AAN9662

UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

ISEÑO HIDRÁULICO-SANITARIO Y PREDIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL PRELIMINAR DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO PRIMARIO DE AGUAS NEGRAS BASADOS EN REACTORES ANAERÓBICOS DE LECHO FLUIDIFICADO, PARA CAUDALES MÁXIMOS OPERATIVOS COMPRENDIDOS EN EL RANGO DE 5 A 140 LPS

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO
presentado ante la
UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO
como parte de los requisitos para optar al título de
INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR — MELANY MENGUAL
JUAN F. MACARIO

PROFESOR GUIA — MARIO MENGUAL

FECHA — 2 DE NOVIEMBRE DE 1999

TESIS
IC999
M4

AGRADECIMIENTOS

Ante todo queremos agradecer a nuestras familias, las cuales con su colaboración y apoyo incondicional, contribuyeron de una u otra manera en la realización de este trabajo de grado.

Igualmente, queremos expresar nuestro sincero agradecimiento al Ing. Mario Mengual, por habernos brindado la oportunidad de la realización de esta tesis, además de su dedicación, amistad y ayuda profesional, aptitudes que nos permiten considerarlo una persona de una calidad humana sin medida.

Y a todas aquellas personas quienes directa o indirectamente colaboraron con la ejecución de este trabajo de grado.

REACTORES ANAERÓBICOS DE FLUJO ASCENDENTE Y LECHO FLUIDIFICADO (RALF)

DISEÑO HIDRÁULICO-SANITARIO Y PREDIMENSIONADO ESTRUCTURAL

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS ..... **I**

ÍNDICE ..... **II**

SINOPSIS ..... **VI**

I INTRODUCCIÓN **1**

II ANTECEDENTES **3**

III CAUDALES DE DISEÑO Y POBLACIONES SERVIDAS **4**

IV TANQUILLA DE DESBASTE-DESARENADOR-CONTROLADOR DE CAUDAL **6**

IV.1 TANQUILLA DE DESBASTE 6

IV.1.1 Generalidades *6*

IV.1.2 Criterios de diseño *6*

IV.1.3 Dimensionado *6*

IV.2 DESARENADOR 9

IV.2.1 Generalidades *9*

IV.2.2 Criterios de diseño *9*

IV.2.3 Dimensionado *11*

IV.3 CONTROLADOR DE CAUDAL 16

IV.3.1 Generalidades *16*

IV.3.2 Criterios de diseño *16*

IV.3.3 Dimensionado *17*

V REACTOR ANAERÓBICO **21**

V.1 GENERALIDADES 21

V.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO 21

V.3 DISEÑO HIDRÁULICO-SANITARIO 23

V.3.1 Criterios y Parámetros de diseño *23*

V.3.2 Distribución de Caudales en el fondo *25*

V.3.3 Dimensionado del reactor, decantador perimetral, distribuidor central de caudal y vertedero perimetral *25*

V.4 PREDISEÑO ESTRUCTURAL 34

V.4.1 Criterios y Parámetros de diseño *34*

V.4.2 Predimensionado de Losas, Muros y Columnas *36*

VI PERFIL HIDRÁULICO DEL SISTEMA **44**

VI.1 GENERALIDADES 44

VI.2 RESULTADOS OBTENIDOS 44

VII CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTOS PRELIMINARES ESTIMADOS **45**

VII.1 CÓMPUTOS MÉTRICOS PRELIMINARES 45

VII.2 PRESUPUESTO ESTIMADO 46

VII.3 COSTOS UNITARIOS 50

VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **51**

VIII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **55**

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO III.1 - CAUDALES Y POBLACIONES SERVIDAS 5

CUADRO IV.1 - TANQUILLA DE DESBASTE 8

CUADRO IV.2 - DIMENSIONADO DEL DESARENADOR 15

CUADRO IV.3 - CONTROLADOR DE CAUDAL 20

CUADRO V.1 - VALORES TÌPICOS DE AGUAS SERVIDAS DOMÉSTICAS 24

CUADRO V.2 - DIMENSIONADO DEL REACTOR ANAERÓBICO 30

CUADRO V.3 - VERIFICACIÓN DEL DECANTADOR PERIMETRAL 31

CUADRO V.4 - DISTRIBUIDOR CENTRAL DE CAUDAL Y VERTEDERO PERIMETRAL 32

CUADRO V.5 - DIMENSIONES FINALES ADOPTADAS PARA EL REACTOR 33

CUADRO V.6 - PREDISEÑO DE LA LOSA SUPERIOR Y COLUMNAS DEL REACTOR 41

CUADRO V.7 - PREDISEÑO DE MURO TRONCO-CÓNICO DEL REACTOR 43

CUADRO VI.1 - NIVELES DE AGUA 44

CUADRO VII.1 - CANTIDADES DE OBRA Y COSTOS DE LA TANQUILLA DE DESBASTE / DESARENADOR / CONTROLADOR DE CAUDAL 47

CUADRO VII.2 - CANTIDADES DE OBRA Y COSTOS DEL REACTOR ANAERÓBICO 48

CUADRO VII.3 - COSTO TOTAL DEL SISTEMA 49

CUADRO VII.4 - COSTOS UNITARIOS 50

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA V.1 - CONFIGURACIÓN DE ÁREAS HEXAGONALES EN EL FONDO DEL REACTOR 26

FIGURA V.2 - DEFINICIÓN DE FRANJAS DE COLUMNAS Y LUCES DE CÁLCULO 37

FIGURA V.3 - ÁREAS TRIBUTARIAS DE COLUMNAS 38

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO VIII.1 – VARIACIÓN DEL TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO Y EL CAUDAL MEDIO 53

GRÁFICO VIII.2 - RELACIÓN ENTRE EL COSTO TOTAL Y LA POBLACIÓN SERVIDA 54

GRÁFICO VIII.3 – RELACIÓN ENTRE EL COSTO UNITARIO POR HABITANTE Y LA POBLACIÓN SERVIDA 54

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO I - SISTEMA DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO. REACTOR DE 6 TUBOS DISTRIBUIDORES. CAUDALES 5, 7.5, 10 Y 12.5 LPS 56

PLANO II - SISTEMA DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO. REACTOR DE 18 TUBOS DISTRIBUIDORES. CAUDALES 15, 20, 25, 30 Y 35 LPS 57

PLANO III - SISTEMA DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO. REACTOR DE 36 TUBOS DISTRIBUIDORES. CAUDALES 40, 50, 60 Y 70 LPS 58

PLANO IV - SISTEMA DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO. REACTOR DE 84 TUBOS DISTRIBUIDORES. CAUDALES 80, 100, 120 Y 140 LPS 59

REACTORES ANAERÓBICOS DE FLUJO ASCENDENTE Y LECHO FLUIDIFICADO (RALF)

DISEÑO HIDRÁULICO-SANITARIO Y PREDIMENSIONADO ESTRUCTURAL

SINÓPSIS

El siguiente trabajo de grado tiene por objeto el diseño hidráulico – sanitario y el predimensionado estructural de diecisiete (17) modelos de sistemas anaeróbicos para el tratamiento de aguas servidas domésticas; dichos sistemas están integrados por una primera estructura conformada por la tanquilla de desbaste, el desarenador y el controlador de caudal; y una segunda representada por el reactor anaeróbico de lecho fluidificado (RALF). Los modelos mencionados han sido diseñados para un caudal máximo operativo comprendido entre 5 y 140 lps, el cual corresponde a una población servida entre 450 y 18800 habitantes.

Estos sistemas han sido agrupados en 4 modelos:

- Modelo de 6 tubos de distribución, con desarenador de una cámara de ancho igual a 0.50m, para caudales operativos máximos iguales a 5, 7.5, 10 y 12.5 lps.
- Modelo de 18 tubos de distribución, con desarenador de dos cámaras de ancho igual a 0.50m cada una, para caudales operativos máximos iguales a 15, 20, 25, 30 y 35 lps.
- Modelo de 36 tubos de distribución, con desarenador de dos cámaras de ancho igual a 0.75m cada una, para caudales operativos máximos iguales a 40, 50, 60, y 70 lps.
- Modelo de 84 tubos de distribución, con desarenador de dos cámaras de ancho igual a 1.00m cada una, para caudales operativos máximos iguales a 80, 100, 120 y 140 lps.

Los resultados obtenidos se presentan en cuatro (4) planos de formato grande (uno por cada modelo), en los cuales se muestran las características y dimensiones de cada uno de los modelos propuestos, tanto de la estructura integrada por la tanquilla de desbaste, el desarenador y el controlador de caudal, como de la estructura del reactor anaeróbico; así mismo, se presentan los cómputos métricos preliminares de cada modelo en términos de las partidas más relevantes en el costo total (excavación, relleno, concreto, acero de refuerzo y acero inoxidable en elementos especiales).

Este trabajo, incluye además, un análisis del costo unitario por habitante, el cual varía sensiblemente con la población servida, obteniéndose el menor costo unitario igual a 22050 Bs/hab (35 US $/hab), para las poblaciones de 18800 habitantes, y el costo unitario máximo igual a 93870 Bs/hab (149 US $/hab), para poblaciones menores cercanas a los 450 habitantes. (considerando una relación de 630 Bs/US $).

En función de los resultados obtenidos se concluye la necesidad de realizar un análisis económico de costos totales y unitarios en función de la población servida, considerando tanto la inversión inicial como el costo operativo y de mantenimiento, de los sistemas de tratamiento aeróbicos intensivos; con la finalidad de establecer comparaciones entre ambos sistemas de tratamiento y determinar el rango óptimo de aplicación de cada uno de ellos.

REACTORES ANAERÓBICOS DE FLUJO ASCENDENTE Y LECHO FLUIDIFICADO (RALF)

DISEÑO HIDRÁULICO-SANITARIO Y PREDIMENSIONADO ESTRUCTURAL

I INTRODUCCIÓN

La normativa sanitaria vigente referente a la calidad de los efluentes cloacales que pueden ser vertidos en los cursos naturales de agua, limita la carga orgánica máxima de dichos efluentes. Por tal motivo, éstos deben ser sometidos a un tratamiento primario que disminuya la carga orgánica a valores permisibles. Dicho tratamiento puede basarse en métodos intensivos (plantas de tratamiento) o en métodos extensivos (lagunas de estabilización), entre otros. Las plantas de tratamiento pueden basarse en procesos aeróbicos, los cuales requieren del suministro de oxígeno, o bien en procesos anaeróbicos, en ausencia de oxígeno.

