga orgánica.

En la Tabla 4.11 se presentan los resultados del diseño de un módulo de vermifiltro.

Tabla 4.11. Resultado del diseño de un módulo de vermifiltro

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Eficiencia de remoción de DBO ₅ (%)	E _r	88,52
Carga hidráulica (m ³ /m ² d)	HLR	1,00
Área superficial (m ²)	A _v	51,67
Volumen módulo vermifiltro (m ³)	V _v	112,84
Tiempo de retención hidráulico (h)	HRT	24,00
Porosidad del sustrato (%)	p	94,70
Profundidad lecho del sustrato (m)	D _l	1,00
Profundidad arena (m)	D _{arena}	0,27
Profundidad grava (m)	D _{grava}	0,13
Profundidad piedra bolones (m)	D _{bolones}	0,27
Altura vermifiltro (m)	D _{vermi}	2,20
Longitud vermifiltro (m)	L _{vermi}	8,00
Ancho vermifiltro (m)	W _{vermi}	6,50
Factor sobredimensionamiento (%)	f	30,00

4.3.5.1. Determinación de la eficiencia del vermifiltro

La determinación de la eficiencia de remoción de la carga orgánica en el agua residual se la obtuvo con la Ecuación 3.27 que se enfoca en la disminución del DBO₅ como indicador a lo largo del proceso y la información obtenida del proceso a escala laboratorio realizado por Ruiz que obtuvo un equipo con buen desempeño en la disminución de los contaminantes (2020).

Donde:

E_r : eficiencia de remoción de DBO₅

C_{DBO_0} : concentración inicial DBO₅ de la caracterización del agua residual:
1 612 (mg/L)

C_{DBO_f} : concentración final DBO₅ después de tiempo óptimo de retención:
185 (mg/L)

$$E_r = \frac{1\,612 \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] - 185 \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right]}{1\,612 \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right]} \cdot 100$$

$$E_r = 88,52\%$$

La eficiencia de remoción obtenida fue del 88,52 %, lo que significa que la carga orgánica se reducirá de manera significativa. Sin embargo, los resultados obtenidos por Ruiz (2020) alcanzaron a las 24 horas una concentración de DBO₅ de 185 mg/L y la normativa indica que la concentración permisible para la descarga a alcantarillados debe ser máximo de 170 mg/L de DBO₅ (Secretaría de Ambiente, 2016).

Resultados de vermifiltros propuestos en otras investigaciones sostienen que con tiempos de retención menores y dentro de los rangos de 2 a 14 horas se alcanza una reducción de la carga orgánica en un 87 % como se observa en la Tabla AI.4. Basado en la bibliografía presentada se trabajó con un tiempo mayor para asegurar que la disminución de la carga si ingresará dentro de los límites permisibles.

4.3.5.2. Determinación del área superficial del vermifiltro

El vermifiltro por PTAR tendrá 6 módulos de iguales dimensiones, por lo que el caudal total de ingreso a cada planta (310 m³/d) también se dividió en 6 flujos (51,67 m³/d) para dimensionar cada módulo. La tasa de carga hidráulica (HLR) para un vermifiltro se recomienda que no debe ser mayor a 1m³/m² d, de esta manera las

lombrices que se encuentran en el sustrato trabajarán apropiadamente (Salazar, 2005). Como se requiere la mayor eficiencia en el proceso se seleccionó el límite máximo recomendado de 1 como HLR y se estimó que el tiempo que le tomará a todo el líquido en escurrir por el filtro es de 1 día. Con la Ecuación 3.28 se determinó el área superficial de cada módulo (Bravo, 2019, p 19).

Donde:

HLR : tasa de carga hidráulica: 1 (m³/m² d)

V_{ar} : volumen de agua residual: 51,67 (m³)

A_v : área de material filtrante (m²)

t : tiempo que demora en escurrir: 1 (d)

$$A_v = \frac{51,67 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right]}{1 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{d}} \right]}$$

$$A_v = 51,67 [\text{m}^2]$$

4.3.5.3. Determinación de la profundidad del lecho del sustrato

Una vez que se obtuvo el área de suelo expuesta se determinó la profundidad de lecho de sustrato (humus con cascarilla de arroz) por medio de la relación que presenta con el tiempo de retención hidráulico (HRT) de 24 h y la porosidad del medio de 0,947 (Manyuchi, et al., 2013, p. 17). Se trabajó con la Ecuación 3.29 y se despejó de ella la profundidad del medio.

Donde:

HRT : tiempo de retención hidráulico: 24 (h)

V_s : volumen de sustrato donde se encuentran las lombrices (m³)

Q_v : caudal que ingresa al vermifiltro: 2,15 (m³/h)

p : porosidad del medio: 94,70 (%)

$$V_s = \frac{HRT \cdot Q_v}{p}$$

El volumen del lecho de sustrato será el área superficial del vermifiltro por la profundidad del lecho, es decir el volumen correspondiente a una piscina de concreto, por lo tanto, de la Ecuación 3.29 se despejo el valor buscado (Dl).

$$A_v \cdot D_l = \frac{HRT \cdot Q_v}{p}$$

$$D_l = \frac{24[h] \cdot 2,15 \left[\frac{m^3}{h} \right]}{0,95 \cdot 51,67[m^2]}$$

$$D_l = 1,05[m] \sim 1[m]$$

4.3.5.4. Determinación de la altura de las capas del vermifiltro

La profundidad del lecho de sustrato en el vermifiltro de cada módulo resultó en 1 m y según Bravo (2019, p. 19) esta altura debe corresponder el 60 % de la altura total del vermifiltro y es la adecuada para que la lombrices puedan trabajar y reproducirse de manera adecuada y eficiente. En la Tabla 3.11 se muestran los porcentajes de capas que debe tener un vermifiltro por lo que las profundidades de las diferentes capas resultaron:

$$D_{arena} = \frac{16}{60} = 0,27 [m]$$

$$D_{grava} = \frac{8}{60} = 0,13 [m]$$

$$D_{bolones} = \frac{16}{60} = 0,27 [m]$$

Para conocer la profundidad total de lecho filtrante se sumaron las cuatro capas que tendrán los módulos del vermifiltro como se presenta a continuación por medio de la Ecuación 4.5.

$$D_{\text{lecho total}} = D_l + D_{\text{arena}} + D_{\text{grava}} + D_{\text{bolones}} \quad [4.5]$$

Donde:

- $D_{\text{lecho total}}$: profundidad del medio filtrante (m)
- D_l : profundidad del lecho (m)
- D_{arena} : profundidad del filtro de arena (m)
- D_{grava} : profundidad del filtro de grava (m)
- D_{bolones} : profundidad del filtro de piedra bolones (m)

$$\therefore D_{\text{lecho total}} = 1,00 + 0,27 + 0,13 + 0,27 \text{ [m]}$$

$$D_{\text{lecho total}} = 1,67 \text{ [m]}$$

Para determinar la altura total del vermifiltro se lo sobredimensionó en un 30 %, este valor fue seleccionado según la investigación realizada por Jiménez (2016, p. 47). El vermifiltro requiere ser sobredimensionado debido a que el sustrato presente será removido y cambiado recurrentemente y se espera que esa actividad no provoque el desbordamiento de la tierra y el agua rociada por no tener paredes que lo sostengan. Con la Ecuación 4.6 se determinó la profundidad total del vermifiltro (Bravo, 2019, p. 15).

$$D_{\text{vermi}} = D_{\text{lecho total}} \cdot \left(1 + \frac{f}{100}\right) \quad [4.6]$$

Donde:

- D_{vermi} : profundidad vermifiltro (m)
- $D_{\text{lecho total}}$: profundidad lecho total: 1,67 (m)
- f : factor de sobredimensionamiento: 0,30

$$D_{\text{vermi}} = 1,67 \text{ [m]} \times 1,3$$

$$D_{\text{vermi}} = 2,17 \text{ [m]} \sim 2,20 \text{ [m]}$$

4.3.5.5. Determinación del largo y ancho de los módulos del vermifiltro

Se conoce el área del suelo expuesta y se consideró un largo del módulo de 8 m para que sea manejable el proceso de movimiento y extracción del humus (Jiménez, 2016). Cada módulo es de forma rectangular por lo tanto con la ecuación del área de un rectángulo (Ecuación 3.3) se determinó el área interna del vermifiltro.

$$L_{\text{vermi}} = 8,00 \text{ [m]}$$

$$W_{\text{vermi}} = \frac{51,67 \text{ [m}^2\text{]}}{8 \text{ [m]}}$$

$$W_{\text{vermi}} = 6,46 \text{ [m]} \sim 6,5 \text{ [m]}$$

4.3.6. DISEÑO DEL TANQUE DE RECOLECCIÓN Y TANQUE DE TRITURACIÓN

Se estableció que los tanques que se utilizarán para recolectar los sólidos crudos y los sólidos triturados presenten las mismas dimensiones, el tiempo de residencia que se utilizó fue de 1 día con el fin de que tengan la capacidad de almacenar todos los residuos recolectados de los diversos procesos de la EMRAQ-EP y la PTAR. La recolección de los residuos sólidos será se lo realizará de manera manual y serán colocados dentro del tanque de almacenamiento.

En la Tabla 4.12 se encuentran los resultados del diseño de los tanques de almacenamiento y de trituración.

Tabla 4.12. Resultado del diseño de tanques de almacenamiento

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Volumen tanque (m ³)	V _{Tanque}	26,35
Diámetro del tanque (m)	Di _{tanque}	3,00
Altura del tanque (m)	H _{tanque}	3,00
Factor de sobredimensionamiento	f	0,25
Tiempo de retención (d)	TRH _{tanque}	1
Relacion altura-diámetro	H _{Tanque} /Di _{tanque}	1
Espesor del tanque (mm)	t _{TH}	12
Espesor de la tapa (mm)	t _{bc}	12

4.3.6.1. Determinación del volumen del tanque de recolección y tanque de trituración

La masa de sólidos que tendrá que tratar la planta se determinó en el Anexo II, donde se calculó un valor de 16 528,07 kg/d por parte de la EMRAQ-EP y la densidad establecida para este tipo de sólidos será de 784 kg/m³ de residuos, el valor determinado de masa de sólidos fue un estimado según el comportamiento de la EMRAQ-EP en sus producciones y la proyección estimada que existirá en 10 años.

Se utilizó la Ecuación 3.30 para la determinación del volumen de los tanques de recolección y de trituración, se estableció que ambos tanques presenten la misma capacidad.

Donde:

V_{Tanque} : volumen del tanque de almacenamiento (m³)

Q_{sólidos} : caudal de sólidos: (masa sólidos/densidad sólidos) (m³/d)

TR_{ta} : tiempo de retención en el tanque almacenamiento: 1 (d)

f_{Tanque} : factor sobredimensionamiento: 0,25

$$V_{\text{Tanque}} = 16\,528,07 \left[\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1}{784} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \cdot 1[\text{d}] \cdot (1+0,25)$$

$$V_{\text{Tanque}}=26,35[\text{m}^3]$$

4.3.6.2. Determinación del diámetro y altura del tanque de recolección y tanque de trituración

Para los tanques se estableció una relación altura-diámetro de 1, por fines estructurales (Castillo, 2013), de esta manera se determinaron las dimensiones de alto y diámetro de los tanques con la Ecuación 3.31.

Donde:

V_{Tanque} : volumen del tanque de almacenamiento (m^3)

D_{tanque} : diámetro interno del tanque (m)

H_{tanque} : altura del tanque (m)

$$26,35[\text{m}^3]=\frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{tanque}}^2 \cdot H_{\text{tanque}}+\frac{\pi \cdot D_{\text{tanque}}^3}{24}$$

$$\frac{H_{\text{tanque}}}{D_{\text{tanque}}}=1$$

$$\therefore 26,35[\text{m}^3]=\frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{tanque}}^3+\frac{\pi \cdot D_{\text{tanque}}^3}{24}$$

$$D_{\text{tanque}}=H_{\text{tanque}}=3,06[\text{m}]\sim 3,00[\text{m}]$$

Como se conoce que los tanque presentaran un fondo cónico para que de esta manera sea más sencillo removerá el lodo almacenado. Se conoce que el volumen del cuerpo y el volumen de fondo son los siguientes:

$$V_{\text{cilindro}}=\frac{\pi}{4} \cdot 3,00^2 \cdot 3,00=21,21[\text{m}^3]$$

$$V_{\text{cónico}}=\frac{\pi \cdot 3,00^3}{24}=3,53[\text{m}^3]$$

4.3.6.3. Determinación de la presión hidrostática del lodo en el tanque de recolección y tanque de trituración

Se asumió que la densidad de lodo permanecerá constante para el dimensionamiento de los equipos, con la Ecuación 3.13 se determinó la presión que ejercerá el lodo en el interior de los tanques teniendo en cuenta que la altura del líquido dentro del interior del tanque es de 2,41 m.

$$\therefore P_{\text{lodo}} = 784 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot 2,41 [\text{m}]$$

$$P_{\text{lodo}} = 18\,535,41 [\text{Pa}] = 0,018 [\text{MPa}]$$

4.3.6.4. Determinación de la presión de operación del tanque de recolección y tanque de trituración

La presión de operación se determinó con la Ecuación 3.12, donde se trabajó con la presión atmosférica de Quito (0,72 atmósfera) y el resultado de la presión hidrostática del lodo en el tanque.

$$P_{\text{ota}} = 0,72 [\text{atm}] \cdot \frac{101\,325 [\text{Pa}]}{1 [\text{atm}]} \cdot \frac{1 \times 10^{-6} [\text{MPa}]}{1 [\text{Pa}]} + 0,018 [\text{MPa}]$$

$$P_{\text{ota}} = 0,09 [\text{MPa}] = 13,05 [\text{psi}]$$

4.3.6.5. Determinación de la presión de diseño del tanque de recolección y tanque de trituración

Como la presión de operación obtenida es menor a 250 psi, se determinó la presión de diseño por medio de la adición de 25 psi a su valor, según indica la norma ASME

B31.3 y como se observa en la Tabla 3.5 (American Society of Mechanical Engineers, 2010)

$$\therefore P_{\text{diseño}} = 13,05[\text{psi}] + 25,00[\text{psi}]$$

$$P_{\text{diseño}} = 38,05[\text{psi}] = 0,26[\text{MPa}]$$

Fue necesario conocer las presiones a las que estarán sometidos los tanques diseñados para proceder con la determinación del espesor necesario de estos.

4.3.6.6. Determinación del espesor del tanque de recolección y tanque de trituración

El espesor de los tanques se determinó con la Ecuación 3.14 y Ecuación 3.32.

Para el espesor del cuerpo

$$t_{\text{TH}} = \frac{38,05[\text{psi}] \cdot \frac{0,00689[\text{MPa}]}{1[\text{psi}]} \cdot 3,23 \times 10^3[\text{mm}]}{2 \cdot 400[\text{MPa}] \cdot 0,8 - 1,2 \cdot 38,05[\text{psi}] \cdot \frac{0,00689[\text{MPa}]}{1[\text{psi}]}} + 2[\text{mm}]$$

$$t_{\text{TH}} = 3,32[\text{mm}]$$

Para el espesor del fondo

$$t_{\text{bc}} = \frac{P_i \cdot D_i}{2 \cdot S_m \cdot E - 0,2 \cdot P_i}$$

$$t_{\text{bc}} = \frac{38,05[\text{psi}] \cdot \frac{0,00689[\text{MPa}]}{1[\text{psi}]} \cdot 3,23 \times 10^3[\text{mm}]}{\left(2 \cdot 400[\text{MPa}] \cdot 0,8 - 0,2 \cdot 38,05[\text{psi}] \cdot \frac{0,00689[\text{MPa}]}{1[\text{psi}]} \right)} + 2[\text{mm}]$$

$$t_{\text{bc}} = 3,32[\text{mm}]$$

El espesor mínimo que debe tener un tanque de almacenamiento referente a su diámetro nominal se encuentra expresado en la Tabla 3,7. Según lo recomendado el espesor mínimo del tanque debe ser de 12 mm, por lo que se optó por ese espesor que incluye 2 mm por seguridad para la corrosión tanto para cuerpo como fondo.

$$\therefore t_{TH} = t_{bc} = t = 12[\text{mm}]$$

4.3.7. DISEÑO DEL TANQUE DE PASTEURIZACIÓN

El tanque de pasteurización es de tipo enchaquetado porque requiere calentamiento constante por lo que se enfocó y se inició con el cálculo de la capacidad que requerirá el tanque interno para su diseño. En la Tabla 4.13 se presentan los resultados del diseño del tanque de pasteurización.

Tabla 4.13. Resultado del diseño del tanque de pasteurización

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Volumen tanque de pasteurización (m ³)	V_{tp}	2,71
Tiempo de retención hidráulico (h)	TR_{tp}	1,00
Diámetro interno tanque de pasteurización (m)	$D_{tp \text{ interno}}$	1,51
Altura tanque de pasteurización (m)	H_{tp}	1,51
Espesor del tanque de pasteurización (mm)	t_{tp}	12,00
Volumen tapa de tanque (m ³)	V_{tp}	1,19
Espesor de la tapa (mm)	t_{tp}	5,00
Factor de sobredimensionamiento (%)	f_p	20,00
Largo paletas de agitación (m)	Da_{tp}	0,51
Distancia entre base del tanque y paleta (m)	Bp_{tp}	0,76
Ancho de las paletas (mm)	W_{tp}	0,10
Ancho del deflector (mm)	J_{tp}	0,15
Potencia del agitador (W)	$P_{agitador}$	3,34

4.2.7.1. Determinación de la densidad del lodo en el tanque de pasteurización

El lodo que se tratará en el interior del tanque de pasteurización es una mezcla entre el lodo triturado y agua. Ingresará un flujo de agua en relación 2:1 con respecto al flujo de lodo triturado por lo que el lodo tendrá una densidad diferente a la del lodo inicial.

Con la Ecuación 4.7 se determinó la densidad estimada de la mezcla, donde se conoce que la densidad del lodo es de 784,00 kg/m³ y la densidad del agua es de 999,33 kg/m³ (Fuel, 2018, p.62)

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{X_{\text{lodo}}}{\rho_{\text{lodo}}} + \frac{X_{\text{agua}}}{\rho_{\text{agua}}} \quad [4.7]$$

Donde:

ρ_m : densidad de la mezcla (kg/m³)

X_{lodo} : porcentaje másico del lodo

X_{agua} : porcentaje másico del agua

ρ_{lodo} : densidad del lodo (kg/m³)

ρ_{agua} : densidad del agua (kg/m³)

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{0,33}{784 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} + \frac{0,67}{999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}$$

$$\rho_m = 916,28 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

4.3.7.2. Determinación del volumen del tanque de pasteurización

Con la densidad determinada y con el flujo másico determinado en el balance de masa en el Anexo II (2 066,00 kg/h) se procedió con el cálculo de volumen del tanque de pasteurización por medio de la Ecuación 3.33.

Donde:

V_{tp} : volumen del tanque de pasteurización (m^3)

$Q_{sólidos}$: caudal de residuos sólidos: (masa sólidos/densidad solidos) (m^3/h)

TR_{tp} : tiempo de residencia de residuos sólidos: 1 (h)

f_p : factor de sobredimensionamiento tanque de pasteurización: 0,20

$$V_{tp} = \frac{2\,066,00 \left[\frac{kg}{h} \right]}{916,28 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \cdot 1 [h] \cdot (1+0,20)$$

$$V_{tp} = 2,71 [m^3]$$

4.3.7.3. Determinación de la altura y diámetro del tanque de pasteurización

Para la aplicación del sistema de agitación por semejanza geométrica la relación altura-diámetro debe ser 1 o cercana, se seleccionó el valor de 1 y se utilizó la ecuación del volumen de un cilindro (Ecuación 4.8) adaptada a la nomenclatura del tanque de pasteurización (Castillo, 2013).

$$V_{tp} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{tp \text{ interno}}^2 \cdot H_{tp} \quad [4.8]$$

Donde:

$D_{tp \text{ interno}}$: diámetro del tanque de pasteurización interno (m)

H_{tp} : altura del tanque de pasteurización (m)

$$\therefore D_{tp \text{ interno}} = H_{tp}$$

$$2,71 [m^3] = \frac{\pi}{4} \cdot D_{tp \text{ interno}}^2 \cdot D_{tp \text{ interno}}$$

$$D_{tp \text{ interno}} = 1,51 [m]$$

$$\therefore H_{tp} = 1,51 [\text{m}]$$

4.3.7.4. Determinación de presión hidrostática del lodo en el tanque de pasteurización

La presión hidrostática que ejercerá la mezcla de agua y lodo se lo determinó con la Ecuación 3.12. Como se requiere conocer la altura de la mezcla en el interior del tanque para aplicar la ecuación mencionada se conoce que el líquido ocupara solo el 80 % del tanque por lo que con la Ecuación 4.9 se determinó la altura de la mezcla (Castillo, 2013).

$$H_{\text{liquido tp}} = H_{tp} \cdot 0,80 \quad [4.9]$$

Donde:

$H_{\text{liquido tp}}$: altura de la mezcla en el tanque de pasteurización (m)

H_{tp} : altura del tanque de pasteurización (m)

$$H_{\text{liquido tp}} = 1,51 [\text{m}] \cdot 0,80$$

$$H_{\text{liquido tp}} = 1,21 [\text{m}]$$

$$\therefore P_{\text{lodo}} = 916,28 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot 1,21 [\text{m}]$$

$$P_{\text{lodo}} = 10\,876,30 [\text{Pa}] = 0,011 [\text{MPa}]$$

4.3.7.5. Determinación de presión de operación del tanque de pasteurización

Para la determinación de la presión de operación del tanque de pasteurización se utilizó la Ecuación 3.12.

$$P_{o\ tp} = 0,72[\text{atm}] \cdot \frac{101\ 325[\text{Pa}]}{1[\text{atm}]} \cdot \frac{1 \times 10^{-6}[\text{MPa}]}{1[\text{Pa}]} + 0,011[\text{MPa}]$$

$$P_{o\ tp} = 0,084[\text{MPa}] = 12,16[\text{psi}]$$

4.3.7.6. Determinación de presión de diseño del tanque de pasteurización

La presión de operación resultó ser menor a 250 psi, por lo tanto, según la norma ASME la presión de diseño será igual a la presión de operación más 25 psi (American Society of Mechanical Engineers , Código B31.3-2010, 2010).

$$\therefore P_{\text{diseño tp}} = 12,16[\text{psi}] + 25,00[\text{psi}]$$

$$P_{\text{diseño tp}} = 37,16[\text{psi}] = 0,26[\text{MPa}]$$

4.3.7.7. Determinación del espesor del tanque de pasteurización

Se consideró que el material del interior del tanque de pasteurización será de acero ASTM A36, con el propósito de que soporte mayores presiones y temperaturas. El espesor del tanque de pasteurización se estableció que deberá ser de 7 mm como mínimo incluido el espesor requerido por corrosión según lo presentado en la Tabla 3.7 de acuerdo con el diámetro nominal obtenido del tanque que fue de 1,51 m (Towler y Sinnott, 2008, p.986).

El espesor de la tapa se lo determinó con la Ecuación 3.34 y con una eficiencia de soldadura de 400 MPa por el material de diseño.

Donde:

t_{tp} : espesor tapa de tanque de pasteurización (mm)

R_c : radio del curvado: 1 651 (mm)

P_i : presión de diseño de tanque de pasteurización: 0,26 (MPa)

$$t_{\text{tp externo}} = \frac{0,885 \cdot 0,26[\text{MPa}] \times 1\,510[\text{mm}]}{400[\text{MPa}] \cdot 1 - 0,1 \cdot 0,261[\text{MPa}]} + 2[\text{mm}]$$

$$t_{\text{tp}} = 2,87[\text{mm}]$$

Como el valor obtenido de espesor es muy bajo, se seleccionó el valor mínimo permitido en tanques a presión según la norma ASME (American Society of Mechanical Engineers , Código B31.3-2010, 2010) de 5 mm.

4.3.7.8. Determinación del sistema de agitación del tanque de pasteurización

El dimensionamiento del sistema de agitación para el tanque de pasteurización se lo realizó de la misma manera que para el tanque de igualación, para ello se consideró una relación altura del líquido y diámetro interno del tanque de 1 y de esta manera se aplicó semejanza geométrica (Castillo, 2013, p.30).

$$\therefore \frac{H_{\text{liquido tp}}}{D_{\text{tp interno}}} = 1$$

Se determinó el largo de las paletas (Da_{tp}) del sistema de agitación con la Ecuación 3.16

$$\frac{Da_{\text{tp}}}{D_{\text{tp interno}}} = 0,337$$

$$Da_{\text{tp}} = 0,337 \cdot 1,51 [\text{m}]$$

$$Da_{\text{tp}} = 0,51[\text{m}]$$

Se determinó la distancia entre la base de tanque y paletas (Bp_{tp}) del sistema de agitación con la Ecuación 3.17.

$$\frac{B_{p_{tp}}}{D_{tp \text{ interno}}} = 0,5$$

$$B_{p_{tp}} = 0,5 \cdot 1,51 \text{ [m]}$$

$$B_{p_{tp}} = 0,76 \text{ [m]}$$

Se determinó el ancho del deflector (J_{tp}) del sistema de agitación con la Ecuación 3.18.

$$\frac{J_{tp}}{D_{tp \text{ interno}}} = 0,1$$

$$J_{tp} = 0,1 \cdot 1,51 \text{ [m]}$$

$$J_{tp} = 0,15 \text{ [m]}$$

Se determinó el ancho de las paletas (W_{tp}) del sistema de agitación con la Ecuación 3.19.

$$\frac{W_{tp}}{D_{a_{tp}}} = 0,2$$

$$W_{tp} = 0,2 \cdot 0,51 \text{ [m]}$$

$$W_{tp} = 0,10 \text{ [m]}$$

Con la Ecuación 3.20 se determinó la potencia del motor para el sistema de agitación del tanque de igualación, se consideró el valor de la constante de agitación ($k_{agitador}$) que corresponde para agitadores de tipo ventilados de 6 palas, valor de 1,65 (Metcalf y Eddy, 2003, p 246).

$$P_{agitador} = 1,65 \cdot 916,28 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \left(0,4 \left[\frac{\text{rev}}{\text{s}} \right] \right)^3 \cdot (0,51 \text{ [m]})^5$$

$$P_{\text{agitador}} = 3,34[\text{W}] = 0,005[\text{hp}]$$

El valor obtenido de la potencia obtenida para el sistema de agitación es bajo, por lo que se utilizará un motor con la potencia mínima existente en el mercado de 0,01 kW (Mott, 2006).

4.3.8. DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR ANAEROBIO

El biodigestor anaerobio se diseñó con base en el tiempo de que deberá permanecer el lodo inicialmente para su estabilización. El tiempo de retención seleccionado fue de 15 días el cual corresponde a los parámetros de operación de un reactor de tasa alta y la temperatura de operación de 50 °C. En la Tabla 4.14 se presentan los resultados del diseño del reactor.

Tabla 4.14. Resultado del diseño del biodigestor anaerobio

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Tiempo de retención (d)	θ_c	15
Díámetro biodigestor (m)	D_{TB}	11,74
Altura biodigestor (m)	h_{TB}	10,98
Área superficial biodigestor (m ²)	A_{TB}	108,25
Volumen biodigestor (m ³)	V_{TB}	1 083,11
Volumen biogás generado (m ³ /d)	$V_{\text{biogás}}$	436,89
Energía que entrega biogás (kW)	Q_b	113,27
Energía para biodigestor (kW)	$Q_{\text{necesario tp}}$	137,10
Energía para pasteurización (kW)	$Q_{\text{necesario TB}}$	-0,17

4.3.8.1. Determinación total diario de producción de masa biológica (Px)

La determinación del total diario de producción de masa biológica corresponde a la masa que se estará formando en el interior del reactor, a partir de esto se puede

conocer el volumen de metano que se formará. Con la Ecuación 3.36 se determinó el parámetro mencionado.

Donde:

P_x : producción total diaria de masa biológica (g SSV/d)

Q : caudal de efluente que trata la planta de tratamiento 620 000 (L/d)
(620 m³/d)

S_o : DBO inicial del afluente: 1 612 (mg/L)

S_f : DBO final del efluente: 185 (mg/L)

k_d : constante de descomposición microbiana: 0,014 (d⁻¹)

θ_c : tiempo de residencia de los lodos: 15 (d)

Y : coeficiente cinético de producción de biogás: 0,075 (gSV/gDBO)

$$P_{x=0,6} = 0,6 \cdot \frac{0,075 \left[\frac{\text{g SSV}}{\text{g DBO}} \right] \cdot (1\,612 - 185) \left[\frac{\text{mg DBO}}{\text{L}} \right] \cdot \frac{1[\text{g DBO}]}{1\,000[\text{mg DBO}]} \cdot 620\,000 \left[\frac{\text{L}}{\text{d}} \right]}{1 + \frac{0,014}{[\text{d}]} \cdot 15[\text{d}]}$$

$$P_{x=0,6} = 0,6 \cdot 54\,839,26 \left[\frac{\text{g SSV}}{\text{d}} \right] = 32\,903,55 \left[\frac{\text{g SSV}}{\text{d}} \right]$$

El valor obtenido indica que al día se generaran 32 903,55 g de sólidos suspendidos volátiles, que es el indicador de la cantidad de materia orgánica que se encuentra presente en el residuo y por medio de su descomposición anaeróbica generará metano y dióxido de carbono. Este valor es importante porque indica cuanto biogás podrá producir la planta propuesta.

4.3.8.2. Determinación del volumen de metano producido

Una vez conocida la masa total diaria de producción de masa biológica por medio de la Ecuación 3.35 se determinó la cantidad de metano que se generará bajo condiciones normales (0 °C y 1 atm).

Donde:

- Q : caudal de efluente que trata la planta de tratamiento (m³/d)
 V_{CH₄} : volumen de metano producido en condiciones estándar (0 °C y 1 atm)
 S_o : DBO inicial del afluente (mg/L)
 S_f : DBO final del efluente (mg/L)
 P_x : masa total diaria de producción de masa biológica (g SSV/d)

$$V_{CH_4} = 0,3516 \left[\frac{m^3 CH_4}{kg DBO} \right] \cdot \left[0,6 \cdot 620\,000 \left[\frac{L}{d} \right] \cdot (1\,612 - 185) \left[\frac{mg DBO}{L} \right] \cdot \frac{1 [Kg DBO]}{1 \times 10^6 [mg DBO]} - 1,42 \left[\frac{kg DBO}{kg SSV} \right] \right] \cdot 32,90 \left[\frac{kg SSV}{d} \right]$$

$$V_{CH_4} = 170,22 \left[\frac{m^3 CH_4}{d} \right] (0^\circ C, 1 atm)$$

Como el biodigestor estará trabajando a condiciones de Quito y a temperatura termofílica (0,72 atm y 50 °C), se realizó la adecuación de las condiciones de la cantidad de metano generado por medio de la ecuación de los gases ideales (Ecuación 4.10) (Johnson y Yates, 2007, p. 297)

$$\frac{V_1}{P_1 \cdot T_1} = \frac{V_2}{P_2 \cdot T_2} \quad [4.10]$$

Donde:

- V₁: Volumen gas a condiciones 1 (m³)
 P₁: Presión de gas a condiciones 1 (atm)
 T₁: Temperatura de gas a condiciones 1 (K)
 V₂: Volumen gas a condiciones 2 (m³)
 P₂: Presión de gas a condiciones 2 (atm)
 T₂: Temperatura de gas a condiciones 2 (K)

$$\therefore V_{\text{CH}_4} = \frac{170,22 \left[\frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{d}} \right] \times 323[\text{K}] \times 1[\text{atm}]}{273,10[\text{K}] \times 0,72[\text{atm}]}$$

$$V_{\text{CH}_4} = 279,61 \left[\frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{d}} \right] (50 \text{ }^\circ\text{C y } 0,72 \text{ atm})$$

4.3.8.3. Determinación del volumen de biogás producido

Según los estudios realizado por Benavides (2020, p. 75) a los lodos generados por la EMRAQ-EP bajo las condiciones de la mezcla (lodo), se estableció que la composición del metano en el biogás que se genera es aproximadamente del 64%, por lo tanto, para el dimensionamiento del reactor se trabajará con este estimado.

Por medio de la relación porcentual (Ecuación 4.11) entre el metano y el biogás total se determinó el volumen de biogás que se formará.

$$\frac{V_b}{V_{\text{CH}_4}} = \frac{1}{0,64} \quad [4.11]$$

Donde:

V_b : volumen del biogás en el biodigestor (m^3)

V_{CH_4} : volumen del metano en el biodigestor (m^3)

$$\therefore V_b = \frac{279,61 \left[\frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{d}} \right]}{0,64}$$

$$V_b = 436,89 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right]$$

La cantidad de biogás que podrá generar la planta propuesta es de 436,89 m^3/d , este combustible será utilizado para el calentamiento de lodos en el interior del tanque de pasteurización.

4.3.8.4. Determinación del volumen del lodo en el biodigestor

Para la determinación del volumen de lodos producidas en la PTAR se utilizó al Ecuación 3.37. Se conoce que la masa de lodo será de 2 066 kilogramos por día y la densidad de este es 915,59 kilogramos por metro cúbico. La información de la masa fue determinada en los balances de masa expuestos en el Anexo II.

$$m_{\text{lodo}} = M_{12} = 2\,066 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] = 49\,584,10 \left[\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right]$$

$$\therefore V_L = 15[\text{d}] \cdot 49\,584,096 \left[\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{m}^3]}{915,59[\text{kg}]}$$

$$V_L = 812,33[\text{m}^3]$$

4.3.8.5. Determinación de las dimensiones del biodigestor

Según las recomendaciones bibliográficas, para que un reactor de tipo anaerobio funcione correctamente, el tanque donde se producirá la reacción debe presentar un volumen en el que el 75 % pertenezca al lodo y el restante para el almacenamiento temporal del gas generado (Gadhamshetty, et al., 2017, p. 268). Bajo los porcentajes presentados se determinó el volumen total del reactor con la Ecuación 4.12.

$$\frac{V_{\text{TB}}}{V_L} = \frac{1}{0,75} \quad [4.12]$$

Donde:

V_{TB} : volumen del biodigestor (m^3)

V_L : volumen del lodo en el biodigestor (m^3)

$$\therefore V_{\text{TB}} = \frac{812,33[\text{m}^3]}{0,75}$$

$$V_{TB}=1\,083,11[\text{m}^3]$$

A los biodigestores de tanques cilíndricos se recomienda no tener diámetros menores a 6,00 m ni superiores a 38,00 m, la profundidad del líquido interno debe ser de por lo menos de 7,50 m con el propósito de que su funcionamiento sea correcto (Metcalf y Eddy, 2003, p. 930). Para la determinación del diámetro del reactor se trabajó con el volumen de lodo y una altura de 7,50 m en la sección cilíndrica y se utilizó la Ecuación 4.4.

$$:812,33[\text{m}^3]=\frac{\pi}{4} \cdot D_{TB}^2 \cdot 7,5[\text{m}]$$

$$D_{TB}=11,74[\text{m}]$$

La forma del biodigestor es un tanque cilíndrico con una tapa elíptica, por lo tanto, solo se conoce el volumen que ocupará el lodo, mientras que el volumen que ocupará el gas equivale al volumen de la tapa más una sección del cilindro del reactor. Se determinó la altura que no ocupa el lodo en la sección cilíndrica del tanque con el fin de determinar la altura total de este, para ello se utilizó la Ecuación 3.38.

Donde:

V_{sc} : volumen de la sección cilíndrica sin lodo: 812,33 (m³)

D_{TB} : diámetro del tanque del biodigestor: 11,74 (m)

h : altura de la sección cilíndrica sin lodo (m)

$$1\,083,11[\text{m}^3] - 812,33[\text{m}^3] = \frac{\pi}{4} \cdot 11,74[\text{m}]^2 \cdot h + \frac{\pi}{24} \cdot 11,74[\text{m}]^3$$

$$h=0,55[\text{m}]$$

La altura de la tapa elíptica corresponde a 0,25 del tamaño del diámetro interno del reactor (American Society of Mechanical Engineers, VIII Reglas para la construcción de recipientes a presión, 2013) por lo tanto la altura total del reactor

(h_{TB}) será la sumatoria de la altura que ocupa el lodo, la altura de la sección cilíndrica que ocupa el gas y la altura de la tapa para ello se utilizó la Ecuación 4.13.

$$h_{TB}=7,50 + h + D_{TB} \cdot f \quad [4.13]$$

$$\therefore h_{TB}=7,50[m]+0,55[m]+11,74[m].0,25$$

$$h_{TB}=10,98[m]$$

Al conocer las dimensiones del reactor se determinó el área superficial que ocupará, con el fin de posteriormente seleccionar la ubicación del equipo en la planta. Para ellos se utilizó la Ecuación 3.1.