Las plantas de tratamiento basadas en procesos de degradación de la materia orgánica por parte de las bacterias aeróbicas, requieren de complejos sistemas electromecánicos, necesarios para el suministro de aire, agitación de la masa líquida, y diversos bombeos a lo largo de dicho proceso. La mayor parte de las plantas de tratamiento existentes en el país son de este tipo, y las mismas se han caracterizado por una compleja y costosa operación dado el personal especializado requerido, los costos de energía y los frecuentes desperfectos de los elementos electromecánicos; todo lo cual ha conducido a que muchas de ellas no están operativas, descargándose los efluentes cloacales directamente a los cuerpos receptores de agua. Adicionalmente, la inversión inicial requerida para la construcción de estas plantas genera un costo por habitante servido muy elevado, lo cual las hace prohibitivas para servir sectores de viviendas de bajo nivel o áreas marginales, bien sea el caso de promotores privados o ejecución por parte del estado, respectivamente.

En los últimos años se ha desarrollado un sistema de tratamiento basado en procesos anaeróbicos, conocido "Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente y Lecho Fluidificado" (RALF), ampliamente utilizados por la empresa estatal SANEPAR en el estado de Paraná, Brasil. Dicho reactor carece de elementos electromecánicos por cuanto el flujo en el mismo es por gravedad, lo cual conduce a una estructura de moderada inversión inicial y reducidos costos de operación y mantenimiento, pudiéndose realizar la misma con personal poco tecnificado, todo lo cual la hace propicia para ser implantada en el medio venezolano.

En tal sentido el presente trabajo contempla el diseño hidráulico-sanitario y el predimensionado estructural de diecisiete (17) modelos de sistemas de tratamiento anaeróbico para aguas servidas domésticas, conformados por una primera estructura integrada por la tanquilla de desbaste, el desarenador y el controlador de caudal, y una segunda representada por el reactor anaeróbico (RALF), propiamente dicho. Los modelos mencionados están agrupados en 4 grupos definidos en función del número de tuberías internas de distribución de

caudal en el reactor anaeróbico, los cuales han sido diseñados para operar con los siguientes caudales máximos operativos, equivalentes a los caudales máximos de aguas servidas a ser tratadas:

- Modelo de 6 tubos de distribución, con desarenador de una cámara de ancho igual a 0.50m, para caudales operativos máximos iguales a 5, 7.5, 10 y 12.5 lps.
- Modelo de 18 tubos de distribución, con desarenador de dos cámaras de ancho igual a 0.50m cada una, para caudales operativos máximos iguales a 15, 20, 25, 30 y 35 lps.
- Modelo de 36 tubos de distribución, con desarenador de dos cámaras de ancho igual a 0.75m cada una, para caudales operativos máximos iguales a 40, 50, 60, y 70 lps.
- Modelo de 84 tubos de distribución, con desarenador de dos cámaras de ancho igual a 1.00m cada una, para caudales operativos máximos iguales a 80, 100, 120 y 140 lps.

Los alcances de este trabajo conforman diferentes capítulos en los cuales se realiza el estudio de los siguientes tópicos: antecedentes históricos del tratamiento anaeróbico; análisis de caudales medios y de diseño y sus correspondientes poblaciones servidas; diseño hidráulico-sanitario y dimensionado de la tanquilla de desbaste, desarenador y controlador de caudal; análisis del funcionamiento, diseño hidráulico-sanitario y dimensionado, y predimensionado estructural de los distintos componentes del reactor anaeróbico; análisis del perfil hidráulico a lo largo del sistema de tratamiento; cuantificación de cantidades de obra de las partidas más relevantes, y elaboración de presupuestos estimados, con el correspondiente análisis de costos por unidad de caudal medio tratado y por habitante servido; por último, se presentan las conclusiones, recomendaciones y bibliografía.

Los resultados del presente trabajo se sintetizan en cuatro (4) planos de formato grande (uno por cada grupo), en los cuales se muestran las características y dimensiones de cada uno de los modelos propuestos, tanto de la estructura integrada por la tanquilla de desbaste, el desarenador y el controlador de caudal, como de la estructura del reactor anaeróbico; así mismo, se presentan las cantidades de obra de cada modelo en términos de las partidas más relevantes en el costo total (excavación, relleno, concreto, acero de refuerzo y acero inoxidable en elementos especiales).

II ANTECEDENTES

La primera aplicación de la digestión anaeróbica para el tratamiento de efluentes cloacales probablemente se remonta al año 1860 en Francia, mediante la fosa séptica de M. Mouras. En el transcurso del final del siglo pasado e inicio del actual, fueron desarrollados varios sistemas nuevos de tratamiento anaeróbico para efluentes cloacales; entre ellos debe mencionarse el tanque séptico de Cameron en Inglaterra y el tanque Imhoff en Alemania. En ambos sistemas el efluente cloacal fluye a través de la estructura en la parte superior, mientras que el lodo anaeróbico reposa en el fondo del tanque, manteniéndose un período de retención en el orden de 1 o 2 días.

El tratamiento primario de efluentes cloacales mediante procesos de digestión anaeróbica tuvo una gran difusión en las décadas de 1920 y 1930, especialmente en ciudades de Alemania, Inglaterra y Estados Unidos: solamente en Alemania más de 12 millones de personas fueron servidas por sistemas de tratamiento anaeróbico, en la mayoría versiones del tanque Imhoff. En las décadas siguientes dichos sistemas comenzaron a ser desplazados por sistemas de tratamiento aeróbico para efluentes cloacales, principalmente a causa de la mayor eficiencia en la remoción de materia orgánica de estos últimos.

La baja eficiencia en la remoción de la materia orgánica por parte de los primeros sistemas de tratamiento primario anaeróbico debe ser atribuida a fallas fundamentales de diseño, representadas en el hecho de no existir mayor contacto entre los microorganismos anaeróbicos en el lodo del fondo del tanque y la parte no sedimentable de la materia orgánica en el efluente cloacal. Sin embargo, en las últimas décadas han sido desarrollados reactores anaeróbicos que permiten un adecuado contacto entre la masa de bacterias anaeróbicas y el efluente cloacal, los cuales se basan principalmente en conducir dicho efluente a través del lodo depositado en el reactor. Uno de estos nuevos sistemas está representado por el reactor anaeróbico de flujo ascendente y lecho fluidificado (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB), desarrollado en la década de 1970 por Lettinga y su grupo de investigadores en la Universidad de Wageningen, Holanda.

El reactor UASB, es uno de los sistemas anaeróbicos más difundidos en la actualidad para el tratamiento de las aguas servidas domésticas; el funcionamiento del mismo se basa en un flujo ascendente lo más uniforme posible a través del manto de lodo en el fondo del reactor; y en un separador de fase que divide el volumen del reactor en una parte inferior o zona de digestión, y una parte superior o zona de decantación.

A partir de la década de 1980 fue desarrollada una variante del UASB en el estado brasileño de Paraná, con la finalidad de suministrar un tratamiento primario a los efluentes cloacales domésticos en las poblaciones del lugar en referencia; dicha variante del reactor anaeróbico de flujo ascendente y lecho fluidificado, conocida con el nombre de RALF, integra el sistema de tratamiento anaeróbico objeto del presente trabajo (Ref. 2 y 3).

III CAUDALES DE DISEÑO Y POBLACIONES SERVIDAS

Los caudales de diseño han sido determinados en función de los parámetros particulares de diseño de las distintas configuraciones propuestas para el reactor anaeróbico; en tal sentido, fueron establecidas las distintas posibles soluciones de distribución de caudal en el fondo del reactor, y en función de las velocidades máximas admisibles en el mismo y de los valores extremos permisibles del área tributaria por punto de distribución, ha sido establecido el rango de caudal de diseño para cada configuración propuesta de reactor (Ver apartes V.3.1 CRITERIOS Y PARÁMETROS DE DISEÑO, V.3.2 DISTRIBUCIÓN DE CAUDAL EN EL FONDO, y V.3.3 DIMENSIONADO DEL CUERPO DEL REACTOR). Estos caudales de diseño son los máximos operativos permisibles por el reactor y corresponden al caudal máximo esperado de aguas servidas a ser tratadas. De los rangos de caudal antes mencionados, han sido establecidos los siguientes caudales de diseño:

- Configuración de 6 puntos de distribución: Caudales de diseño iguales a 5, 7.5, 10 y 12.5 lps.
- Configuración de 18 puntos de distribución: Caudales de diseño iguales a 15, 20, 25, 30 y 35 lps
- Configuración de 36 puntos de distribución: Caudales de diseño iguales a 40, 50, 60 y 70 lps.
- Configuración de 84 puntos de distribución: Caudales de diseño iguales a 80, 100, 120 y 140 lps

El caudal medio de efluente cloacal y la población servida, correspondientes a los caudales de diseño antes mencionados, han sido determinados mediante la aplicación de la ecuación propuesta para el cálculo del gasto de las aguas negras domiciliarias (Ref.1):

$$Qmax = Qmed * K * R$$

Donde:

- *Qmax* corresponde al caudal de diseño (lps).
- *Qmed* corresponde al caudal medio del acueducto para una dotación de 300 lpcpd, el cual viene dado por la siguiente ecuación (lps):

$$Qmed = \frac{Dotación * P}{86.4}$$

- *P* corresponde a la población servida en miles de habitantes.
- *K* corresponde a un coeficiente función de la población considerada, el cual viene dado por la siguiente fórmula:

$$K = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{P}}$$

- *R* corresponde al coeficiente de gasto de reingreso igual a 0.8.

Sustituyendo las últimas ecuaciones en la primera se obtiene:

$$Qmax = \frac{Dotación * P}{86.4} * \left(1 + \frac{14}{4 + \sqrt{P}}\right) * R$$

Los caudales medios y poblaciones servidas resultantes se presentan en el CUADRO III.1.

CUADRO III.1 - CAUDALES Y POBLACIONES SERVIDAS

Caudal de diseño (lps)	N° de tubos de distribución	K	R	Dotación Acueducto (lpdpc)	Qmed (lps)	Población servida (hab).
5	6	3,80	0,8	300	1,64	450
7,5	6	3,80	0,8	300	2,47	690
10	6	3,80	0,8	300	3,29	940
12,5	6	3,75	0,8	300	4,17	1200
15	18	3,69	0,8	300	5,08	1460
20	18	3,58	0,8	300	6,98	2010
25	18	3,50	0,8	300	8,93	2570
30	18	3,42	0,8	300	10,95	3150
35	18	3,36	0,8	300	13,03	3750
40	36	3,30	0,8	300	15,15	4360
50	36	3,20	0,8	300	19,55	5630
60	36	3,11	0,8	300	24,11	6940
70	36	3,03	0,8	300	28,83	8300
80	84	2,97	0,8	300	33,69	9700
100	84	2,85	0,8	300	43,79	12600
120	84	2,76	0,8	300	54,38	15700
140	84	2,68	0,8	300	65,31	18800

IV TANQUILLA DE DESBASTE-DESARENADOR-CONTROLADOR DE CAUDAL

IV.1 TANQUILLA DE DESBASTE

IV.1.1 GENERALIDADES

El objetivo de la tanquilla de desbaste es el de remover los elementos flotantes y partículas de gran tamaño que se encuentran en el efluente cloacal, a fin de evitar que los mismos se introduzcan en el desarenador impidiendo su buen funcionamiento.