Donde:

A_{TB} : área transversal del biodigestor (m)

D_d : diámetro interno del biodigestor: 11,74 (m)

$$\therefore A_{TB}=\frac{\pi}{4} \cdot (11,74[m])^2$$

$$A_{TB}=108,25[m^2]$$

4.3.8.6. Determinación energía obtenida del biodigestor

El biogás generado dentro del reactor servirá como combustible para el intercambiador de calor del tanque de pasteurización, ya que este equipo requiere elevar el lodo en su interior a 70 °C. Por lo tanto, se debe determinar si la energía que entregará el biogás generado será suficiente para calentar el lodo. Se procedió al cálculo de la energía calorífica que entrega el biogás diariamente por medio de la Ecuación 3.39. El poder calorífico del biogás generado se asumió que será igual al poder calorífico correspondiente a biogás de concentración de metano del 60 % de 22 400 kJ/m³ (Romero, 2016, p.794).

Donde:

Q_b : flujo calorífico generado por el biogás (W)

PC_b : poder calorífico del biogás: 22 400 (J/m³)

$$Q_b = 22\,400 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right] \cdot 436,89 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right]$$

$$Q_b = 9\,786\,313,60 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{d}} \right] = 113,27[\text{kW}]$$

4.2.8.7. Determinación de energía requerida para el calentamiento de los lodos

Como se requiere que el biogás sea el combustible para el calentamiento del tanque de pasteurización, se determinó los calores necesarios para mantener los lodos en los diferentes procesos a las temperaturas establecidas, para ello se utilizó la Ecuación 3.41.

Para la determinación del calor requerido para calentar el lodo en el tanque de pasteurización se asumió que este tendrá una capacidad calórica igual a la del agua (4 200 J/kg °C) como se observa en la Figura A1.5 y que ingresará al tanque a una temperatura de 13,9 °C, temperatura correspondiente a la temperatura promedio de Quito (Weather Spark, 2021).

$$\therefore Q_{\text{lodo}} = 2\,066 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \times 4\,200 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right] \times (70 - 13,9) [^\circ\text{C}]$$

$$Q_{\text{lodo}} = 486\,791,86 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right] = 135,22[\text{kW}]$$

El tanque de pasteurización presentará pérdidas de calor debido a su material de acero ASTM A36, y es necesario conocerlas para estimar el calor total requerido para alcanzar la temperatura de operación. De la Tabla 3.16 se seleccionó el valor del coeficiente de transmisión global de 4.68 W/m² °C para material de acero y con

la Ecuación 3.42 se determinó las pérdidas de energía que existirán. Se conoce además que el área superficial de biodigestor será de 7,16 m².

Donde:

$Q_{\text{pérdidas}}$: flujo calórico que se pierde en el ambiente (W)

U : coeficiente global de transmisión de calor: 4,68 (W/m² °C)

A : área de la sección transversal por donde atraviesa el flujo de calor por pérdidas: 7,16 (m²)

ΔT : variación de temperatura entre el interior y el medio externo del equipo: (70-13,9) (°C)

$$\therefore Q_{\text{pérdidas}} = 4,68 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{°C}} \right] \cdot 7,16 [\text{m}^2] \cdot (70,0 - 13,9) [\text{°C}]$$

$$Q_{\text{pérdidas}} = 1\,879,84 [\text{W}] = 1,88 [\text{kW}]$$

Con la Ecuación 3.40 se determinó el calor necesario requerido para el funcionamiento del tanque de pasteurización.

$$Q_{\text{necesario tp}} = 135,22 [\text{kW}] + 1,88 [\text{kW}]$$

$$Q_{\text{necesario tp}} = 137,10 [\text{kW}]$$

Como se observa la cantidad de calor requerido por el tanque de pasteurización es mayor a la cantidad de calor que entregará el biogás, por lo tanto, requerirá complementar el proceso con otro combustible para satisfacer la demanda o se podría implementar una purificación previa del biogás para de este modo aumente su poder calorífico y tener mayor generación de calor (Varnero, 2011, p. 57).

Se determinó la energía que debe liberar el lodo en el interior del biodigestor, debido a que, el lodo presente deberá disminuir su temperatura hasta alcanzar los 50 °C, para ello se utilizó la Ecuación 3.41.

$$\therefore Q_{\text{lodo}} = 2\,066 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \times 4\,200 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right] \times (50-70) [^\circ\text{C}]$$

$$Q_{\text{lodo}} = -173\,544 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right] = -48,21 [\text{kW}]$$

Como el tanque no es aislado en su totalidad, se determinó las pérdidas de calor a través de toda su estructura, que corresponde a cuerpo, base y tapa. Se seleccionó de la Tabla 3.16 los valores de coeficiente global de transmisión de calor y se determinó el calor perdido con la Ecuación 3.42 aplicada para cada una de las partes del biodigestor.

Para el cuerpo del cilindro se trabajó con un coeficiente de transmisión de calor de $0,71 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ que corresponde a un muro de hormigón con aislamiento (Metcalf y Eddy, 2003, p. 941).

$$\therefore Q_{\text{pérdidas cuerpo}} = 0,71 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right] \cdot (11,74 \cdot \pi \cdot 10,98) [\text{m}^2] \cdot (70-13,9) [^\circ\text{C}]$$

$$Q_{\text{pérdidas cuerpo}} = 16\,130,27 [\text{W}] = 16,13 [\text{kW}]$$

Para la determinación de las pérdidas en la base del tanque se utilizó un coeficiente de transmisión de calor de $0,63 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ que corresponde a una base de hormigón sobre tierra húmeda ya que se consideró el ambiente de Quito (Metcalf y Eddy, 2003, p. 941).

$$\therefore Q_{\text{pérdidas base}} = 0,63 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right] \cdot \left(\frac{11,74^2 \cdot \pi}{4} \right) [\text{m}^2] \cdot (70-13,9) [^\circ\text{C}]$$

$$Q_{\text{pérdidas base}} = 3\,825,86 [\text{W}] = 3,83 [\text{kW}]$$

Para la determinación de las pérdidas en la tapa del tanque se utilizó un coeficiente de transmisión de calor de $4,68 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ que corresponde a una base de cubierta fija de acero (Metcalf y Eddy, 2003, p. 941).

$$\therefore Q_{\text{pérdidas tapa}} = 4,68 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right] \cdot \left(\frac{11,74^2 \cdot \pi}{4} \right) [\text{m}^2] \cdot (70,0 - 13,9) [^\circ\text{C}]$$

$$Q_{\text{pérdidas tapa}} = 28\,420,70 [\text{W}] = 28,42 [\text{kW}]$$

Por lo tanto, con la Ecuación 3.40 se determinó el calor necesario para el funcionamiento del biodigestor.

$$Q_{\text{necesario TB}} = -48,21 [\text{kW}] + 16,13 [\text{kW}] + 3,83 [\text{kW}] + 28,42 [\text{kW}]$$

$$Q_{\text{necesario TB}} = -0,17 [\text{kW}]$$

La energía que requiere ser removida del biodigestor se lo hará por medio de un intercambiador de doble tubo donde ingresará agua a temperatura ambiente de Quito (13,9 °C) para enfriar el lodo.

4.3.9. DIMENSIONAMIENTO DE LA BANDA TRANSPORTADORA

Para el dimensionamiento de la banda transportadora se seleccionó la velocidad en la Tabla 3.22. Se consideró que el material que va a transportar la banda es no abrasivo debido a que es lodo proveniente de residuos cárnicos y un ancho de banda de 400 mm para que pueda ingresar debajo del tanque de recolección. Por lo tanto, con los parámetros establecidos la velocidad que debe tener la banda será de 2,30 m/s (Rodríguez, 2021).

Para seleccionar adecuadamente la banda transportadora que se requiere se estableció la capacidad de transporte del lodo será de 0,875 m³/h (688,67 kg/h), la altura de descarga es de 2 m debido a la altura que tiene el tanque de trituración, el grado de inclinación de la cinta será de 10°. El ángulo seleccionado es la inclinación máxima recomendada para bandas transportadoras, mayor a ese valor se corre el riesgo de que el material no suba (Rodríguez, 2021)

Con la Ecuación 3.51 y los parámetros de diseño establecidos se determinó la potencia necesaria que debe tener la cinta. Como se conoce el ángulo de inclinación y la altura a la que debe llegar la banda, se determinó que el largo de esta será de 11,52 m.

Donde:

P_{ct} : potencia de la banda (kW)

L : longitud de la banda transportadora: 11,52 (m)

φ : ángulo de inclinación de la banda: 10 ($^{\circ}$)

v_{ct} : velocidad de avance de la banda: 2,30 (m/s)

L_f : longitud de la guía o faldones: 11,52 (m)

Q_m : capacidad que transporta la cinta: (688,67 kg/h) 0,689 (t/h)

B : ancho de la banda transportadora: 0,40 (m)

$$P_{ct} = \frac{11,52[m] \cdot \text{sen } 10[^\circ] \cdot 0,689 \left[\frac{t}{h} \right]}{367} + 0,8 \cdot 2,30 \left[\frac{m}{s} \right] + 0,3 \cdot 2,30 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 0,4[m]$$

$$+ 0,16 \cdot 2,30 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 11,52[m]$$

$$P_{ct} = 6,36[kW]$$

Con la potencia establecida, se seleccionará por catálogo la mejor opción para la planta.

4.3.10. DIMENSIONAMIENTO DEL TRANSPORTADOR HELICOIDAL

Para la selección adecuada del transportador helicoidal se procedió con la determinación del área transversal, para ello se utilizó la Ecuación 3.52. Se asumió un diámetro de 16 cm, se consideró que el lodo a transportar es de tipo pesado y poco abrasivo por lo tanto el factor de relleno de 0,25 (Rodríguez, 2021).

4.3.10.1. Determinación del área transversal del transportador helicoidal

El área transversal del transportador helicoidal comprende al diámetro del cilindro por el cual estará rotando el tornillo sin fin. Con la Ecuación 3.52 se determinó el parámetro mencionado. Se asumió un diámetro de 16 cm adecuado para que el lodo pueda avanzar sin el riesgo de que se quede atorado, se consideró además que el lodo a transportar es de tipo pesado y poco abrasivo por lo tanto el factor de relleno de 0,25 (Rodríguez, 2021).

Donde:

A_T : área transversal del transportador (m^2)

γ_{th} : factor de relleno de la sección transversal: 0,25

D : diámetro del transportador helicoidal: 0,16 (m)

$$\therefore A_T = 0,25 \cdot \frac{\pi \cdot (0,16[m])^2}{4}$$

$$A_T = 0,005 [m^2]$$

4.2.10.2. Determinación de la velocidad del transportador helicoidal

De la Tabla 3.24 se seleccionó el valor de paso de la hélice según el diámetro del transportador, por lo tanto, el paso será de 160 mm y la velocidad angular de 70 rpm. Con la Ecuación 3.53 se determinó el valor de la velocidad lineal del transportador.

Donde:

v : velocidad lineal del transportador (m/s)

p_{tor} : paso de tornillo: 0,16 (m)

n : velocidad angular del transportador: 70 (rpm)

$$v = \frac{0,16[\text{m}] \cdot 70[\text{rpm}]}{60}$$

$$v = 0,19 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

4.2.10.3. Determinación de la capacidad de transporte del transportador helicoidal

Con la Ecuación 3.54 se determinó la capacidad de transporte del equipo, se seleccionó como valor de inclinación del tornillo de 20 °C y un coeficiente de disminución de 0,6 (Rodríguez, 2021). Al igual que en la banda transportadora, la inclinación máxima recomendada para el funcionamiento de un tornillo sinfín es de 20 °C por tal motivo se seleccionó dicho valor y así tratar de utilizar el área de la planta de forma optimizada (Rodríguez, 2021).

Donde:

Ct : capacidad de transporte (t/h)

ρ : densidad del material: 0,92 (t/m³)

i : coeficiente de disminución: 0,60

A_T : área transversal del transportador: 0,01 (m²)

v : velocidad lineal del transportador: 0,19 (m/s)

$$\therefore Ct = 3\,600 \cdot 0,01[\text{m}^2] \cdot 0,19 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot 0,92 \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot 0,60$$

$$Ct = 3,77 \left[\frac{\text{t}}{\text{h}} \right]$$

4.2.10.4. Determinación de la potencia requerida del transportador helicoidal

Finalmente se determinó la potencia del transportador helicoidal con la Ecuación 3.55, se seleccionó el valor del factor de resistencia del material de valor 1,2 para

un tipo de material granular, además, se conoce que la altura de descarga hacia el tanque es de 2 m y por medio del ángulo de inclinación seleccionado se conoce que la longitud que deberá tener el transportador será de 5,84 m.

Donde:

P_{th} : potencia requerida por el transportador (kW)

C_r : factor de resistencia del material: 1,20

L : longitud del transportador: 5,84 (m)

H : altura de descarga: 2,00 (m)

$$P = \frac{3,77 \left[\frac{t}{h} \right] \cdot 1,20 \cdot 5,84[m] + 2,00[m]}{367} + \frac{0,16[m] \cdot 5,84[m]}{20}$$

$$P = 0,12[kW]$$

4.3.11. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TUBERÍAS

El proceso de transporte del agua residual y lodos generados por la EMRAQ-EP se lo realizó por medio de sistemas de tuberías. El material de las tuberías seleccionadas fue de PVC, debido a que, al trabajar con agua y derivados estas generarían corrosión si las tuberías fuesen de metal, de esta manera se espera que la duración de las tuberías no requiera mayor mantenimiento. Para la determinación de las dimensiones de las tuberías se clasificó a la planta en sistemas como se observa en la Figura 4.1 y Figura 4.2.

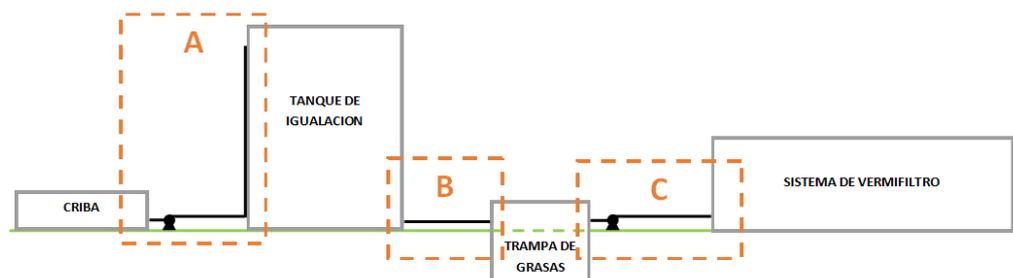


Figura 4.1. Esquema sistema de tuberías planta de agua

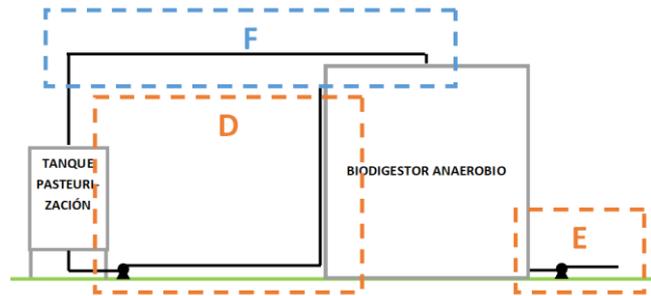


Figura 4.2. Esquema sistema de tuberías planta de lodos

En la Tabla 4.15 se presenta la denominación de cada sistema de tuberías.

Tabla 4.15. Clasificación de sistemas de tubería de la PTAR

Sistema	Descripción
A	Cribaje – tanque de igualación (agua residual)
B	Tanque de igualación – trampa de grasas (agua residual)
C	Trampa de grasas – vermifiltro (agua residual)
D	Tanque de pasteurización – biodigestor anaerobio (lodo residual)
E	Extracción de lodo de biodigestor anaerobio (lodo residual)
F	Biogás – tanque de pasteurización (biogás)

Para determinar las dimensiones de cada tubería dentro del proceso se requirió conocer las longitudes que tendrán estas antes y después de cada bomba, los accesorios que presentarán en cada línea y el material de las que estarán hechas. En la Tabla 4.16 se presentan la información de cada línea de tubería.

Tabla 4.16. Especificaciones de las líneas de tuberías en la PTAR de la EMRAQ-EP

Sistema	Ubicación	Longitud (m)	Accesorios	Material
A	Antes de bomba	1,0	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Entrada • 1 Salida • 1 Válvula de bola 	PVC
A	Después de bomba	4,8	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Entrada • 1 Salida • 3 Codos • 1 Válvula bola • 1 Válvula retención • 1 Válvula control 	PVC

Tabla 4.16. Especificaciones de las líneas de tuberías en la PTAR de la EMRAQ-EP
(continuación...)

B	N/A	1,5	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Entrada • 1 Salida • 1 Válvula contro 	PVC
C	Antes de bomba	4,0	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Entrada • 1 Salida • 1 Tee • 1 Codo 90° • 1 Válvula de bola 	PVC
C	Después de bomba	76,5	<ul style="list-style-type: none"> • 19 Tee • 19 Entrada 	PVC
D	Antes de bomba	1,0	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Entrada • 1 Salida • 1 Te • 1 Válvula de bola 	PVC
D	Después de bomba	14,0	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Entrada • 1 Salida • 1 Válvula de bola • 1 Válvula retención 	PVC
E	Antes de bomba	1,8	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Entrada • 1 Salida • 1 Tee • 1 Codo 90° • 1 Válvula de bola • 1 Válvula control 	PVC
E	Después de bomba	1,6	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Salida • 1 Tee • 1 Codo 90° • 1 Válvula de bola 	PVC
F	Antes de compresor	6,2	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Entrada • 1 Salida • 4 Codos • 1 Válvula de alivio de presión • 1 Válvula de bola • 1 Válvula control 	Polietileno
F	Después de compresor	8,1	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Entrada • 3 Codos • 1 Válvula de alivio de presión • Válvula de bola 	Polietileno

Se determinó las dimensiones de las tuberías de los sistemas A, B, D y E con la misma metodología, por lo que se presenta el ejemplo de cálculo para el sistema A.

4.3.11.1. Dimensionamiento de tuberías en el sistema A (Sistema de cribaje-tanque de igualación)

a) Dimensionamiento de tubería antes de la bomba (succión)

- **Determinación del diámetro de la tubería**

Para la determinación del diámetro de la tubería que se encontrará antes de la bomba en el sistema A, fue necesario conocer la velocidad a la cual se desplaza el fluido. De la Tabla 3.17 se seleccionó el valor máximo permisible de velocidad en succión para efluentes líquidos de 0,9 m/s, el caudal que atravesará la tubería de succión es el caudal de diseño de la planta de 310 m³/d y con la Ecuación 4.14 se determinó el diámetro de la tubería.

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot v \quad [4.14]$$

Donde:

Q : caudal del fluido (m³/s)

D : diámetro de tubería (m)

v : velocidad del fluido (m/s)

$$310 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{8[\text{h}]} \cdot \frac{1[\text{h}]}{3\,600[\text{s}]} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot 0,90 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$D = 0,12[\text{m}] = 4,86[\text{in}]$$

Para la selección de las tuberías se trabajará con las medidas de tuberías estándar de PVC, los valores normalizados se presentan en la Tabla A1.4. Como el valor obtenido de diámetro interno fue cercano a 5 pulgadas (in), se seleccionó un tubo

de diámetro nominal de 5 pulgadas, por lo tanto, el diámetro interno será 5.047 pulgadas (0,13 m) (Petersen products company, 2021).

- **Determinación de la velocidad en el interior de la tubería**

Con el valor de diámetro establecido se determinó la velocidad del fluido con la Ecuación 4.14.

$$310 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{8[\text{h}]} \cdot \frac{1[\text{h}]}{3\,600[\text{s}]} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(5,05[\text{in}] \cdot \frac{0,0254[\text{m}]}{1[\text{in}]} \right)^2 \cdot v$$

$$v=0,83 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

La velocidad obtenida ingresa en el rango permitido de velocidad succión en el interior de tuberías como se observa en la Tabla 3.17.

- **Determinación de la cabeza de pérdidas por accesorios**

Para la determinación de la cabeza de pérdidas por accesorios se consideró que la línea de succión del sistema A cuenta con los accesorios presentados en la Tabla 4.16. De la Tabla 3.20 se seleccionó los valores de los coeficientes por accesorios de cada uno de ellos y con la Ecuación 3.43 se determinó la cabeza de pérdidas por accesorios en la línea de succión.

Donde:

h_{acc} : cabeza de pérdidas por accesorios (m)

k_{acc} : constante de pérdidas por accesorios

v : velocidad del fluido: 0,83 (m/s)

g : aceleración de la gravedad: 9,81 (m/s²)

$$h_{acc} = (1,00 + 0,50 + 4,00) \cdot \frac{(0,83 \left[\frac{m}{s} \right])^2}{2 \cdot 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]}$$

$$h_{acc} = 0,19 [m]$$

- **Determinación de la cabeza de pérdidas por fricción**

Para la determinación de las pérdidas por fricción se debió calcular previamente el número de Reynolds, para ello se trabajó con la Ecuación 3.45. La información de las características del efluente a las condiciones del ambiente de Quito se encuentra en la Tabla AI.5, la velocidad y diámetro para el cálculo son los valores determinados previamente.

Donde:

Re : número de Reynolds

ρ : densidad del fluido: 999,33 (kg/m³)

μ : viscosidad del fluido: 0,00117 (kg/m s)

D : diámetro interno de la tubería: 0,13 (m)

v : velocidad del fluido en el interior de la tubería: 0,83 (m/s)

$$Re = \frac{0,83 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 999,33 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 0,13 [m]}{0,00117 \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]}$$

$$Re = 92\,160,43$$

El valor obtenido del número de Reynolds es mayor a 4 000 lo que indica que el efluente se encontrará en régimen turbulento, con dicho valor se ingresó en el diagrama de Moody (Anexo V) y se determinó el factor de fricción (factor de Darcy). Se considera que el vidrio y el plástico no presentan rugosidad por lo tanto la

rugosidad relativa de las tuberías será igual a 0 como se observa en la Tabla 3.21 (Streeter, 2000, p. 305).

Para la selección del factor Darcy en el diagrama de Moody se seleccionó la curva más baja de rugosidad relativa y con el valor de Reynolds obtenido se obtuvo que el factor fue de 0,019. Con la Ecuación 3.44 se determinó la cabeza de pérdidas por fricción en la tubería y se conoce que la longitud de la tubería será de 1 m como se observa en la Tabla 4.16 siendo esta distancia la obtenida por la ubicación de los equipos y sus dimensiones.

Donde:

h_f : cabeza por pérdidas de fricción (m)

f : factor de Darcy: 0,019

L : longitud de la tubería: 1,00 (m)

D : diámetro interno de la tubería: 0,13 (m)

v : velocidad del fluido en el interior de la tubería: 0,83 (m/s)

g : aceleración de la gravedad: 9,81 (m/s²)

$$h_f=0,019 \cdot \frac{1,00[\text{m}] \cdot \left(0,83 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]\right)^2}{0,13[\text{m}] \cdot 2 \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]}$$

$$h_f=0,005[\text{m}]$$

- **Determinación de la caída de presión**

Para la determinación de la caída de presión se estableció que el punto 1 se encuentra ubicado justo antes del ingreso del efluente en la tubería de succión, el punto 2 se encuentra en la tubería que va a ingresar a la bomba, no existirá diferencia de alturas entre ambos puntos de medición y la velocidad del fluido será constante a lo largo de toda la tubería. La caída de presión se determinó con la Ecuación 3.47.

Donde:

P_1 : presión del fluido en el punto 1 (Pa)

ρ : densidad del fluido: 999,33 (kg/m³)

g : aceleración de gravedad: 9,81 (m/s²)

v_1 : velocidad del fluido en el punto 1: 0,83 (m/s)

z_1 : altura del punto 1 con respecto a un punto de referencia: 0,00 (m)

P_2 : presión del fluido en el punto 2 (Pa)

v_2 : velocidad del fluido en el punto 2: 0,83 (m/s)

z_2 : altura del punto 2 con respecto a un punto de referencia: 0,00 (m)

h_{acc} : pérdidas por accesorios: 0,190 (m)

h_f : pérdidas por fricción: 0,005 (m)

$$\therefore \Delta P = (0,00[m] + 0,190[m] + 0,005[m]) \cdot 999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

$$\Delta P = 1\,911,67[\text{Pa}] = 0,28[\text{psi}]$$

La caída de presión obtenido se encuentra dentro del rango permisible como se observa en la Tabla 3.19 para tuberías de succión, por lo que el diámetro seleccionado inicialmente permite que se cumpla la velocidad y la caída de presión adecuada para el funcionamiento del transporte del líquido.

- **Determinación de la presión de operación y presión de diseño**

La tubería que conecta el sistema de cribaje con el tanque de igualación no requiere de asilamiento y como es un canal abierto, la presión de operación se consideró la atmosférica en Quito (0,72 atm). Por lo tanto, con la Ecuación 3.48 se determinó la presión de diseño para una tubería sin aislamiento (Mott, 2006, p. 162).

Donde:

$P_{\text{diseño}}$: Presión de diseño (psi)

P_{op} : Presión de operación (psi)

$$P_{\text{diseño}} = 0,72[\text{atm}] \cdot \frac{14,70[\text{psi}]}{1[\text{atm}]} \cdot 1,10$$

$$P_{\text{diseño}} = 11,64[\text{psi}] = 80\,254,98[\text{Pa}]$$

- **Determinación de la temperatura de operación y temperatura de diseño**

Se estima que la temperatura de operación de efluente dentro de la tubería será igual a la temperatura del ambiente de 13,9 °C de la zona, temperatura promedio en Quito. Por lo tanto, la temperatura de diseño se determinó con la Ecuación 3.49, para una tubería sin aislamiento.

Donde:

$T_{\text{diseño}}$: temperatura de diseño (°C)

T_{op} : temperatura de operación (°C)

$$T_{\text{diseño}} = 13,90[°\text{C}] + 10,00[°\text{C}]$$

$$T_{\text{diseño}} = 23,90[°\text{C}]$$

b) Dimensionamiento de tubería después de la bomba (descarga)

- **Determinación del diámetro de la tubería**

De la misma manera que se determinó el diámetro de la tubería de succión se determinó la tubería de descarga. Se utilizó el valor máximo permisible de velocidad de descarga presentado en la Tabla 3.17 para efluentes líquidos de 3,00 m/s, con este valor se determinó el diámetro de la tubería con la Ecuación 4.14. El caudal de trabajo en la descarga fue el mismo que en la succión de 310 m³/d.

Donde:

Q : caudal del fluido (m³/s)

D : diámetro de tubería (m)

v : velocidad del fluido: 3,00 (m/s)

$$310 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{8[\text{h}]} \cdot \frac{1[\text{h}]}{3\,600[\text{s}]} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot 3,00 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$D = 0,07[\text{m}] = 2,76[\text{in}]$$

El valor obtenido de diámetro interno fue cercano a 3 in, se seleccionó un tubo de diámetro nominal cercano al valor obtenido de 4 in de la Tabla AI.4, por lo tanto, el diámetro interno es de 4,03 in (Petersen products company, 2021).

- **Determinación de la velocidad en el interior de la tubería**

Con el valor de diámetro establecido se determinó la velocidad del fluido con la Ecuación 4.14.

$$310 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{8[\text{h}]} \cdot \frac{1[\text{h}]}{3\,600[\text{s}]} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(4,03[\text{in}] \cdot \frac{0,0254[\text{m}]}{1[\text{in}]} \right)^2 \cdot v$$

$$v = 1,31 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

La velocidad obtenida ingresa en el rango permitido de velocidad de descarga.

- **Determinación de la cabeza de pérdidas por accesorios**

A continuación, se determinó las pérdidas por accesorios dentro de la tubería de succión, la tubería de succión presenta en su línea: pérdidas por entrada y por

salida, una válvula de bola, una válvula de retención, una válvula de control y 3 codos. De la Tabla 3.20 se seleccionó el total de coeficientes por accesorios y con la Ecuación 3.43 se determinó la cabeza de pérdidas por accesorios en la línea de descarga.

Donde:

h_{acc} : cabeza de pérdidas por accesorios (m)

k_{acc} : constante de pérdidas por accesorios

v : velocidad del fluido: 1,31 (m/s)

g : aceleración de la gravedad: 9,81 (m/s²)

$$h_{acc} = (1,00 + 0,50 + 4,00 + 2,75 + 3,00 \cdot 0,80 + 3,00) \cdot \frac{\left(1,31 \left[\frac{m}{s}\right]\right)^2}{2 \cdot 9,81 \left[\frac{m}{s^2}\right]}$$

$$h_{acc} = 1,19 [m]$$

- **Determinación de la cabeza de pérdidas por fricción**

Para la determinación de las pérdidas por fricción se debió calcular previamente el número de Reynolds, para ello se trabajó con la Ecuación 3.45. La información de las características del efluente a las condiciones del ambiente de Quito se encuentra en la Tabla A1.4, la velocidad y diámetro para el cálculo son los valores determinados previamente.

Donde:

Re : número de Reynolds

ρ : densidad del fluido: 999,33 (kg/m³)

μ : viscosidad del fluido: 0,00117 (kg/m s)

D : diámetro interno de la tubería: 0,10 (m)

v : velocidad del fluido en el interior de la tubería: 1,31 (m/s)

$$Re = \frac{1,31 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 999,33 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 0,10[m]}{0,00117 \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]}$$

$$Re = 11\,890,79$$

El valor obtenido del número de Reynolds es mayor a 4 000 lo que indica que el efluente se encontrará en estado turbulento, con dicho valor se ingresó en el diagrama de Moody (Anexo V) y se determinó el coeficiente por pérdidas de fricción (factor de Darcy). Se considera que el vidrio y el plástico no presentan rugosidad por lo tanto la rugosidad relativa de las tuberías será igual a 0 como se observa en la Tabla 3.21 (Streeter, 2000, p. 305).

Para la selección del factor Darcy en el diagrama de Moody se seleccionó la curva más baja de rugosidad relativa y con el valor de Reynolds obtenido se obtuvo que el factor fue de 0,018. Con la Ecuación 3.44 se determinó la cabeza de pérdidas por fricción en la tubería y se conoció que la longitud de la tubería será de 4,80 m como se observa en la Tabla 4.16.

Donde:

h_f : cabeza por pérdidas de fricción (m)

f : factor de Darcy: 0,018

L : longitud de la tubería: 4,8 (m)

D : diámetro interno de la tubería: 0,10 (m)

v : velocidad del fluido en el interior de la tubería: 1,31 (m/s)

g : aceleración de la gravedad: 9,81 (m/s²)

$$h_f = 0,018 \cdot \frac{4,80[m] \cdot \left(1,31 \left[\frac{m}{s} \right] \right)^2}{0,10[m] \cdot 2 \cdot 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]}$$

$$h_f = 0,08[m]$$

- **Determinación de la caída de presión**

Para la determinación de la caída de presión se estableció que el punto 1 se encuentra ubicado justo después de la salida de la bomba en la sección A, el punto 2 se encuentra al final de la tubería, donde se descarga el efluente, la diferencia de alturas se da por la dimensión del tanque donde llega el efluente y la velocidad del fluido será constante a lo largo de toda la tubería. La caída de presión se determinó con la Ecuación 3.47.

Donde:

P_1 : presión del fluido en el punto 1 (Pa)

ρ : densidad del fluido: 999,33 (kg/m³)

g : aceleración de gravedad: 9,81 (m/s²)

v_1 : velocidad del fluido en el punto 1: 1,31 (m/s)

z_1 : altura del punto 1 con respecto a un punto de referencia: 0,00 (m)

P_2 : presión del fluido en el punto 2 (Pa)

v_2 : velocidad del fluido en el punto 2: 1,31 (m/s)

z_2 : altura del punto 2 con respecto a un punto de referencia: 3,80 (m)

h_{acc} : pérdidas por accesorios: 1,19 (m)

h_f : pérdidas por fricción: 0,08 (m)

$$\Delta P = (1,19[m] + 0,08[m] + 3,8[m]) \cdot 999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

$$\Delta P = 49\,703,37[\text{Pa}] = 7,21[\text{psi}]$$

La caída de presión obtenida no ingresa dentro del rango de valores permisibles en la descarga de efluentes como se puede observar en la Tabla 3.19, sin embargo, el hecho de que el fluido está en proceso de descarga la caída de presión no influirá mayormente para provocar afectaciones en las tuberías por lo que se considera más importante que la velocidad del efluente en el interior de la tubería ingrese en el rango recomendado (Mott, 2006).

- **Determinación de la presión de operación y presión de diseño**

Para establecer la presión de operación de la tubería de descarga de la sección A, se conoce que la presión de operación será igual a la presión que presenta el equipo posterior a ella (tanque de igualación). Del diseño del tanque de igualación se conoce que la presión operación será de 15,23 psi, la tubería que conecta el sistema de cribaje con el tanque de igualación no requiere de aislamiento, por lo tanto, con la Ecuación 3.48 se determinó la presión de diseño de la tubería de descarga.

Donde:

$P_{\text{diseño}}$: Presión de diseño (psi)

P_{op} : Presión de operación: 15,23 (psi)

$$P_{\text{diseño}} = 15,23[\text{psi}] \cdot 1,1$$

$$P_{\text{diseño}} = 16,75[\text{psi}] = 115\,455,00[\text{Pa}]$$

- **Determinación de la temperatura de operación y temperatura de diseño**

Se estima que la temperatura de operación de efluente dentro de la tubería será igual a la temperatura del ambiente de 13,9 °C, temperatura promedio en Quito. Por lo tanto, la temperatura de diseño se determinó con la Ecuación 3.49, para una tubería sin aislamiento.

Donde:

$T_{\text{diseño}}$: temperatura de diseño (°C)

T_{op} : temperatura de operación (°C)

$$T_{\text{diseño}} = 13,90[°\text{C}] + 10,00[°\text{C}]$$

$$T_{\text{diseño}} = 23,90[°\text{C}]$$

4.3.11.2. Dimensionamiento de tuberías en el sistema B (Tanque de igualación – trampa de grasas)

El sistema B consiste en la tubería que conecta el tanque de igualación a la trampa de grasas. En este sistema no se consideró necesario utilizar bomba, puesto que, con la presión hidrostática en el tanque de igualación es más que suficiente para que el líquido fluya hacia la trampa de grasas.

- **Determinación del diámetro de la tubería**

Para la determinación del diámetro de la tubería se estableció el valor máximo permisible de velocidad por drenaje establecido en la Tabla 3.19 de 0,3 m/s, con este valor se determinó el diámetro de la tubería por medio de la Ecuación 4.14. El caudal que atravesará la tubería de la sección B será igual al caudal de diseño de 310 m³/d, a diferencia del sistema anterior el caudal será dividido para las 24 horas del día para instaurar un proceso continuo después del tanque de igualación.

Donde:

Q : caudal del fluido (m³/s)

D : diámetro de tubería (m)

v : velocidad del fluido: 0,3 (m/s)

$$310 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{24[\text{h}]} \cdot \frac{1[\text{h}]}{3600[\text{s}]} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot 0,30 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$D=0,12[\text{m}]=4,72[\text{in}]$$

Para la selección de las tuberías se trabajará con las medidas de tuberías estándar de PVC, los valores normalizados se presentan en la Tabla A1.4. Como el valor obtenido de diámetro interno fue cercano a 5 pulgadas (in), se seleccionó un tubo de diámetro nominal de 5 in, por lo tanto, el diámetro interno será 5,047 in (0,13 m) (Petersen products company, 2021).

- **Determinación de la velocidad en el interior de la tubería**

Con el valor de diámetro establecido se determinó la velocidad del fluido con la Ecuación 4.14.

$$310 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{24[\text{h}]} \cdot \frac{1[\text{h}]}{3600[\text{s}]} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(5,05[\text{in}] \cdot \frac{0,0254[\text{m}]}{1[\text{in}]} \right)^2 \cdot v$$

$$v=0,28 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

La velocidad obtenida ingresa en el rango permitido de velocidad de drenaje en el interior de tuberías como se observa en la Tabla 3.17.

- **Determinación de la cabeza de pérdidas por accesorios**

Para la determinación de la cabeza de pérdidas por accesorios se consideró que la línea de drenaje del sistema B cuenta con los accesorios presentados en la Tabla 4.16. De la Tabla 3.20 se seleccionó los valores de los coeficientes por accesorios de cada uno de ellos y con la Ecuación 3.43 se determinó la cabeza de pérdidas por accesorios en la línea de descarga.