Este dispositivo está integrado por dos tanquillas las cuales conforman una estructura monolítica: la húmeda, donde se aloja una reja de acero que retiene flotantes y partículas de gran tamaño cuando el flujo pase a través de ella; y la seca, donde se ubican las válvulas de compuerta que permiten el cierre del flujo hacia las cámaras del desarenador. En la tanquilla húmeda está ubicada una tubería de rebose, unos 5cm por encima del nivel máximo operativo de la tanquilla de desbaste, la cual permite revertir el flujo de nuevo hacia la cloaca en caso de cierre de las válvulas antes mencionadas; así mismo permite evacuar hacia la cloaca caudales excedentes en caso de un fuerte incremento en el caudal por el efecto de la lluvia en malos empotramientos.

IV.1.2 CRITERIOS DE DISEÑO

El diseño de estas tanquillas ha sido realizado en función del diámetro de las tuberías que alimentan las cámaras del desarenador. Fue adoptado un espacio libre mínimo entre ellas de 0,40m y una separación libre con las paredes verticales y fondo de la tanquilla de 0,35m, tal que permita la instalación de las válvulas; así mismo, fue prevista una separación libre de 0,25m entre las bridas de las válvulas y los muros a lo largo del eje de la tubería. La longitud mínima adoptada para ambas tanquillas es igual a 0,80m. El espesor adoptado para las paredes y el fondo es igual a 15cm en función de la carga de agua y de las luces generales del conjunto. El diámetro de las tuberías de entrada al desarenador fue determinado en base al caudal de diseño, para un rango de velocidad en las mismas entre 0,60 y 1,00 m/s.

IV.1.3 DIMENSIONADO

En función de los criterios de diseño anteriormente expuestos y mediante el formulario que se presenta a continuación, fueron determinadas las dimensiones de la tanquilla de desbaste, las cuales se presentan en el CUADRO IV.1.

TANQUILLA DE DESBASTE

FORMULARIO DEL CUADRO IV.1

COLUMNA 1, Q_d: Caudal de diseño en lps.—

COLUMNA 2, N: Número de vertederos en distribuidor central de alimentación.—

COLUMNA 3, N°Cam: Número de cámaras por cada desarenador.—

COLUMNA 4. Vmin: Menor Velocidad admisible en las tuberías de entrada al desarenador.—*Se adoptó un valor igual a 0.6 m/s.*

COLUMNA 5 Vmax: Mayor Velocidad admisible en las tuberías de entrada al desarenador.—Se adoptó un valor de 1.00 m/s, *para evitar la entrada violenta del agua al desarenador*

COLUMNA 6, ϕT3 min: Diámetro mínimo que deben tener las tuberías de entrada al Desarenador en mm.—

$$\phi T3min = 1000 * \left(\frac{4 * Qd}{N°Cam * \pi * V\,\text{máx}} \right)^{0.5}$$

Donde Qd está en m^3/s.

COLUMNA 7, ϕT3 max: Diámetro máximo que deben tener las tuberías de entrada al Desarenador en mm.—

$$\phi T3max = 1000 * \left(\frac{*4 * Qd}{N°Cam * \pi * Vmin} \right)^{0.5}$$

Donde Qd está en m^3/s.

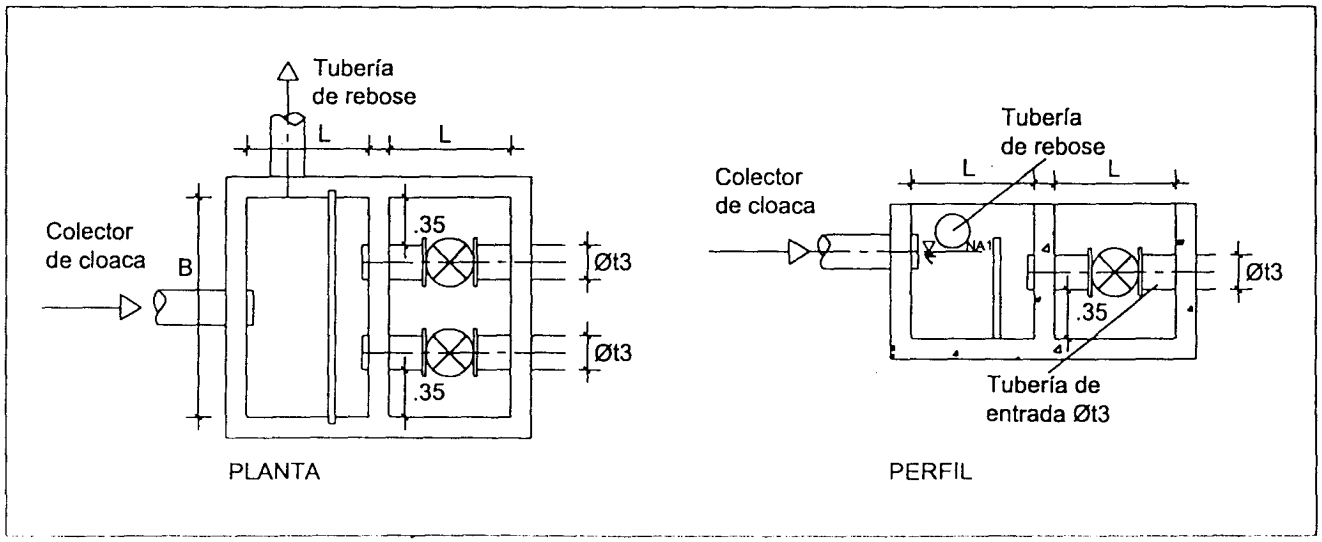
COLUMNA 8, ϕT3 adoptado: Diámetro definitivo de las tuberías de entrada al desarenador.

COLUMNA 9, B: Ancho adoptado.—*Cumpliendo con los parámetros de diseño establecidos en el punto anterior. Se generalizó en cada grupo con el caso más desfavorable de cada uno de ellos.*

COLUMNA 10, L: longitud adoptada.—*Cumpliendo igualmente con los parámetros de diseños adoptados en el punto anterior. Se generalizó en cada grupo con el caso más desfavorable de cada uno de ellos.*

CUADRO IV.1 - TANQUILLA DE DESBASTE

Qd (lps)	N	N° Cam.	Vmin (m/s)	Vmax (m/s)	ϕT3 min (mm)	ϕT3 max (mm)	ϕT3 adoptado (mm)	B (m)	L (m)
5	6	1	0,6	1	79,73	103,01	100	1,40	0,80
7,5	6	1	0,6	1	97,65	126,16	100	1,40	0,80
10	6	1	0,6	1	112,76	145,67	150	1,40	0,80
12,5	6	1	0,6	1	126,07	162,87	150	1,40	0,80
15	18	2	0,6	1	97,65	126,16	100	1,40	0,80
20	18	2	0,6	1	112,76	145,67	150	1,40	0,80
25	18	2	0,6	1	126,07	162,87	150	1,40	0,80
30	18	2	0,6	1	138,10	178,41	150	1,40	0,80
35	18	2	0,6	1	149,17	192,71	150	1,40	0,80
40	36	2	0,6	1	159,47	206,01	200	1,60	0,90
50	36	2	0,6	1	178,29	230,33	200	1,60	0,90
60	36	2	0,6	1	195,31	252,31	200	1,60	0,90
70	36	2	0,6	1	210,96	272,53	250	1,60	0,90
80	84	2	0,6	1	225,52	291,35	250	2,15	1,00
100	84	2	0,6	1	252,14	325,74	250	2,15	1,00
120	84	2	0,6	1	276,21	356,82	300	2,15	1,00
140	84	2	0,6	1	298,34	385,42	300	2,15	1,00



IV.2 DESARENADOR

IV.2.1 GENERALIDADES

El propósito del desarenador es el de remover las partículas de arena contenidas en las aguas servidas, evitando su posterior incorporación al reactor anaeróbico (RALF).

El desarenador está conformado, según el caudal de diseño por una o dos cámaras de paredes verticales y losa de fondo inclinada, de manera que la arena retenida concurra hacia un sector que facilite su remoción posterior. A dichas cámaras llegan las tuberías provenientes de la tanquilla de desbaste.

Adosado al desarenador y siguiendo el sentido del flujo, se ubica un aliviadero que opera hidráulicamente como cresta ancha sobre el cual vierte el agua desarenada hacia un canal de descarga, cuyo muro derecho es el mismo vertedero; este canal conduce el agua hacia el dispositivo controlador de caudales que regula el gasto de entrada al reactor. En la parte inferior del desarenador se encuentra la cámara de sedimentos, de cuyo punto más bajo salen las tuberías de limpieza que permiten la remoción periódica de los mismos. Estas tuberías de limpieza están provistas de válvulas de compuerta ubicadas en una tanquilla seca, descargando en una tanquilla húmeda.

IV.2.2 CRITERIOS DE DISEÑO

El diseño hidráulico-sanitario del desarenador ha sido realizado según lo pautado en la Ref. 4, para una remoción de hasta 7/8 (87,5%) de partículas de diámetro igual o mayor a 0,25mm (arena media), empleando un modelo de desarenador en la curva de Hazen-Fair de mal comportamiento, η=2, para cada caudal de diseño. En los casos de reactor con 6 tubos de distribución fue considerada una sola cámara debido al poco caudal que circula y a las pequeñas dimensiones obtenidas, previéndose un dispositivo de "by-pass" entre la tanquilla de desbaste y el controlador de caudal que permite la limpieza de dicha cámara. En cambio, para el resto de los casos fueron consideradas 2 cámaras en operación simultánea, operando una sóla durante la limpieza de la otra cámara.

Los parámetros de diseño considerados se resumen a continuación:

- Diámetro de partículas a remover $\varnothing p$= 0,25 mm (arenas medias).
- Velocidad de sedimentación: calculada según Ref. 4.
- Porcentaje de remoción = 87,5%.
- Mal comportamiento η= 2.
- Verificación de la Rata de Desbordamiento Superficial (R.D.S.)
- Vcrítica: calculada según Ref. 4.
- Diámetro de las tuberías de limpieza: $\varnothing$150 mm para reactores de 6 y 18 tubos de distribución, y $\varnothing$200 mm para reactores de 36 y 84 tubos de distribución.

Considerando la carga de agua relativamente pequeña y la magnitud de las dimensiones en los casos de 6, 18 y 36 tubos de distribución, fue adoptado un espesor de fondo y muros igual a 15cm; en el caso de 84 tubos de distribución el espesor adoptado es igual a 20cm.

Aplicando el procedimiento pautado en la Ref. 4 para el dimensionado del desarenador, fue determinada la velocidad de asentamiento (Vs):

Para T° = 25°C

Densidad del agua = ρ = 101.70 Kgf * S^2/m^4

Viscosidad dinámica del agua = μ = 0,912 x 10^{-4} Kgf * S/m^2

Vu = 4,0 cm/s (1° Iteración)

Fue calculado el número de Reynolds para poder determinar el valor del coeficiente de arrastre.

$$R = \frac{Vu * \rho * \phi p.}{\mu} = \frac{4{,}0 * 10^{-2} * 101{,}70 * 0{,}25 * 10^{-3}}{0{,}912 * 10^{-4}} = 11{,}15$$

El valor del coeficiente de arrastre (Co) para R > 2

$$Co = \frac{24}{R} + \frac{3}{\sqrt{R}} + 0{,}34 = 2{,}15 + 0{,}90 + 0{,}34 = 3{,}39$$

Considerando partículas esféricas fue determinada la velocidad de asentamiento de las mismas:

$$Vs = \sqrt{\frac{4g\,(\rho s - \rho w)d}{3\,Co\,\rho w}}$$

$$Vs = \left[\frac{4 * 9{,}81\,(2{,}65 - 1{,}0) * 0{,}25 * 10^{-3}}{3 * 3{,}39}\right]^{1/2} = 3{,}98 * 10^{-2}\ m/s = Vu$$

Por consiguiente fue adoptado un valor de velocidad de sedimentación Vs = 4,0 cm/s para fluido T° 25°C y Ø partícula = 0,25mm. A continuación, fue determinada la velocidad crítica a lo largo del desarenador con el fin de obtener la máxima velocidad dentro de éste asegurando la sedimentación de las partículas:

$$Vcrítica = 8\,\beta\,g\,(\rho s - 1)d * \frac{1}{f} \quad \text{(sin arrastre en el fondo)}$$

Donde:

- β representa un factor de forma, que para el caso de análisis es 0,04correspondiente a arenas unigranulares no adheribles,

- f representa el factor de rugosidad de la cámara que en este caso es igual a 0,03.

$$Vcrítica = \sqrt{\frac{8*0,04}{0,03}*9,81*(1,65)*0,85*10^{-3}} = 0,21 \text{ m/s}$$

En función del tipo de comportamiento esperado del desarenador (mal comportamiento), considerando el porcentaje de remoción esperado, se obtuvo una carga de tratamiento P1= 3.6 para el cálculo del área de la planta de cada cámara del desarenador. Dicha área se determina por la expresión:

$$A= P1*Qd/Vs$$

Donde: Qd es el caudal de diseño en cada cámara.

Una vez calculadas las áreas, y en función de los anchos preestablecidos de cada cámara, fue determinado la longitud de las mismas.

Así mismo, fue adoptado como parámetro de diseño que la relación L/B tiene que ser mayor que 2, lo cual se verificó en todos los casos.

A partir de la velocidad crítica calculada anteriormente, el número de cámaras por desarenador y con el caudal de diseño fueron determinadas las alturas de agua (h) para cada caso.

Fue adoptado como borde libre de los desarenadores 0,25m, con lo cual fueron determinadas las alturas totales de los mismos.

El tiempo de retención hidráulica en el desarenador fue determinado dividiendo el volúmen total de agua del desarenador entre el caudal de diseño.

Igualmente, fue determinado el tiempo de retención hidráulica para el caudal medio.

Finalmente, fue verificada la rata de desbordamiento superficial.

IV.2.3 DIMENSIONADO

En función de los criterios de diseño anteriormente expuestos y mediante el formulario que se presenta a continuación, fueron determinadas las dimensiones del desarenador, las cuales se presentan en el CUADRO IV.2.

DESARENADOR

FORMULARIO DEL CUADRO IV.2.

COLUMNA 1, Q_d: Caudal de diseño en lps.—
COLUMNA 2, N: Número de tubos de distribución.—
COLUMNA 3, Qm: Caudal medio en lps.— *Qd/2.4*
COLUMNA 4, ϕp: Diámetro de las partículas a ser removidas.— *Se adoptó que éste sería igual a 0.25 mm.*

COLUMNA 5, T°C: Temperatura promedio en el desarenador.— *Se adoptó un valor de 25 °C.*
COLUMNA 6, ρ: Densidad del agua.—*Se adoptó una densidad de 101.7 kgf*s/m^4, que sería la equivalente a una temperatura de 25 °C.*

COLUMNA 7, μ: Viscosidad dinámica del agua.—*Se adoptó un valor de 9.12*10^{-5} kgf*s/m^2 correspondiente a las mismas condiciones anteriormente dichas*
COLUMNA 8, Vt: Velocidad de sedimentación de tanteo.—*Se adoptó un valor de 4 cm/s como primer valor de tanteo.*
COLUMNA 9, R: Número de Reynolds.—

$$R = \frac{V * \rho * \phi p}{\mu}$$

COLUMNA 10, Co: Coeficiente de arrastre.—

$$Co = \frac{24}{R} + \frac{3}{R} + 0.34$$

COLUMNA11, Vs: Velocidad de sedimentación de las partículas en cm/s.—

$$Vs = \frac{4 * g * (\rho s - \rho w) * \phi p}{3 * Co * \rho w}$$

Donde g es la gravedad en m/s^2, ρs es la gravedad específica del sólido, para el caso de partículas suspendidas en el agua, igual a 2.65, y ρw es la gravedad específica del agua

COLUMNA 12, Vcr: Velocidad crítica tranversal de las partículas para que no ocurra socavación en el fondo.—

$$Vcr = \frac{8 * \beta * g * (\rho s - \rho w) * \phi p}{f}$$

Donde f es el factor de rugosidad de la cámara. (ver referencia) y β es un factor de forma, que en nuestro caso para arenas unigranulares no adheribles es 0.04.

COLUMNA 13, %Rem. Porcentaje de remoción estimado.—*Se adoptó un valor igual a 87.5 % de remoción de partículas en el desarenador como parámetro de diseño.*

COLUMNA 14, n efic.: Factor de comportamiento del desarenador.—*Se adoptó como parámetro de diseño un valor de n=2, para desarenadores con un regular comportamiento.(Ver referencia).*

COLUMNA 15, P1: Parámetro carga de tratamiento.—*Se obtuvo por medio de la gráfica de comportamiento del desarenador, en función de su factor de comportamiento y de su porcentaje de remoción. Este valor obtenido es igual a 3.6. (ver referencia)*

COLUMNA 16, A: Área de planta del desarenador en m^2.—

$$A = \frac{P1 * Qd}{Vcr}$$

Donde el caudal está en m^3/s y Vcr en m/s.

COLUMNA 17, N° Cam. Número de cámaras por cada desarenador.—*Se adoptó la colocación de una sola cámara en el grupo de 6 distribuidores por lo pequeño de éstos, y 2 cámaras en el resto de los casos de estudio.*

COLUMNA 18, B: Ancho de cada cámara del desarenador.—*Se fijó anchos para cada tipo de desarenador. Los casos de 6 y 18 distribuidores 0,50 m, los de 36 distribuidores 0.75 m y los de 84 distrbuidores 1,00 m.*

COLUMNA 19, Lmin: Longitud mínima de los desarenadores.—*Se obtuvo al dividir el Area A entre el ancho B.*

COLUMNA 20, L: Longitud definitiva de los desarenadores.—*En función de las Lmin obtenidas se redondearon por encima para cada desarenador.*

COLUMNA 21, L/B: Relación largo-ancho de las cámaras del desarenador.—*Se fijó como parámetro que éste no puede ser inferior a 2.*

COLUMNA 22, Amod: Área definitiva de planta de las cámaras del desarenador en m^2.—

$$A\text{mod} = L * B$$

COLUMNA 23, AT: Área transversal de cada cámara del desarenador.—

$$AT = \frac{Qd}{N°cam. * Vcr}$$

Donde Qd está en m^3/s y Vcr en m/s.

COLUMNA 24, h: Altura de agua dentro del desarenador en cm.—

$$h = \frac{100 * AT}{B}$$

COLUMNA 25, ht: Altura total del desarenador.—*Se adoptó un borde libre de 0.25m*

$$ht = h + 0.25$$

COLUMNA 26, Vh: Velocidad horizontal del agua.—*Al ser diseñado el desarenador en función de la Vcr, entonces Vh = Vcr*

COLUMNA 27, T.R.H (Qmáx): Tiempo de retención hidráulica para Qd.—

$$T.R.H.(Qmax) = \frac{h * B * L * N°Cam.}{Qd}$$

Donde todas las medidas están en m y el caudal en m^3/s.

COLUMNA 28, T.R.H.(Qmed): Tiempo de retención hidráulica para Qm.—

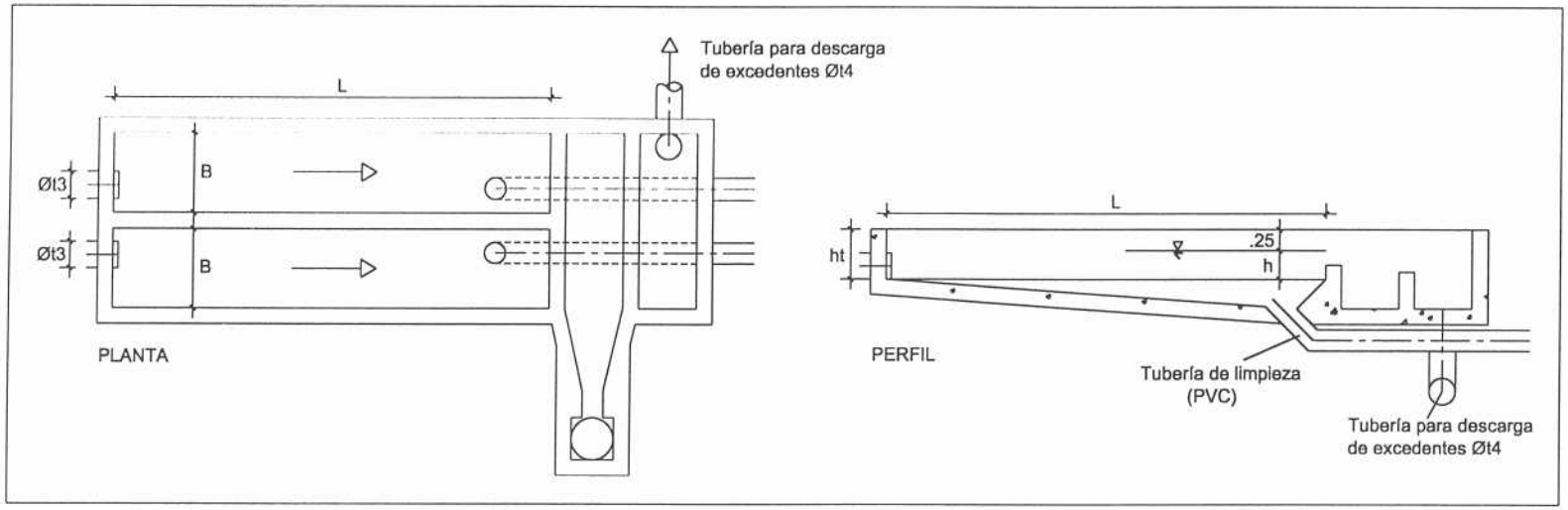
$$T.R.H.(Qmed) = \frac{h * B * L * N°Cam.}{Qm}$$