Donde:

h_{acc} : cabeza de pérdidas por accesorios (m)

k_{acc} : constante de pérdidas por accesorios

v : velocidad del fluido: 0,28 (m/s)

g : aceleración de la gravedad: 9,81 (m/s²)

$$h_{\text{acc}} = (1,00 + 0,50 + 3,00) \cdot \frac{(0,28 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right])^2}{2 \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]}$$

$$h_{\text{acc}} = 0,02[\text{m}]$$

- **Determinación de la cabeza de pérdidas por fricción**

Para la determinación de las pérdidas por fricción se debió calcular previamente el número de Reynolds, para ello se trabajó con la Ecuación 3.45. La información de las características del efluente a las condiciones del ambiente de Quito se encuentra en la Tabla A1.5, la velocidad y diámetro para el cálculo son los valores determinados previamente.

Donde:

Re : número de Reynolds

ρ : densidad del fluido: 999,33 (kg/m³)

μ : viscosidad del fluido: 0,00117 (kg/m s)

D : diámetro interno de la tubería: 0,13 (m)

v : velocidad del fluido en el interior de la tubería: 0,28 (m/s)

$$Re = \frac{0,28 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 999,33 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 0,13 [m]}{0,00117 \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]}$$

$$Re = 31\,090,27$$

El valor obtenido del número de Reynolds es mayor a 4 000 lo que indica que el efluente se encontrará en régimen turbulento, con dicho valor se ingresó en el diagrama de Moody (Anexo V) y se determinó el factor de fricción (factor de Darcy). Se considera que el vidrio y el plástico no presentan rugosidad por lo tanto la rugosidad relativa de las tuberías será igual a 0 como se observa en la Tabla 3.21 (Streeter, 2000, p. 305).

Para la obtención del factor Darcy en el diagrama de Moody se seleccionó la curva más baja de rugosidad relativa y con el valor de Reynolds obtenido se obtuvo que el factor fue de 0,021. Con la Ecuación 3.44 se determinó la cabeza de pérdidas por fricción en la tubería y se conoce que la longitud de la tubería será de 1,5 m como se observa en la Tabla 4.16.

Donde:

h_f : cabeza por pérdidas de fricción (m)

f : factor de Darcy: 0,021

L : longitud de la tubería: 1,50 (m)

D : diámetro interno de la tubería: 0,13 (m)

v : velocidad del fluido en el interior de la tubería: 0,28 (m/s)

g : aceleración de la gravedad: 9,81 (m/s²)

$$h_f = 0,021 \cdot \frac{1,50[\text{m}] \cdot \left(0,28 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]\right)^2}{0,13[\text{m}] \cdot 2 \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]}$$

$$h_f = 0,001[\text{m}]$$

Al ser un valor tan bajo indica que no existe mayores pérdidas por la fricción del fluido en el interior de la tubería, este valor podría ser despreciado para los cálculos posteriores.

- **Determinación de la caída de presión**

Para la determinación de la caída de presión se estableció que el punto 1 se encuentra ubicado justo después del inicio de la tubería de drenaje del tanque de igualación, el punto 2 se encuentra al final de la tubería que descarga el efluente en la trampa de grasas, como la trampa de grasas se encuentra enterrada en la superficie no existirá diferencia de alturas entre ambos puntos de medición y la velocidad del fluido será constante a lo largo de toda la tubería. La caída de presión se determinó con la Ecuación 3.47.

Donde:

P_1 : presión del fluido en el punto 1 (Pa)

ρ : densidad del fluido: 999,33 (kg/m³)

g : aceleración de gravedad: 9,81 (m/s²)

- v_1 : velocidad del fluido en el punto 1: 0,28 (m/s)
 z_1 : altura del punto 1 con respecto a un punto de referencia: 0,00 (m)
 P_2 : presión del fluido en el punto 2 (Pa)
 v_2 : velocidad del fluido en el punto 2: 0,28 (m/s)
 z_2 : altura del punto 2 con respecto a un punto de referencia: 0,00 (m)
 h_{acc} : pérdidas por accesorios: 0,02 (m)
 h_f : pérdidas por fricción: 0,001 (m)

$$\therefore \Delta P = (0,00[m] + 0,02[m] + 0,001[m]) \cdot 999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

$$\Delta P = 205,87[\text{Pa}] = 0,03[\text{psi}]$$

La caída de presión obtenido se encuentra dentro del rango permisible como se observa en la Tabla 3.19 para tuberías de drenaje, por lo que el diámetro seleccionado inicialmente permite que se cumpla la velocidad y la caída de presión adecuada para el funcionamiento del transporte del líquido.

- **Determinación de la presión de operación y presión de diseño**

La tubería que conecta el tanque de igualación con la trampa de grasas no requiere de asilamiento, la presión de operación de la tubería será igual a la presión de operación del equipo previo de esta, por lo tanto, tendrá un valor de 15,23 psi. Con la Ecuación 3.48 se determinó la presión de diseño para una tubería sin aislamiento (Mott, 2006, p. 162).

Donde:

$P_{\text{diseño}}$: Presión de diseño (psi)

P_{op} : Presión de operación (psi)

$$P_{\text{diseño}} = 15,23[\text{psi}] \cdot 1,1$$

$$P_{\text{diseño}}=16,75[\text{psi}]=115\,476,00[\text{Pa}]$$

- **Determinación de la temperatura de operación y presión de diseño**

Se estima que la temperatura de operación de efluente dentro de la tubería será igual a la temperatura del ambiente de 13,9 °C de la zona, temperatura promedio en Quito. De esta manera, la temperatura de diseño se determinó con la Ecuación 3.49, para una tubería sin aislamiento.

Donde:

$T_{\text{diseño}}$: temperatura de diseño (°C)

T_{op} : temperatura de operación (°C)

$$T_{\text{diseño}}=13,90[^\circ\text{C}]+10,00[^\circ\text{C}]$$

$$T_{\text{diseño}}=23,90[^\circ\text{C}]$$

4.3.11.3. Dimensionamiento de tuberías en el sistema C (trampa de grasas – vermifiltro)

El sistema C comprende la distribución homogénea del agua por medio de un sistema de tuberías con la ayuda de aspersores sobre el área total del vermifiltro. De la trampa de grasas hacia el vermifiltro se consideró la utilización de dos bombas centrífugas iguales en paralelo, con el fin, de que cada bomba se encargue de la distribución de agua para 3 módulos de vermifiltro, cada módulo requiere 6 aspersores de tipo Wobbler como se observa en la Figura 4.4 (Senninger, 2021).

Para la determinación de las características de las tuberías y de las bombas que se encontrarán en el sistema C, se realizaron los cálculos en función de una bomba, la más lejana a la trampa de grasas, con el fin de conocer las condiciones más críticas del sistema, la segunda bomba será igual a la determinada.

a) Dimensionamiento de tubería antes de la bomba (succión)

La tubería que sale de la trampa de grasas se divide en dos y distribuye el caudal total en dos secciones, por lo que se determinaron dos diámetros de tubería. Para ambos diámetros de tuberías se asumió una velocidad de 0,9 m/s, que es la velocidad máxima que podría alcanzar el fluido en la tubería y con la Ecuación 4.14 se calculó el diámetro de ambas tuberías.

Donde:

Q : caudal del fluido (m³/s)

D : diámetro de tubería (m)

v : velocidad del fluido: 0,9 (m/s)

Para la Tubería 1 el caudal será el de diseño, igual a 310 m³/d, ya que, esta tubería inicial dirigirá el fluido hacia la bifurcación que posteriormente desplazará el agua hacia las dos bombas.

$$310 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{24[\text{h}]} \cdot \frac{1[\text{h}]}{3600[\text{s}]} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot 0,90 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$D=0,07[\text{m}]=2,76[\text{in}]$$

Para la tubería 2 el caudal será la mitad del caudal de diseño, igual a 155 m³/d, debido a que, la tubería será después de la bifurcación, ya que dirige el efluente a una bomba.

$$155 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{24[\text{h}]} \cdot \frac{1[\text{h}]}{3600[\text{s}]} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot 0,90 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$D=0,05[\text{m}]=1,97[\text{in}]$$

Para la selección de las tuberías se trabajará con las medidas de tuberías estándar de PVC, los valores normalizados se presentan en la Tabla A1.4. Los valores obtenidos de ambas tuberías son cercanos a 3 y 2 in, por lo que se utilizó tuberías

de diámetro nominal con estos valores y de esta manera los diámetros internos serán de 3,068 in (0,08 m) y 2,067 in (0,05 m) respectivamente para determinar las velocidades en el interior de las tuberías (Petersen products company, 2021).

- **Determinación de la velocidad en el interior de la tubería**

Con el valor de diámetro establecido se determinó la velocidad del fluido con la Ecuación 4.14.

Para la tubería 1:

$$310 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{24[\text{h}]} \cdot \frac{1[\text{h}]}{3600[\text{s}]} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,08[\text{m}])^2 \cdot v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$v=0,71 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Para la tubería 2:

$$155 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{24[\text{h}]} \cdot \frac{1[\text{h}]}{3600[\text{s}]} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,05[\text{m}])^2 \cdot v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$v=0,91 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Las velocidades obtenidas ingresan en el rango permisible permitido de velocidad succión en el interior de tuberías como se observa en la Tabla 3.17, por lo que acepta una tubería de 3 in y otra de 2 in.

Para la determinación de las pérdidas a continuación se trabajó con una velocidad para todo el tramo de tubería, se eligió la mayor velocidad obtenida entre las dos tuberías de 0,91 m/s con su respectivo diámetro, ya que esta tubería será la de mayor longitud y con fines prácticos para los cálculos.

- **Determinación de la cabeza de pérdidas por accesorios**

Para la determinación de la cabeza de pérdidas por accesorios se consideró que la línea de succión del sistema C cuenta con los accesorios presentados en la Tabla 4.16. De la Tabla 3.20 se seleccionó los valores de los coeficientes por accesorios de cada uno de ellos y con la Ecuación 3.43 se determinó la cabeza de pérdidas por accesorios en la línea.

Donde:

h_{acc} : cabeza de pérdidas por accesorios (m)

k_{acc} : constante de pérdidas por accesorios

v : velocidad del fluido: 0,91 (m/s)

g : aceleración de la gravedad: 9,81 (m/s²)

$$h_{acc} = (1,0 + 0,5 + 4,0 + 1,8 + 0,8) \times \frac{(0,91 \frac{m}{s})^2}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_{acc} = 0,35 [m]$$

- **Determinación de la cabeza de pérdidas por fricción**

Para la determinación de las pérdidas por fricción se debió calcular previamente el número de Reynolds, para ello se trabajó con la Ecuación 3.45. La información de las características del efluente a las condiciones del ambiente de Quito se encuentra en la Tabla AI.5, la velocidad y diámetro para el cálculo son los valores determinados previamente.

Donde:

Re : número de Reynolds

ρ : densidad del fluido: 999,33 (kg/m³)

μ : viscosidad del fluido: 0,00117 (kg/m s)

D : diámetro interno de la tubería: 0,05 (m)

v : velocidad del fluido en el interior de la tubería: 0,91 (m/s)

$$\text{Re} = \frac{0,91 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot 999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 0,05 [\text{m}]}{0,00117 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}} \right]}$$

$$\text{Re} = 26\,746,80$$

El valor obtenido del número de Reynolds es mayor a 4 000 lo que indica que el efluente se encontrará en estado turbulento, con dicho valor se ingresó en el diagrama de Moody (Anexo V) y se determinó el factor de fricción (factor de Darcy). Se considera que el vidrio y el plástico no presentan rugosidad por lo tanto la rugosidad relativa de las tuberías será igual a 0 como se observa en la Tabla 3.21 (Streeter, 2000, p. 305).

Para la selección del factor Darcy en el diagrama de Moody se seleccionó la curva más baja de rugosidad relativa y con el valor de Reynolds obtenido se obtuvo que el factor fue de 0,021. Con la Ecuación 3.44 se determinó la cabeza de pérdidas por fricción en la tubería y se conoce que la longitud de la tubería será de 4,00 m como se observa en la Tabla 4.16.

Donde:

h_f : cabeza por pérdidas de fricción (m)

f : factor de Darcy: 0,021

L : longitud de la tubería: 4,00 (m)

D : diámetro interno de la tubería: 0,05 (m)

v : velocidad del fluido en el interior de la tubería: 0,91 (m/s)

g : aceleración de la gravedad: 9,81 (m/s²)

$$h_f = 0,021 \cdot \frac{4,00 [\text{m}] \cdot (0,91 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right])^2}{0,05 [\text{m}] \cdot 2 \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]}$$

$$h_f = 0,07 [\text{m}]$$

- **Determinación de la caída de presión**

Para la determinación de la caída de presión se estableció que el punto 1 se encuentra ubicado justo antes del ingreso del efluente en la tubería de succión, el punto 2 se encuentra en la tubería que va a ingresar a la bomba, existirá una diferencia de alturas de 1,86 m, ya que la trampa de grasas se encontrará sumergida en la tierra, la velocidad del fluido será constante a lo largo de toda la tubería. La caída de presión se determinó con la Ecuación 3.47.

Donde:

P_1 : presión del fluido en el punto 1 (Pa)

ρ : densidad del fluido: 999,33 (kg/m³)

g : aceleración de gravedad: 9,81 (m/s²)

v_1 : velocidad del fluido en el punto 1: 0,91 (m/s)

z_1 : altura del punto 1 con respecto a un punto de referencia: 0,00 (m)

P_2 : presión del fluido en el punto 2 (Pa)

v_2 : velocidad del fluido en el punto 2: 0,91 (m/s)

z_2 : altura del punto 2 con respecto a un punto de referencia: 1,86 (m)

h_{acc} : pérdidas por accesorios: 0,38 (m)

h_f : pérdidas por fricción: 0,07 (m)

$$\therefore \Delta P = (1,86[m] + 0,38[m] + 0,07[m]) \cdot 999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

$$\Delta P = 22\,351,81[\text{Pa}] = 3,24[\text{psi}]$$

- **Determinación de la presión de operación y presión de diseño**

La tubería que conecta la trampa de grasas a las bombas del vermifiltro no requieren de aislamiento, la presión de operación se considera igual a la presión del equipo previo a esta, por tal motivo, la presión será igual a la sumatoria de la

presión hidrostática en la trampa de grasas y la presión atmosférica. La presión hidrostática se determinó con la Ecuación 3.13.

Donde:

P_e : presión hidrostática que ejerce el efluente dentro del tanque (MPa)

ρ_e : densidad del efluente: 999,33 (kg/m³)

g : aceleración por gravedad: 9,81 (m/s²)

h_l : altura del líquido: 1,25 (m)

$$P_e = 999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot 1,25 [\text{m}]$$

$$P_e = 12\,254,28 [\text{Pa}] = 1,78 [\text{psi}]$$

Con la Ecuación 3.50 se determinó la presión de diseño para una tubería sin aislamiento (Mott, 2006, p. 162).

$$P_{\text{diseño}} = P_{\text{op}} \cdot 1,1$$

Donde:

$P_{\text{diseño}}$: Presión de diseño (psi)

P_{op} : Presión de operación (psi)

$$P_{\text{diseño}} = (0,72 [\text{atm}] \cdot \frac{14,70 [\text{psi}]}{1 [\text{atm}] + 1,78) [\text{psi}] \cdot 1,1$$

$$P_{\text{diseño}} = 13,60 [\text{psi}] = 93\,768,70 [\text{Pa}]$$

- **Determinación de la temperatura de operación y temperatura de diseño**

Se estima que la temperatura de operación del efluente dentro de la tubería será igual a la temperatura del ambiente de 13,9 °C de la zona, temperatura promedio

en Quito. Por lo tanto, la temperatura de diseño se determinó con la Ecuación 3.49, para una tubería sin aislamiento.

Donde:

$T_{\text{diseño}}$: temperatura de diseño ($^{\circ}\text{C}$)

T_{op} : temperatura de operación ($^{\circ}\text{C}$)

$$T_{\text{diseño}} = 13,90[^{\circ}\text{C}] + 10,00[^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{\text{diseño}} = 23,90[^{\circ}\text{C}]$$

b) Dimensionamiento de tubería después de la bomba (descarga)

En la Figura 4.3 se presenta un esquema del sistema de tuberías en todo el sistema de vermifiltración. Como se observa en la Figura 4.3 el agua residual deberá ser distribuida a través de 18 aspersores alrededor de todo el vermifiltro, por lo que ambas bombas deberán tener la capacidad de impulsar el agua hasta los puntos más lejanos en el sistema, que son los puntos 9 y 18.

Se conoce además que a medida que el agua fluya por los aspersores el caudal irá disminuyendo progresivamente hasta llegar a los puntos finales del sistema, por lo que se debe asegurar que el caudal que requiere el aspersor final sea el óptimo para el funcionamiento del aspersor.

El caudal total que ingresa por una bomba será de $155 \text{ m}^3/\text{d}$ ($0,0018 \text{ m}^3/\text{s}$), se asumió, además, que el factor de Darcy para todo el sistema de tuberías será de 0,025 siendo este factor de fricción el utilizado entre tramos pequeños de tubería (De Juan Valero, Pereira, Pirconell y Tarjuelo, 2010, p. 258)

Para conocer los caudales que tienen cada tramo de tubería se dividió el caudal total en 18 partes, de esta manera se conocerá el caudal que deberá llegar a los puntos más lejanos del sistema (punto 9 y punto 18) como se observa en la Figura 4.3, debido a que son los puntos críticos. Con la Ecuación 4.15 se determinó el caudal crítico.

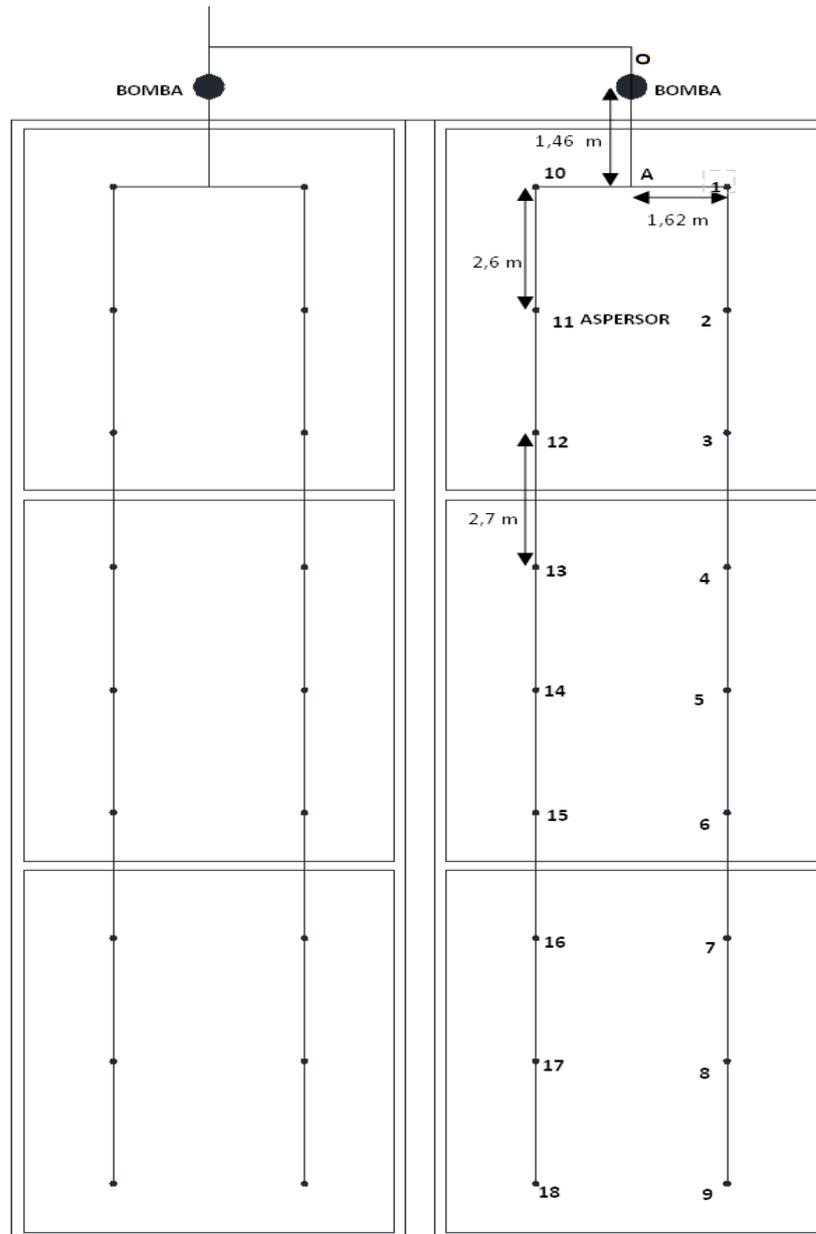


Figura 4.3. Esquema tubería sistema C

$$Q_{\text{crítico}} = \frac{Q}{18}$$

[4.15]

Donde:

Q : caudal del fluido (m^3/s)

$Q_{\text{crítico}}$: caudal crítico del fluido (m^3/s)

$$Q_{\text{crítico}} = \frac{155 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{24[\text{h}]} \cdot \frac{1[\text{h}]}{3\,600[\text{s}]}}{18}$$

$$Q_{\text{crítico}} = 9,97\text{E}^{-5} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

Una vez conocido el caudal crítico se determinó los caudales en los tramos anteriores como se observa en la Figura 4.3. Se presenta un ejemplo de cálculo para determinar el caudal que tendrá el tramo de tubería A-1 por medio de la Ecuación 4.16.

Como el tramo A-1 se encuentra entre la bifurcación y el primer aspersor en la tubería su relación de caudal en cuanto al caudal crítico será de 9, ya que, a medida que el tramo está más cerca del inicio del recorrido, el caudal será mayor, mientras que cuando se va a alejando el flujo irá entregando efluente a los diferentes aspersores de la línea, hasta llegar al último con el caudal crítico (De Juan Valero, et al., 2010, p. 258).

$$Q_{\text{A-1}} = Q_{\text{crítico}} \cdot R_{\text{Qc}} \quad [4.16]$$

Donde:

$Q_{\text{A-1}}$: caudal del fluido en tramo A-1 (m^3/s)

$Q_{\text{crítico}}$: caudal crítico del fluido (m^3/s)

R_{Qc} : relación con caudal crítico

$$\therefore Q_{\text{A-1}} = 9,97\text{E}^{-5} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \cdot 9$$

$$Q_{\text{A-1}} = 8,97\text{E}^{-4} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

En la Tabla 4.17 se presentan los caudales por tramo de tubería y la relación que estos tiene en función del caudal crítico.

Tabla 4.17. Caudales a lo largo del sistema de tuberías de los aspersores

Tramos de tubería	Relación en función al caudal crítico	Caudal (m ³ /s)
O-A	18	1,794E-03
A-1	9	8,970E-04
1-2	8	7,973E-04
2-3	7	6,977E-04
3-4	6	5,980E-04
4-5	5	4,983E-04
5-6	4	3,987E-04
6-7	3	2,990E-04
7-8	2	1,993E-04
8-9	1	9,967E-05
A-10	9	8,970E-04
10-11	8	7,973E-04
11-12	7	6,977E-04
12-13	6	5,980E-04
13-14	5	4,983E-04
14-15	4	3,987E-04
15-16	3	2,990E-04
16-17	2	1,993E-04
17-18	1	9,967E-05

La relación entre el caudal crítico y el tramo O-A es de 18, es decir este valor será el caudal total del sistema, por la razón de que se inicia el proceso de distribución del efluente líquido en el sistema de vermifiltración.

- **Determinación de la velocidad en el interior de la tubería**

Para la determinación de las velocidades esperadas a lo largo de los tramos de la tubería se estableció que el diámetro entre el tramo O - A será de 1 ½ in (0,045 m) y entre los demás tramos de tuberías será de ¾ in (0,024 m). Este último valor se estableció con el propósito de que la conexión de la tubería con los aspersores

calce adecuadamente, puesto que, el diámetro máximo de entrada al aspersor es de $\frac{3}{4}$ de pulgada y estos venden de forma estandarizada y no se podrá comprar aspersores personalizados con el diámetro deseado (Senninger, 2021, p.1). Como se conoce el caudal de cada tramo y el diámetro respectivo de las tuberías, se determinó con la Ecuación 4.14 la velocidad en el interior del sistema. La Tabla 4.18 muestra los valores obtenidos de las velocidades en cada tramo de la tubería.

Tabla 4.18. Velocidades a lo largo del sistema de tuberías de los aspersores

Tramos de tubería	Diámetro (m)	Velocidad (m/s)
O-A	0,045	1,13
A-1	0,024	1,98
1-2	0,024	1,76
2-3	0,024	1,54
3-4	0,024	1,32
4-5	0,024	1,10
5-6	0,024	0,88
6-7	0,024	0,66
7-8	0,024	0,44
8-9	0,024	0,22
A-10	0,024	1,98
10-11	0,024	1,76
11-12	0,024	1,54
12-13	0,024	1,32
13-14	0,024	1,10
14-15	0,024	0,88
15-16	0,024	0,66
16-17	0,024	0,44
17-18	0,024	0,22

- **Determinación de la cabeza de pérdidas por accesorios**

Para la determinación de las pérdidas por accesorios dentro de la tubería de descarga hacia los aspersores se consideró un sistema total, por lo tanto, se

establecieron los accesorios que se presentan a lo largo de todas las tuberías en la Tabla 4.16.

De la Tabla 3.20 se seleccionó los valores de coeficientes de cada uno de los accesorios presentes y con la Ecuación 3.43 se determinó la cabeza de pérdidas por accesorios en la línea de descarga por tramo, la sumatoria de todas las pérdidas serán el resultado de la cabeza de pérdidas por accesorio de todo el sistema. En la Tabla 4.19 se presentan los valores obtenidos de cabeza de pérdidas por accesorios en cada uno de los tramos del sistema de aspersores.

Tabla 4.19. Cabeza de pérdidas por accesorios a lo largo del sistema de tuberías de los aspersores

Tramos de tubería	Cabeza pérdidas por accesorios (m)
O-A	0,15
A-1	0,46
1-2	0,36
2-3	0,28
3-4	0,20
4-5	0,14
5-6	0,09
6-7	0,05
7-8	0,02
8-9	0,01
A-10	0,46
10-11	0,36
11-12	0,28
12-13	0,20
13-14	0,14
14-15	0,09
15-16	0,05
16-17	0,02
17-18	0,01
TOTAL	3,39

- **Determinación de la cabeza de pérdidas por fricción**

Se estableció que el factor de Darcy para todos los tramos de tuberías que se presentan en la Figura 4.5, sea de 0,025, con dicho valor junto con las dimensiones respectivas de los diámetros de tuberías y las longitudes de estas se determinó los valores de cabeza de pérdidas por fricción en cada tramo del sistema de aspersores por medio de la Ecuación 3.44. En la Tabla 4.20 se presentan los valores de factor de Darcy, diámetro interno de cada tramo de tubería, la longitud de cada uno y los valores obtenidos de factores de fricción.

Tabla 4.20. Cabeza de pérdidas por fricción a lo largo del sistema de tuberías de los aspersores

Tramos de tubería	Factor Darcy	Diámetro (m)	Longitud de tuberías (m)	Cabeza pérdidas por fricción (m)
O-A	0,025	0,045	3,62	0,05
A-1	0,025	0,024	4,60	0,76
1-2	0,025	0,024	4,60	0,76
2-3	0,025	0,024	4,66	0,58
3-4	0,025	0,024	4,60	0,43
4-5	0,025	0,024	4,60	0,30
5-6	0,025	0,024	4,66	0,19
6-7	0,025	0,024	4,60	0,11
7-8	0,025	0,024	4,60	0,05
8-9	0,025	0,024	3,62	0,01
A-10	0,025	0,024	4,60	0,76
10-11	0,025	0,024	4,60	0,76
11-12	0,025	0,024	4,66	0,58
12-13	0,025	0,024	4,60	0,43
13-14	0,025	0,024	4,60	0,30
14-15	0,025	0,024	4,66	0,19
15-16	0,025	0,024	4,60	0,11
16-17	0,025	0,024	4,60	0,05
17-18	0,025	0,024	3,62	0,01
TOTAL			76,48	6,41

- **Determinación de la caída de presión**

Para la determinación de la caída de presión en el sistema de tuberías de los aspersores se calculó la caída de presión más crítica del sistema que sería entre el punto inicial (punto O) hasta el punto más lejano de la tubería (punto 9 o punto 18). Por lo tanto, se utilizó la Ecuación 3.47, la cabeza de pérdida por accesorios total resultó la sumatoria de todas las pérdidas obtenidas en cada tramo y presentadas en la Tabla 4.18 y a cabeza de pérdida por fricción total resultó de la sumatoria de las pérdidas determinadas previamente y presentadas en la Tabla 4.19. Se estableció que el punto 1 para la determinación de la caída de presión se encuentra ubicado en el inicio de la tubería que sale de la bomba, y el punto 2 estará al final de la tubería del aspersor 9 y existirá diferencia de altura, puesto que, los aspersores se encontrarán a 2 metros del suelo.

Donde:

P_1 : presión del fluido en el punto 1 (Pa)

ρ : densidad del fluido: 999,33 (kg/m³)

g : aceleración de gravedad: 9,81 (m/s²)

v_1 : velocidad del fluido en el punto 1: 1,13 (m/s)

z_1 : altura del punto 1 con respecto a un punto de referencia: 0,00 (m)

P_2 : presión del fluido en el punto 2 (Pa)

v_2 : velocidad del fluido en el punto 2: 0,22 (m/s)

z_2 : altura del punto 2 con respecto a un punto de referencia: 0,20 (m)

h_{acc} : pérdidas por accesorios: 1,70 (m)

h_f : pérdidas por fricción: 3,20 (m)

$$\Delta P = \left(1,70[m] + 3,20[m] + 2,00[m] + \frac{0,20^2 - 1,13^2}{2 \cdot 9,81} \right) \cdot 999,33 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$\Delta P = 67\,025,60 [Pa] = 9,72 [psi]$$

La caída de presión máxima que se tendrá a lo largo del sistema de tuberías de los aspersores es 16,67 psi; este valor es alto, pero se acepta debido al

comportamiento que tiene el fluido a lo largo de todo el sistema ya que irá perdiendo caudal para poder trabajar correctamente.

- **Determinación de la presión de operación y presión de diseño**

La presión de operación se consideró la atmosférica en Quito (0,72 atm), esto debido a que el líquido será desplazado hacia el ambiente para humedecer los vermifiltros por medio de los aspersores, además el sistema no requiere de aislamiento puesto que no presenta cambios de temperatura.

Con la Ecuación 3.48 se determinó la presión de diseño para una tubería sin aislamiento.

Donde:

$P_{\text{diseño}}$: Presión de diseño (psi)

P_{op} : Presión de operación (psi)

$$P_{\text{diseño}} = 0,72[\text{atm}] \cdot \frac{14,70[\text{psi}]}{1[\text{atm}]} \cdot 1,10$$

$$P_{\text{diseño}} = 11,64[\text{psi}] = 80\,254,98[\text{Pa}]$$

- **Determinación de la temperatura de operación y temperatura de diseño**

Se estima que la temperatura de operación de efluente dentro de la tubería será igual a la temperatura del ambiente de 13,9 °C de la zona, temperatura promedio en Quito. Por lo tanto, la temperatura de diseño se determinó con la Ecuación 3.49, para una tubería sin aislamiento.

Donde:

$T_{\text{diseño}}$: temperatura de diseño (°C)

T_{op} : temperatura de operación (°C)

$$T_{diseño} = 13,90[°C] + 10,00[°C]$$

$$T_{diseño} = 23,90[°C]$$

4.3.11.4. Dimensionamiento de tuberías en el sistema D (tanque de pasteurización – biodigestor anaerobio)

La determinación de las dimensiones de tuberías en los sistemas D se los realizó de la misma manera que en el sistema A (sistema de cribaje – tanque de igualación) y en la Tabla 4.21 se presentan los resultados.

Tabla 4.21. Resultados obtenidos del dimensionamiento de tuberías Sistema D

Parámetro	Succión	Descarga
Velocidad (m/s)	0,69	2,64
Diámetro nominal tubería (m)	0,25	0,13
Cabeza pérdidas por fricción (m)	0,00	0,70
Cabeza pérdidas por accesorios (m)	0,22	5,05
Caída de presión (Pa)	3 723,17	151 615,71
Presión de operación (Pa)	86 526,20	172 920,51
Presión de diseño (Pa)	95 147,65	190 226,35
Temperatura de operación (°C)	70,00	70,00
Temperatura de diseño (°C)	80,00	80,00

4.3.11.5. Dimensionamiento de tuberías en el sistema E (Tanque de pasteurización – biodigestor anaerobio)

La determinación de las dimensiones de tuberías en los sistemas D se los realizó de la misma manera que en el sistema A (Sistema de cribaje – tanque de igualación) y en la Tabla 4.22 se presentan los resultados.

Tabla 4.22. Resultados obtenidos del dimensionamiento de tuberías Sistema E

Parámetro	Succión	Descarga
Velocidad (m/s)	0,68	2,64
Diámetro nominal tubería (m)	0,25	0,20
Cabeza pérdidas por fricción (m)	0,00	0,01
Cabeza pérdidas por accesorios (m)	0,17	0,43
Caída de presión (Pa)	1 585,79	3 861,064
Presión de operación (Pa)	87 770,26	72 946,53
Presión de diseño (Pa)	96 595,55	80 254,98
Temperatura de operación (°C)	50,00	50,00
Temperatura de diseño (°C)	60,00	60,00

4.3.11.6. Dimensionamiento de tuberías en el sistema F (Biogás – tanque de pasteurización)

La tubería del sistema F tiene la funcionalidad de distribuir el biogás generado en el biodigestor hacia el tanque de pasteurización, el material seleccionado para esta tubería fue polietileno, siendo la mejor opción para tuberías que transportan gas debido a que no generará corrosión y resistirá adecuadamente a la presión a la cual será transportado el biogás (Towler y Sinnott, 2008, p. 257).

El proceso de dimensionamiento de dicha tubería fue igual al realizado para el sistema A, con la diferencia que la velocidad y caída de presión permisible difiere a los parámetros establecidos para los líquidos. En la Tabla 3.18 se presentan los valores permisibles para el biogás dentro de la tubería según recomendaciones bibliográficas (Towler y Sinnott, 2008, p. 257).

Se presenta en la Tabla 4.23 los resultados del diseño de la tubería para el transporte del biogás, se muestran tanto los valores obtenidos en la línea de succión como en la línea de descarga.

Tabla 4.23. Resultados obtenidos del dimensionamiento de tuberías Sistema F

Parámetro	Succión	Descarga
Velocidad (m/s)	21,275	14,868
Diámetro nominal tubería (m)	0,13	0,15
Cabeza pérdidas por fricción (m)	52,70	10,19
Cabeza pérdidas por accesorios (m)	143,03	107,03
Caída de presión (Pa)	1 516,85	1 585,80
Presión de operación (Pa)	72 974,11	72 974,11
Presión de diseño (Pa)	80 268,76	80 268,76
Temperatura de operación (°C)	50,00	50,00
Temperatura de diseño (°C)	60,00	60,00

4.3.12. DIMENSIONAMIENTO DE BOMBAS Y COMPRESORES

Para el transporte del fluido tanto el agua residual como el lodo fue necesario implementar bombas en las líneas de las tuberías y un compresor para movilizar el biogás obtenido, en la Tabla 4.4 se presentan las bombas requeridas para la PTAR de la EMRAQ-EP. Para el dimensionamiento de cada bomba y compresor se utilizó la información obtenida en la Sección 4.2.10.

4.3.12.1. Dimensionamiento de la bomba del sistema A (sistema de cribaje – tanque de igualación)

Para la determinación de la potencia de la bomba fue necesario determinar las presiones de descarga, succión y TDH.

- **Determinación de las pérdidas totales en la línea de tubería**

La determinación de la presión de descarga se la obtiene por medio de las pérdidas totales en toda la línea de la tubería por la que fluye el agua residual. Para ello se

trabajó con la Ecuación 4.17, desde el punto A al punto B que se indican en la Figura 4.4 (Mott, 2006, p. 420).



Figura 4.4. Esquema tubería sistema A

$$\Delta H = \frac{(P_B - P_A)}{\rho \cdot g} + \frac{v_B^2 - v_A^2}{2 \cdot g} + (Z_B - Z_A) + h_{accT} + h_{fT} \quad [4.17]$$

Donde:

- ΔH : pérdidas totales en la tubería (m)
- P_A : presión en la succión en el punto A (Pa)
- P_B : Presión en la descarga en el punto B (Pa)
- v_A : velocidad en la tubería de succión (m/s)
- v_B : velocidad en la tubería de descarga (m/s)
- Z_A : altura de entrada con respecto a la bomba (m)
- h_{accT} : cabeza de pérdidas totales por accesorios (m)
- h_{fT} : cabeza de pérdidas totales por fricción (m)

Se conoce que la presión de entrada y de salida en el sistema serán iguales a la presión atmosférica, las velocidades de las tuberías son los valores obtenidos de la sección 4.2.10.1, y son igual a 0,83 m/s y 1,31 m/s respectivamente para inicio y fin. La altura de descarga del efluente es igual a 3,87 m siendo esta la altura del tanque de igualación.