COLUMNA 29, R.D.S: Rata de Desbordamiento Superficial.—

$$R.D.S = \frac{Vs}{86400 * P1}$$

CUADRO IV.2. - DIMENSIONADO DEL DESARENADOR

Qd (lps)	N	Qm (lps)	ϕp (mm)	T°	ρ (kgf*s^2 /m^4)	μ (kgf*s/m^2)	Vt (cm/s)	R	Co	Vs (cm/s)	Vcr (m/s)	% Rem	n efic.	P1	A (m^2)	N° Cam.	B (m)	Lmin (m)	L (m)	L/B	Amod (m^2)	AT (m^2)	h (cm)	ht (cm)	Vh (m/s)	T.R.H. (Qmáx.) (seg)	T.R.H. (Qmed.) (seg)	R.D.S. ajustada (lpd/m^2)
5	6	2,08	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	0,45	1	0,50	0,90	1,0	2,0	0,50	0,02	5	30	0,21	5	12	960000
7,5	6	3,13	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	0,68	1	0,50	1,35	1,4	2,7	0,68	0,04	7	32	0,21	6	16	960000
10	6	4,17	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	0,90	1	0,50	1,80	1,8	3,6	0,90	0,05	10	35	0,21	9	21	960000
13	6	5,21	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	1,13	1	0,50	2,25	2,3	4,5	1,13	0,06	12	37	0,21	11	26	960000
15	18	6,25	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	1,35	2	0,50	1,35	1,4	2,7	1,35	0,04	7	32	0,21	6	16	960000
20	18	8,33	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	1,80	2	0,50	1,80	1,8	3,6	1,80	0,05	10	35	0,21	9	21	960000
25	18	10,42	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	2,25	2	0,50	2,25	2,3	4,5	2,25	0,06	12	37	0,21	11	26	960000
30	18	12,50	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	2,70	2	0,50	2,70	2,7	5,4	2,70	0,07	14	39	0,21	13	31	960000
35	18	14,58	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	3,15	2	0,50	3,15	3,2	6,3	3,15	0,08	17	42	0,21	15	36	960000
40	36	16,67	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	3,60	2	0,75	2,40	2,4	3,2	3,60	0,10	13	38	0,21	12	28	960000
50	36	20,83	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	4,50	2	0,75	3,00	3,0	4,0	4,50	0,12	16	41	0,21	14	35	960000
60	36	25,00	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	5,40	2	0,75	3,60	3,6	4,8	5,40	0,14	19	44	0,21	17	42	960000
70	36	29,17	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	6,30	2	0,75	4,20	4,2	5,6	6,30	0,17	22	47	0,21	20	49	960000
80	84	33,33	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	7,20	2	1,00	3,60	3,6	3,6	7,20	0,19	19	44	0,21	17	42	960000
100	84	41,67	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	9,00	2	1,00	4,50	4,5	4,5	9,00	0,24	24	49	0,21	22	52	960000
120	84	50,00	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	10,80	2	1,00	5,40	5,4	5,4	10,80	0,29	29	54	0,21	26	62	960000
140	84	58,33	0,25	25	101,7	9,12E-05	4,0	11,15	3,39	3,99	0,21	87,5	2,00	3,60	12,60	2	1,00	6,30	6,3	6,3	12,60	0,34	34	59	0,21	30	73	960000



IV.3 CONTROLADOR DE CAUDAL

IV.3.1 GENERALIDADES

El objetivo del controlador de caudal es el de limitar el caudal de entrada al reactor en el caso de presentarse un caudal de efluente cloacal superior al gasto de diseño del reactor, situación que usualmente se presenta durante los períodos de lluvia intensa por efecto de los malos empotramientos; el caudal en exceso es retornado a la cloaca. El diseño de esta estructura es similar al del Medidor Parshall.

El controlador de caudal recibe la descarga de los desarenadores y está integrado por un canal transversal a los mismos el cual descarga en un extremo a través de una contracción y caída, seguidas por la embocadura de la tubería de alimentación al reactor; dicha contracción genera condición crítica de flujo, lo cual permite establecer un determinado tirante de agua en el canal para el caudal descargado por los desarenadores, situación que es aprovechada en el controlador de caudal para aliviar, a través de un vertedero y hacia una tanquilla, los caudales que exceden el gasto de diseño del reactor. Tanto el canal mencionado como la tanquilla de descarga conforman una estructura monolítica con el cuerpo del desarenador.

IV.3.2 CRITERIOS DE DISEÑO

El diseño hidráulico del controlador de caudal debe verificar que en caso de un caudal de entrada al desarenador igual al doble del de diseño (200% Qd), el gasto de entrada al reactor se incremente en un valor no mayor al 30% (130% Qd); esta condición permite la selección del ancho de contracción requerido en la descarga del canal del controlador, conjuntamente con el valor del caudal de diseño del reactor.

En función del ancho de contracción adoptado, fue dimensionado el ancho del canal del controlador y la convergencia de las paredes en la contracción y caída después de la misma, según el dimensionado de los Medidores Parshall (Ref. 5). Los criterios de diseño para el dimensionado altimétrico del controlador de caudal son los siguientes:

- El tirante de agua en el canal se considera igual a la energía mínima del flujo crítico en la contracción, es decir, se desprecia la carga de velocidad en dicho canal; esto implica que dicha carga debe ser inferior a 5 mm.

- La altura del vertedero de descarga de excedentes sobre el fondo del canal del controlador es igual al tirante de este último para la condición del caudal de diseño (Qd) a través de la contracción; es decir, para dicho caudal no se verifica ningún desborde en el vertedero de descarga.

- La altura del vertedero del desarenador sobre el fondo del canal del controlador debe incrementarse respecto a la mencionada en el punto anterior, a fin de no tener efecto de sumergencia en la descarga de dicho vertedero, para caudales a través de la contracción superiores al gasto de diseño del reactor.

- Para un caudal operativo superior al caudal de diseño, debe verificarse que dicho caudal es igual a la suma del flujo a través de la contracción más el flujo sobre el vertedero de descarga de excedentes, ambos determinados para el tirante resultante en el canal del controlador, el cual coincide con la energía mínima del caudal parcial a través de la contracción.

IV.3.3. DIMENSIONADO

En función de los criterios de diseño anteriormente expuestos y mediante el formulario que se presenta a continuación, fueron determinadas las dimensiones del controlador de caudal, las cuales se presentan en el CUADRO IV.3.

CONTROLADOR DE CAUDAL

FORMULARIO DEL CUADRO IV.3

COLUMNA 1, Q_d: Caudal de diseño en lps.—
COLUMNA 2, N: Número de vertederos en distribuidor central de alimentación.—
COLUMNA 3, N°Cam: Número de cámaras por cada desarenador.—
COLUMNA 4, B: Ancho de cada cámara del desarenador.—
COLUMNA 5, R: Longitud libre del controlador de caudal.—*se adoptó por razones de geometría 2*B + el espesor de las paredes del desarenador. Excepto en el caso de 6 distribuidores en donde se adoptó un valor de B.*
COLUMNA 6, D: Ancho del controlador de caudal.—
COLUMNA 7, P: Longitud de la convergencia del controlador de caudal.—
COLUMNA 8, F: Longitud de la contracción del controlador de caudal.—
COLUMNA 9, $\phi t1$: Diámetro de la tubería de alimentación.—
COLUMNA 10, h: Altura de agua del desarenador.—
COLUMNA 11, Wc: Ancho de la contracción del controlador de caudal.—*Se adoptó un ancho de 5 cm para el caso de 6 distribuidores, 10 cm para el de 18 distribuidores, 20 cm para el de 36 distribuidores y 25 cm para el de 84 distribuidores.*
COLUMNA 12, C: Caída en el controlador de caudal.—
COLUMNA 13, q1: Caudal unitario en la contracción del controlador de caudal en $m^3/s/m$.—

$$q1 = \frac{Qd}{Wc}$$

Donde Qd está en m^3/s y Wc en m.
COLUMNA 14, Yc1: Altura crítica que ocurre en el principio de la contracción o en el final de la convergencia del canal de aproximación para el Qd.—

$$Yc1 = \sqrt[3]{\frac{q1}{g}}$$

COLUMNA 15, Emin1: Energía mínima en el canal de aproximación y altura del segundo vertedero del controlador de caudal.—

$$Emin1 = 1.5 * Yc$$

COLUMNA16, Emin2: Energía mínima en el canal de aproximación para un caudal igual al doble del gasto de diseño, y altura del primer vertedero del controlador de caudal.—*Estos valores se calcularon en forma de tanteo, de tal forma de lograr que el gasto de entrada al reactor se incremente en un valor no mayor al 30% (130% Qd).*
COLUMNA 17, H: Diferencia de altura entre los dos vertederos del controlador de caudal en m.—

$$H = Emin2 - Emin1$$

COLUMNA 18, Qa: Caudal de alivio del segundo vertedero del controlador de caudal.—

$$Qa = (1.8 * N°Cam * H * B)^{\frac{3}{2}}$$

COLUMNA 19, Yc2: Altura crítica que ocurriría en el principio de la contracción para un caudal igual al doble del gasto de diseño.—

$$Yc2 = \frac{2 * Emin2}{3}$$

COLUMNA 20, q2: Caudal unitario en la contracción del controlador de caudal en $m^3/s/m$.—

$$q2 = (g * Yc2^3)^{0.5}$$

COLUMNA 21, Qr: Caudal que entra al reactor en lps.—

$$Qr = Wc * q2 * 1000$$

COLUMNA 22, QT: Caudal total igual a la suma de Qa y Qr en lps.—

$$QT = Qa + Qr$$

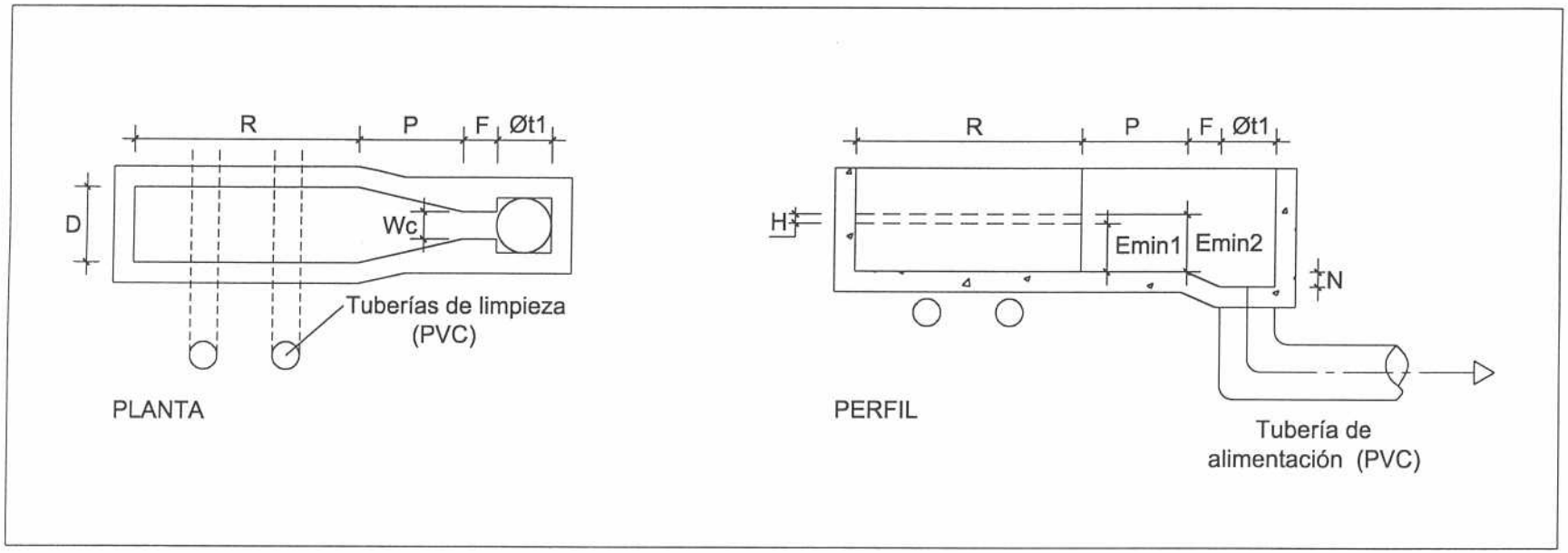
COLUMNA 23, Q=2Qd: Gasto igual al doble del caudal del diseño.—*Es un valor para compararlo con el QT, para indicar exactamente cual es el valor de tanteo exacto de Emin2.*

COLUMNA 24, %, Porcentaje del caudal de diseño que entra al reactor para un gasto de 2Qd.—*Para verificar que cumpla con el parámetro del porcentaje anteriormente explicado en los Criterios de Diseño.*

$$\% = \frac{Qr * 100}{Qd}$$

CUADRO IV.3 - CONTROLADOR DE CAUDAL

Qd (lps)	N	N.Cam.	B (m)	R (m)	D (m)	P (m)	F (m)	ϕT1 (mm)	h (cm)	Wc (cm)	C (cm)	q1 (m^3/s/m)	Yc1 (m)	Emin1 (m)	Emin2 (m)	H (m)	Qa (lps)	Yc2 (m)	q2 (m^3/s/m)	Qr (lps)	QT (lps)	Q=2Qd (lps)	%
5	6	1	0,50	0,50	0,50	0,30	0,10	100	4,8	5	4	0,100	0,101	0,151	0,175	0,024	3,4	0,117	0,125	6,2	9,6	10	125
7,5	6	1	0,50	0,50	0,50	0,30	0,10	150	7,2	5	4	0,150	0,132	0,198	0,23	0,032	5,2	0,153	0,188	9,4	14,6	15	125
10	6	1	0,50	0,50	0,50	0,30	0,10	150	9,6	5	4	0,200	0,160	0,240	0,279	0,039	7,0	0,186	0,251	12,6	19,6	20	126
12,5	6	1	0,50	0,50	0,50	0,30	0,10	150	12,0	5	4	0,250	0,185	0,278	0,324	0,046	8,9	0,216	0,314	15,7	24,6	25	126
15	18	2	0,50	1,15	0,50	0,60	0,20	200	7,2	10	8	0,150	0,132	0,198	0,228	0,030	10,9	0,152	0,186	18,6	29,4	30	124
20	18	2	0,50	1,15	0,50	0,60	0,20	200	9,6	10	8	0,200	0,160	0,240	0,277	0,037	14,9	0,185	0,249	24,9	39,8	40	124
25	18	2	0,50	1,15	0,50	0,60	0,20	250	12,0	10	8	0,250	0,185	0,278	0,321	0,043	18,4	0,214	0,310	31,0	49,4	50	124
30	18	2	0,50	1,15	0,50	0,60	0,20	250	14,4	10	8	0,300	0,209	0,314	0,363	0,048	22,1	0,242	0,372	37,2	59,3	60	124
35	18	2	0,50	1,15	0,50	0,60	0,20	250	16,8	10	8	0,350	0,232	0,348	0,402	0,054	26,0	0,268	0,435	43,5	69,4	70	124
40	36	2	0,75	1,65	0,55	0,77	0,28	300	12,8	20	11	0,200	0,160	0,240	0,285	0,045	28,2	0,190	0,259	51,7	80,0	80	129
50	36	2	0,75	1,65	0,55	0,77	0,28	300	16,0	20	11	0,250	0,185	0,278	0,33	0,052	35,1	0,220	0,323	64,6	99,8	100	129
60	36	2	0,75	1,65	0,55	0,77	0,28	400	19,3	20	11	0,300	0,209	0,314	0,372	0,058	41,5	0,248	0,387	77,4	118,8	120	129
70	36	2	0,75	1,65	0,55	0,77	0,28	400	22,5	20	11	0,350	0,232	0,348	0,413	0,065	49,2	0,275	0,453	90,5	139,7	140	129
80	84	2	1,00	2,20	0,65	0,96	0,34	400	19,3	25	13	0,320	0,219	0,328	0,387	0,059	57,0	0,258	0,410	102,6	159,6	160	128
100	84	2	1,00	2,20	0,65	0,96	0,34	400	24,1	25	13	0,400	0,254	0,380	0,449	0,069	71,1	0,299	0,513	128,2	199,4	200	128
120	84	2	1,00	2,20	0,65	0,96	0,34	500	28,9	25	13	0,480	0,286	0,430	0,507	0,077	85,3	0,338	0,615	153,9	239,2	240	128
140	84	2	1,00	2,20	0,65	0,96	0,34	500	33,7	25	13	0,560	0,317	0,476	0,562	0,086	99,8	0,375	0,718	179,6	279,3	280	128



V REACTOR ANAERÓBICO (RALF)

V.1 GENERALIDADES

El objetivo del reactor anaeróbico es la degradación de la materia orgánica del agua servida que proviene del controlador de caudal, por medio de la acción de las bacterias anaeróbicas que se encuentran en el fondo del reactor, a fin de adecuar la carga orgánica remanente a los valores permisibles impuestos por la Normativa Sanitaria y poder descargar a los cursos naturales de agua. El reactor anaeróbico tiene una forma tronco-cónica invertida, con un dispositivo de descarga de lodos en el fondo; consta de un distribuidor central de caudal que conduce el agua hasta el fondo del reactor mediante unos tubos distribuidores; dicho flujo pasa a través de un lecho de lodos, ascendiendo paulatinamente hasta el separador de fase GLS (gas-líquido-sólido), donde se genera un flujo radial a través de un decantador perimetral, para finalmente descargar por medio de unos vertederos en un canal perimetral con pendiente para su posterior salida del reactor; igualmente posee un gasómetro en la parte superior destinado a acumular los gases desprendidos para su posterior descarga.

V.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento del reactor anaeróbico de lecho fluidificado (Ref. 2 y 3), se basa en conducir los residuos sanitarios, previamente desbastados y desarenados, hasta la parte central superior del tanque. En este punto se ubica la cámara circular distribuidora de caudal, tipo radial divergente, en la cual el agua servida se introduce en la parte central, fluyendo hacia la periferia. En la parte periférica de esta cámara hay vertederos triangulares que dividen el flujo de forma homogénea y equitativa, para cada compartimiento o cajuela que alimenta los tubos difusores, los cuales conducen el agua hasta la base del reactor, donde se distribuye uniformemente por toda la superficie del fondo.

Después de haberse distribuído la carga orgánica en la superficie del fondo, la misma se mezcla con el manto de lodo (mezcla completa), el cual previamente ha sido formado o inoculado y es altamente concentrado en bacterias anaerobias principalmente del tipo metanogénicas. La materia orgánica contenida en los residuos es retenida en el manto de lodo debido a las bajas velocidades ascensionales, y los sólidos que se sedimentan encuentran el equilibrio entre la fuerza ascensional y la fuerza de gravedad. El material biodegradable que quedó retenido en el manto de lodo es degradado y estabilizado a través de la actividad metabólica de las bacterias, las cuales transforman la materia orgánica en suspensión y/o disuelta en productos estables como el agua, biogás (gas metano, gas carbónico, entre otros), y materias inertes.

En la parte media superior del reactor hay una cortina separadora, la cual funciona como separador de fase para gas, líquido y sólido (denominado separador GLS). Dicha cortina funciona también como interfase entre la zona de digestión y decantación. Los gases desprendidos siguen hacia el gasómetro, ubicado en la parte superior interna del reactor, desde donde son desechados a la atmósfera o captados para fines energéticos.

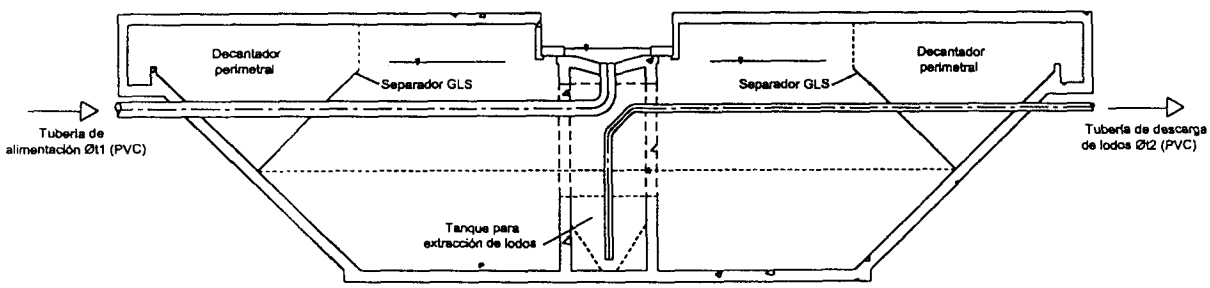
La fracción sólida (copos de lodo), arrastrada por las burbujas de gas, se desprende de ellas en la parte superior y vuelve al manto de lodo. El líquido sigue hacia el decantador periférico

donde las partículas que son arrastradas por el flujo son decantadas, regresando al manto de lodo. El líquido clareado es vertido en la parte superior periférica del tanque por los vertederos triangulares instalados en todo el perímetro del mismo; dicho líquido, es recolectado por una canaleta lateral que conduce el efluente hacia el cuerpo receptor o hacia otra unidad de tratamiento secundario.

Tanto la parte superior de la zona de digestión, como la zona de decantación, están equipadas con retenedores de espuma, con el objetivo de retenerla dentro del reactor. El lodo excedente producido por el reactor debe ser retirado periódicamente y conducido hacia lechos de secado, en los cuales, una vez deshidratado, puede ser destinado como fertilizante agrícola, o desechado en terraplenes sanitarios. En el presente trabajo no ha sido contemplado el diseño de los lechos de secado.