Las cabezas de pérdidas totales tanto para accesorios como para fricción corresponden a la sumatoria de las cabezas de pérdidas determinadas para el sistema A en la tubería de succión y la tubería de descarga.

$$\Delta H = \frac{(72\,974,140 - 72\,974,140)[\text{Pa}]}{999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]} + \frac{(1,31^2 - 0,83^2) \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}{2 \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]} + (3,7 - 0)[\text{m}]$$

$$+(0,19 + 1,19)[\text{m}] + (0,01 + 0,08)[\text{m}]$$

$$\Delta H = 5,37 [\text{m}]$$

- **Determinación de la presión de descarga**

La presión de descarga se la determinó con la Ecuación 3.56 y la presión de operación en la línea de succión del sistema A. Se trabajó con la densidad del efluente líquido de 999,33 kg/m³ al ser este valor del agua a condiciones de Quito.

$$P_d = P_o + \Delta H$$

Donde:

P_d : presión de descarga (psi)

P_o : presión de operación: 10,58 (psi)

ΔH : pérdidas totales de la tubería (psi)

$$P_d = 10,58[\text{psi}] + \left(5,37[\text{m}] \cdot 999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \right) [\text{Pa}] \cdot \frac{1[\text{psi}]}{6\,894,76[\text{Pa}]}$$

$$P_d = 18,22 [\text{psi}] = 125\,622,48[\text{Pa}]$$

- **Determinación de la altura dinámica total (TDH)**

El cálculo del TDH se lo realizó con la Ecuación 3.57, valor necesario para obtener la potencia de la bomba.

Donde:

TDH : altura dinámica total (psi)

P_d : presión de descarga: 18,22 (psi)

P_s : Presión de succión: 10,58 (psi)

$$TDH=18,22 \text{ [psi]}-10,58 \text{ [psi]}$$

$$TDH=7,64 \text{ [psi]}=52 \ 648,95 \text{ [Pa]}$$

- **Determinación de la potencia necesaria**

La determinación de la potencia de la bomba se lo realizó con la Ecuación 3.58, se estableció la eficiencia de la bomba es del 85 %, siendo este el valor que normalmente se utiliza para bombas centrífugas (Mott, 2006, p.383).

Donde:

P_{bomba} : potencia de la bomba (W)

Q : caudal del fluido (m^3/s)

n : eficiencia de la bomba: 0,85

TDH : altura dinámica total: 52 648,95 (Pa)

$$\text{Potencia} = \frac{310 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{8[\text{h}]} \cdot \frac{1[\text{h}]}{3600[\text{s}]} \cdot 52 \ 648,95[\text{Pa}]}{0,85}$$

$$\text{Potencia}=666,72[\text{W}]=0,89 \text{ [HP]}$$

Como el valor de potencia obtenida es menor a 1,5 kW según la Tabla 3.25 se utilizó un factor de 1,5 para la obtención de la potencia nominal de la bomba.

$$\text{Potencia nominal}=666,72[\text{W}] \times 1,5$$

$$\text{Potencia nominal}=1 \ 000,07 \text{ [W]}=1,34[\text{HP}]$$

4.3.12.2. Dimensionamiento de la bomba del sistema C (tanque de igualación – trampa de grasas)

Para la determinación de la potencia de la bomba fue necesario determinar las presiones de descarga, succión y TDH.

- **Determinación de las pérdidas totales en la línea de tubería**

La determinación de la presión de descarga se la obtiene por medio de las pérdidas totales en todo el sistema de tuberías de aspersores. Para ello se trabajó con la Ecuación 4.17 desde los puntos O al punto 18 como se observa en Figura 4.3. Los datos mencionados a continuación se los obtuvo de la sección 4.2.10.3.

Donde:

- ΔH : pérdidas totales en la tubería (m)
- P_A : presión en la succión en el punto A: 93 768,70 (Pa)
- P_B : Presión en la descarga en el punto B: 72 974,14 (Pa)
- v_A : velocidad en la tubería de succión: 0,00 (m/s)
- v_B : velocidad en la tubería de descarga: 0,22 (m/s)
- z_A : altura de entrada con respecto a la bomba: 0,00 (m)
- z_B : altura de salida con respecto a la bomba: 2,00+1,86 (m)
- h_{accT} : cabeza de pérdidas totales por accesorios: 0,30+3,39 (m)
- h_{fT} : cabeza de pérdidas totales por fricción: 0,07+6,41 (m)

$$\Delta H = \frac{(72\,974,14 - 93\,768,70)[\text{Pa}]}{999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]} + \frac{(0,22^2 - 0,00^2) \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}{2 \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]} + (2,00 + 1,86)[\text{m}]$$

$$+ (0,30 + 3,39)[\text{m}] + (0,07 + 6,41)[\text{m}]$$

$$\Delta H = 11,91 \text{ [m]}$$

Las pérdidas totales en la tubería resultaron de 11,91 m, esto indica la altura que deberá alcanzar la bomba seleccionada para trasladar el fluido por ese sistema.

- **Determinación de la presión de descarga**

La presión de descarga se la determinó con la Ecuación 3.56 y la presión de operación en la línea de succión del sistema C. Se trabajó con la densidad del efluente líquido de 999,33 kg/m³ ya que se consideró que el efluente tiene las mismas condiciones del agua pura a 13,9 °C para fines prácticos.

Donde:

P_d : presión de descarga (psi)

P_o : presión de operación: 10,58 (psi)

ΔH : pérdidas totales de la tubería (psi)

$$P_d = 10,58[\text{psi}] + \left(11,91[\text{m}] \cdot 999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \right) [\text{Pa}] \cdot \frac{1[\text{psi}]}{6\,894,76[\text{Pa}]}$$

$$P_d = 27,51 [\text{psi}] = 189\,674,77[\text{Pa}]$$

- **Determinación de la altura dinámica total (TDH)**

El cálculo del TDH se lo realizó con la Ecuación 3.57, valor necesario para obtener la potencia de la bomba.

Donde:

TDH : altura dinámica total (psi)

P_d : presión de descarga: 27,51 (psi)

P_s : Presión de succión: 13,60 (psi)

$$\text{TDH} = 27,51[\text{psi}] - 13,60[\text{psi}]$$

$$\text{TDH} = 13,91 [\text{psi}] = 95\,906,07[\text{Pa}]$$

- **Determinación de la potencia necesaria**

La determinación de la potencia de la bomba se lo realizó con la Ecuación 3.57, se estableció la eficiencia de la bomba es del 85 %, siendo este el valor que normalmente se utiliza para bombas centrífugas (Mott, 2006, p.383).

Donde:

P_{bomba} : potencia de la bomba (W)

Q : caudal del fluido (m^3/s)

n : eficiencia de la bomba: 0,85

TDH : altura dinámica total: 95 906,07[Pa]

$$\text{Potencia} = \frac{310 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{24[\text{h}]} \cdot \frac{1[\text{h}]}{3600[\text{s}]} \cdot 52\,648,95[\text{Pa}]}{0,85}$$

$$\text{Potencia} = 404,83[\text{W}] = 0,54[\text{HP}]$$

Como el valor de potencia obtenida es menor a 1,5 kW según la Tabla 3.22 se utiliza un factor de 1,5 para la obtención de la potencia nominal de la bomba.

$$\text{Potencia nominal} = 404,83[\text{W}] \times 1,5$$

$$\text{Potencia nominal} = 607,74 [\text{W}] = 0,81[\text{HP}]$$

4.3.12.3. Dimensionamiento de la bomba del sistema D (Tanque de pasteurización – biodigestor anaerobio)

Para la determinación de la potencia de la bomba fue necesario determinar las presiones de descarga, succión y TDH, se trabajó en el sistema presentado en la Figura 4.7 y se calcularon los parámetros con la misma metodología que para el sistema A.

En la Tabla 4.24 se prestan los resultados para el sistema D para impulsar el lodo de densidad de $916,28 \text{ kg/m}^3$ del tanque de pasteurización al biodigestor anaerobio.

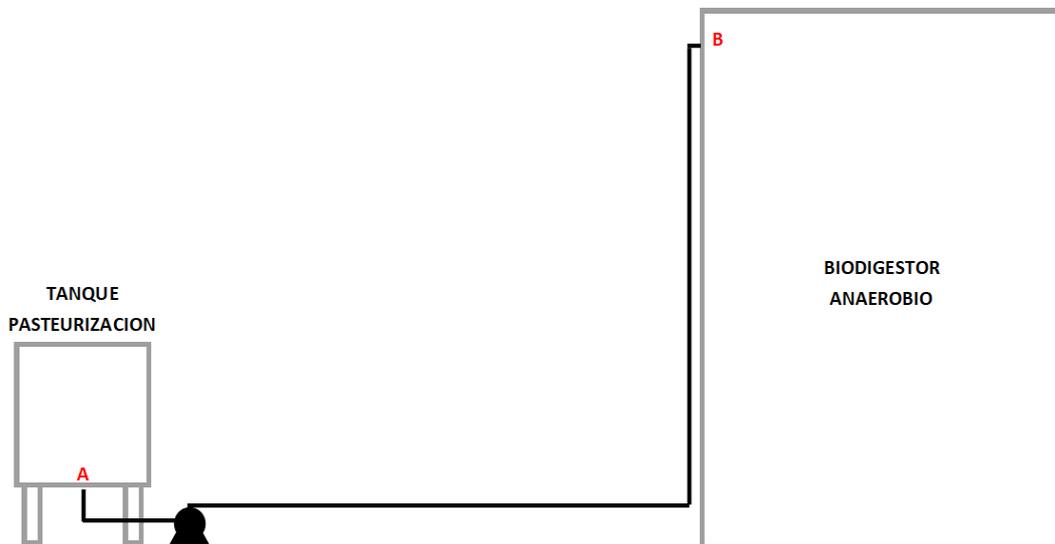


Figura 4.5. Esquema tubería sistema D

Tabla 4.24. Resultados obtenidos para determinación de potencia de bomba Sistema D

Parámetro	Valor
Presión en la succión en el punto A (Pa)	86 536,13
Presión en la descarga en el punto B (Pa)	72 946,56
Velocidad en la tubería de succión (m/s)	0,00
Velocidad en la tubería de descarga (m/s)	2,64
Altura de entrada con respecto a la bomba (m)	0,50
Altura de salida con respecto a la bomba (m)	11,13
Cabeza de pérdidas totales por accesorios (m)	5,27
Cabeza de pérdidas totales por fricción (m)	0,70
Pérdidas totales tuberías (Pa)	152 305,19
Presión de descargar (Pa)	328 742,03
Presión de succión (Pa)	86 598,15
Altura dinámica total (Pa)	221 528,55
Potencia bomba (kW)	10,52
Potencia nominal bomba (kW)	15,88

4.3.12.4. Dimensionamiento de la bomba del sistema (extracción de lodo de biodigestor anaerobio)

Para la determinación de la potencia de la bomba fue necesario determinar las presiones de descarga, succión y TDH, se trabajó en el sistema presentado en la Figura 4.8 y se calcularon los parámetros con la misma metodología que para el sistema A. En la Tabla 4.25 se prestan los resultados del sistema E para impulsar el lodo del tanque de pasteurización al biodigestor anaerobio.

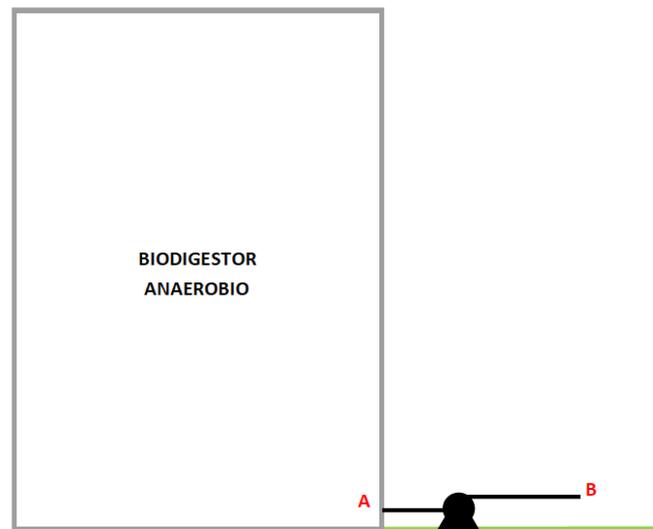


Figura 4.6. Esquema tubería sistema E

Tabla 4.25. Resultados obtenidos para determinación de potencia de bomba Sistema E

Parámetro	Valor
Presión en la succión en el punto A (Pa)	87 794,337
Presión en la descarga en el punto B (Pa)	87 794,337
Velocidad en la tubería de succión (m/s)	0,00
Velocidad en la tubería de descarga (m/s)	1,07
Altura de entrada con respecto a la bomba (m)	0,00
Altura de salida con respecto a la bomba (m)	0,00
Cabeza de pérdidas totales por accesorios (m)	0,60
Cabeza de pérdidas totales por fricción (m)	0,01
Pérdidas totales tuberías (psi)	62 052,82
Presión de descargar (psi)	88 390,79
Presión de succión (psi)	87 770,26

Tabla 4.25. Resultados obtenidos para determinación de potencia de bomba Sistema E (continuación...)

Altura dinámica total (psi)	62 052,82
Potencia bomba (W)	26,85
Potencia nominal bomba (W)	37,28

4.3.12.5. Dimensionamiento del compresor del sistema F (Biogás – tanque de pasteurización)

Para la determinación de la potencia del compresor fue necesario determinar las presiones de descarga, succión y TDH, se trabajó en el sistema presentado en la Figura 4.7 y se calcularon los parámetros por medio de una metodología similar que, para los sistemas con bombas, a diferencia que se utilizaron la Ecuación 3.60 para la determinación del trabajo por compresión y con la Ecuación 3.61 para determinación de la potencia requerida. En la Tabla 4.26 se prestan los resultados para el sistema E para impulsar el lodo del tanque de pasteurización al biodigestor anaerobio.

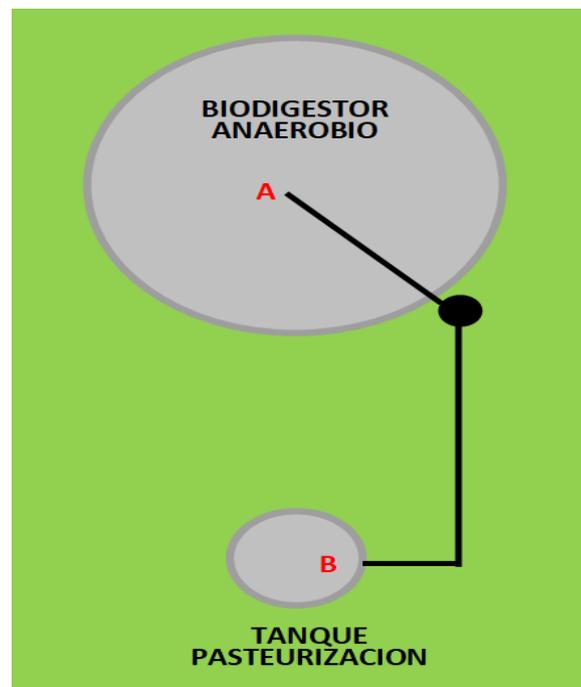


Figura 4.7. Esquema tubería sistema E (vista superior)

Tabla 4.26. Resultados obtenidos para determinación de potencia de bomba Sistema F

Parámetro	Valor
Presión en la succión en el punto A (Pa)	72946,56
Presión en la descarga en el punto B (Pa)	72946,56
Velocidad en la tubería de succión (m/s)	0,00
Velocidad en la tubería de descarga (m/s)	21,28
Altura de entrada con respecto a la bomba (m)	11,13
Altura de salida con respecto a la bomba (m)	0,00
Cabeza de pérdidas totales por accesorios (m)	62,89
Cabeza de pérdidas totales por fricción (m)	250,06
Pérdidas totales tuberías (Pa)	2 068,43
Presión de descargar (Pa)	75 014,96
Presión de succión (Pa)	72 9246,53
Altura dinámica total (Pa)	221 528,55
Potencia bomba (W)	28 433,54
Potencia nominal bomba (W)	42 654,03

Hay que tener en cuenta que la distancia que tendrá que recorrer el biogás hasta llegar al tanque de pasteurización es larga, esto se debe a la altura que tiene el biodigestor y a la distancia que se encuentra el tanque de pasteurización con respecto al biodigestor.

Por estos motivos mencionados se observa que la potencia requerida del compresor es alta, lo que se puede hacer es trabajar con un sistema de bombeo de gas en serie o tener un tanque de almacenamiento del biogás para que exista amortiguación del esfuerzo que debe realizar el compresor.

4.3.13. HOJAS DE ESPECIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DISEÑADOS

El dimensionamiento de los equipos principales y auxiliares se determinaron en las secciones anteriores, tanto para las dos plantas de agua residual como para la

planta de tratamiento de lodos, diseñados con la capacidad para tratar $620 \text{ m}^3/\text{d}$ de agua residual y $21,08 \text{ m}^3/\text{d}$ de lodos.

La mayoría de los equipos requeridos en la PTAR son tanques de grandes dimensiones, los cuales serán construidos *in situ* y para ello se cotizó su construcción junto a la adaptación del terreno. Los equipos auxiliares como banda transportadora, transportador helicoidal, bombas y tuberías, por medio de los cálculos realizados se procedió con la búsqueda en el mercado a través de catálogos para de esta manera obtener equipos cercanos a lo requerido y los catálogos utilizados se presentan en el Anexo III. En la Tabla 4.27 a la Tabla 4.42 se presentan los resultados obtenidos del diseño y selección de equipos necesarios para el funcionamiento de la PTAR.

El desarrollo de los cálculos de dimensionamiento se presenta en el Anexo II con base en los criterios de diseño escogidos para cada uno de los equipos principales.

Tabla 4.27. Hoja de especificación del sistema de cribaje

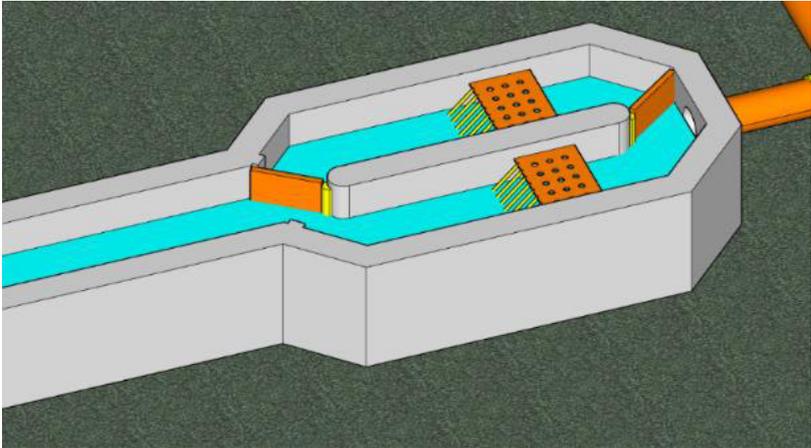
HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°1	
Nombre del equipo: Sistema de cribaje	
Fabricante: CORFIM S.A	Material de construcción: Hormigón armado, varillas de hierro
	Etiqueta de la planta: C-001
Dimensiones del equipo: Separación de barras = 0,025 (m) Espesor de barras = 0,01 (m) Ancho canal = 0,30 (m) Ancho de la criba = 0,67 (m) Largo de la criba = 3,00 (m) Número de barras = 19,00	Parámetros de diseño: Velocidad de acercamiento = 0,6 (m/s) Inclinación de la base = 45 (°) Factor de seguridad = 4
Principios de funcionamiento: El sistema de cribaje es considerado un pretratamiento en las PTAR, tienen la función de retener los residuos sólidos gruesos que se encuentran dispersos en el efluente líquido. Para que una criba pueda retener los sólidos, esta cuenta con una serie de varillas de hierro en posición inclinada con una separación especificada, de acuerdo con el tamaño de los sólidos que se quieren retener. El sistema de cribaje seleccionado para la PTAR del efluente descargado por la EMRAQ-EP cuenta con un sistema doble de criba, para de esta manera se pueda realizar el mantenimiento de estas sin el inconveniente de para la planta.	
Esquema del equipo: 	

Tabla 4.28. Hoja de especificación de tanque de igualación

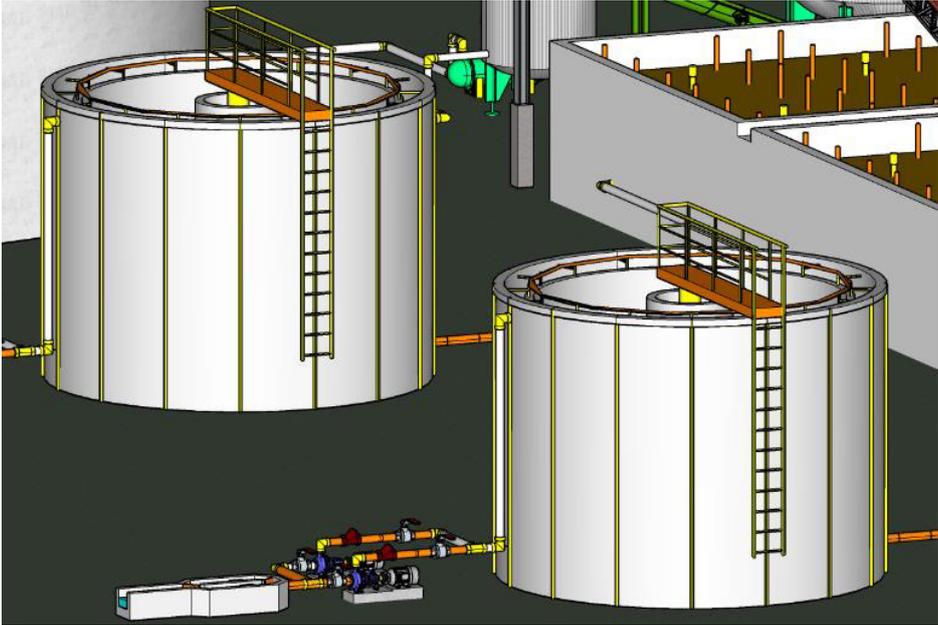
HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°2	
Nombre del equipo: Tanque de igualación	
Fabricante: FAMIT Fabricación y Montajes Industriales Tecnológicos	Material de construcción: Acero tipo AISI 316
	Etiqueta de la planta: TK-001
Dimensiones del equipo: Altura del tanque = 3,87 (m) Diámetro del tanque = 4,52 (m) Espesor del tanque = 12 (mm) Ancho de las paletas = 3,22 (m) Distancia base del tanque y paleta = 2,26 (m) Ancho de las paletas = 0,31 (m) Ancho del deflector = 0,45 (m)	Parámetros de diseño: Tanque a presión atmosférico Volumen del tanque = 62,00 (m ³) Área superficial del tanque = 13,35 (m ²) Potencia del agitador = 0,85 (kW) Velocidad de rotación = 0,4 (rev/min) Tiempo de retención hidráulico = 2 (h) Presión de operación: 15,23 (psi) Temperatura de operación: 13,90 (°C) Presión de diseño: 23,90 (psi) Temperatura de diseño: 41,68 (°C)
Principios de funcionamiento: El tanque de igualación permite la regulación de los caudales según las especificaciones deseada por el constructor, de esta manera se puede controlar el caudal que continuará después de haber atravesado la igualación. Además, ayuda a mantener el agua homogeneizada por medio de un sistema de agitación mecánica previa a la continuación del proceso y se logra que los procesos posteriores trabajen eficientemente. En la PTAR propuesta se van a utilizar dos tanques de igualación con el fin de recibir todo el caudal que viene de la EMRAQ-EP que lo descarga durante 8 horas, de esta manera se va a distribuir el agua al resto de la planta de forma continua las 24 horas del día.	
Esquema del equipo: 	

Tabla 4.29. Hoja de especificación de trampa de grasas

HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°3	
Nombre del equipo: Trampa de grasas	
Fabricante: CORFIM S.A	Material de construcción: Hormigón armado Tapa de acero inoxidable
	Etiqueta de la planta: TG-001
Dimensiones del equipo: Ancho de la trampa = 1,00 (m) Largo de la trampa = 2,00 (m) Altura de la trampa = 1,55 (m) Espesor: 0,30 (m)	Parámetros de diseño: Tiempo de retención = 0,25 (h) Área superficial = 2,00 (m ²) Volumen de la trampa = 3,10 (m ³) Remoción de grasas y aceites = 85,91 (%)
<p>Principios de funcionamiento:</p> <p>Las trampas de grasas funcionan por medio del principio de separación de líquidos por densidades, son tanques rectangulares que se encargan de retardar el flujo de agua residual que lo atraviesa para de esta manera lograr que el aceite y la grasa presente se separen. Normalmente la grasa se sitúa en la parte superior del agua y esta es removida de manera manual y los sólidos pesados decantan en el fondo del tanque. El efluente de la EMRAQ-EP presenta grasa en su composición que se encuentra fuera de norma, por tal motivo el sistema de tratamiento del agua residual contará con dos trampas de grasas de iguales dimensiones.</p>	
<p>Esquema del equipo:</p> 	

Tabla 4.30. Hoja de especificación de vermifiltro

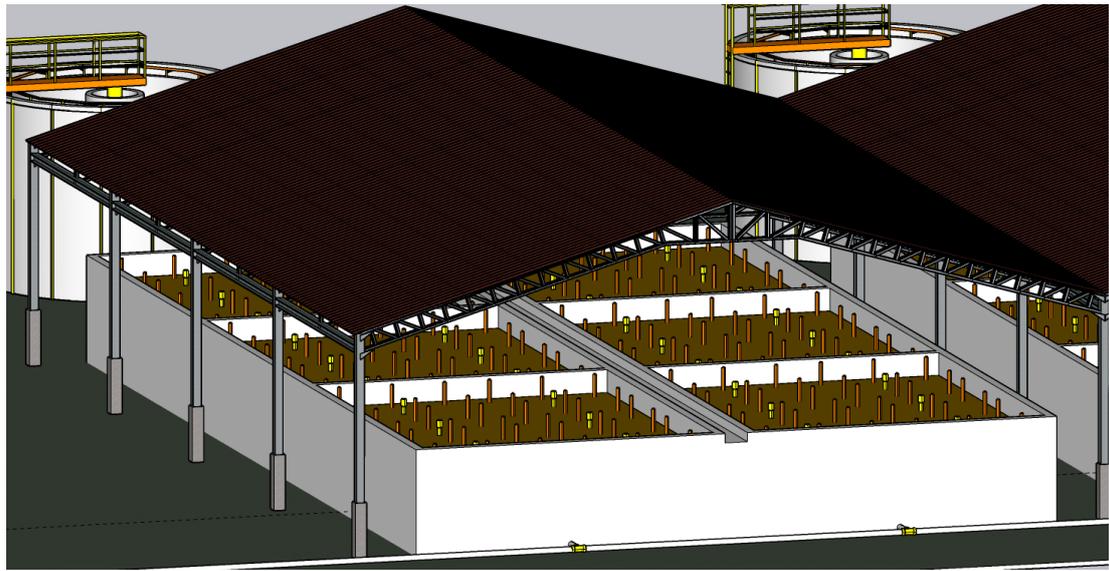
HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°5	
Nombre del equipo: Vermifiltro	
Fabricante: CORFIM S.A	Material de construcción: Hormigón Armado Etiqueta de la planta: V-001
Dimensiones del equipo: Altura vermifiltro = 2,20(m) Longitud módulo vermifiltro = 8,00 (m) Ancho módulo vermifiltro = 6,50 (m) Cantidad de módulos = 12 Profundidad lecho del sustrato = 1,00 (m) Profundidad arena = 0,27 (m) Profundidad grava = 0,13 (m) Profundidad piedra bolones = 0,27 (m)	Parámetros de diseño: Tiempo de retención hidráulico = 24 (h) Área superficial módulo = 51,67 (m ²) Volumen módulo vermifiltro = 112,84 (m ³) Carga hidráulica = 1,00 (m ³ /m ² d)
Principios de funcionamiento: <p>El vermifiltro funciona como un filtro percolador, donde el agua es bombeada desde la parte inferior de la estructura y rociada sobre la primera capa donde se encuentran lombrices, estas se encargan de la reducción de la carga orgánica presente en el agua, posterior a ello, el agua es percolada por otras capas de material inerte que permiten mejorar la eficiencia de remoción de compuestos orgánicos del medio. En la planta de tratamiento propuesto, el agua residual dirigida por medio de bombeo hacia el sistema de tuberías de los módulos del vermifiltro que ingresan por la parte inferior de los módulos hacia el inicio de los aspersores que se encuentran a 2,00 m de altura desde la base. El agua es roseada constantemente sobre al sustrato y las lombrices, el agua residual es percolada y filtrada hacia los canales de salida en la parte inferior del vermifiltro y dirigida hacia el sistema de alcantarillado.</p>	
Esquema del equipo: 	

Tabla 4.31. Hoja de especificación del tanque de recolección

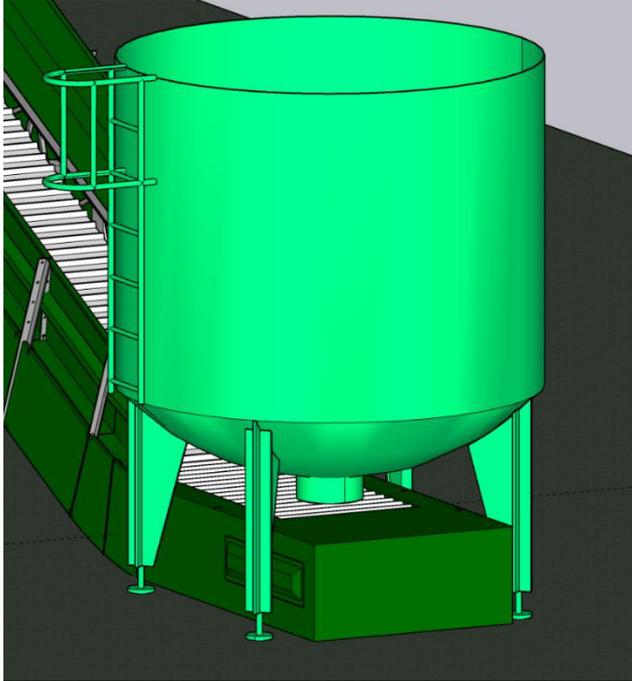
HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°6	
Nombre del equipo: Tanque de recolección	
Fabricante: FAMIT Fabricación y Montajes Industriales Tecnológicos	Material de construcción: Acero tipo AISI 316
	Etiqueta de la planta: TK-001
Dimensiones del equipo: Diámetro del tanque = 3,00 (m) Altura del tanque = 3,060(m) Altura de bases del tanque = 0,50 (m) Espesor del tanque = 12 (mm)	Parámetros de diseño: Tanque a presión atmosférico Volumen tanque = 26,35 (m ³) Tiempo de retención = 24 (h) Presión de operación = 13,12 (psi) Temperatura de operación = 13,90 (°C) Presión de diseño = 13,05 (psi) Temperatura de diseño: 23,90 (°C) Presión de diseño = 38,05 (psi)
Principios de funcionamiento: El tanque de recolección como su nombre lo indica estará encargado de la recolección de todos los sólidos que genera la planta de faenamiento durante un día completo de operación y para de esta manera comenzar con el inicio del proceso de tratamiento de los sólidos. El tanque de recolección será llenado de forma manual durante todo el día, a medida que vayan saliendo los residuos sólidos, este presentará un orificio en la parte inferior para que pueda dirigir los residuos hacia la banda transportadora y posteriormente esta envíe los residuos hacia el inicio de la trituradora de residuos cárnicos.	
Esquema del equipo:	
	

Tabla 4.32. Hoja de especificación del tanque de trituración

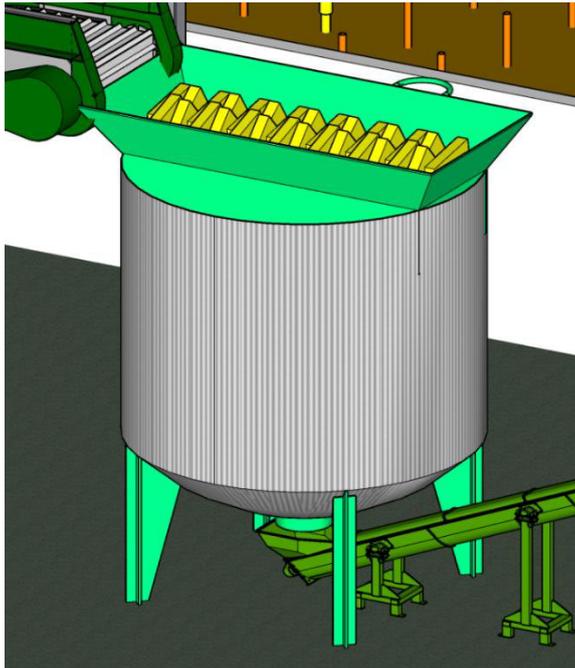
HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°7	
Nombre del equipo: Tanques de trituración	
Fabricante: FAMIT Fabricación y Montajes Industriales Tecnológicos Haarslev Processing Technology	Material de construcción: Acero tipo AISI 316 Etiqueta de la planta: TK-002
Dimensiones del equipo: Diámetro del tanque = 3,00 (m) Altura del tanque = 3,06 (m) Altura de bases del tanque = 0,50 (m) Espesor del tanque = 12 (mm)	Parámetros de diseño: Tanque a presión atmosférico Volumen tanque = 26,35 (m ³) Tiempo de retención = 24 (h) Presión de operación = 13,12 (psi) Temperatura de operación = 13,90 (°C) Presión de diseño = 13,05 (psi) Temperatura de diseño: 41,68 (°C) Presión de diseño = 38,05 (psi) Potencia trituradora = 37 (kW) Capacidad trituradora = 6 t/h
Principios de funcionamiento: El tanque de trituración tiene las mismas dimensiones que el tanque de recolección con la diferencia de que este posee una trituradora para residuos cárnicos en su parte superior, los sólidos recolectados durante un día son transportados por medio de una banda transportadora hacia la parte superior de la trituradora y de esta manera se homogeniza todos los residuos sólidos. La trituradora seleccionada es de marca Haarslev con doble eje de velocidad baja, los residuos triturados saldrán por la parte inferior del tanque y serán dirigido al tanque de pasteurización por medio de un tornillo sinfín.	
Esquema del equipo: 	

Tabla 4.33. Hoja de especificación de tanque de pasteurización

HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°8	
Nombre del equipo: Tanques de pasteurización	
Fabricante: FAMIT Fabricación y Montajes Industriales Tecnológicos	Material de construcción: Acero tipo AISI 316
	Etiqueta de la planta: TK-004
Dimensiones del equipo: Diámetro interno del tanque = 1,51 (m) Altura del tanque = 1,51 (m) Altura de bases del tanque = 0,50 (m) Espesor del tanque = 12,00 (mm) Espesor de la tapa = 5,00 (mm) Largo paletas de agitación = 0,51 (m) Distancia base del tanque y paleta = 0,76 (m) Ancho de las paletas = 0,10 (m) Ancho del deflector = 0,15 (m)	Parámetros de diseño: Tanque a presión atmosférico Volumen tanque = 2,71 (m ³) Tiempo de retención = 1 (h) Presión de operación = 12,19 (psi) Temperatura de operación = 70,00 (°C) Presión de diseño = 37,19 (psi) Temperatura de diseño = 80,00 (°C) Potencia = 3,34 (W)
Principios de funcionamiento: El tanque de pasteurización es un tanque enchaquetado por el cual ingresa agua caliente para mantener el lodo en su interior a 70,00 °C, la función es la de eliminar cualquier patógeno presente en los residuos provenientes del proceso de faenamiento. El tanque presenta un sistema de agitación mecánico en su interior, para mezclar los flujos de lodo y agua que ingresarán al tanque de manera continua. El lodo ingresará al tanque por la parte superior por medio de un tornillo sinfín y el agua por medio de tubería, la mezcla será descargada y dirigida por un sistema de tuberías hacia el biodigestor.	
Esquema del equipo: <div style="text-align: center;">  </div>	

Tabla 4.34. Hoja de especificación del biodigestor anaerobio

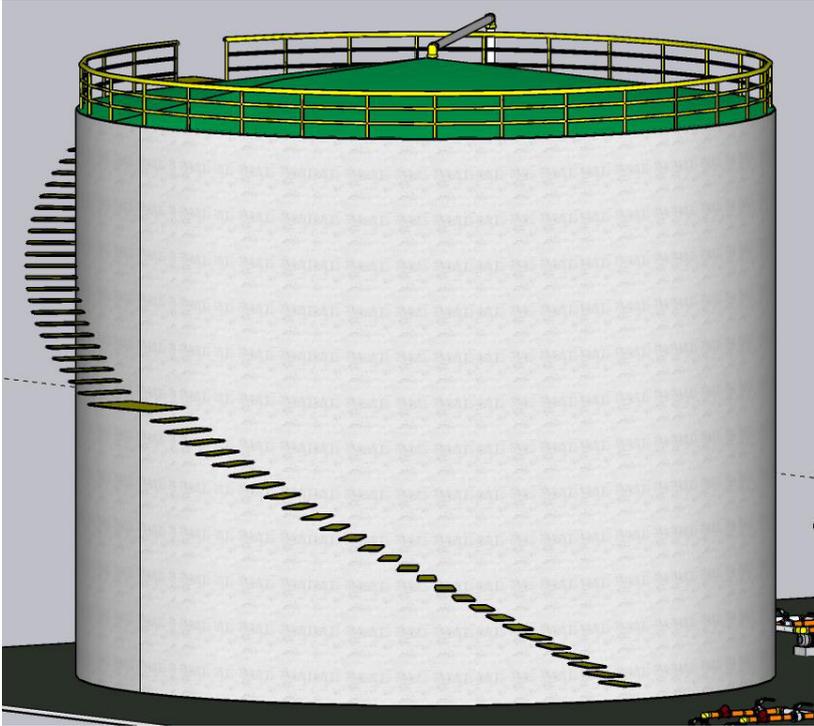
HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°9	
Nombre del equipo: Tanques de biodigestor anaerobio	
Fabricante: FAMIT Fabricación y Montajes Industriales Tecnológicos	Material de construcción: Hormigón armado Estructura de acero Tapa de acero inoxidable
	Etiqueta de la planta: TK-005
Dimensiones del equipo: Diámetro interno del tanque = 11,74 (m) Altura del tanque = 10,98 (m) Espesor del tanque = 20 (cm)	Parámetros de diseño: Volumen tanque = 1 083,11 (m ³) Tiempo de retención = 15 (d) Potencia = 1,49 (kW) x agitador
Principios de funcionamiento: El biodigestor anaerobio tiene como función la descomposición del lodo generado por la empresa de rastro en ausencia de oxígeno, con el fin, de obtener un lodo más estable. Al ser un proceso anaerobio forma como producto biogás con una composición aproximada de 60 % de metano y 40 % de dióxido de carbono, este producto es un combustible que se va a utilizar en la misma planta para los procesos de calentamiento del tanque de pasteurización.	
Esquema del equipo:	
	

Tabla 4.35. Hoja de especificación banda transportadora

HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°10	
Nombre del equipo: Banda transportadora	
Fabricante: Proindserv. Cia. Ltd.	Modelo: Estándar
	Etiqueta de la planta: BP-001
Dimensiones del equipo: Altura = 2,00 (m) Inclinación = 10 (°) Longitud de la banda = 11,52 (m) Ancho de la banda = 0,40 (cm)	Parámetros de diseño: Capacidad = 0,69 (t/h) Velocidad de la banda = 2,30 (m/s) Potencia = 6,36 (kW)
Principios de funcionamiento: La banda transportadora tiene la función de recibir el material que sale del tanque de recolección para llevarlo hacia el inicio del tanque de trituración. Las bandas transportadoras funcionan a través del movimiento de una banda sin fin que se encuentra enrollada alrededor de una serie de rodillo giratorios, y un sistema de tensión para que logre soportar las diferentes cargas aplicadas.	
Esquema del equipo: <div style="text-align: center;">  </div>	

Tabla 4.36. Hoja de especificación transportador helicoidal

HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°11	
Nombre del equipo: Transportador helicoidal	
Fabricante: Proindserv Cia. Ltda.	Modelo: SF1A
	Etiqueta de la planta: BP-002
Dimensiones del equipo: Diámetro = 0,16 (m) Inclinación = 20 (°) Longitud = 5,84 (m) Área del canalón = 0,005 (m ²) Paso del tornillo = 0,16 (m)	Parámetros de diseño: Capacidad = 1,85 (t/h) Coeficiente disminución = 0,60 Velocidad lineal = 0,19 (m/s) Velocidad de giro = 70 (rpm) Potencia = 0,09 (kW)
Principios de funcionamiento: Los transportadores helicoidales o también conocidos como tornillos sinfín son transportadores que tienen un tornillo central que rota de tal manera que va desplazando el material de un punto a otro del tornillo. En la PTAR el transportador tiene como función desplazar el lodo desde el taque de trituración hasta el tanque de pasteurización debido a que va a transportar un lodo parcialmente seco.	
Esquema del equipo: <div style="text-align: center;">  </div>	

Tabla 4.37. Hoja de especificación bomba centrífuga

HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°12	
Nombre del equipo: Bombas centrífugas	
Fabricante: INOXPA	Modelo: HCP 40-150 HCP 40-110 HCP 50-260
	Etiqueta de la planta: P-001 (HCP 40-150) P-002/P-003 (HCP 40-110) P-004 (HCP 50-260)
Dimensiones del equipo: HCP 40-150 Ancho = 290 (mm) Largo = 545 (mm) Alto = 395 (mm) HCP 40-110 Ancho = 230 (mm) Largo = 445 (mm) Alto = 340 (mm) HCP 50-260 Ancho = 465 (mm) Largo = 1 024 (mm) Alto = 642 (mm)	Parámetros de diseño: HCP 40-150 (4 und) Potencia = 1,1 (kW) HCP 40-110 (4 und) Potencia = 0,37 (kW) HCP 50-260 (2 und) Potencia = 15 (kW)
Principios de funcionamiento: Las bombas centrífugas se utilizan para el transporte de líquidos a través de un sistema de tuberías hacia los equipos en los sistemas A (4 und), sistema C (4 und) y en el sistema D (2 und). Las bombas centrífugas presentan un rotor interno que al girar en su eje permiten el desplazamiento continuo del fluido y pueden variar de velocidad de giro en caso de requerirlo. En la PTAR se utilizaron bombas centrífugas de diferentes potencias para el transporte continuo y tratamiento del agua residual.	
Esquema del equipo: 	

Tabla 4.38. Hoja de especificación bomba para manejo de lodos

HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°13	
Nombre del equipo: Bomba para manejo de lodos	
Fabricante: INOXPA	Modelo: NIZA 4.3 M
	Etiqueta de la planta: P-005
Dimensiones del equipo: Ancho = 300(mm) Largo = 550 (mm) Alto = 400 (mm)	Parámetros de diseño: Potencia = 0,37 (kW)
Principios de funcionamiento: En el biodigestor anaerobio se forman los lodos estables después de ser digeridos, este lodo saldrá de forma constante del reactor por medio de una tubería en la parte inferior del equipo. Por lo que se requerirá una bomba centrífuga capaz de succionar y transportar un efluente viscoso como es el lodo, el funcionamiento general de estas bombas es similar al de las bombas centrífugas.	
Esquema del equipo: <div style="text-align: center;">  </div>	

Tabla 4.39. Hoja de especificación Compresor

HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°14	
Nombre del equipo: Compresor	
Fabricante: Suministros Industriales del Tajo. S.A.	Modelo: VEGA 5010
	Etiqueta de la planta: KT-001
Dimensiones del equipo: Ancho = 1 500 (mm) Largo = 1 600 (mm) Alto = 950 (mm)	Parámetros de diseño: Potencia = 37 (kW) Caudal de aire requerido = 5 300 L/min Presión máxima = 10 bar
Principios de funcionamiento: El compresor tiene la función de trasladar un gas por medio de su aspiración y expulsión de este por medio del aumento de la presión del gas. En la PTAR se encargará del traslado del biogás hacia el intercambiador de calor del tanque de pasteurización.	
Esquema del equipo:	
	

Tabla 4.40. Hoja de especificación agitador por aspiración

HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°15	
Nombre del equipo: Agitador por aspiración	
Fabricante: Suministros Industriales del Tajo. S.A.	Modelo: EIMIX RDT TYPES MIXER
	Etiqueta de la planta: N/A
Dimensiones del equipo: Diámetro = 0,4 m	Parámetros de diseño: Potencia = 1,49 (kW)
<p>Principios de funcionamiento:</p> <p>El agitador por aspiración es un mecanismo para mezclar líquidos viscosos. El lodo presente en el biodigestor requiere ser mezclado de manera homogénea y continua para que pueda darse la digestión correctamente, por medio de 4 agitadores ubicados equidistantemente en el tanque se podrá lograr el fin deseado. Lo agitadores por aspiración, son tubos huecos, que succionan por la parte inferior el efluente presenta y lo descarga por la parte superior, de esta manera se logra que el efluente este en movimiento continuo.</p>	
<p>Esquema del equipo:</p> <div style="text-align: center;">  </div>	

Tabla 4.41. Hoja de especificación intercambiador de tubos concéntricos

HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°16	
Nombre del equipo: Intercambiador de tubos concéntricos	
Fabricante: HRS Heat Exchanger	Modelo: HRS K
	Etiqueta de la planta: IQ-001
Dimensiones: Área = 2,3 m ² Longitud = 3,00 m	Parámetros: Q max (servicio) = 16 m ³ /L Q max (producto) = 13 m ³ /L P máx (servicio) = 10 bar P máx (producto) = 10 bar
Principios de funcionamiento: En el sistema de pasteurización se requiere que el lodo alcance una temperatura de 70 °C, para ello se implemento un sistema de calentamiento por chaqueta donde ingresará agua caliente y así entregar calor. Para el calentamiento del agua se utilizará un intercambiador de tubos concéntricos que recibirá calor por parte de la combustión del biogás generado en el biodigestor, el agua fluirá por el interior de los tubos mientras que el vapor de la combustión se dirigirá por medio de la chaqueta.	
Esquema del equipo: <div style="text-align: center;">  </div>	

Tabla 4.42. Hoja de especificación intercambiador de calor de doble tubo

HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°17	
Nombre del equipo: intercambiador de calor de doble tubo	
Fabricante: HRS Heat Exchanger	Modelo: HRS K
	Etiqueta de la planta: IQ-002
Dimensiones: Área = 0,40 m ² Longitud = 3,00 m	Parámetros: Q max (servicio) = 13 m ³ /L Q max (producto) = 4 m ³ /L P máx (servicio) = 10 bar P máx (producto) = 10 bar
Principios de funcionamiento: El intercambiador de doble tubo consiste en dos tubos concéntricos, por donde el fluido que desea ser calentado pase por el tubo interior y el fluido de servicio pasará por la parte interna que existe entre ambos tubos, este tipo de intercambiadores evita el atascamiento del fluido debido a que solo existe una dirección de flujo. Para el enfriamiento del lodo en el interior del biodigestor, se trabajará con un intercambiador de doble tubo que recirculará el lodo en su interior y trabajará con agua a temperatura ambiente como agente enfriante por la sección anular de los tubos concéntricos.	
Esquema del equipo:	
	

4.4. PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

La planta de tratamiento en su totalidad fue diseñada con el propósito de trabajar de manera continua, sin embargo, al inicio del proceso, ciertos equipos como el tanque de pasteurización y el biodigestor anaerobio no funcionarán. Esto se debe a que primero se tendrá que recolectar la materia prima para que empiece a funcionar la planta de tratamiento de sólidos.

La EMRAQ-EP tiene un horario de trabajo diario de 8 horas, donde, se empieza con el proceso de faenamiento a las 3 de la mañana, de 3h00 a 4h00 se realiza limpieza del área, se hace una inspección a los animales a faenar por parte de los veterinarios y después los animales son llevados a un proceso de aturdimiento. A partir de las 4h00 se comienza con el proceso de desangrado del animal y despiece, es ahí donde comienza a salir el agua residual con alta carga orgánica, todo el proceso transcurre hasta las 11h00 y a esa hora es donde finaliza (EMRAQ-EP, 2019).

Por lo tanto, se descargará agua residual proveniente de la EMRAQ-EP de 3h00 a 11h00, el agua que sale de la planta de faenamiento será dirigida al inicio de la planta y pasará por el proceso de cribaje a medida que sea descargada, por lo que se asumió que el proceso de descarga y cribado del agua residual ocurrirán al mismo tiempo. Después el agua se dirigirá al tanque de igualación, por lo que se especificó un tiempo transporte menor a 30 minutos, el agua empezará a llenar el tanque y tendrá que permanecer en agitación un mínimo de 2 horas antes de continuar con el recorrido, el flujo que sale del tanque de igualación fue calculado para que pueda ser repartido continuamente durante 24 horas.

El efluente después se dirigirá hacia la trampa de grasas, permanecerá ahí alrededor de 15 minutos y continuará su dirección hacia los módulos de vermifiltros para finalmente ser percolado a través de ellos. Por otro lado, el primer día de arranque de la PTAR propuesta de 4h00 a 12h00 se espera recolectar los residuos sólidos generados en el faenamiento, estos residuos serán llevado de forma manual al tanque de recolección junto con los sólidos retenidos del sistema de cribaje, se

4.5. DIAGRAMA DE BLOQUES (BFD) Y DIAGRAMA DE FLUJO (PFD)

La secuencia de procesos se presenta en la Figura 4.9 donde se muestra la totalidad del tratamiento a manera de diagrama de bloques (BFD). En la Figura 4.10 se presentan los diagramas de flujo (PFD) de la planta y en la Figura 4.11 está expuesta la simbología utilizada.

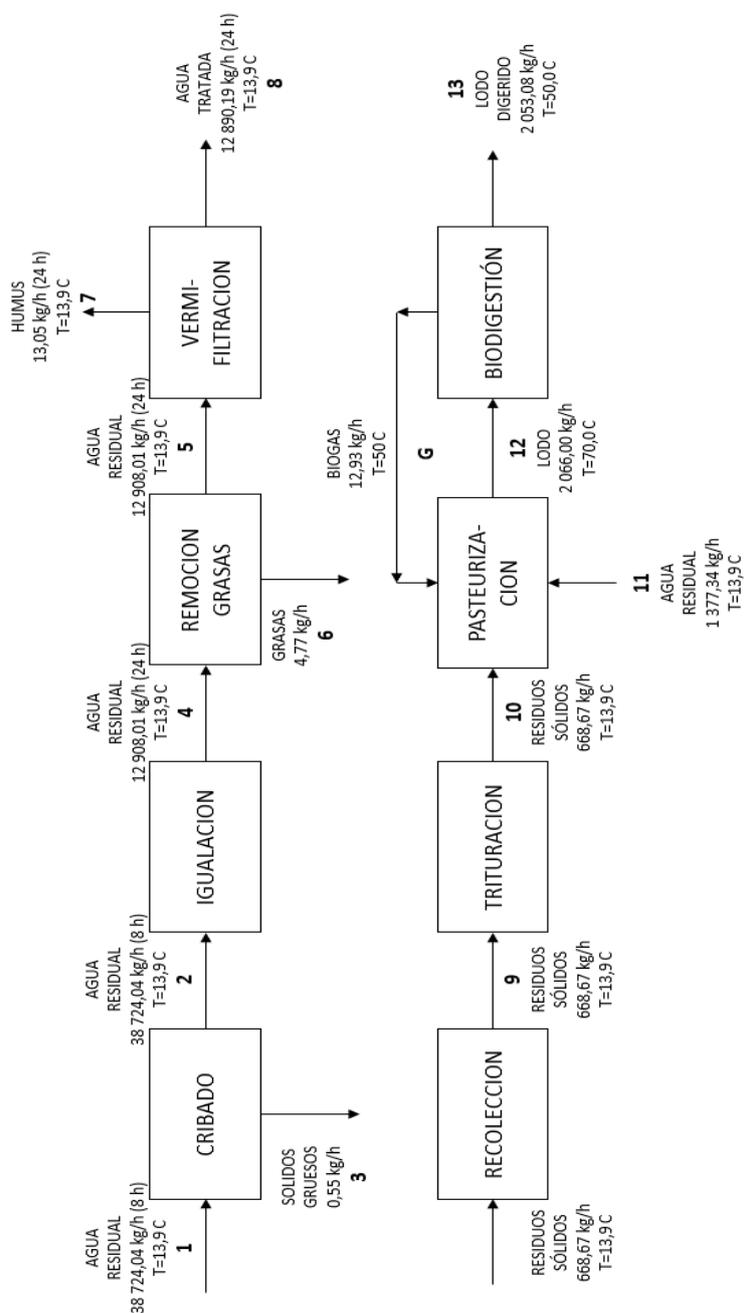


Figura 4.9. Diagrama bloques del proceso de la PTAR de la EMRAQ-EP

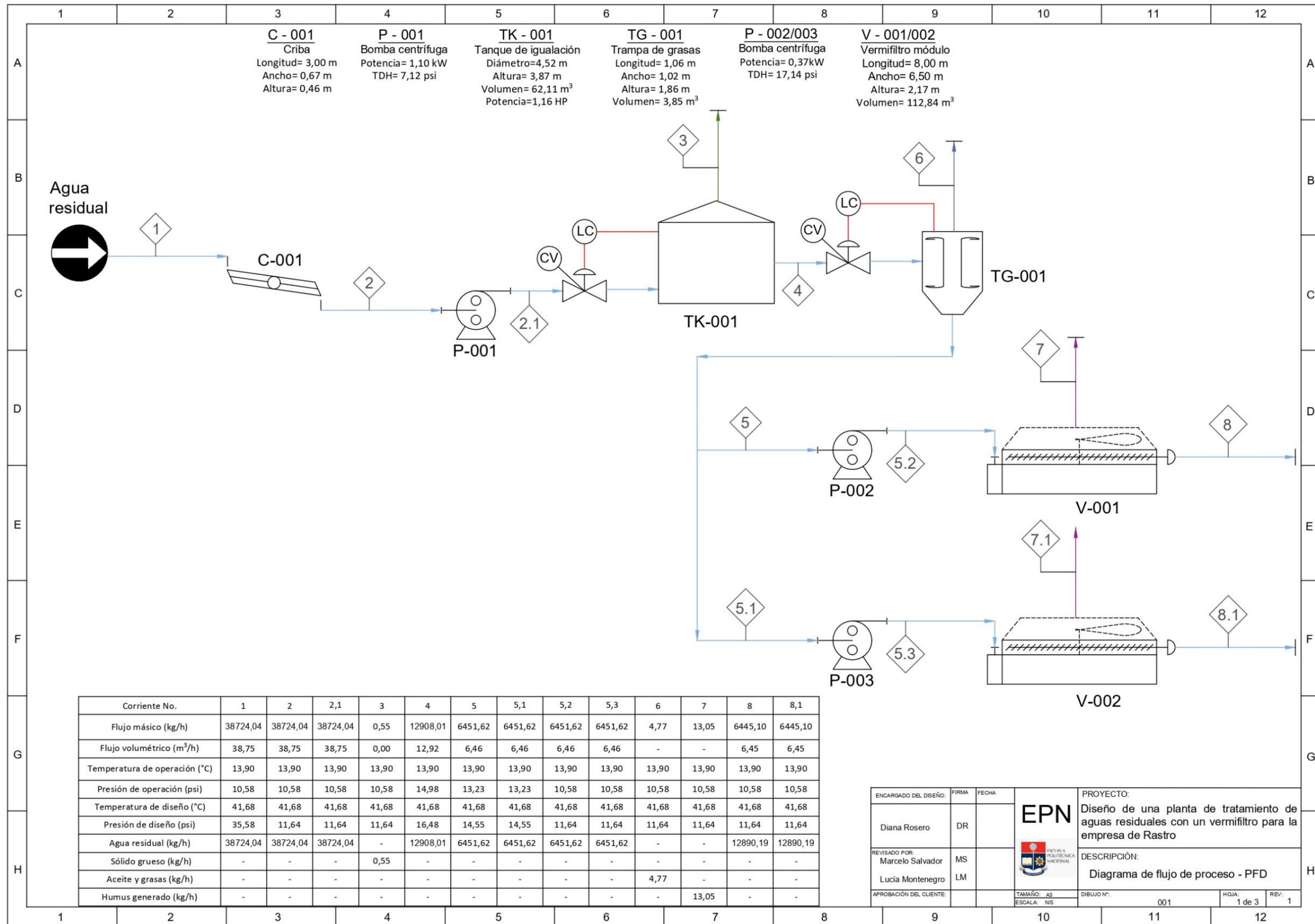


Figura 4.10. Diagrama PFD de la PTAR

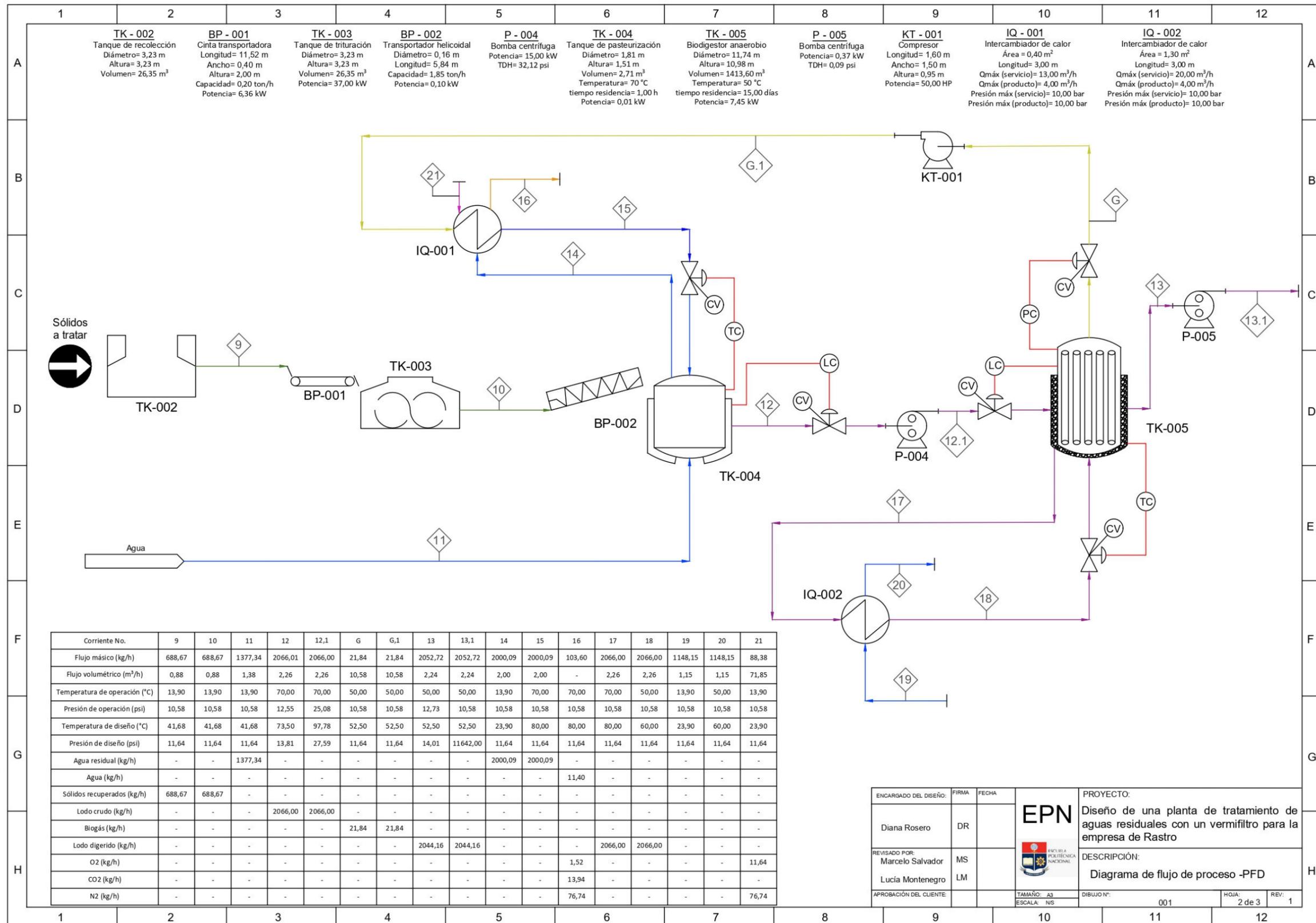


Figura 4.10. Diagrama PFD de la PTAR (continuación...)

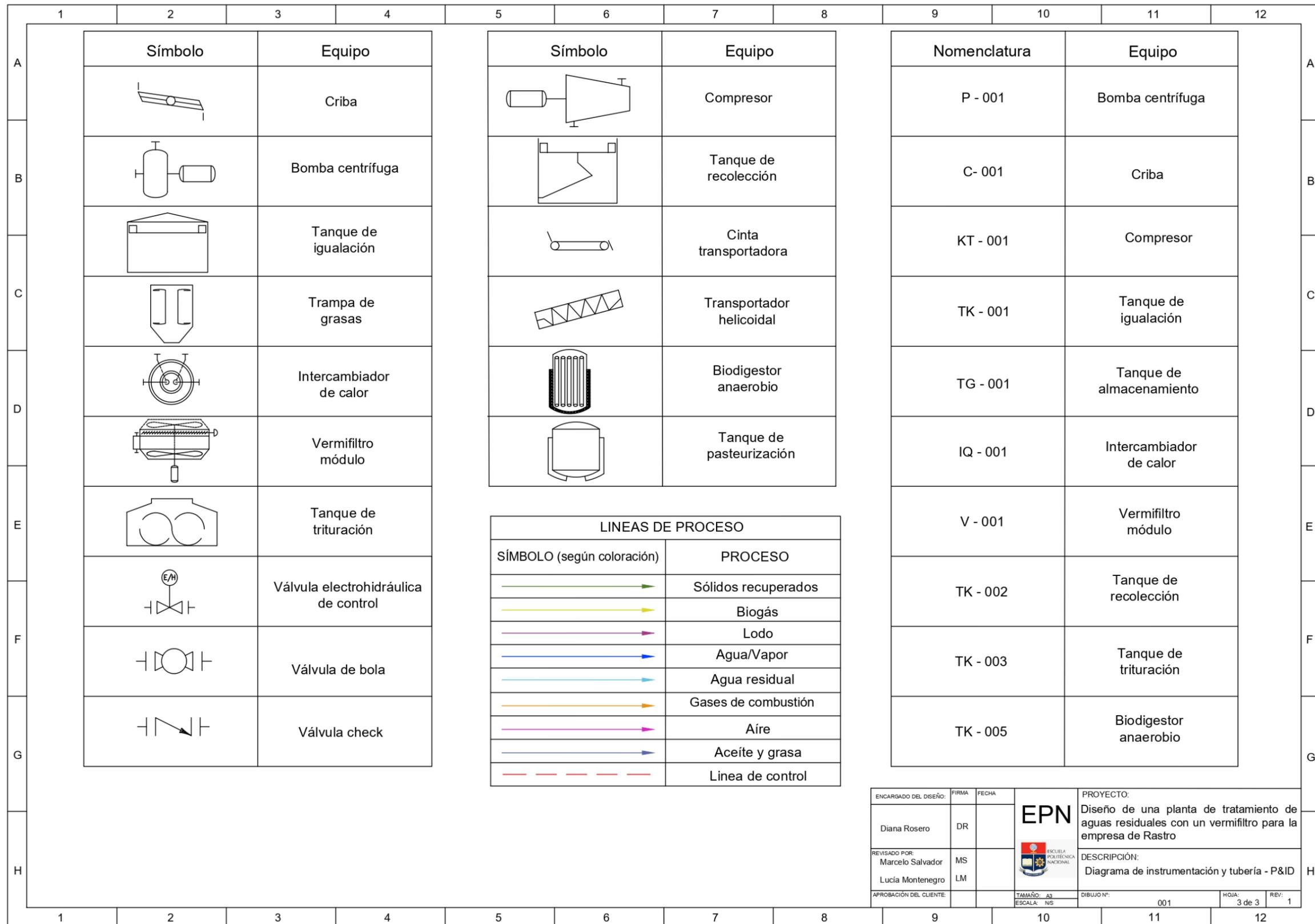


Figura 4.11. Simbología utilizada en el diagrama PFD de la PTAR

4.6. DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN (P&ID)

La planta de tratamiento diseñada contará con sistemas de control automático para de esta manera tener un proceso más eficiente y sin posibles fallas de funcionamiento. Se contará con sistemas de medición de altura del efluente en el interior de los tanques, esto aplicará para los dos tanques de igualación donde habrá un sensor de altura que indicará a la válvula de control conectada a la tubería por la cual ingresa el efluente que deberá permitir o no el ingreso del líquido. De igual comportamiento habrá sensores de nivel en la trampa de grasa en el tanque de pasteurización y en el reactor anaerobio.

Los vermifiltros contarán con medidores de pH, temperatura y humedad, esto con el propósito de mantener un ambiente adecuado para la vida de las lombrices en su interior. El tanque de pasteurización contará con un sistema de control de temperatura por medio de la manipulación del flujo de agua caliente que entregará el intercambiador de calor que está conectado.

Finalmente, el biodigestor anaerobio contará además del control de nivel con control de temperatura por medio de la manipulación del lodo que sale del intercambiador de calor de doble tubo y control de la presión en su interior por medio de la liberación del biogás que generará diariamente. En la Figura 4.11 y Figura 4.12 se presentan los diagramas de tuberías e instrumentación donde se observan los controles mencionados anteriormente y todo el sistema de tuberías que presentará la planta de tratamientos diseñada.

4.7. DISPOSICION EN PLANTA (LAYOUT) Y PLANOS DE ELEVACIÓN (VISTAS)

En la Figura 4.14 se presenta la disposición en planta de todos los equipos diseñados. En la Figura 4.15 (a), (b) y (c) se presentan las vistas 3D de la planta.