Desde el fondo del reactor, la velocidad de ascensión del flujo disminuye, permitiendo que los sólidos que se sedimentan encuentren un punto de equilibrio entre la fuerza ascensional y la gravedad, estacionándose a una determinada altura. Dichos sólidos, estacionados y distribuidos en toda el área transversal del reactor, sirven de soporte para el desarrollo de bacterias. Por cuanto en el ambiente no hay oxígeno suficiente, solamente las bacterias anaeróbicas tienen condiciones de desarrollo. A medida que el manto de lodo se vuelve más denso pasa a funcionar como un filtro, reteniendo también los sólidos de menores dimensiones que difícilmente son retirados, en los procesos clásicos de decantación.

La masa biológica, representada por el manto de lodo, presenta condiciones ideales en lo que se refiere a relación alimento/bacteria. El sustrato disponible pasa a ser el total de biodegradables presentes en el efluente cloacal, incluso los solubles y coloidales. La eficiencia del proceso, además de depender de la temperatura y acidez del medio, es muy dependiente del tiempo de retención hidráulica, o sea el tiempo disponible para que las bacterias utilicen el sustrato. Como la unidad es cerrada, el biogás producido puede acumularse en el gasómetro, permitiendo el aprovechamiento del elevado potencial energético representado por el metano.



REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE (RALF)

V.3 DISEÑO HIDRÁULICO-SANITARIO

V.3.1 CRITERIOS Y PARÁMETROS DE DISEÑO

El dimensionado hidráulico–sanitario del reactor ha sido realizado en función de los parámetros de diseño recomendados por el Ing. Decio Jürgensen, en su publicación "Aplicación de la Tecnología Anaerobia para Tratamiento de Alcantarillado utilizando los Reactores Anaeróbicos de Flujo Ascendente contra Manto de Lodo – RALF" (Ref. 2); así como los presentados en la publicación "Anaerobic Sewage Treatment" de G. Lettinga – A. Van Haandel (Ref. 3). Los criterios generales y parámetros mencionados se exponen a continuación:

- La carga orgánica aplicada en el reactor (C.O. = $DB0_5$/bacterias en el lodo por día) debe estar en el orden de 0,5 a 1,5 kg. DB0/m^3/día.

- Las velocidades ascensionales están en el siguiente orden:
  Velocidad máxima en la sección central:
  Vmax = 0,5 m/h para Qmedio
  Vmax = 0.90 m/h para Qmax
  Velocidad máxima en la base:
  Vmax = 2,0 m/h

- El tiempo de retención hidráulica debe ser mayor de 8 horas para el caudal medio de proyecto.

- La distribución del efluente cloacal debe realizarse a través de tubos difusores de forma tal de generar un flujo uniforme en el fondo del reactor. Esta distribución uniforme se logra dividiendo el área de la losa de fondo en hexágonos y descargando la tubería difusora en el centro del hexágono; la relación recomendada debe estar en el orden de 1 difusor por cada 2 a 4 m^2 de área de fondo de reactor.

- El flujo debe ser dirigido de tal forma que provoque un movimiento ascendente contra el manto de lodo, eliminándose todas las posibles zonas muertas y cortocircuitos en el reactor.

- La profundidad del agua en el reactor debe estar entre 4,50 y 6,00 m, dando así condiciones de asimilar las capas de lodo del manto, la zona de transición, la zona de decantación y la zona de acumulación de espuma. En el presente trabajo ha sido adoptada una altura del decantador perimetral igual a 2,10m para los de 6 distribuidores, 2,40m para los de 18 distribuidores, 2,70m para los de 36 distribuidores y 3,00m para los de 84 distribuidores.

- El diámetro exterior del dispositivo de extracción de lodo en el fondo del reactor ha sido adoptado igual a 1,50m para los casos de 6 y 18 distribuidores, e igual a 2,60m para los casos de 36 y 84 distribuidores. El diámetro interno de dicho dispositivo es igual a 1,20m y 2,00m respectivamente.

- La inclinación de las paredes de la superficie tronco-cónica debe estar comprendida entre 45° y 60° con relación a una línea horizontal; de esta forma se evita la acumulación de sedimento en las paredes.

- El volumen del decantador perimetral debe estar comprendido entre el 20 y 35% del volumen total del reactor.

Debe preverse dentro del reactor, un conjunto de dispositivos que resultan indispensables para su correcto funcionamiento, cuyo diseño se indica en los apartes siguientes. Dichos dispositivos son:

a- Distribuidor central de caudal y tubos distribuidores
b- Separador GLS (gas-líquido-sólido), para conformar el decantador perimetral
c- Cortina antiespuma y vertedero perimetral

El distribuidor central de caudal está provisto de vertederos triangulares (90°) en su perímetro interno, con ancho igual a 20cm cada uno y en número igual al de las tuberías de distribución; todo esto permite determinar el diámetro interno de dicho distribuidor. La longitud de las cajuelas del distribuidor central ha sido adoptada igual a 30cm para los casos de 6 y 18 distribuidores, e igual a 60cm para los casos de 36 y 84 distribuidores.

El separador GLS es de forma tronco-cónica, con altura ligeramente menor a la del decantador perimetral y ángulo de inclinación igual al del reactor.

La cortina antiespuma tiene una altura adoptada igual a 0,40m. El aliviadero perimetral ha sido diseñado con vertederos triangulares (90°) de 16cm de ancho, en un número igual a 36, 90, 144 y 252 unidades para el caso de 6, 18, 36 y 84 distribuidores respectivamente.

El diámetro de la tubería de extracción de lodo, fue adoptado igual a 200mm para todos los casos. Las tuberías de distribución fueron adoptadas igual a 75mm para todos los casos.

A título informativo, se presentan en el cuadro siguiente los valores típicos de aguas servidas domésticas

CUADRO V.1

Valores típicos de Aguas Servidas Domésticas (Rich, Linvill G.)

Parámetro	Concentración (mg/l)
DBO 5	200
DQO	400
Sólidos Suspendidos Totales	200
Sólidos Suspendidos Volátiles	150
Sólidos Suspendidos Biodegradables	90
Nitrógeno (N): Amoniacal libre	30
Fósforo (P): Ortofosfato	10

V.3.2 DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES EN EL FONDO

Uno de los criterios determinantes en el diseño del reactor anaeróbico es lograr una distribución de caudal a nivel del fondo del reactor lo más uniforme posible, con el objeto de evitar zonas de estancamiento o flujos locales de alta velocidad que afecten la estabilidad del lodo suspendido. A fin de lograr en el fondo la uniformidad del caudal proveniente del distribuidor central a través de los tubos distribuidores. se requiere ubicar el punto de descarga de estos últimos en forma equidistante, generando así áreas tributarias por puntos de descarga iguales. El método que ha sido adoptado para generar áreas tributarias iguales es dividir el área del fondo en hexágonos, cuyos centros coinciden con las descargas de los tubos distribuidores, y en cuyos vértices se tiene la ubicación óptima de las columnas del reactor. La combinación de todos estos hexágonos genera una figura que razonablemente se adecúa a la planta circular del fondo del reactor.

En tal sentido, el proceso de ubicación de las descargas de los tubos de distribución en el fondo del reactor se inicia con la combinación de 7 hexágonos (seis alrededor de uno central), en la cual el hexágono central corresponde a la ubicación del dispositivo de extracción de lodo, y los seis perimetrales a las áreas tributarias del mismo número de tubos de distribución; este primer diseño ha generado la configuración de fondo para el reactor de 6 tubos de distribución. La siguiente configuración se genera colocando un nuevo anillo de doce hexágonos perimetrales a la distribución anterior, originando la configuración de fondo para el reactor de 18 tubos de distribución. En forma similar se genera la configuración de fondo para el reactor de 36 tubos de distribución, colocando un nuevo anillo de 18 hexágonos perimetrales alrededor de la configuración de 18 tubos. Por último, se genera la mayor configuración analizada correspondiente a 84 tubos de distribución, para lo cual se requiere la colocación de dos anillos perimetrales de 24 hexágonos cada uno.

Para todas las configuraciones los centros de los hexágonos de cada anillo perimetral conforman a su vez un hexágono, lo cual se traduce en simetrías radiales a 60° que determinan la dirección radial de los ejes de columnas, ubicando las mismas en ciertos vértices de los hexágonos coincidentes con dichas direcciones.

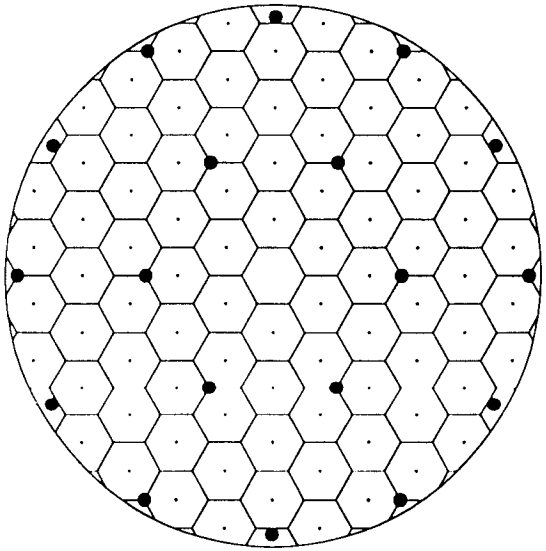
En la página siguiente. en la FIGURA V.1, se presentan las cuatro (4) configuraciones analizadas de distribución de caudal en el fondo del reactor, mostrando la combinación de hexágonos, los puntos de descarga de las tuberías de distribución, y la ubicación de las columnas del reactor.

V.3.3 DIMENSIONADO DEL REACTOR, DECANTADOR PERIMETRAL, DISTRIBUIDOR CENTRAL DE CAUDAL Y VERTEDERO PERIMETRAL.

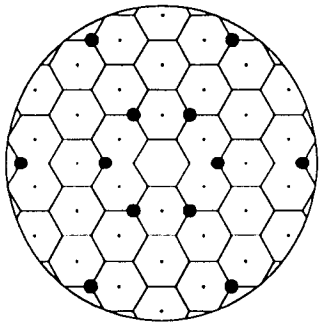
En función de los criterios anteriormente expuestos y mediante los tres formularios que se presentan a continuación, fueron determinadas las dimensiones del reactor, del decantador perimetral, del distribuidor central de caudal y vertedero perimetral, todas las cuales se presentan en los CUADROS V.2, V.3 y V.4, respectivamente.