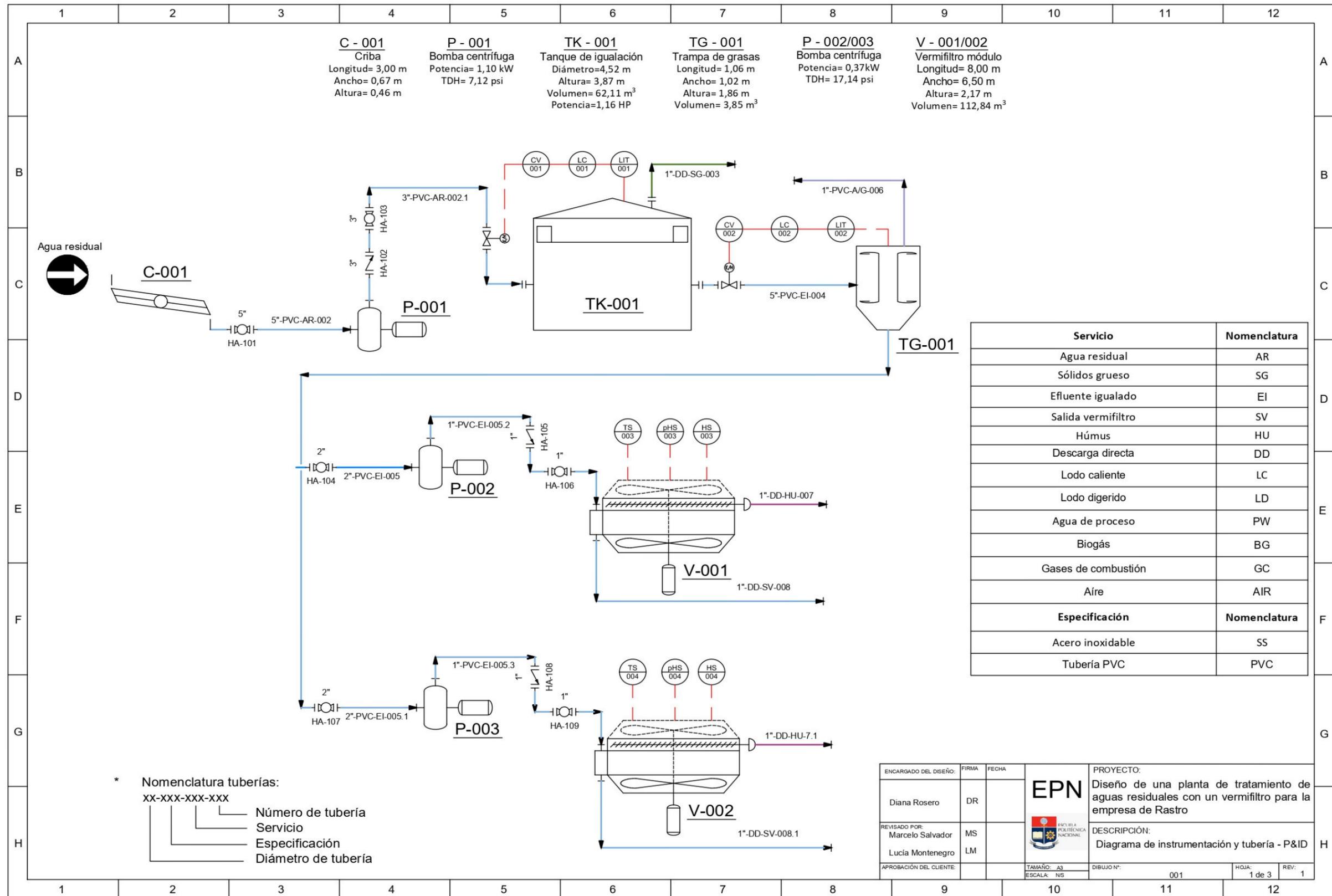


Figura 4.12. Diagrama P&ID de la PTAR

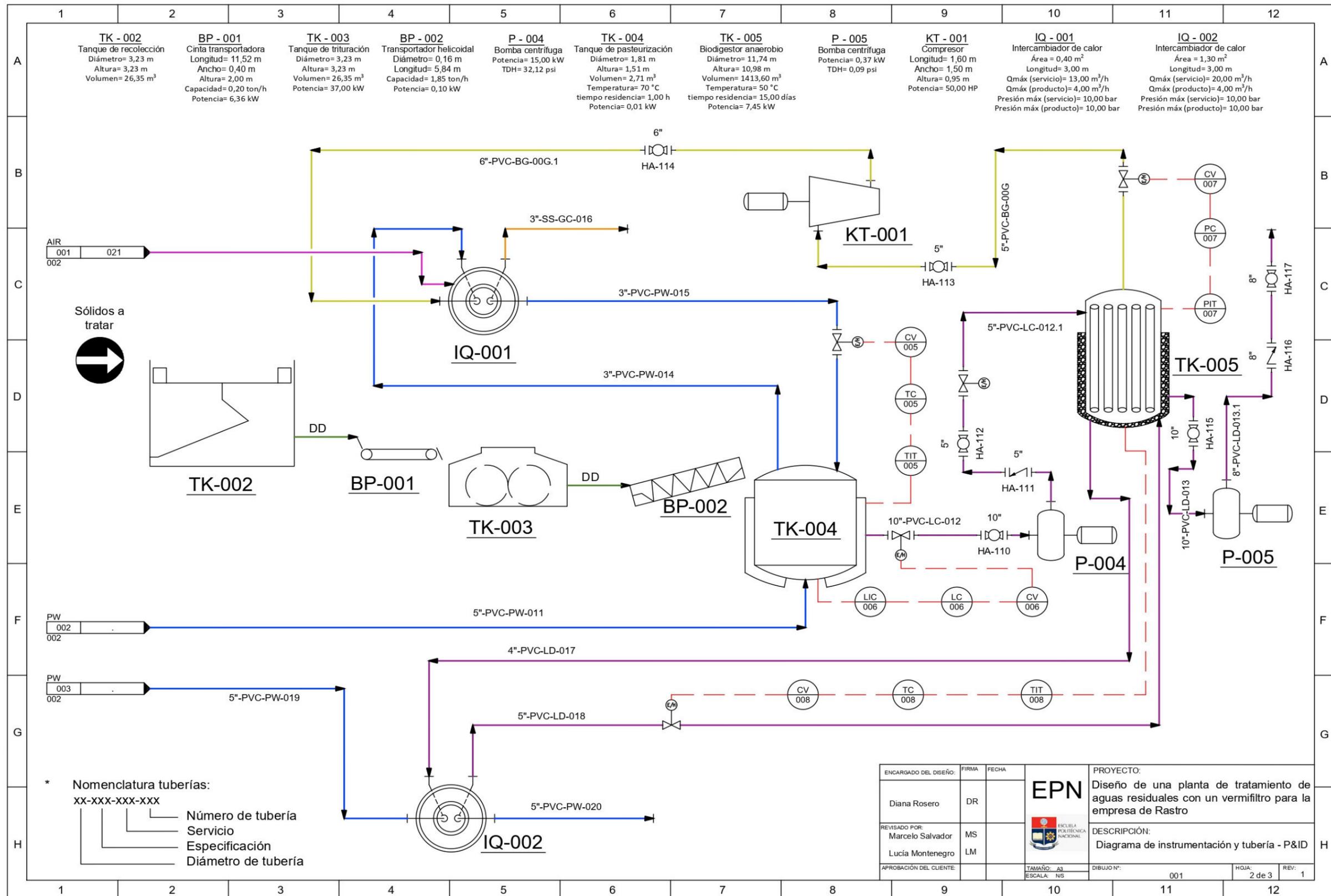
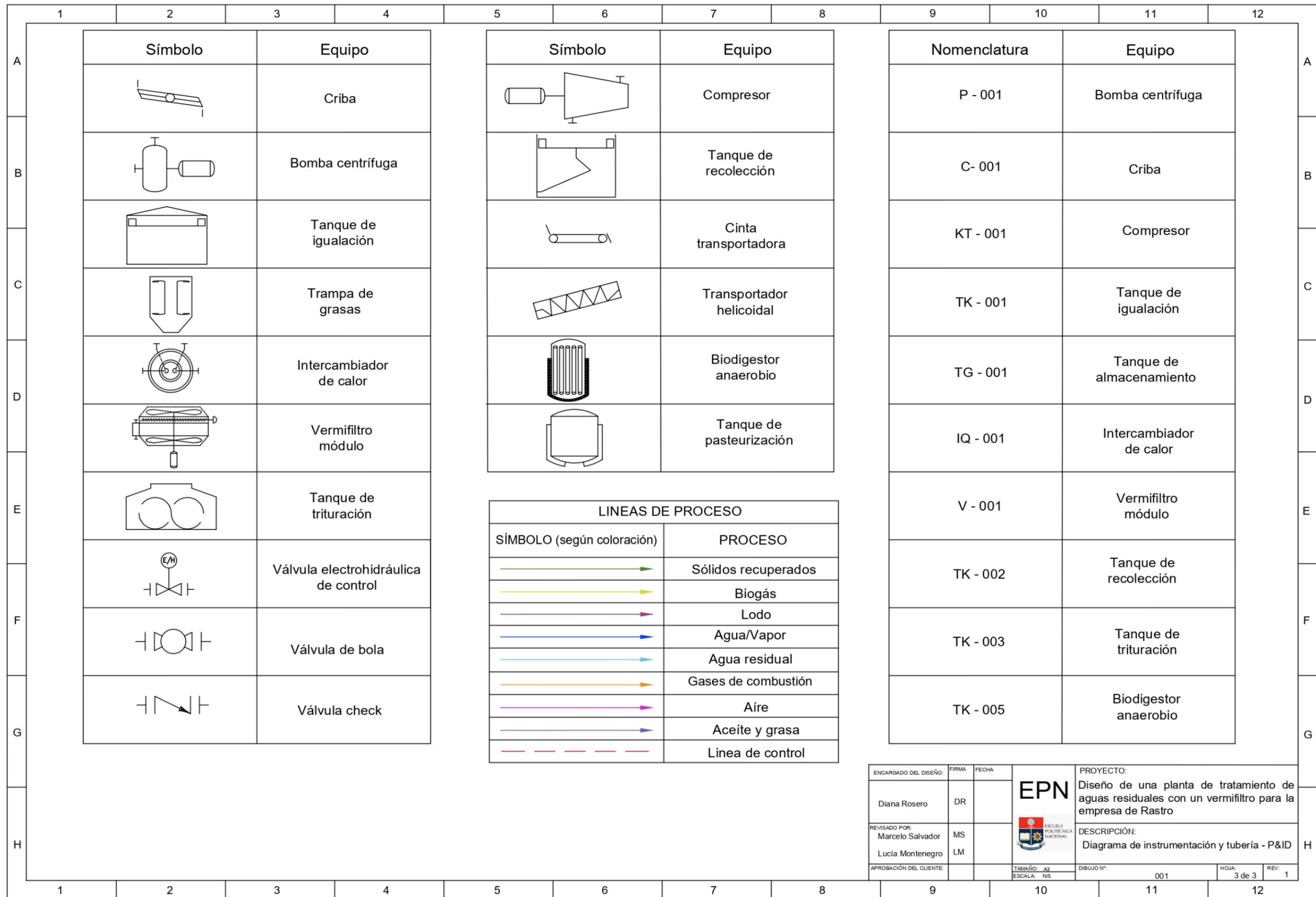
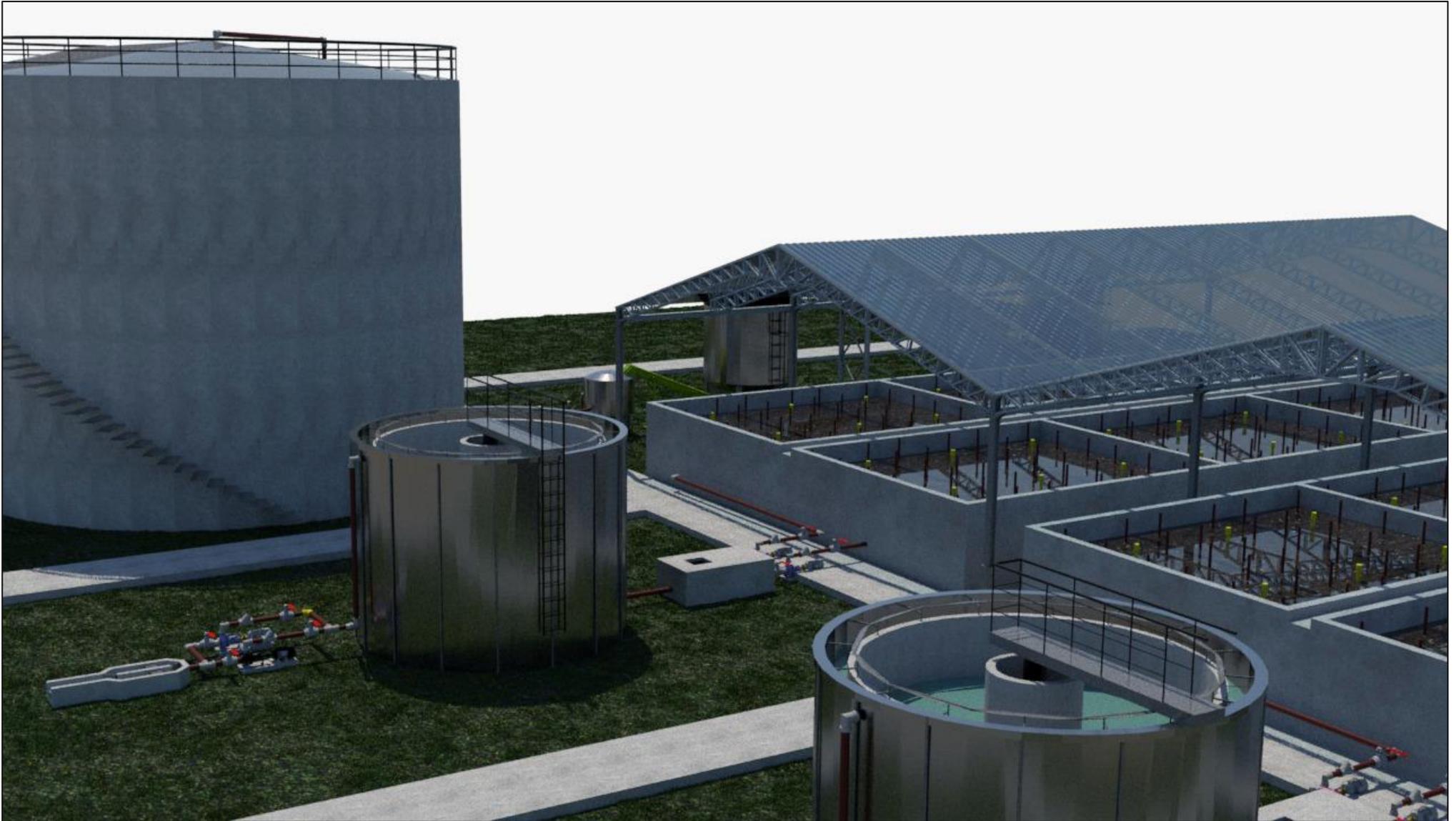
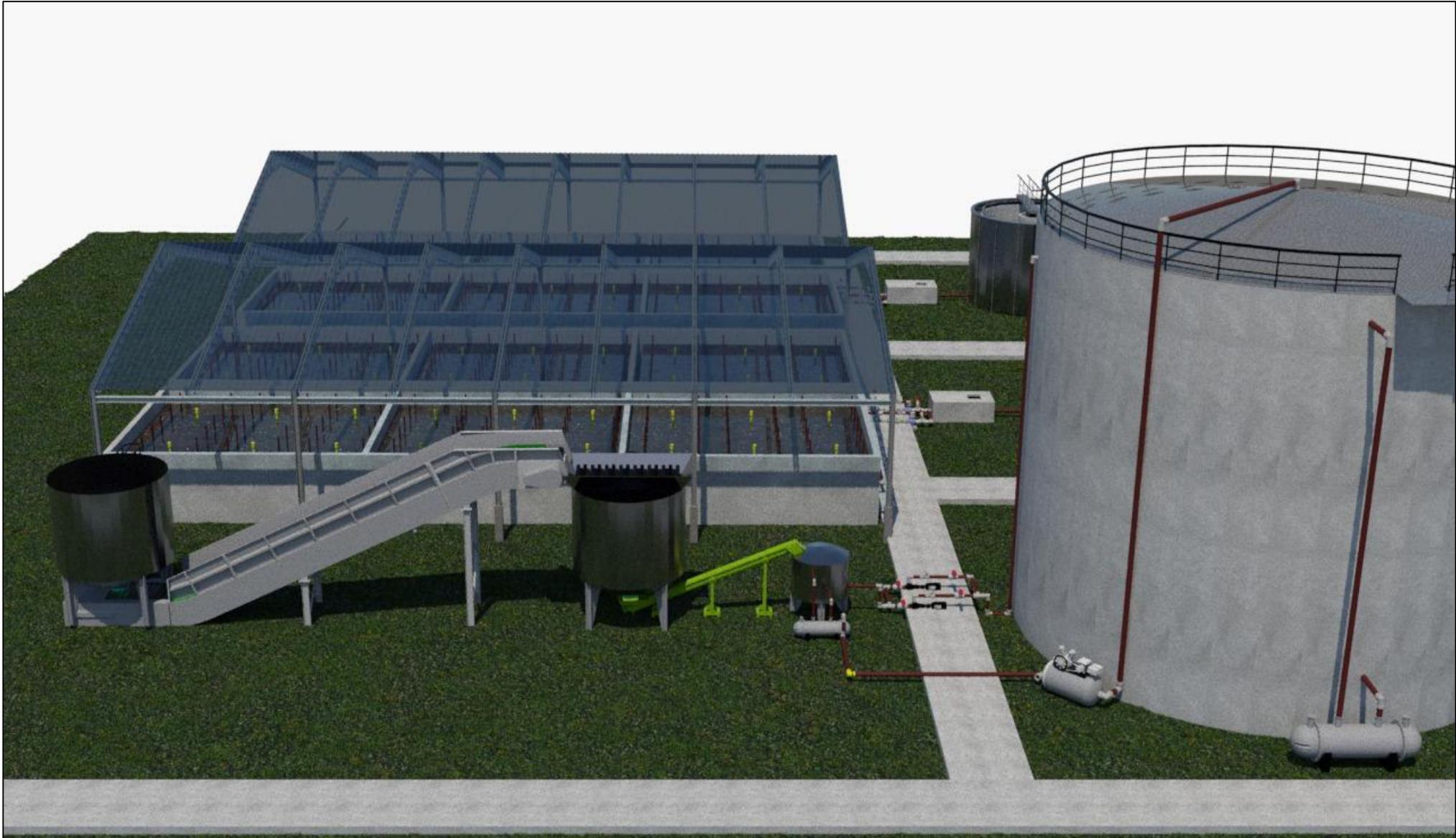


Figura 4.12. Diagrama P&ID de la PTAR (continuación...)

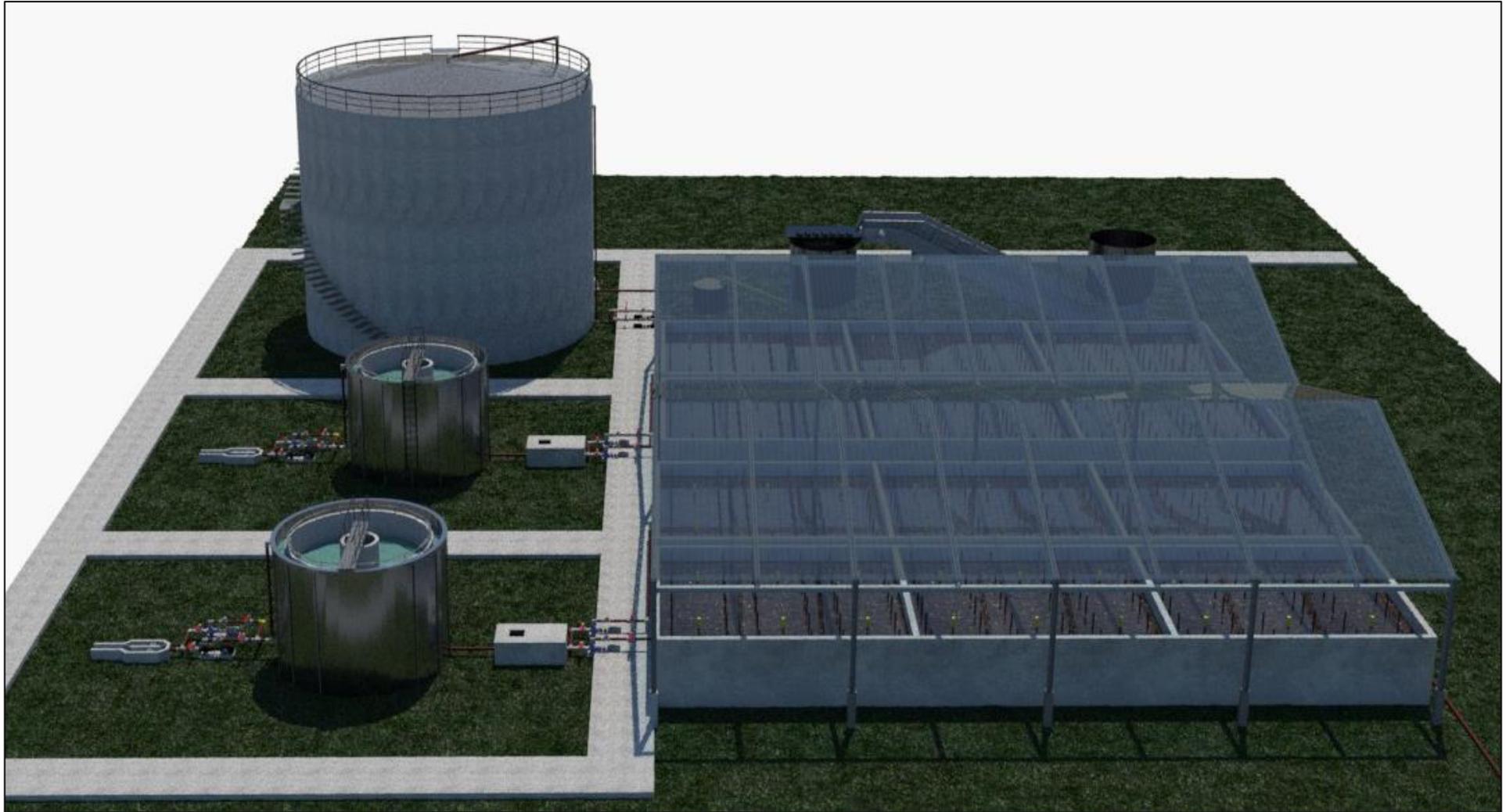




(a)



(b)



(c)

Figura 4.15. Vistas 3D PTAR EMRAQ-EP
(a) Vista frontal, (b) Vista posterior, (c) Vista total

5. ESTUDIO DE LA PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA

Para el estudio de la prefactibilidad económica se consideraron tres tipos de costos: costo de inversión, costos operativos y costos por multas. El conjunto total de los costos establecidos permitió conocer la factibilidad de la ejecución del proyecto de la planta de tratamiento de agua residuales de la EMRAQ-EP.

El costo de inversión corresponde costos preliminares correspondientes a equipos principales, secundarios, auxiliares y sus respectivas instalaciones, en la Tabla 4.4 se presentan enlistados todos los equipos que tendrá la PTAR. Los costos que se cotizaron se encuentran sus rubros desglosados respectivamente en el Anexo AIII.

Los costos operativos corresponden al pago de sueldos del personal y a la energía requerida para el funcionamiento adecuado de los equipos. Los costos por multas se obtienen del análisis de las sanciones legales o monetarias a las que estaría expuesta la PTAR por descargar inadecuadamente sus efluentes, pero ellos se debe conocer la normativa vigente, en este caso la planta deberá cumplir con lo estipulado en la Norma Técnica para el control de descargas líquidas. Resolución No. SA-DGCA-NT002-2016 (Secretaría de Ambiente, 2016).

5.1. COSTOS DE INVERSIÓN

Como se mencionó, los costos de inversión corresponden a todo lo relacionado con la construcción e implementación de los equipos diseñado. En estos costos se encuentran los costos de los equipos principales y secundarios según las dimensiones establecidas, los equipos auxiliares, la obra civil, los sistemas de tuberías y válvulas.

Según el diseño establecido, los equipos se los obtendrá en el mercado nacional, ya que son equipos comunes en las plantas de tratamiento de agua y otros son

construidos a medida. Por lo tanto, no se requerirá importar ningún equipo siendo un punto a favor porque así se evita de esta manera el incremento de los costos.

Tabla 5.1. Costo total por equipos de la PTAR de la EMRAQ-EP

Operación	Equipo	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Retención de sólidos	Sistema cribaje	2	776,95	1 553,90
Igualación de caudales	Tanque de igualación	2	103 757,28	207 514,56
	Bomba centrífuga cribas – tanque igualación	4	665,50	2 662,00
Remoción de grasas	Trampa de grasas	2	1 880,83	3 761,66
Filtración	Módulo de vermifiltro	12	168 212,75	2 018 553,00
	Bomba centrífuga trampa de grasas – módulos	4	551,50	2 206,00
Almacenamiento de sólidos	Tanque de recolección de sólidos	1	69 641,28	69 641,28
Trituración de sólidos	Tanque de trituración	1	83 233,80	83 233,80
	banda transportadora almacenamiento – trituración	1	25 209,00	25 209,00
Pasteurización	Tanque de pasteurización	1	42 787,32	42 787,32
	Transportador helicoidal trituración – pasteurización	1	15 180,00	15 180,00
	Compresor biogás biodigestor – pasteurización	1	7 059,60	7 059,60
Digestión de lodos	Biodigestor anaerobio	1	471 471,60	471 471,60
	Bomba de lodos	2	1304,15	2 608,30
	Bomba centrífuga pasteurización - biodigestor	2	3 454,00	6 908,00
Costo total de equipos (USD)				2 960 350,02

En la Tabla 5.1 se presentan los resultados de los costos determinados de los equipos principales y secundarios para la determinación de la inversión total de la PTAR. Se debe tomar en cuenta que la PTAR no requiere ningún equipo específico

que deba ser adquirido, si no, que son equipos que por su tamaño deben ser contruidos in situ.

En el costo individual por equipo viene incluido lo que son costos por obra civil e implementación. Se deber indicar que se estimó la realización de una adecuación del terreno donde van los equipos debido a sus grandes tamaños que está incluido dentro del costo del equipo además de los sistemas de agitación y calentamiento correspondiente. El costo total de inversión por los equipos resultó de 2 960 350,02 USD. Los costos por equipo de manera más detallada presentan en el Anexo AIII.

Se estableció además la construcción de un cerramiento, vías de acceso y una casa de control y guardianía para la adecuación correcta de la PTAR, este costo señalado es opcional, pero se lo consideró para lograr un acercamiento más certero del costó que tendrá la construcción. En la Tabla 5.2 se presentan los costos relacionados a lo indicado sobre la obra civil secundaria.

Tabla 5.2. Costo obra civil secundaria

Equipo	Costo (USD)
Cerramiento total del terreno	23 800,00
Replanteo de vías de acceso e interiores	54 034,20
Casa de control y guardianía	18 285,30
Costo total (USD)	96 119,50

Al trabajar con agua y lodos en el proceso se requirió la adquisición e instalación de bombas para la impulsión de todos los fluidos. En la Tabla 5.3 se presentan los costos de las bombas y compresor utilizadas.

Tabla 5.3. Costo de bombas y compresor

Equipo	Identificación	Cantidad total	Costo (USD)
Bomba centrífuga	P – 001	2	1 331,50
	P – 002	2	1 103,00
	P – 003	2	1 103,00
	P – 004	2	6 908,00

Tabla 5.3. Costo de bombas y compresor (continuación...)

Equipo	Identificación	Cantidad total	Costo (USD)
Bomba para lodos	P – 005	2	2 608,30
Compresor	KT – 001	1	7 059,60
Costo total (USD)			20 113,40

El costo por tuberías y accesorios, se lo determinó por medio de precios en el mercado y se estableció que los costos de los accesorios son el 75 % del costo total de tuberías. En la Tabla 5.4 se presentan los costos mencionados (Sinnot y Towler, 2008, p. 998)

Tabla 5.4. Costo de tuberías y accesorios de la PTAR de la EMRAQ-EP

Diámetro nominal (in)	Material	Sistema	Cantidad por sistema (m)	Longitud por sistema (m)	Costo unitario (USD/m)	Costo (USD)
¾	PVC	C	4 x 76,50	306,00	2,05	627,30
2	PVC	C	4 x 4,00	16,00	3,90	62,40
4	PVC	A	4 x 4,80	19,20	9,73	186,82
5	PVC	A	4 x 1,00	4,00	10,91	43,64
5	PVC	D	1 x 14,00	14,00	10,91	152,74
5	PE	F	1 x 6,20	6,20	10,91	67,64
6	PE	F	1 x 8,10	8,10	12,08	97,85
10	PVC	D	2 x 1,00	2,00	16,76	33,52
10	PVC	E	2 x 1,80	3,60	16,76	60,34
Costo total tubería (USD)						1 332,24
Costo total accesorios (USD)						999,18
Costo total (USD)						2 331,42

(Riego Ecuador, 2021)

Como se observa, en la Tabla 5.4 se detalló la cantidad de tubería requerida según determinados para cada sistema establecido durante el dimensionamiento de las tuberías de la PTAR, en la Tabla 4.16 se presenta detalladamente las características de cada las tuberías correspondientes a cada sistema.

5.2. COSTOS DE OPERACIÓN

Todos los costos de operación se asocian con la potencia requerida para el funcionamiento de cada uno de los equipos, esta información se obtuvo de la energía determinada y la que se obtuvo de los catálogos. Además, se asume como costo de operación los sueldos de los operarios y supervisores de la planta.

Se estableció que el funcionamiento de la planta será de 24 h con dos jornadas de trabajo, de 7:00 a 19:00 y de 19:00 a 7:00, se contratarán 7 operarios y 1 supervisor en el día y en la noche serán 4 operario y 1 supervisor.

El sueldo establecido para los operarios será de 1,66 USD la hora para el turno del día y 2,08 USD en el horario de la noche. El sueldo de los supervisores será de 890,00 USD al ser parte del área administrativa y rotarán semanalmente la supervisión en la noche. Se debe tomar en cuenta el aporte al IESS, el cual es del 9,45 % del salario del empleado y el 11,15 % del salario del empleado por parte del empleador y los fondos de reservas que pagará la empresa corresponde al 8,33 % del salario de cada empleado (IESS, 2021). En la Tabla 5.5 se presentan los valores de sueldos para todo el personal que estará involucrado en la operación de la PTAR.

Tabla 5.5. Costo mensual de personal

Cargo	Sueldo por trabajador (USD/mes)	Sueldo total trabajadores sin aportación (USD/mes)	Aportación total al IESS (USD/mes)	Decimotercero, decimocuarto y fondos de reserva (USD/mes)	Sueldo total trabajadores (USD/mes)
Supervisor (2)	890,00	1 780,00	198,47	367,44	2 345,91
Operario día (3)	597,60	1792,80	199,89	149,19	2 363,76
Operario noche (1)	747,00	747,00	83,29	155,60	985,89
Costo total mensual (USD)					5 695,56

Otro costo que forma parte del costo de operación es el consumo de energía que ocupan los equipos. En la Tabla 5.6 se presentan el listado de los equipos que requieren energía eléctrica para su funcionamiento.

Actualmente el precio de energía es de 0,043 USD/kW-h (ARCONEL, 2020), por lo tanto, con dicho valor se trabajó para la determinación de los costos energéticos y junto con las potencias presentadas en la Tabla 4.4.

Tabla 5.6. Costo consumo de energía por equipo de la PTAR de la EMRAQ-EP

Equipo	Cantidad	Consumo (kW-h)	Costo total (USD)
Bomba T.I.*	4	96,00	4,13
Agitador T.I.*	2	25,20	1,08
Bomba V.*	4	35,52	1,53
Cinta transportadora	1	152,64	6,56
Trituradora	1	888,00	38,18
Transportador helicoidal	1	2,16	0,09
Agitador T.P.*	1	0,24	0,01
Bomba T.P.*	2	720,00	30,96
Bomba lodo	2	17,76	0,76
Agitador por aspiración	5	35,76	1,54
Compresor	1	894,96	38,48
Costo total diario (USD)			123,33
Costo total mensual (USD)			3 700,03

*T.I.: Tanque de igualación

*V.: Vermifiltro

*T.P.: Tanque de pasteurización

La PTAR de la EMRAQ-EP no tiene como fin generar ingresos, por lo que los costos de operación solo hacen referencia al pago de la energía consumida por los equipos y el pago del personal requerido. En la Tabla 5.7 se presentan los costos de operación total.

Tabla 5.7. Costos totales por operación PTAR

Descripción	Costo (USD/mensual)
Costo personal	5 695,56
Costo consumo de energía	3 700,03
Costo total	9 395,59

Los costos obtenidos por operación resultaron bajos, si se considera la magnitud de la planta de 3 920 m², esto se debe a que la base del tratamiento de agua son vermifiltros, que, a más de los sistemas de bombas, sistemas de agitación y aspersores no consume mayor energía.

Se realizó la relación costo por metro cúbico tratado de la PTAR para conocer si el tratamiento es factible, se considera que el flujo a tratar es toda el agua que ingresa a la planta de tratamiento junto con los sólidos que se tratarán diariamente. Para la determinación del costo de tratamiento se utilizó la Ecuación 5.1 (Romero, 2016, p.175).

$$C_t = \frac{C_{op}}{Q_t} \quad [5.1]$$

Donde:

C_t : costos de tratamiento (USD/m³)

C_{op} : costos operación (USD/mes)

Q_t : caudal tratado (m³/mes)

El caudal tratado mensualmente por la PTAR es de 18 600 m³/mes y el lodo que se trata es de 632,45 m³/mes.

$$\therefore C_t = \frac{9\,725,28 \left[\frac{\text{USD}}{\text{mes}} \right]}{(18\,600) \left[\frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \right]}$$

$$C_t = 0,52 \left[\frac{\text{USD}}{\text{m}^3} \right]$$

Se obtuvo que para tratar 1 m³ de agua residual se requieren 0,52 USD, normalmente el costo para tratar agua residual en el país oscila entre los 200 000,00 a 700 000,00 USD para tratar de 100 a 500 gpm, si se coloca a razón de 1 m³ el costo, resulta que para tratar 1 m³ de cuesta 9,18 USD (Chavéz, 2018).

Por lo tanto, es notorio la disminución de costos al trabajar con proceso biológicos para tratar el agua residual, sin embargo, se debe considerar el tiempo que tomará pagar la inversión que resultó alta, en comparación a lo que se ahorraría por no trabajar con un proceso de tratamiento convencional.

5.3. COSTOS POR MULTAS

Toda ejecución de una obra, proyecto o actividad que no presente permiso o autorización el momento que es notificada debe proceder con el inicio de la regularización ambiental y cumplir las medidas de acción en un lapso de 15 días e indicar el inicio del proceso y los avances (Ordenanza Metropolitana 0138, 2016, p.16). Si la actividad realizada no presenta evidencia de la regularización y/u orden de remediación, reparación y/o restauración del daño ambiental si esta aplica, se suspenderá toda actividad hasta el inicio o continuación de la regularización (Ordenanza Metropolitana 0138, 2016, p.19). Junto con la suspensión de la actividad se sancionará monetariamente a la institución generadora del problema según la categorización del impacto ambiental. En la Tabla 5.8 se presentan las sanciones monetarias según la categoría del impacto ambiental.

Tabla 5.8. Sanción monetaria según impacto ambiental

Categoría	Sanción
Impacto ambiental mínimo	Multa equivalente a 1 salario básico unificado del trabajador general
Impacto ambiental bajo	Multa equivalente a 10 salarios básicos unificados del trabajador general
Impacto ambiental medio y alto	Multa equivalente a 20 salarios básicos unificados del trabajador general

(Ordenanza Metropolitana 0138, 2016, p.20)

Según la Tabla 5.8 los costos que tendría que pagar la EMRAQ-EP serían de:

- 450 USD, si el impacto es mínimo
- 4 000 USD, si el impacto es bajo
- 8 000 USD, si el impacto es medio o alto

En caso de que la EMARQ-EP reincida con la infracción de no cumplir con la normativa en cuanto a la descarga de aguas residuales al alcantarillado, la multa será igual al valor establecido anteriormente multiplicado por el número de veces de reiteraciones de la infracción.

Además, si la gravedad de la infracción lo amerita, donde reincide la infracción dentro de dos años consecutivos, la entidad de control procederá a la revocación de la concesión, licencia y toda autorización que se tiene para operar y prestar servicios (Ordenanza Metropolitana 0138, 2016, p.26).

Como se conoce la EMRAQ-EP genera un caudal de agua residual que no está siendo abastecido por su PTAR y además no se encuentra dentro de la normativa vigente. Si la empresa de rastro no realiza un control y adecuación de sus residuos puede llegar a recibir sanciones como las mencionadas previamente.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- La planta de tratamiento de aguas residuales para la Empresa de Rastro Quito está diseñada para el tratamiento de 620 m³/d residuos líquidos y una cantidad y 16 528,068 kg/d de desechos sólidos con el propósito de abastecer la demanda de tratamiento actual y futura del agua residual generada.
- La PTAR está diseñada para trabajar las 24 horas los 7 días a la semana y lograr una remoción aproximada del 88,52 % de la carga orgánica presente en el agua residual, debido a que, este es el mayor problema que están teniendo sus efluentes.
- El corazón de la PTAR es el proceso de vermifiltración, según lo diseñando se requieren 12 módulos de vermifiltros que corresponden a los presentes en las dos plantas de tratamiento del agua residual en paralelo, las dimensiones de cada módulo son de 8 m de largo por 6,5 m de ancho y 2,17 m de alto para tratar la cantidad de agua residual esperada (620 m³/d).
- La inversión estimada para la implementación de la PTAR diseñada es de 2 960 350,02 USD donde está incluido los costos por obra civil y costos de los equipos requeridos. Por otro lado, el costo de operación estimado para toda la planta sería de 9 395,59 USD/mes, que concluye que la inversión si será alta para la implementación de todo el proceso, pero una vez que esté en operación los costos no superaran 10 000,00 USD por mes, siendo un resultado favorable.
- Se determinó que el costo de tratamiento del agua residual es de 0,52 USD/m³ lo que resulta ser un valor accesible y conveniente debido a que los costos por operación son bajos al igual que los costos por consumo de electricidad. Al comparar el valor obtenido con los valores de trabajo normales de una planta que son de 9,18 USD/m³; por lo que la planta logrará su objetivo de tratar el

caudal que estaba sin abasto de la EMRAQ-EP a un costo económico y un proceso sencillo.

6.2. RECOMENDACIONES

- Se debería evaluar si resulta más conveniente el tratamiento de los sólidos por empresas externas a la EMRAQ-EP que hacerlo directamente, puesto que, la implementación del sistema de tratamiento eleva considerablemente los costos de inversión y el área que ocupa es extensa.
- Considerar la opción de otro mecanismo para el tratamiento de los desechos sólidos que resulte en un área menor de trabajo y evaluar económicamente si es más factible que el proceso propuesto.
- Evaluar los costos por inversión y por operación una vez realizada la ingeniería a detalle de la planta con el objetivo de conocer si el incremento de costos sobrepasa considerablemente los costos obtenidos en un inicio con la ingeniería básica.
- Realizar una simulación a escala piloto del proceso total propuesto para la EMRAQ-EP para considerar factores que puedan afectar el proceso propuesto a gran escala, como el caso de las lombrices seleccionadas, conocer si estas tendrán una tasa alta de reproducción y tiempo de vida bajo las condiciones ambientales de Quito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alarcón, C. (2016). Diseño de un biodigestor anaeróbico para procesar los desechos sólidos del centro de faenamiento municipal de ganada de Orellana. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Magister en Ingeniería Ambiental*). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
2. Amador, J. (2013). Selección de potencias nominales y tensiones de motores eléctricos acompañantes de bombas. *Scielo*.
3. American Petroleum Institute. (2012). *API 650. Welded tanks for oil storage*. Washington D.C, Estados Unidos: APU publishing services.
4. American Society for Testing and Materials. (2019). Standar Specification for Carbon Structure Steel. (*ASTM A36/A36M*). ASTM, New York, United States.
5. American Society of Mechanical Engineers . (2010). Código B31.3-2010. *Tuberías de proceso*. New York, United States.
6. American Society of Mechanical Engineers. (2013). *VIII Reglas para la construcción de recipientes a presión*. Nueva York, Estados Unidos.
7. ARCONEL. (2020). *EL DIRECTORIO DE LA AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD*. Obtenido de <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/12/031-18-Aprobacion-del-Analisis-y-Determinacion-de-los-Costos-del-Servicio-Publico-de-Energia-Elctrica-de-enero-a-diciembre-de-2019.pdf>

8. Bardera, A., y Gómez, S. (2016). How to calculate the volumes of partially full tanks. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 1-7.
9. Basauri, D., y Terrones, J. (2018). Producción de Biogás Utilizando Contenido Ruminal, Como Alternativa de Plan de Manejo Ambiental de los Residuos Orgánicos Generados en el Camal Municipal De Cajamarca. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental*). Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo, Cajamarca, Perú.
10. Benavides, D. (2020). Biodigestión anaerobia de los desechos del camal del Distrito Metropolitano de Quito para obtención de compost, biol y biogás. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico*). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
11. Bravo, M. (2019). Diseño y evaluación del uso de lombrifiltro como alternativa al tratamiento de residuos líquidos industriales en el proceso de producción de carragenina. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil Químico*). Universidad del Bio-Bio, Biobio, Chile.
12. Briceño, K., y Castillo, X. (2009). Diagnóstico ambiental y plan de manejo para el Camal Municipal de Zapotillo. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero de Manejo y Conservación del Medio Ambiente*). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
13. Castillo, V. (2013). Diseño y Cálculo de un Agitador de fluidos. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental*). Universidad del Bio bio, Biobio, Chile.

14. Castro, E. (2019). Estudio de viabilidad técnica y económica de la implementación del sistema Tohá (lombrifiltro) para el tratamiento de las aguas residuales en el Municipio de Tinjacá- Boyacá. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental*). Universidad Distrital Fransico José de Caldas, Bogotá, Colombia.
15. CEPIS. (2003). *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Especificación Técnica para el Diseño de Trampa de Grasas*. (OPS/CEPIS/03.8). Obtenido de <https://vdocuments.mx/trampa-de-grasas-especificaciones-tecnicas-cepis.html>
16. Chango, E., y Simbaña, I. (2016). Evaluación de la gestión de residuos sólidos en la planta de tratamiento de aguas residuales del camal Metropolitano de Quito y propuesta de mejora. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil*). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
17. Chavéz, C. (2018). *¿Cuánto cuesta una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales?* Obtenido de <https://wp.indiquimica.com.ec/cuanto-cuesta-una-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales/#:~:text=Un%20sistema%20de%20tratamiento%20de%20agua%20residual%20aqu%C3%AD%20usualmente%20tiene,co sto%20de%20%24200%2C000%20a%20%24700%2C000>.
18. Chen, K., Cheng, J., Lee, J., Li, L., y Peng, S. (2020). Energy Efficiency: Indicator, Estimation,. *Sustainability*, 1-19.
19. CORFIM S.A. (2021). *Constructora Internacional del Ecuador*. Obtenido de <https://www.corfimsa.com.ec/>

20. De Juan Valero, J., Pereira, L., Pirconell, M., y Tarjuelo, M. (2010). *El riego y sus tecnologías*. Albacete, España: Centro regional de estudios del agua.
21. DISMET. (2021). *Equipos y componentes DISMET*. Obtenido de <https://www.dismet.com/>
22. Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Sa. (Octubre de 2017). *Planta de tratamiento de aguas residuales Quitumbe*. Obtenido de <https://www.aguaquito.gob.ec/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-ptar-quitumbe-inicia-funcionamiento/>
23. Empresa Pública Metropolitana de Rastro Quito. (2019). *Informe de Rendición de Cuentas 2019*. Quito, Ecuador: EMRAQ-EP.
24. Espín, A. (2014). Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para el camal municipal del cantón Alausí. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico*). Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
25. FAMIT. (2021). *Fabricación y montajes industriales tecnológicos*. Obtenido de <https://www.famit.com.ec/index.html>
26. Ferrer, Y., y Pérez, H. (2017). Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás: Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y rendimiento. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar*, 43(1), 9-20.
27. Filtros del litoral. (2021). *Separadores de agua*. <https://filtrosdelitoral.com/productos/>.

28. Fuel, K. (2018). Elaboración de un manual para el manejo de los residuos sólidos generados por el Camal Metropolitano de Quito en el proceso de faneamiento. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Tecnóloga en Aguas y Saneamiento Ambiental*). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
29. Gadhamshetty, V., Giri, B., Khanal, S., y Nitayavardhana, S. (2017). Anaerobic Bioreactor/Digester: Desing and Development. *Elsevier*, 261-279. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63665-2.00010-2>
30. Galeano, L., y Rojas, V. (2016). Propuesta de Diseño de una Planta de Tratamiento de Agua Residual por zanjón de oxidación para el casco urbano del Municipio de Velez -Santander. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil*). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
31. García, S., Clubbs, R., Stanley, J., Scheffe, B., Yelderman, J., y Brooks, B. (2013). Comparative analysis of effluent water quality from a municipal treatment plant and two on-site wastewater treatment systems. *Chemosphere*, 33-44. doi:10.1016/j.chemosphere.2013.03.007
32. Grupp, A. (2010). Diseño de un Modelo de una Planta para tratamiento de agua residuales domésticas con Tanques Fibratank. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico*). Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela.
33. Guzmán, M. (2004). Estudio de factibilidad de la aplicación del sistema Toha en la planta de Tratamiento de aguas servidas de Valdivia. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil*). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

34. Haarslev. (2021). *Trituradora*. Obtenido de <https://es.haarslev.com/products/high-speed-crusher/>
35. Hendricks, D. (2016). *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes: Physical, Chemical, and Biological*. New York, United States: CRC Press.
36. Hidráulica Alsina S.A. (2021). *Catálogo general 2021/22*. Obtenido de <https://www.bombashasa.com/imag/cat-tarifa/catalogo.pdf>
37. IESS. (2021). *Servicios y prestaciones*. Obtenido de <https://www.iess.gob.ec/en/web/afiliado/servicios-y-prestaciones>.
38. INEN. (1992). *Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes*. In *Código de Práctica Ecuatoriano*. (Vol. 1, Issue, Primera Edición).
39. INOXPA. (2021). *Bombas centrífugas Prolac HCP*. Obtenido de <https://www.inoxpa.es/descargas/documentos/bombas>
40. Jeffus, L. (2009). *Soldadura. Principios y aplicaciones*. Madrid, España: Paraninfo, S.A.
41. Jiménez, A. (2016). Estudio de un Sistema de Tratamiento de aguas residuales provenientes de una fábrica de embutidos. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico*). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
42. Johnson, K., y Yates, J. (2007). *Molecular Physical Chemistry for Engineers*. New York, United States: University Science Books.
43. Lara, L. (2011). Las aguas residuales del camal municipal del cantón baños y su incidencia en la contaminación del río Pastaza en la

provincia de Tungurahua. (*Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil*). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

44. Linnenberg, C., Hernández, C., Amador, R., y Viquez, M. (2012). *Estudio de factibilidad biodigestor anaeróbico tipo industrial*. San José, Costa Rica: Sigma Alimentos.
45. Manyuchi, M., Kadzungura, L., y Boka, S. (2013). Pilot Scale Studies for Vermifiltration of 1000m³/day of Sewage Wastewater. *Asian Journal of Engineering and Technology*, 13-19.
46. Mendoza, M. (2017). Informe de Gestión Anual, Ejercicio económico 2017. Quito, Ecuador: EMPRESA PÚBLICA METROPOLITANA DE RASTRO. Obtenido de Obtenido de: http://www.epmrq.gob.ec/images/lotaip/informes/informe_gestion_2017.pdf
47. Metcalf, y Eddy. (2003). *Ingeniería de aguas residuales volumen 1: tratamiento vertido y reutilización*. Madrid, España: Mcgraw Hill.
48. Morales, P. (2018). Evaluación experimental del potencial de producción de biogás a partir de aguas residuales provenientes del camal metropolitano de Quito. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental*). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
49. Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos* (6ta ed.). Ciudad de México, México: Pearson Educación.
50. Ordenanza Metropolitana 0138. (2016). *Ordenanza Metropolitana 0138*. Obtenido de <http://www.quitoambiente.gob.ec/index.php/calidad-y-gestion-ambiental/normativas>

51. Orozco, P., y Sánchez, W. (2020). Biorremediación de las aguas residuales provenientes de la industria láctea a escala de laboratorio mediante el sistema Tohá. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental*). Universidad Nacional de Chimborazi, Riobamba, Ecuador.
52. OVIVO. (2021). *EIMIX® MECHANICAL SLUDGE MIXER*. Obtenido de <https://www.ovivowater.us/product/municipal/municipal-wastewater/sludge-treatment-anaerobic-digestion/digestion-mixing/eimix-mechanical-sludge-mixer/>
53. Palomo, M. (2017). Aislantes Térmicos. Criterios de Selección por Requisitos Energéticos. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Arquitecto*). Universidad Técnica de Madrid, Madrid, España.
54. Petersen products company. (2021). *Select Mechanical or Inflatable Pipe Plugs based on the below pipe ID and along with the pressure to be blocked*. Obtenido de <https://www.petersenproducts.com/PVC-s/1986.htm>
55. Power, N., y Ware, A. (2015). What is the effect of mandatory pasteurisation on the biogas transformation of solid slaughterhouse wastes? *Elsevier*, 503-512.
56. Proindserv Cia. Ltda. (2021). (a) *Transportadores de material pétreo*. Obtenido de <https://proindserv.com.ec/transportadores-material-petreo/>
57. Proindserv. Cia. Ltd. (2021). (b) *Equipos transportadores*. Obtenido de <https://proindserv.com.ec/equipos-transportadores/>

58. Ramón, J., León, J., y Castillo, N. (2015). Diseño de un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie *Eisenia foetida*. *Mutis*, 46-54.
59. Riego Ecuador. (2021). *Riego Ecuador, tubos PVC*. Obtenido de <https://www.riegoecuador.com/index.php/productos/tubo-pvc-160-mm-6-metros>
60. RMC. (2021). *Instalación de bombas centrífugas*. Obtenido de <http://rcmecuador.com/instalacion-de-bombas/>
61. Rodriguez, H. (2021). *Cálculo y Diseño de cintas transportadoras*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn84.html>
62. Romero, J. (2016). Tratamiento de aguas residuales, Teoría y principios de diseño. Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
63. Ruiz, F. (2020). Estudio de un sistema de tratamiento con base en un biofiltro utilizando lombrices *Eisenia Foetida*, para el tratamiento de efluentes provenientes de la empresa pública metropolitana de rastro EMRAQ-EP. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico*). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
64. Ruiz, S. (2011). Plan de gestión de residuos del camal del cantón Antonio Ante. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental*). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
65. Russel, D. (2012). *Tratamiento de aguas residuales, un enfoque práctico*. Barcelona, España: Editorial Reverté.

66. Salazar, P. (2005). Sistema Tohá; una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas residuales en sectores rurales. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Constructor Civil*). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
67. Secretaría del Ambiente. (2016). Normativa Técnica para el control de descargas líquidas NT002. Obtenido de: <http://www.quitoambiente.gob.ec/>
68. Senninger. (2021). *Wobbler, riego agrícola*. Obtenido de <https://www.senninger.com/es/product/wobblerr>
60. Solís, G. (2014). Diseño de un sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de Petroecuador Terminal Riobamba. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico*). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
70. Streeter, V. (2000). *Mecánica de Fluidos*. Bogotá, Colombia: McGraw Hill.
71. Suministros Industriales del Tajo, S. (2021). *Catálogos compresores*. Obtenido de <http://www.catalogo.sitasa.com/familias/compresores/2.pdf>
72. Schlegel y Kremer Industrieautomation GmbH. (2021). Properties of Technical Gas Compositions. Obtenido de: <https://www.ski-gmbh.com/swa/tools/technical-gas>
73. Tamayo, P. (2019). Diseño de una planta de tratamiento de efluentes de una industria de producción de snacks. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico*). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

74. Towler, G., y Sinnott, R. (2008). *Chemical Engineering Design, Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. California, United States: Elsevier Inc.
75. Valdez, E., y Vázquez, A. (2003). *Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de Agua Residuales*. Ciudad de México, México: Fundación ICA, A.C.
76. Varnero, M. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile, Chile: Gobierno de Chile, Ministerio de Energía.
77. Weather Spark. (2021). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Quito*. Obtenido de <https://es.weatherspark.com/y/20030/Clima-promedio-en-Quito-Ecuador-durante-todo-el-a%C3%B1o>
78. Xiomi, S. (2018). Eficiencia del método de lombrifiltro en la remoción de los contaminantes de las aguas residuales domésticas en el Distrito de Chachapoyas-Amazonas. (*Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental*). Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.

ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Información extra para determinación de los diseños de los equipos	233
ANEXO II	
Balance de masa de la planta de tratamiento	237
ANEXO III	
Evaluación económica de la planta de tratamiento de agua residuales de la EMRAQ-EP	252
ANEXO IV	
Catálogos de los equipos	261
ANEXO V	
Diagrama de Moody	266

ANEXO I

INFORMACIÓN EXTRA PARA DETERMINACIÓN DE LOS DISEÑO DE LOS EQUIPOS

En esta sección se presentan los datos requeridos para la elaboración de algunos de los cálculos a lo largo del documento.

En la Tabla AI.1 se presentan los datos obtenidos de bibliografía de densidades de sólidos retenidos en sistemas de cribaje en proyectos de tratamiento de aguas residuales similares al agua obtenida de la EMRAQ-EP.

Tabla AI.1. Densidades de sólidos retenidos en criba

Tipo de agua tratada	Densidad residuo en criba (kg/m ³)
Agua de camal (Zapotillo, Loja)	625,00
Agua de camal (Antonio Ante, Imbabura)	616,00
Promedio	620,50

(Briceño y Castillo, 2009, p. 95; Ruiz S. , 2011, p. 83)

En la Tabla AI.2 se presentan los resultados obtenidos de la investigación realizada en el 2020 por parte de Ruiz de un proceso de tratamiento para el agua residual de la EMRAQ-EP.

Tabla AI.2. Concentraciones de aceite en trampa de grasas escala laboratorio

Ensayo	DBO ₅	DQO	Aceites y Grasas	SST
	(mg/L)			
Ingreso	1 020,00	1 955,00	429,82	1 917,50
Salida	998,00	1 875,00	55,34	1 734,29
Salida	1 052,00	1 840,00	61,86	1 708,57
Salida	1 008,00	1 845,00	64,49	1 814,29

(Ruiz, 2020)

En la Figura AI.3 se presentan las propiedades químicas del biogás a una concentración de 64 % de metano.

Calculated properties			
Property	Symbol	Value	Unit
Density	ρ	0.711	kg/m ³ ▼
Standard density	ρ_n	1.171	kg/Nm ³ ▼
Relative humidity	φ	0	% ▼
Absolute humidity	x	∞	
%-Vol. H2O	rd	0	% ▼
Dew point temp.	T_{dew}	0	°C ▼
Partial steam pressure	p_s	0	atm (abs) ▼
Saturation steam pressure	p_{sat}	1	atm (abs) ▼
Molar mass	M	26.111	kg/kmol ▼
Dynamic viscosity	η	1.735e-5	Pa*s ▼
Kinematic viscosity	ν	2.442e+1	mm ² /s ▼
Adiabatic exponent	κ	1.278	
Isobaric heat capacity	c_p	1.464	J/(kg*K) ▼
Compressibility (@std. conditions)	z_n	0.99607	
Compressibility (@p,T conditions)	z	0.99844	
Specific gas constant	R	318.427	J/(kg*K) ▼
Critical temperature	T_c	-41.68	°C ▼
Critical pressure	p_c	55.278	atm (abs) ▼
Critical density	ρ_c	271.969	kg/m ³ ▼

Figura AI.1. Características químicas biogás (Schlegel y Kremer Industrieautomation GmbH, 2021)

En la Tabla AI.4 se presentan los valores de diámetro nominal en correspondencia a su diámetro interno para tuberías de cédula 40 de PVC.

PVC and CPVC Pipes - Schedule 40					
Nominal Pipe Size (inches)	Outside Diameter (inches)	Minimum Wall Thickness (inches)	Inside Diameter ⁽¹⁾ (inches)	Weight (lb/ft)	
				PVC	CPVC
1/2	0,840	0,109	0,622	0,160	0,170
3/4	1,050	0,113	0,824	0,210	0,230
1	1,315	0,133	1,049	0,320	0,340
1 1/4	1,660	0,140	1,380	0,430	0,460
1 1/2	1,900	0,145	1,610	0,510	0,550
2	2,375	0,154	2,067	0,680	0,740
2 1/2	2,875	0,203	2,469	1,070	1,180
3	3,500	0,216	3,068	1,410	1,540
4	4,500	0,237	4,026	2,010	2,200
5	5,563	0,258	5,047	2,730	
6	6,625	0,280	6,065	3,530	3,860
8	8,625	0,322	7,981	5,390	5,810
10	10,750	0,365	10,020	7,550	8,240
12	12,750	0,406	11,938	10,010	10,890
14	14,000	0,438	13,124	11,800	
16	16,000	0,500	15,000	15,430	

Figura AI.2. Diámetros nominales tubería PVC
(Petersen Products Company, 2021)

En la Figura AI.3 se presentan las propiedades físicas químicas del agua a diferentes temperaturas.

Temperatura T [°C]	Densidad ρ_{agua} [Kg/m ³]	Calor específico C_p [J/kg.K]	Viscosidad μ [Pa.s]	Tensión superficial. σ_{agua} [N/m]
0	999.8	421.76	1793x10 ⁻⁶	0.07564
5	1000.0			
10	999.7	419.21	1307x10 ⁻⁶	0.07423
15	999.1			
20	998.2	418.18	1002x10 ⁻⁶	0.07275
25	997.0			
30	995.6	417.84	797.7x10 ⁻⁶	0.07120
35	994.1			
40	992.2	417.85	653.2x10 ⁻⁶	0.06960
45	990.2			
50	988.1	418.06	547.0x10 ⁻⁶	0.06794
55	985.7			
60	983.2	418.43	466.5x10 ⁻⁶	0.06624
65	980.6			
70	977.8	418.95	404.0x10 ⁻⁶	0.06447
75	974.9			
80	971.8	419.63	354.4x10 ⁻⁶	0.06267
85				
90	965.3	420.5	314.5x10 ⁻⁶	0.06080
95				
100	958.4	421.59	281.8x10 ⁻⁶	0.05891

Figura AI.3. Propiedades físicas químicas del agua
(Mott, 2006, p. 590)

ANEXO II

BALANCE DE MASA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Para el desarrollo de los cálculos del balance de masa de todo el proceso se consideró la densidad del agua residual igual a $999,33 \text{ kg/m}^3$ y la temperatura de esta igual a $13,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperatura considerada el promedio en la ciudad de Quito (Tamayo, 2019, p 129, Weather Spark, 2021).

AII.1. BALANCE DE MASA DEL SISTEMA DE CANAL Y CRIBADO

En la Figura AII.1 se presenta el diagrama que indica el funcionamiento del sistema de cribaje para el cálculo del balance de masa.



Figura AII.1. Diagrama de funcionamiento del sistema de cribado

El sistema de tratamiento del efluente líquido de la EMRAQ-EP se diseñó para un caudal $310 \text{ m}^3/\text{d}$ que será descargado durante 8 horas al día, este flujo corresponde a la corriente M1.

$$M_1 = 310 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot 999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \frac{1[\text{d}]}{8[\text{h}]}$$

$$M_1 = 38\,724,04 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

La corriente M₃ corresponde al material que es retenido en la criba. Con la Ecuación AII.1 se determinó el volumen de los sólidos retenidos y el valor del volumen de residuos correspondiente a una abertura de barras de 2,5 cm (INEN, 1992, P. 229)

$$V_{\text{sólidos retenidos}} = V_{\text{residuos}} \cdot Q_d \quad [\text{AII.1}]$$

Donde:

$V_{\text{sólidos retenidos}}$: volumen de sólidos retenidos en la criba (L/d)

V_{residuos} : cantidad de sólidos (L/m³)

Q_d : caudal de diseño (m³/d)

$$V_{\text{sólidos retenidos}} = 0,023 \left[\frac{\text{L}}{\text{m}^3} \right] \cdot 310 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right]$$

$$V_{\text{sólidos retenidos}} = 7,13 \left[\frac{\text{L}}{\text{d}} \right]$$

Para la determinación de sólidos retenidos por la criba se transformó en masa el valor obtenido del volumen de sólidos retenidos, para ello se multiplicó el volumen por el promedio de la densidad bibliográficas de los sólidos de lodos correspondientes a residuos de criba de PTAR. L

Los valores de densidades se presentan en la Tabla AI.1.

$$M_3 = 7,13 \left[\frac{\text{L}}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{L}} \right] \cdot 1 \left[\text{d} \right]}{1\,000 \left[\text{L} \right] \cdot 8 \left[\text{h} \right]} \cdot 620,50 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$M_3 = 0,55 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

La corriente M₂ se consideró de igual tamaño que la corriente M₁ al tener una cantidad relativa baja de la corriente M₃.

$$M_2 \approx M_1$$

$$M_2 = 38\,724,04 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

AII.2. BALANCE DE MASA EN EL SISTEMA DE IGUALACION

En la Figura AII.2 se presentan las corrientes que intervienen para el funcionamiento del tanque de igualación.



Figura AII.2. Diagrama de funcionamiento del tanque de igualación

El tanque de igualación va a funcionar con una cantidad de caudal que ingresará de manera continua por 8 horas al día y repartirá dicha cantidad para las 24 horas. Por lo tanto, el tanque presentará una acumulación de líquido en su interior, con la Ecuación AII.2 se podrá calcular posteriormente el volumen del tanque de igualación por medio de un balance de masa en estado transitorio.

$$M_2 - M_4 = \frac{dM}{dt}$$

$$\frac{M_2 - M_4}{\rho_{H_2O}} = \frac{dV_{TH}}{dt}$$

$$\int_{t_0}^{t_f} \frac{M_2 - M_4}{\rho_{H_2O}} dt = \int_{V_{0TH}}^{V_{fTH}} dV_{TH}$$

$$\frac{(M_2 - M_4)}{\rho_{H_2O}} \times (t_f - t_0) = (V_{fTH} - V_{0TH}) \quad [AII.2]$$

Donde:

ρ_{H_2O} : densidad del agua residual: 999,33 (kg/m³)

- $V_{o_{TH}}$: volumen del líquido en el tanque de igualación a tiempo 0 (m^3)
 $V_{f_{TH}}$: volumen del líquido en el tanque de igualación lleno (m^3)
 t_o : tiempo de llenado inicial (h)
 t_f : tiempo de llenado final (h)

La corriente M4 se determinó con la Ecuación AII.3, donde se consideró que el tiempo de descarga del efluente será de 24 horas.

$$M_4 = \frac{Q_d \cdot 1[d]}{t_d} \cdot \rho_{H_2O} \quad [AII.3]$$

Donde:

t_d : tiempo de descarga del efluente industrial (h)

$$M_4 = 310 \left[\frac{m^3}{d} \right] \cdot \frac{1[d]}{24[h]} \cdot 999,33 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$M_4 = 12\,908,01 \left[\frac{kg}{h} \right]$$

AII.3. BALANCE DE MASA EN LA TRAMPA DE GRASAS

En la Figura AII.3 se presentan el diagrama de funcionamiento de la trampa de grasas y las corrientes que intervienen.

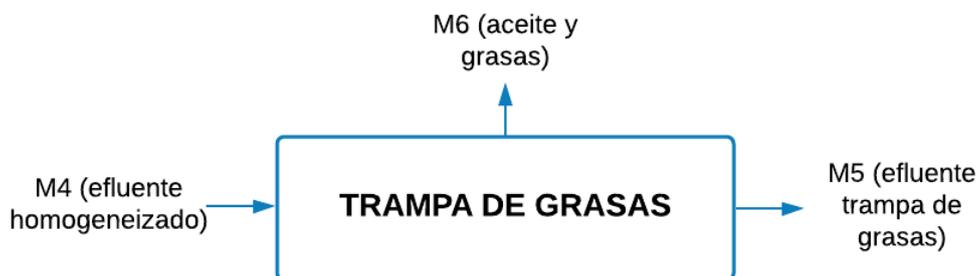


Figura AII.3. Diagrama de funcionamiento de la trampa de grasas

La corriente M6 está relacionada directamente con el porcentaje de remoción que tiene el equipo, este valor se determinó con la Ecuación AII.4 y los valores presentados en la Tabla AI.2.

$$X_{GYA} = 100 - 100 \cdot \frac{C_{\text{aceite f}}}{C_{\text{aceite o}}} \quad [\text{AII.4}]$$

Donde:

X_{GYA} : porcentaje de remoción de aceite y grasas (%)

$C_{\text{aceite o}}$: concentración inicial de aceite y grasas en el efluente (mg/L)

$C_{\text{aceite f}}$: concentración final de aceite y grasas en el efluente (mg/L)

$$X_{GYA} = 100 - 100 \cdot \frac{60,56 \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right]}{429,82 \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right]}$$

$$X_{GYA} = 85,91 [\%]$$

La corriente M6 se determinó con la Ecuación AII.5 y el valor obtenido de X_{GYA} .

$$M_6 = X_{GYA} \cdot C_{\text{aceite o}} \cdot \frac{M_4}{\rho_{H_2O}} \quad [\text{AII.5}]$$

$$\frac{M_4}{\rho_{H_2O}} = \frac{12\,908,01 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]}{999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} \cdot \frac{1\,000 [\text{L}]}{1 [\text{m}^3]} \cdot \frac{1 [\text{h}]}{3\,600 [\text{s}]}$$

$$\frac{M_4}{\rho_{H_2O}} = 3,59 \left[\frac{\text{L}}{\text{s}} \right]$$

$$M_6 = \frac{85,91 [\%]}{100 [\%]} \cdot 429,82 \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] \cdot 3,59 \left[\frac{\text{L}}{\text{s}} \right]$$

$$M_6 = 1\,324,89 \left[\frac{\text{mg}}{\text{s}} \right] = 4,77 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] = 38,16 \left[\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right]$$

El valor de la corriente M5 se lo obtuvo de la diferencia entre el flujo que ingresa a la trampa de grasas y la cantidad masa de aceite y grasas retenidos (Ecuación AII.6) como se observa en la Figura AII.3.

$$M_5 = M_4 - M_6 \quad [\text{AII.6}]$$

$$M_5 = 12\,908,01 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] - 4,77 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

$$M_5 = 12\,903,24 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

La determinación de la masa de sólidos suspendidos totales en la trampa de grasas ($M_{5\text{ SST}}$) se lo realizó con la concentración obtenida de los datos resultantes de la trampa de grasa diseñada a escala laboratorio de Ruiz (2020) presentados en la Tabla AI.2 y la Ecuación AII.7.

$$M_{5\text{ SST}} = C_{5\text{ SST}} \cdot Q_5 \quad [\text{AII.7}]$$

Donde:

$C_{5\text{ SST}}$: concentración de sólidos suspendidos totales del flujo de salida de la trampa de grasas (mg/L)

Q_5 : caudal del efluente de salida de la trampa de grasas (mg/L)

$$M_{5\text{ SST}} = 1\,752,50 \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] \cdot \frac{1[\text{kg}]}{1 \times 10^6 [\text{mg}]} \cdot 12\,903,24 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot \frac{1}{999,33 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \times \frac{1[\text{m}^3]}{1\,000[\text{L}]}}$$

$$M_{5\text{ SST}} = 22,63 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

AII.4. BALANCE DE MASAS EN EL VERMIFILTRO

La determinación de los flujos másicos que intervienen en el vermifiltro se lo obtiene a partir de la cantidad de humus por las lombrices al momento del consumo de la

carga orgánica presente. Según Salazar (2005, p.64), la materia orgánica que se transforma en humus corresponde al 60 % de los sólidos que se quedan en el filtro biológico. En la Figura AII.4 se presentan el diagrama de funcionamiento del vermifiltro y sus corrientes de flujos.

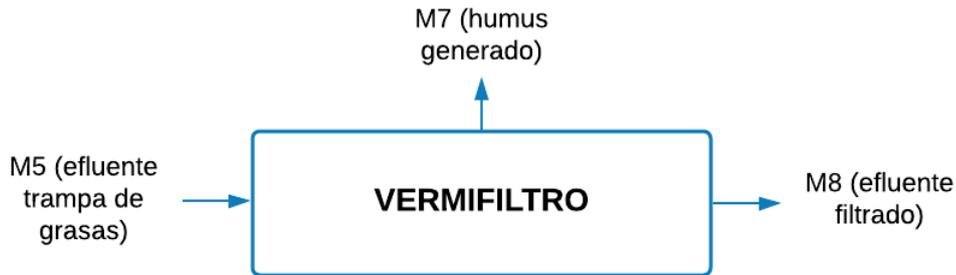


Figura AII.4. Diagrama de funcionamiento del vermifiltro

Para conocer la cantidad de humus generado se calculó el flujo másico de sólidos suspendidos en el vermifiltro ($M_{8\text{ SST}}$), se asume que el caudal diario de efluente que ingresa a vermifiltro es el mismo que el caudal de salida y para su determinación se utilizó la Ecuación AII.8.

$$M_{8\text{ SST}} = C_{5\text{ SST}} \cdot Q_8 \quad [\text{AII.8}]$$

Donde:

$C_{8\text{ SST}}$ concentración de sólidos suspendidos totales del flujo de salida del vermifiltro (mg/L)

Q_8 caudal del efluente de salida del vermifiltro (mg/L)

$$M_{8\text{ SST}} = 67,8 \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] \cdot \frac{1[\text{kg}]}{1 \times 10^6 [\text{mg}]} \cdot 309,885 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot \frac{1\,000[\text{L}]}{1[\text{m}^3]} \cdot \frac{1[\text{d}]}{24[\text{h}]}$$

$$M_{8\text{ SST}} = 0,88 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

La cantidad de sólidos suspendidos totales de la corriente M7 se lo determinó con la Ecuación AII.9

$$M_{7 \text{ SST}} = M_{5 \text{ SST}} - M_{8 \text{ SST}} \quad [\text{AII.9}]$$

$$M_{7 \text{ SST}} = 22,63 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] - 0,88 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

$$M_{7 \text{ SST}} = 21,75 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

Al conocer la cantidad de sólidos suspendidos en la corriente M7 se determinó su valor con la Ecuación AII.10.

$$M_7 = M_{7 \text{ SST}} \cdot 0,6 \quad [\text{AII.10}]$$

$$M_7 = 21,75 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot 0,6$$

$$M_7 = 13,05 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

La corriente M8 se determinó entre la diferencia de la corriente que ingresa al vermifiltro y la masa de humus que se genera (Ecuación AII.11).

$$M_8 = M_5 - M_7 \quad [\text{AII.11}]$$

$$M_8 = 12\,903,24 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] - 13,05 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

$$M_8 = 12\,890,19 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

AII.5. DETERMINACION DE LA CANTIDAD RESIDUOS SÓLIDOS

Para la determinación de la capacidad que deberá tener la planta de tratamiento de lodos se estimó que para que exista una descarga diaria de 620 m³/d de agua

residual se debieron haber faenado 16 882 animales según los datos entregados por la EMRAQ-EP en su INFORME DE GESTION 2019. En la Tabla 3.12 se presentan las cantidades faenadas en ese año.

La relación de consumo por tipo de animal faenado (bovino, porcino y ovino) en la empresa de rastro es, por un bovino consumido se consumen 1,24 porcinos y 0,28 ovinos (EMRAQ-EP, 2019, p. 8). Por lo tanto, se presenta el ejemplo de cálculo con la Ecuación All.12 que se realizó para estimar la cantidad de residuos sólidos que se obtendrán de los animales faenados por mes cuando existe una generación de agua residual de 620 m³/d.

$$\text{cantidad bovinos} = \text{cantidad total animales} \cdot \frac{\text{cantidad residuos bovino}}{\text{cantidad residuos total}} \quad [\text{All.12}]$$

$$\text{cantidad bovinos} = 16\ 882 \left[\frac{\text{UND}}{\text{mes}} \right] \cdot \frac{1}{1,00+1,24+0,28}$$

$$\text{cantidad bovinos} = 6\ 700 \left[\frac{\text{UND}}{\text{mes}} \right]$$

Con el valor de la cantidad de bovino estimados y la relación existente entre las especies se determinó las cantidades de porcinos y ovinos que se faenaran. En la Tabla All.1 se presentan los valores calculados.

Tabla All.1. Resumen de especies faenadas por mes

Especie faenada	Cantidad (und/mes)
Bovino	6 700
Porcino	8 316
Ovino	1 866

Con los valores de la Tabla 3.12. y la Tabla All.1 se determinó la cantidad de residuos generado por especie por medio de la Ecuación All.13

$$M_{\text{residuo ESPECIE}} = \text{cantidad}_{\text{ESPECIE}} \cdot R_{\text{residuo-animal}} \quad [\text{All.13}]$$

Donde:

$M_{\text{residuo ESPECIE}}$: masa del residuo según la especie (kg/mes)

$\text{cantidad}_{\text{ESPECIE}}$: cantidad de animales según la especie (UND)

$R_{\text{residuo-animal}}$: relación masa-cantidad ((kg/mes)/ UND)

La determinación de la masa total de residuos generados por la especie bovina se muestra a continuación.

$$M_{\text{estiércol bovino}} = 6\,700 \left[\frac{\text{animal}}{\text{mes}} \right] \cdot 5 \left[\frac{\text{kg}}{\text{animal}} \right]$$

$$M_{\text{estiércol bovino}} = 33\,500 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right]$$

$$M_{\text{ruminal bovino}} = 6\,700 \left[\frac{\text{animal}}{\text{mes}} \right] \cdot 23,81 \left[\frac{\text{kg}}{\text{animal}} \right]$$

$$M_{\text{ruminal bovino}} = 159\,527 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right]$$

$$M_{\text{decomisos bovino}} = 6\,700 \left[\frac{\text{animal}}{\text{mes}} \right] \cdot 0,41 \left[\frac{\text{kg}}{\text{animal}} \right]$$

$$M_{\text{decomisos bovino}} = 2\,747 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right]$$

La determinación de la masa total de residuos generados por la especie porcina se muestra a continuación.

$$M_{\text{estiércol porcino}} = 8\,316 \left[\frac{\text{animal}}{\text{mes}} \right] \cdot 5 \left[\frac{\text{kg}}{\text{animal}} \right]$$

$$M_{\text{estiércol porcino}} = 41\,580 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right]$$

$$M_{\text{ruminal porcino}} = 8\,316 \left[\frac{\text{animal}}{\text{mes}} \right] \times 23,81 \left[\frac{\text{kg}}{\text{animal}} \right]$$

$$M_{\text{ruminal porcino}} = 19\,8003,96 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right]$$

$$M_{\text{decomisos porcino}} = 8\,316 \left[\frac{\text{animal}}{\text{mes}} \right] \times 0,41 \left[\frac{\text{kg}}{\text{animal}} \right]$$

$$M_{\text{decomisos porcino}} = 3\,409,56 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right]$$

La determinación de la masa total de residuos generados por la especie ovina se muestra a continuación.

$$M_{\text{estiércol ovino}} = 1\,866 \left[\frac{\text{animal}}{\text{mes}} \right] \cdot 5 \left[\frac{\text{kg}}{\text{animal}} \right]$$

$$M_{\text{estiércol ovino}} = 9\,330 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right]$$

$$M_{\text{ruminal ovino}} = 1\,866 \left[\frac{\text{animal}}{\text{mes}} \right] \cdot 23,81 \left[\frac{\text{kg}}{\text{animal}} \right]$$

$$M_{\text{ruminal ovino}} = 44\,429,46 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right]$$

$$M_{\text{decomisos ovino}} = 1\,866 \left[\frac{\text{animal}}{\text{mes}} \right] \cdot 0,41 \left[\frac{\text{kg}}{\text{animal}} \right]$$

$$M_{\text{decomisos ovino}} = 768,06 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right]$$

La sumatoria de todas las masas de los residuos generados, dio como resultado la masa total de sólidos estimados que generará la EMRAQ-EP.

$$M_{\text{total RS}} = 33\,500,00 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right] + 15\,9527,00 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right] + 2\,747,00 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right] + 41\,580,00 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right] +$$

$$19\,8003,96 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right] + 3\,409,56 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right] + 9\,330 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right] + 44\,429,46 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right] + 768,06 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right]$$

$$M_{\text{RS animales}} = 493\,292,04 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right]$$

La PTAR no solo tratará los residuos sólidos obtenidos del proceso de faenamiento, si no que, se añadirán los residuos retenidos en la rejilla (M_3) y en la trampa de grasas (M_6). Para la determinación de la cantidad de residuos sólidos que va a tratar la planta de lodos se utilizó la Ecuación All.14.

$$M_{\text{RS TOTAL}} = M_{\text{RS animales}} + M_3 + M_6 \quad [\text{All.14}]$$

$$M_{\text{RS TOTAL}} = 493\,292,04 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right] \cdot \frac{1[\text{mes}]}{30[\text{d}]} + 1,08 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot \frac{8[\text{h}]}{1[\text{d}]} + 76,31 \left[\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right]$$

$$M_{\text{RS TOTAL}} = 16\,528,07 \left[\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right]$$

AIL.6. BALANCE DE MASA EN LOS TANQUES DE RECOLECCION Y TRITURACION

El tanque de recolección de sólidos y el tanque de la trituración tendrán el mismo balance de masa, en la Figura All.5 y Figura All.6 se presentan los diagramas de funcionamiento que tendrán los dos tanques de almacenamiento.



Figura AII.5. Diagrama de funcionamiento del tanque de recolección de sólidos



Figura AII.6. Diagrama de funcionamiento del tanque trituración

Como los dos tanques son de almacenamiento temporal de los sólidos recolectados y triturados al inicio del proceso de tratamiento de sólidos, estos flujos van a ser iguales.

$$M_{RS \text{ TOTAL}} = M_9 = M_{10}$$

$$M_9 = M_{10} = 16\,528,07 \left[\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right]$$

$$M_9 = M_{10} = 688,67 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

AII.7. BALANCE DE MASA EN EL TANQUE DE PASTEURIZACION

En la se presenta el diagrama de funcionamiento en el tanque de pasteurización.

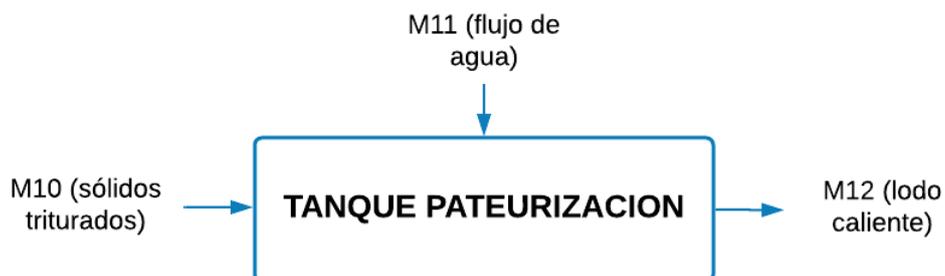


Figura AII.7. Flujos en el tanque de pasteurización

Para la determinación de la masa de agua que ingresará al tanque de pasteurización se utilizará la Ecuación AII.15, la cual indica que por 1 kg de lodo que ingrese al tanque ingresarán 2 kg de agua. Esta relación se estableció de los

resultados obtenidos por Benavides (2020, p. 59) para obtener la mayor cantidad de biogás en el proceso siguiente.

$$M_{11} = M_{10} \cdot 2 \quad [\text{All.15}]$$

$$M_{11} = 1\,377,34 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

La corriente M12 es la suma de las corrientes M11 y M10, con la Ecuación All.16 se determinó su valor.

$$M_{12} = M_{10} + M_{11} \quad [\text{All.16}]$$

$$M_{12} = 688,67 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] + 1\,377,34 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

$$M_{12} = 2\,066,01 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

AII.8. BALANCE DE MASA EN EL BIODIGESTOR ANAEROBIO

El lodo obtenido de la mezcla realizada en el tanque de pasteurización fue trasladada al tanque de biodigestión anaerobia, para la obtención del biogás en función de la materia orgánica generada en el EMARAQ-EP. En la Figura AII.8 se presentan los flujos del biodigestor anaerobio.

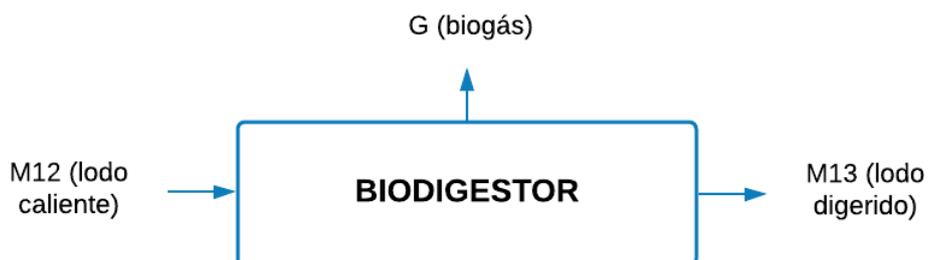


Figura AII.8. Flujos en el biodigestor anaerobio

El volumen generado de biogás en el biodigestor se lo calculó en la sección 4.3.8.5, la determinación de la corriente volumétrica de biogás (G) se lo determinó con la Ecuación AII.17. Se consideró la densidad del biogás es 0,71 kg/m³ para una concentración volumétrica del 64 % de metano (Schlegel y Kremer Industrieautomation GmbH, 2021), todas las características físicas y químicas del biogás a trabajar se presentan en la Figura AI.1.

$$G = V_b \cdot \rho_b$$

Donde:

G : flujo másico biogás (kg/m³)

V_b : flujo volumétrico de biogás (m³/d)

ρ_b : densidad de biogás (kg/m³)

$$G = 436,89 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot 0,71 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$G = 310,19 \left[\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right]$$

$$G = 12,93 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

El lodo digerido se lo obtuvo de la diferencia entre la cantidad de biogás generado y la masa de lodo caliente que ingresa al equipo por medio de la Ecuación AII.17.

$$M_{13} = M_{12} - G \quad \text{[AII.17]}$$

$$M_{13} = 2\,066,01 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] - 12,93 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

$$M_{13} = 2\,053,08 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

ANEXO III

EVALUACION ECONÓMICA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES DE LA EMRAQ-EP

En esta sección se tabulan los costos de cada rubro contemplado para la ejecución de la planta de tratamiento de aguas residuales. Los costos de implementación de los equipos se establecieron como el 20 % del costo total del rubro, acatando el rango entre 20 – 50 % sugerido por (Towler y Sinnott, 2008). Dentro del costo de implementación se consideran aquellas actividades complementarias a el desarrollo del proyecto. En la Tabla AIII.1 se detalla los costos relacionados al cerramiento total del terreno, considerando su área de 3 920 m².

Tabla AIII.1. Costos del cerramiento total del terreno

Ítem	Descripción	Precio unitario (USD/m ²)	Cantidad (m ²)	Costo total (USD)
Malla de cerramiento	Alambre galvanizado, con marcos y estructuras de tubo galvanizado redondo de 2 in, 1,5 mm espesor 272,00 m x 2,50 m = 750 m ² . incluye bordillo de hormigón armado	35,00	680	23 800,00

(CORFIM S.A., 2021)

En la Tabla AIII.2 se detallan los costos para el replanteo de vías de acceso e interiores. Los costos relacionados a la casa de control y guardianía se desglosan en la Tabla AIII.3.

Tabla AIII.2. Costos para el replanteo de vías de acceso e interiores

Ítem	Precio unitario (USD/m ³)	Cantidad (m ³)	Costo (USD)
Excavación, relleno y compactación de vías para vehículos	24,00	1 100	26 400,00
Construcción de bordillos de origen simple	17,00	420	7 140,00

Tabla AIII.2. Costos para el replanteo de vías de acceso e interiores (**continuación...**)

Instalación de adoquines en las vías peatonales	18,66	620	11 569,20
Pavimento de aceras peatonales	26,25	340	8 925,00
Total			54 034,20

(CORFIM S.A., 2021)

Tabla AIII.3. Costos de la casa de control y guardianía

Ítem	Precio unitario (USD/m3)	Cantidad (m3)	Costo (USD)
Construcción de casa de control, con cimentación de hormigón armado	245,00	9,00	2 205,00
Columnas y vigas de hormigón armado, paredes con bloques de cemento cubierta con estructura metálica y techo de galpón	153,96	2,60	400,30
Construcción de casa de guardia, con cimentación de hormigón armado	245,00	64,00	15 680,00
Total			18 285,30

(CORFIM S.A., 2021)

El desglose de los costos relacionados a la construcción del sistema de cribado se observa en la Tabla AIII.4.

Tabla AIII.4. Costo del sistema de cribado

Ítem	Precio unitario (USD/m3)	Cantidad (m3)	Costo (USD)
Construcción del sistema de cribado	297,00	2,18	647,46
Implementación (20 %)			129,49
Total			776,95

(CORFIM S.A., 2021)

En la Tabla AIII.5 se especifican los costos de la instalación de bombas centrífugas hacia el tanque de igualación.

Tabla AIII.5. Costos de la instalación de bombas centrífugas hacia el tanque de igualación

Ítem	Precio unitario (USD)	Cantidad (und)	Costo (USD)
Bomba centrífuga de 1 kW (con bomba de alterna)	165,00	4	660,00
Instalación de 2 bombas por sistema	245,00	2	490,00
Sistema de instalaciones eléctricas	489,00	2	978,00
Costo de instalación del sistema de bombeo	247,00	2	494,00
Total			2 622,00

(RMC, 2021)

En la Tabla AIII.6 se encuentra los costos de la construcción del tanque de igualación.

Tabla AIII.6. Costos de la construcción del tanque de igualación

Ítem	Precio unitario	Cantidad	Costo (USD)
Replanteo del tanque en terreno, excavación, relleno y compactado	189,00 USD/m ²	21,60 m ²	4 082,40
Construcción piso hormigón armado 6,00 m x 6,00 m x 0.30 m espesor	254,00 USD/m ²	21,60 m ²	5 486,40
Tanque de acero inoxidable código AISI 316	81.100,00 USD/und	2,00 und	162 200,00
Agitador	580,00 USD/und	2,00 und	1 160,00
Subtotal			172 928,80
Implementación (20 %)			34 585,76
Total			207 514,56

(FAMIT, 2021)

En la Tabla AIII.7 se detallan los costos de la construcción de trampa de grasas.

Tabla AIII.7. Costos de la construcción de trampa de grasas

Ítem	Precio unitario	Cantidad	Costo (USD)
Trampa de grasa de hormigón armado	248,00 USD/m ³	6,32 m ³	1 567,36
Implementación (20 %)			313,47
Total			1 880,83

(CORFIM S.A., 2021)

La Tabla AIII.8 detalla los costos del sistema de bombeo hacia los vermifiltros.

Tabla AIII.8. Costos del sistema de bombeo hacia las piscinas

Ítem	Precio unitario (USD/und)	Cantidad (und)	Costo (USD)
Bomba centrífuga de 0,37 kW (con bomba de alterna)	61,00	4,00	244,00
Instalación de 2 bombas centrífugas	245,00	2,00	490,00
Sistema de instalaciones eléctricas	489,00	2,00	978,00
Costo de instalación del sistema de bombeo	247,00	2,00	494,00
Total			2.206,00

(RMC, 2021)

Los costos para la construcción de los vermifiltros se observan en la Tabla AIII.9.

Tabla AIII.9. Costos para la construcción de los vermifiltros

Ítem	Precio unitario	Cantidad	Costo (USD)
Replanteo de filtros en terreno, excavación, relleno y compactado	148,00 USD/m ²	558,00 m ²	82 584,00
Construcción piso hormigón armado 348,92 x 0,30 m espesor	245,00 USD/m ²	209,34 m ²	51 288,30
Filtro de hormigón armado	1 544,00 USD/m ³	683,20 m ³	1 054.860,80
Puente peatonal de revisión, con estructura metálica galvanizada	358,00 USD/m ³	48,80 m ³	17 470,40
Relleno con piedra, 172.00 m ³ (25 %)	19,00 USD/m ³	344,00 m ³	6 536,00
Relleno con grava, 172.00 m ³ (25 %)	19,00 USD/m ³	344,00 m ³	6 536,00
Relleno con arena, 172.00 m ³ (25 %)	12,00 USD/m ³	344,00 m ³	4 128,00
Relleno con cascarilla/lombrices, 172.00 m ³ (25%)	24,00 USD/m ³	344,00 m ³	8 256,00
Sistema de aspersores de agua (36 por sistema)	2 724,00 USD/und	2,00 und	5 448,00
Sistemas de tubos ventilación, con tubos PVC 2 in. diámetro	978,00 USD/und	2,00 und	1 956,00

Tabla AIII.9. Costos para la construcción de los vermifiltros (continuación...)

Sistema de tuberías y válvulas para 4 bombas centrífugas	1 200,00 USD/und	2,00 und	2 400,00
Estructura metálica de cubierta de filtro, con perfiles estructurales	645,00 USD/m ³	683,20 und	440 664,00
Subtotal			1 682 127,50
Implementación (20 %)			336 425,50
Total			2 018 553,00

(CORFIM S.A., 2021; Filtros del litoral, 2021)

En la Tabla AIII.10 se especifican los costos de la construcción del tanque de recolección y En la Tabla AIII.11 se desglosan los costos de la banda transportadora.

Tabla AIII.10. Costos de la construcción del tanque de recolección

Ítem	Precio unitario	Cantidad	Costo (USD)
Replanteo del tanque en terreno, excavación, relleno y compactado	189,00 USD/m ²	10,80 m ²	2 041,20
construcción piso hormigón armado 6,00 m x 6,00 m x 0.30 m espesor	254,00 USD/m ²	10,80 m ²	2 743,20
Tanque de acero inoxidable Código AISI 316	53 250,00 USD/und	1,00 und	53 250,00
Subtotal			58 034,40
Implementación (20 %)			11 606,88
Total			69 641,28

(FAMIT, 2021)

Tabla AIII.11. Costos de la banda transportadora

Ítem	Precio unitario (USD/und)	Cantidad (und)	Costo (USD)
Sistema de banda transportadora	3 220,00	1,00	3 220,00
Motor eléctrico	21 200,00	1,00	21 200,00
Costo de instalación del sist. banda	789,00	1,00	789,00
Total			25 209,00

(DISMET, 2021)

En la Tabla AIII.12 se detallan los costos de la construcción del tanque de trituración.

Tabla AIII.12. Costos de la construcción del tanque de trituración

Ítem	Precio unitario	Cantidad	Costo (USD)
Replanteo del tanque en terreno, excavación, relleno y compactado	189,00 USD/m ²	7,50 m ²	1 417,50
Construcción piso hormigón armado 5.00 m x 5.00 m x 0.30 m espesor	254,00 USD/m ²	7,50 m ²	1 905,00
Tanque de acero inoxidable código AISI 316	53 250,00 USD/und	1,00 und	53 250,00
Triturador eléctrico	12 000,00 USD/und	1,00 und	12 000,00
Costo de instalación del sistema de trituración	789,00 USD/und	1,00 und	789,00
Subtotal			69 361,50
Implementación (20 %)			13 872,30
Total			83 233,80

(FAMIT, 2021; Haarslev, 2021)

En la Tabla AIII.13 se encuentran los costos de construcción de un tornillo sin fin.

Tabla AIII.13. Costos de construcción de un tornillo sin fin

Ítem	Precio unitario	Cantidad	Costo (USD)
Construcción de sistema metalmecánico de camisa metálica (tubo)	4 890,00 USD/und	1,00 und	4 890,00
Construcción del tornillo sin fin	4 890,00 USD/und	1,00 und	4 890,00
Motor eléctrico para el sistema	4 200,00 USD/und	1,00 und	4 200,00
Costo de instalación del sistema de tornillo sin fin	1 200,00 USD/und	1,00 und	1 200,00
Total			15 180,00

(DISMET, 2021)

Los costos para la construcción del tanque de pasteurización se desglosan en la Tabla AIII.14.

Tabla AIII.14. Costos para la construcción del tanque de pasteurización

Ítem	Precio unitario	Cantidad	Costo (USD)
Replanteo del tanque en terreno, excavación, relleno y compactado	189,00 USD/m ²	2,70 m ²	510,30
Construcción piso hormigón armado 3.00 m x 3.00 m x 0.30 m espesor	254,00 USD/m ²	2,70 m ²	685,80
Tanque de acero inoxidable código AISI 316	31.880,00 USD/und	1,00 und	31 880,00
Sistema para calentamiento intercambiador de calor	2.400,00 USD/und	1,00 und	2 400,00
Agitador	180,00 USD/und	1,00 und	180,00
Subtotal			35 656,10
Implementación (20 %)			7 131,22
Total			42 787,32

(FAMIT, 2021)

En la Tabla AIII.15 se especifican los costos para la instalación de las bombas centrífugas hacia el biodigestor anaeróbico.

Tabla AIII.15. Costos para la instalación de las bombas centrífugas hacia el biodigestor anaeróbico

Ítem	Precio unitario (USD/und)	Cantidad (und)	Costo (USD)
Bomba centrífuga de 15 kW (con bomba de alterna)	2473,00	2,00	4 946,00
Instalación de bombas centrífugas	245,00	2,00	490,00
Sistema de instalaciones eléctricas	489,00	2,00	978,00
Costo de instalación del sistema de bombeo	247,00	2,00	494,00
Total			6 908,00

(RMC, 2021)

Los costos de instalación de las bombas de lodos se especifican en la Tabla AIII.16.

Tabla AIII.16. Costos de instalación de las bombas de lodos

Ítem	Precio unitario (USD/und)	Cantidad (und)	Costo (USD)
Bomba centrífuga de 0,37 kW (con bomba de alterna)	359,15	2,00	718,30
Instalación de bombas centrífugas	245,00	2,00	490,00
Sistema de instalaciones eléctricas	489,00	2,00	978,00
Costo de instalación del sistema de bombeo	247,00	2,00	494,00
Total			2 608,30

(RMC, 2021)

En la Tabla AIII.17 se detallan los costos para la construcción del tanque biodigestor anaeróbico.

Tabla AIII.17. Costos para la construcción del tanque biodigestor anaeróbico

Ítem	Precio unitario	Cantidad	Costo (USD)
Construcción piso hormigón armado 16.00 m x 16.00 m x 0.30 m espesor	345,00 USD/m ²	76,80 m ²	26 496,00
Tanque de hormigón armado (calculado como muro de contención)	856,00 USD/m ²	162,00 m ²	138 672,00
Construcción de sistema estructural de cerchas metálicas con perfiles	840,00 USD/m ²	145,00 m ²	121 800,00
Construcción tapa de acero inoxidable código AISI 316	581,00 USD/m ²	145,00 m ²	84 245,00
Sistema para calentamiento intercambiador de calor	7.200,00 USD/und	1,00 und	7 200,00
Agitador por aspiración	2.887,00 USD/und	5,00 und	14 435,00
Subtotal			392 848,00
Implementación (20 %)			78 569,60
Total			471 418,00

(FAMIT, 2021)

En la Tabla AIII.18 se muestran los costos del sistema de bombeo de biogás desde el biodigestor anaeróbico.

Tabla AIII.18. Costos del sistema de bombeo de biogás desde el biodigestor anaeróbico

Ítem	Precio unitario (USD/und)	Cantidad (und)	Costo (USD)
Compresor 50 HP	4.166,00	1,00	4 166,00
Instalación de compresor	245,00	1,00	245,00
Sistema de instalaciones eléctricas	489,00	2,00	978,00
Costo de instalación del sistema de bombeo	247,00	2,00	494,00
Subtotal			5 883,00
Implementación (20 %)			1 176,60
Total			7 059,60

(RMC, 2021)

Los valores de los precios de los diferentes rubros para cada equipo fueron obtenidos por la cotización a diferentes empresas, se buscó empresas cercanas a Quito para eliminar costos por transporte o importación. La implementación del costo total fue aplicada para todos los equipos que serán construidos in situ, puesto que, requerirán de visitas de verificación y mantenimiento por parte de los proveedores.

ANEXO IV

CATÁLOGO DE LOS EQUIPOS

AIV.1. COTIZACION Y CARACTERÍSTICAS DE LOS TANQUES DE LA PTAR

En la Figura AIV.1 se presenta la cotización entregada por parte de la empresa FAMIT donde se encuentran los precios ofrecidos para la construcción de los diversos tanques que van en la planta de tratamiento.

DESCRIPCIÓN		CANT.	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
FABRICACIÓN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE AGUA Y GAS EN ACERO INOXIDABLE AISI 316				
Incluye: Fabricación de Tanque #1 horizontal en acero inoxidable AISI 316 de 4520 [mm] de diámetro * 3570 [mm] de largo.Capacidad:62,11m3				
	1	81.100,00	81.100,00	
Incluye: Fabricación de Tanque #2 horizontal en acero inoxidable AISI 316 de 3230 [mm] de diámetro * 3230 [mm] de largo.Capacidad:26,35m3				
	1	33.250,00	33.250,00	
Incluye: Fabricación de Tanque #3 enchapeado con tapa horizontal en acero inoxidable 316 de 1980 [mm] de diámetro * 1650 [mm] de largo.Capacidad:3,53m3				
	1	31.880,00	31.880,00	
Incluye: Fabricación de Tanque #4 horizontal en acero inoxidable 316 para almacenamiento de gas de 4520 [mm] de diámetro * 22000 [mm] de largo.Capacidad:432m3				
	1	333.321,14	333.321,14	
Soldadores calificados para proceso SMAW y GTAW				
				-
Dossier de calidad y placa de identificación				
				-
No incluye instalación				
				-
Gracias por su confianza			SUBTOTAL	519.551,14
Observaciones:Estos valores son referenciales			IVA 12%	62.346,14
			TOTAL	\$ 581.897,28
Tiempo de ejecución del proyecto: TK#1,#2,#3 (90) días laborales, TK#4 (120) días laborales				
Tiempo de garantía:12 meses por defectos de fabricación				
Forma de pago: 50% anticipo , 50% contra entrega				
Somos una Empresa con 30 años de Experiencia, dedicada al Diseño y Fabricación de Estructuras Metálicas, Tanques de Almacenamiento, Tuberías Industriales y Carpintería Metálica. Ofrecemos Servicios de Torno y Fresadora, Mantenimiento Industrial, Proyectos de Ingeniería Civil, Eléctricos, Automatización y Control.				
Atentamente,				
				
Julio Patricio Tufiño R. GERENTE GENERAL				
www.famit.com.ec				

Figura AIV.1 Cotización tanque de la PTAR
(FAMIT, 2021)

AIV.2. CATÁLOGO PARA SELECCIÓN DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

En la Figura AIV.2 se presenta la tabla donde se seleccionó las diferentes bombas que se utilizaron en la PTAR.

I Dimensiones

	kW	Motor	DN ₁	DN ₂	A	B	C	D	E	F	G	H	I	ØJ	kg
HCP 40-110															
	0,37 ⁽¹⁾	71	50	40	39	445	53	130	203	119	250	112	340	230	18
	0,55	71	50	40	39	445	53	130	203	119	250	112	340	230	18
	0,75	80	50	40	39	520	53	130	217	140	275	132	395	290	26,5
HCP 40-150															
	0,75 ⁽¹⁾	80	50	40	46,5	545	76	140	217	165	275	132	395	290	30
	1,1	80	50	40	46,5	545	76	140	217	165	275	132	395	290	29
	1,5	90	50	40	46,5	545	76	140	227	171	275	132	405	290	33
	2,2	90	50	40	46,5	545	76	140	227	171	275	132	405	290	35,5
HCP 40-205															
	1,5 ⁽¹⁾	90	50	40	45	545	109	175	227	171	275	132	405	290	43,5
	2,2	90	50	40	45	545	109	175	227	171	275	132	405	290	42
	3	100	50	40	45	623	109	175	266	169	325	175	475	350	53
	4	112	50	40	45	623	109	175	278	175	325	175	487	350	60
	5,5	112	50	40	45	623	109	175	278	175	325	175	487	350	66
	5,5	132	50	40	45	770	109	175	293	199	375	216	526	400	78,5
	7,5	132	50	40	45	770	109	175	293	199	375	216	526	400	87
	11	132	50	40	45	770	109	175	293	199	375	216	526	400	100
HCP 50-150															
	0,75 ⁽¹⁾	80	65	50	56	546	72	170	217	166	275	132	395	290	30,5
	1,5	90	65	50	56	546	72	170	227	172	275	132	405	290	33
	2,2	90	65	50	56	546	72	170	227	172	275	132	405	290	36
	3	100	65	50	56	624	72	170	266	170	325	175	475	350	47,5
	4	112	65	50	56	624	72	170	278	176	325	175	487	350	54,5
HCP 50-190															
	1,5 ⁽¹⁾	90	65	50	59	548	105	210	227	174	275	132	405	290	43,5
	3	100	65	50	59	628	105	210	266	172	325	175	475	350	52,5
	4	112	65	50	59	628	105	210	278	178	325	175	487	350	59,5
	5,5	112	65	50	59	628	105	210	278	178	325	175	487	350	65,5
	5,5	132	65	50	59	773	105	210	293	202	375	216	526	400	78
	7,5	132	65	50	59	773	105	210	293	202	375	216	526	400	87
HCP 50-260															
	5,5 ⁽¹⁾	132	65	50	72	809	148	250	293	238	375	216	526	400	97
	7,5	132	65	50	72	809	148	250	293	238	375	216	526	400	102
	11	132	65	50	72	809	148	250	293	238	375	216	526	400	115
	11	160	65	50	72	1024	148	250	367	283	475	267	642	465	149
	15	160	65	50	72	1024	148	250	367	283	475	267	642	465	169
	18,5	160	65	50	72	1024	148	250	367	283	475	267	642	465	186
	22	180	65	50	72	1024	148	250	387	324,5	475	267	662	465	233
HCP 65-175															
	3 ⁽¹⁾	100	80	65	72	655	98	200	266	201	325	175	475	350	60,5
	4	112	80	65	72	655	98	200	278	207	325	175	487	350	62,5
	5,5	112	80	65	72	655	98	200	278	207	325	175	487	350	68,5
	5,5	132	80	65	72	802	98	200	293	231	375	216	526	400	81
	7,5	132	80	65	72	802	98	200	293	231	375	216	526	400	90

(1) Motor de 4 polos



Información orientativa. Reservándonos el derecho de modificar cualquier material o características sin previo aviso.
Fotos no contractuales. Para más información consulte nuestra página web. www.inoxpa.com

Figura AIV.2. Catálogo para selección de bombas centrífugas (INOXPA, 2021)

En la Figura AIV.3 se presenta la tabla donde se seleccionó la bomba para lodos que se utilizó en la PTAR.

CURVA / CURVE / COURBE																							
Modelo Model Modèle	Cod.	P2		I (A)			Ø		Altura manométrica / Head / Hauteur (m)														
		kW	CV	1 - 230V	3 - 230V	3 - 400V	Asp	Imp	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80	
NIZA 4.2 M	7584	0,26	0,35	2,4	-	-	1"	1"	4000	3300	1200												
NIZA 4.3 M	7586	0,37	0,5	3,3	-	-	1"	1"	4500	3800	3400	2500	1600										
NIZA 4.4 M	7588	0,55	0,75	3,9	-	-	1"	1"	4800	4200	4000	3500	2800	2100	300								
NIZA 4.5 M	7602	0,75	1	5,0	-	-	1"	1"	5000	4500	4200	3800	3300	2800	2200	1600	500						
NIZA 4.5 T	7603	0,75	1	-	3,3	1,9	1"	1"	5000	4500	4200	3800	3300	2800	2200	1600	500						
NIZA 6.3 M	7604	0,6	0,8	4,0	-	-	1"	1"	5500	5100	4600	3900	2800	1000									
NIZA 6.3 T	7605	0,6	0,8	-	2,8	1,6	1"	1"	5500	5100	4600	3900	2800	1000									
NIZA 6.4 M	7590	0,75	1	4,6	-	-	1"	1"	5700	5400	5000	4600	4200	3800	3000	1500							
NIZA 6.4 T	7591	0,75	1	-	3,4	2,0	1"	1"	5700	5400	5000	4600	4200	3800	3000	1500							
NIZA 6.5 M	7592	0,96	1,3	6,0	-	-	1"	1"	6000	5700	5400	5100	4800	4400	4100	3400	2700	1200					
NIZA 6.5 T	7593	0,96	1,3	-	4,1	2,4	1"	1"	6000	5700	5400	5100	4800	4400	4100	3400	2700	1200					
NIZA 6.6 M	7606	1,1	1,5	7,0	-	-	1"	1"	6200	6000	5800	5500	5200	4800	4400	4000	3600	3200	2500	1400			
NIZA 6.6 T	7607	1,1	1,5	-	4,8	2,8	1"	1"	6200	6000	5800	5500	5200	4800	4400	4000	3600	3200	2500	1400			
NIZA 10.3 M	7594	0,75	1	6,1	-	-	1 1/2"	1 1/2"	9200	8500	7400	6500	5200	4200	2000								
NIZA 10.3 T	7595	0,75	1	-	4,3	2,4	1 1/2"	1 1/2"	9200	8500	7400	6500	5200	4200	2000								
NIZA 10.4 M	7596	1,1	1,5	7,7	-	-	1 1/2"	1 1/2"	9800	9200	8400	7600	6800	5900	5100	4000	2500	500					
NIZA 10.4 T	7597	1,1	1,5	-	5,2	3,1	1 1/2"	1 1/2"	9800	9200	8400	7600	6800	5900	5100	4000	2500	500					
NIZA 10.5 M	7598	1,5	2	9,5	-	-	1 1/2"	1 1/2"	10500	9800	9100	8400	7900	7200	6500	5800	5100	4200	2300	600			
NIZA 10.5 T	7599	1,5	2	-	6,8	4,0	1 1/2"	1 1/2"	10500	9800	9100	8400	7900	7200	6500	5800	5100	4200	2300	600			
NIZA 10.6 T	7600	2,2	3	-	8,0	4,6	1 1/2"	1 1/2"		10600	10200	9600	9400	8700	8200	7600	7000	6400	5700	5000	4400	2000	

Figura AIV.3. Catálogo para selección de bombas para traslado de lodos (INOXPA, 2021)

En la Figura AIV.4 se presenta la tabla donde se seleccionó el compresor que se utilizó en la PTAR.

Prestaciones												
Nombre	Código	Potencia hp/kw	Caldera litros	Aire real lts/min.	Volt/hz.	Presión max. bar	Dimensiones lxhxa	Conexión BSP	dB(A)	Peso kg.		
VEGA 1010	V60SH92N1N064	10/7,5	-	1000	400/TRIF/50	10	1200x700x1010	3/4"	62	326		
VEGA 1510	V60SP92N1N064	15/11	-	1500	400/TRIF/50	10	1200x700x1010	3/4"	63	350		
VEGA 2010	V60SS92N1N064	20/15	-	1850	400/TRIF/50	10	1200x700x1010	3/4"	64	410		
VEGA 2510	V60SV92N1N064	25/18,5	-	2500	400/TRIF/50	10	1510x730x1080	3/4"	70	436		
VEGA 3010	V60SY92N1N064	30/22	-	3000	400/TRIF/50	10	1510x730x1080	3/4"	71	635		
VEGA 4010	V60TE92N1N064	40/30	-	4300	400/TRIF/50	10	1510x730x1080	3/4"	71	710		
VEGA 5010	V60TW92N1N064	50/37	-	5300	400/TRIF/50	10	1600x950x1500	1 1/4"	70	870		
VEGA 6010	V60EI92N1N364	60/45	-	6500	400/TRIF/50	10	1600x950x1500	1 1/4"	72	910		
VEGA 7510	V60NT92N1N364	75/55	-	7800	400/TRIF/50	10	1600x950x1500	2"	74	952		
VEGA 7610	V60AP92N1N064	75/55	-	8300	400/TRIF/50	10	1900x1300x2040	2"	70	1650		
VEGA 10010	V60AZ92N1N064	100/75	-	10500	400/TRIF/50	10	1900x1300x2040	2"	72	1720		

Figura AIV.4. Catálogo para selección del compresor (Tajo S.A., 2021)

AIV.3. CATÁLOGO PARA SELECCIÓN DE INTERCAMBIADOR DE CALOR

En la Figura AIV.5 y Figura AIV.6 se presentan los catálogos de los intercambiadores de calor seleccionados.

DATOS TÉCNICOS									
APLICACIONES									
Calentar, enfriar, pasteurizar fangos									
Calentamiento digestores									
Recuperación energética fango-fango									
MATERIALES ESTÁNDAR DE FABRICACIÓN									
Lado Servicio:	Acero inoxidable AISI 316L								
Lado Producto:	Acero inoxidable AISI 316L								
Otras calidades disponibles a petición									
CONEXIONES ESTÁNDAR									
Lado Servicio:	Brida								
Lado Producto:	Brida								
Otras conexiones disponibles a petición									
RANGO									
MODELOS	LONGITUD (m)	ÁREA (m ²)	CONEXIÓN SERVICIO	CONEXIÓN PRODUCTO	CAUDAL MÁX SERVICIO (m ³ /hr)	CAUDAL MÁX PRODUCTO (m ³ /hr)	VOLUMEN SERVICIO (l)	VOLUMEN PRODUCTO (l)	
DTR 51/25	3 - 6	0,4	DN40	DN15	13	4	8,2	2,5	
DTR 64/38	3 - 6	0,6	DN40	DN25	17	10	10,3	5,7	
DTR 76/51	3 - 6	0,9	DN40	DN40	18	18	14,1	11	
DTR 104/64	3 - 6	1,1	DN65	DN50	43	29	29,7	16,9	
DTR 104/76	3 - 6	1,3	DN65	DN65	33	41	21,5	24,8	
DTR 129/104	3 - 6	1,8	DN80	DN80	37	77	26	46,4	
DTR 168/129*	3 - 6	2,4	DN100	DN100	55	120	45,4	73,6	

Área y volúmenes para modelos de 6m. * DTR 168/129: hasta 5 bares de presión en camisa.

Figura AIV.5 Catálogo Intercambiador de calor de doble tubo HRS DTR (Proindserv. Cia. Ltd., 2021)

DATOS TÉCNICOS

APLICACIONES

Fluidos de viscosidad media - baja
Calentamiento CIP
Aplicaciones industriales en general

MATERIALES ESTÁNDAR DE FABRICACIÓN

Lado Servicio: Acero inoxidable AISI 304
Lado Producto: Acero inoxidable AISI 316L
Otras calidades disponibles a petición

CONEXIONES ESTÁNDAR

Lado Servicio: Brida
Lado Producto: Peana-Brida
Otras conexiones disponibles a petición

ACABADO SUPERFICIE

Exterior: Mate
Interior: Decapado
Otros acabados disponibles a petición

CONDICIONES DE DISEÑO

Lado Servicio: 10 bar/185°C
Lado Producto: 10 bar/185°C

CARACTERÍSTICAS

- Tubos corrugados para aumentar la transferencia de calor
- Junta de expansión que absorbe la dilatación diferencial entre la camisa y el haz tubular
- Múltiples unidades pueden ir montadas e interconectadas sobre un bastidor con opción de chapa protectora y aislamiento térmico
- Disponible versión con acabado pulido

RANGO

MODELOS	LONGITUD (m)	ÁREA (m ²)	CONEXIÓN SERVICIO	CONEXIÓN PRODUCTO	CAUDAL MÁX SERVICIO (m ³ /hr)	CAUDAL MÁX PRODUCTO (m ³ /hr)	VOLUMEN SERVICIO (l)	VOLUMEN PRODUCTO (l)
K 7 76/18	0,7 - 6	2,3	DN40	DN65	16	13	14,6	8,3
K 13 104/18	0,7 - 6	4,3	DN65	DN80	40	24	27,6	15,4
K 19 129/18	0,7 - 6	6,3	DN80	DN100	55	35	44,8	22,6
K 37 168/18	0,7 - 6	12,4	DN80	DN150	55	67	70,3	43,9
K 55 219/18	0,7 - 6	18,4	DN125	DN200	130	100	129,8	65,3

Se puede suministrar las siguientes longitudes: 0,7/1/1,5/2/3/6 m. Área y volúmenes para modelos de 6m. Volumen conexiones incluido.

Figura AIV.6 Catálogo Intercambiador de calor tubos concéntricos HRS SERIE K (Proindserv. Cia. Ltd., 2021)

ANEXO V

DIAGRAMA DE MOODY

En la Figura AV.1 se presenta el diagrama de Moody el cual fue utilizado para la determinación de los factores de fricción en los cálculos del sistema de tuberías de la PTAR.

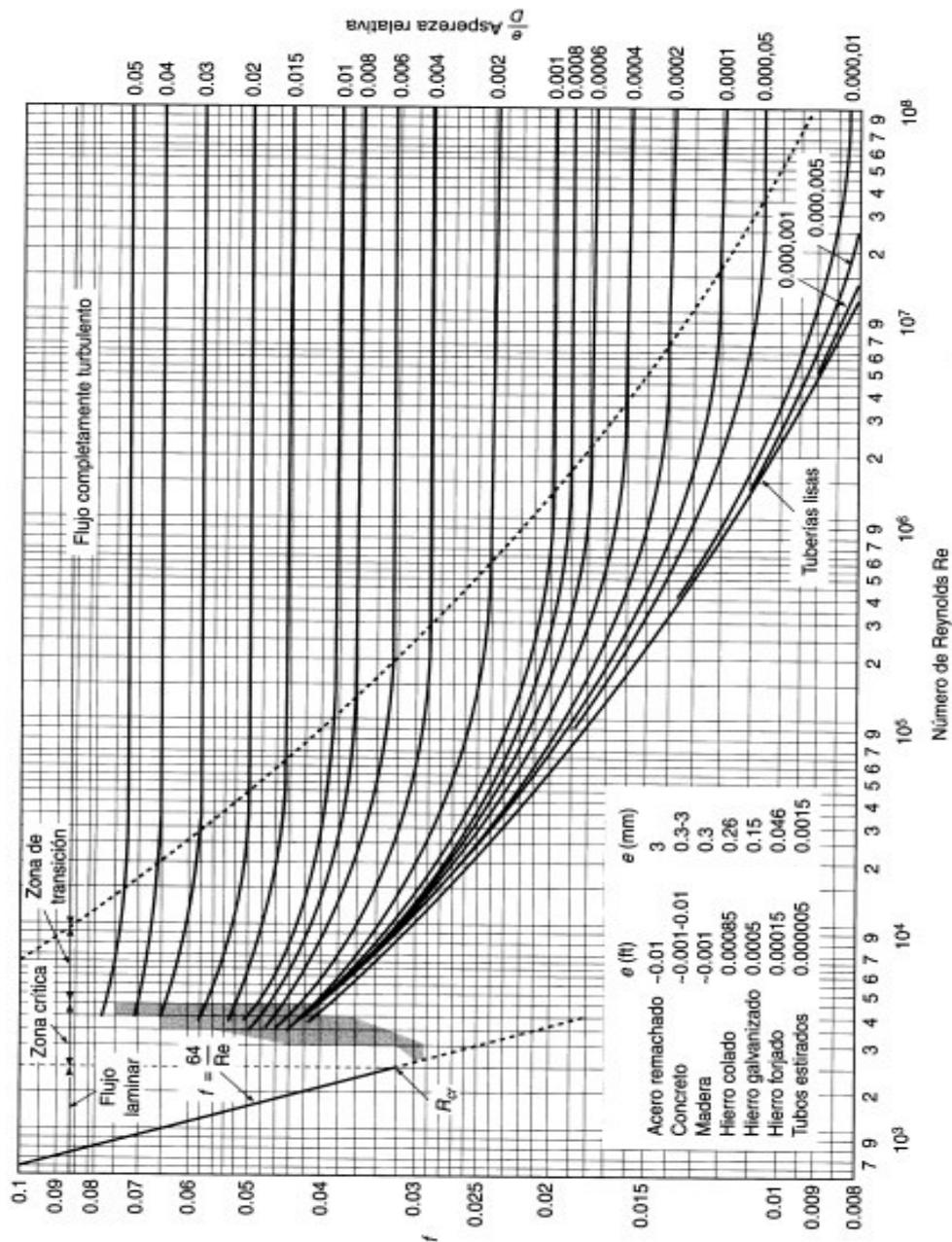


Diagrama de Moody. (De L.F. Moody, *Trans. ASME*, vol. 66, 1944.)

Figura V.1. Diagrama de Moody
(Mott, 2006, p. 269)