FIGURA V.1

CONFIGURACIÓN DE ÁREAS HEXAGONALES EN EL FONDO DEL REACTOR

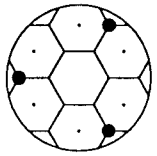


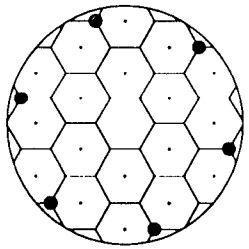
84 Hexágonos



36 Hexágonos

6 Hexágonos





18 Hexágonos

REACTOR ANAERÓBICO

FORMULARIO DEL CUADRO V.2

COLUMNA 1, Qd: Caudal de diseño en lps.—

COLUMNA 2, N: Número de tubos de distribución.—

COLUMNA 3, Qd/N: Caudal unitario por distribuidor.—

COLUMNA 4, Qd: Caudal de diseño en m^3/h.—

COLUMNA 5, V1d: Velocidad en el fondo del reactor para el Q_d.—*Se fijó el valor máximo de 2m/h para empezar con los cálculos.*

COLUMNA 6, A1n: Área neta del fondo.—

$$A1n = \frac{Qd}{V1d}$$

COLUMNA 7, A5: Área externa de la tanquilla de extracción de lodos.— *Se asumió que para reactores con hasta 18 tubos de distribución el diámetro de ellos será de 1,5 m, y para mayores de 18 tubos de distribución será de 2,6 m.*

$$0{,}25*\pi*diámtero^2$$

COLUMNA 8, A1n+A5: Representa el área bruta del fondo del reactor.

COLUMNA 9, ϕ1: Diámetro del fondo del reactor.—

$$\phi 1 = \sqrt{\frac{(A1n + A5)*4}{\pi}}$$

COLUMNA 10, A1n/N: Área unitaria por distribuidor.

COLUMNA 11, V2d: Velocidad central del reactor para el Qd—*Se fijó un valor máximo de 0,9 m/h para empezar con los cálculos.*

COLUMNA 12, A2: Área central del reactor.— $A2 = \frac{Qd}{V2d}$

COLUMNA 13, ϕ2: Diámetro central del reactor.— $\phi 2 = \sqrt{\frac{A2*4}{\pi}}$

COLUMNA 14, H: Altura total del agua en el reactor.— *Se fijó un valor de 4,80 m para reactores con 6 distribuidores, 5,20m para los de 18 distribuidores, 5,60m para los de 36 distribuidores y 6,00m para los de 84.*

COLUMNA 15, h: Altura máxima del decantador perimetral.— *Se fijó un valor de 2,10 m para reactores con 6 distribuidores, 2,40m para los de 18 distribuidores, 2,70m para los de 36 distribuidores y 3,00m para los de 84.*

COLUMNA 16, $\alpha_{inicial}$: Inclinación de las paredes del reactor y del separador GLS.—

$$\alpha_{inicial} = arctag\left(\frac{(H-h)*2}{\phi_2 - \phi_1}\right)$$

COLUMNA 17, α_{mod}: Inclinación de las paredes del reactor y del separador GLS corregido.-- *Si el ángulo es mayor de 60° será 60°, si está entre 45° y 60° será el ángulo en cuestión, y si es menor de 45° será 45°. (Ver referencia).*

COLUMNA 18, ϕ1mod: Diámetro del fondo del reactor modificado.— *Si el ángulo es mayor de 45° ϕ_1 permanecerá igual. Si el ángulo es menor de 45°:*

$$\phi 1 = \phi 2 - \frac{2(H-h)}{tan(45)}$$

COLUMNA 19, ϕ2mod: Diámetro central del reactor modificado.—Si *el ángulo es menor de 60° ϕ_2 permanecerá igual. Si el ángulo es mayor de 60°:*

$$\phi 2 = \phi 1 + \frac{2(H-h)}{tan(60)}$$

COLUMNA 20, ϕ3: Diámetro superior del reactor.—

$$\phi 3 = \phi 1 + \frac{2 * H}{tan(\alpha_{mod})}$$

FORMULARIO DEL CUADRO V.3

COLUMNA 1. Qd: Caudal de diseño en lps.—
COLUMNA 2. N: Número de tubos de distribución.—
COLUMNA 3. Qm: Caudal medio en lps.—
COLUMNA 4. Qm: Caudal medio en m^3/h. —
COLUMNA 5. Vol.R: Volumen total del reactor.— *(Volumen del tronco-cono invertido formado por el reactor).—*
COLUMNA 6. Vol.D: Volumen del decantador perimetral.— *(volumen formado por la diferencia entre los 2 tronco-conos qe se forman en la parte superior del reactor a partir del comienzo del GLS).*
COLUMNA 7. Vol.D/Vol.R: Relación en % de los volúmenes del decantador y del reactor.
COLUMNA 8. $V1d_{mod}$: Nueva velocidad en el fondo del reactor para el caudal de diseño.—

$$V1d = \frac{Qd * 4}{\phi 1 \text{mod}^2 * \pi} - A5$$

COLUMNA 9. $V2d_{mod}$: Velocidad central del reactor modificada para el caudal de diseño.—

$$V2d = \frac{Qd * 4}{\phi 2 \text{mod}^2 * \pi}$$

COLUMNA 10, $V2m_{mod}$: Velocidad central del reactor modificada para el caudal medio.—

$$V2m_{mod} = \frac{V2d_{mod}}{2,4}$$

COLUMNA 11, V3: Velocidad mínima en el decantador perimetral para el caudal de diseño.—

$$V3 = \frac{Qd}{\phi 2 \text{mod} * h * \pi}$$

COLUMNA 12, TRH: Tiempo de retención hidráulica.—

$$TRH = \frac{Vol.R}{Qm}$$

FORMULARIO DEL CUADRO V.4

COLUMNA 1, Q_d: Caudal de diseño en lps.—

COLUMNA 2, N: Número de vertederos en distribuidor central de alimentación.—

COLUMNA 3, A2: Área central del reactor.—A2=Qd/V_{2d}, *donde V_{2d} es la velocodad central del reactor para el Qd*

COLUMNA 4, αmod: Inclinación de las paredes del reactor y del separador GLS corregido.—

COLUMNA 5, ϕ3 : Diámetro superior del reactor.—

COLUMNA 6, ϕ3 mod.: Diámetro superior del reactor modificado.—

$$\phi 3.\text{mod} = \phi 3 - \frac{0.6}{tan(\alpha\,\text{mod.})}$$

COLUMNA 7, QvertE: Caudal unitario en cada vertedero de alimentación en lps. –

QvertE=Qd/N

COLUMNA 8, HvertE: Carga de agua en vertedero de alimentación en cm.—

$$HvertE = \left(\frac{QvertE}{1000 * C}\right)^{2/5} * 100 \quad donde\ \ C\ es\ igual\ a\ 1.34.$$

COLUMNA 9, ϕT1: Diámetro de la tubería de alimentación en mm.—

COLUMNA10, VT1: Velocidad para el caudal de diseño en el tubo de alimentación (m/s)

$$VT1 = \frac{Qd * 4}{1000 * \pi * (\phi T1 / 1000)^2}$$

COLUMNA 11, ϕT2: Diámetro de las tuberías de distribución.—

COLUMNA 12, ϕT3: Diámetro de la tubería de extracción de lodos.—

COLUMNA 13, b: Ancho de los vertederos triangulares.—

COLUMNA 14, Pi: Perímetro interior de las cajuelas del distribuidor de caudal.—

Pi=N*b

COLUMNA 15, ϕi: Diámetro interior de las cajuelas del distribuidor de caudal.— *Si Pi/π+0.6>1.2 el ϕi será igual a 0.6m de lo contrario será igual a Pi/π+0.6.*

COLUMNA 16, ϕe: Diámetro exterior de las cajuelas del distribuidor de caudal.— *ϕe=ϕI+0.60 m hasta los casos de 18 distribuidores (ya que la longitud de las cajuelas es de 30cm), mientras que para los de 36 y 84 distribuidores ϕe=ϕI+1.20.(longitud de cajuelas 0.60m)*

COLUMNA 17, M: Número de vertederos perimetrales de descarga.—

COLUMNA 18, M/A2: Relación entre el número de vertederos de descarga y el área central.

COLUMNA 19, QvertD: Caudal unitario en cada vertedero de descarga en lps.—

QvertD=Q_d/M

COLUMNA 20, HvertD: Carga de agua en vertedero de descarga en m.—

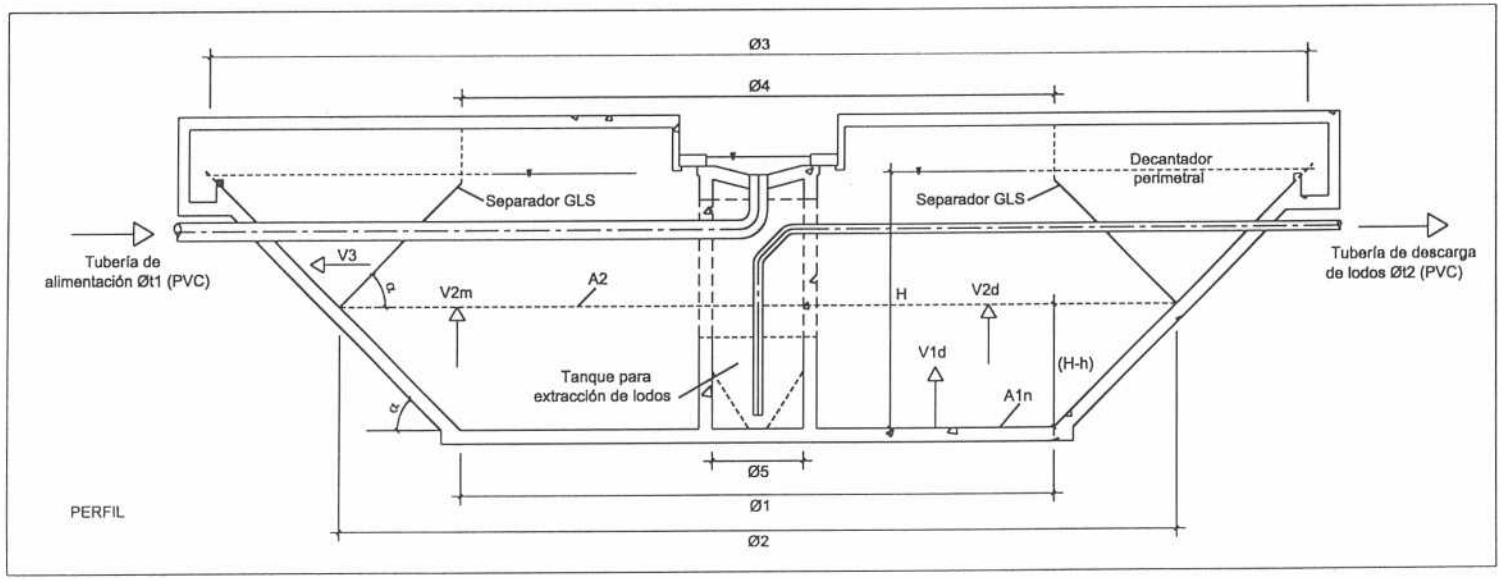
$$HvertD = \left(\frac{QvertD}{1000 * C}\right)^{2/5} * 100 \qquad \text{donde C=1.34}$$

COLUMNA 21, Svert: Separación entre ejes de vertedero de descarga.—

Svert=ϕ3.mod.*π / M

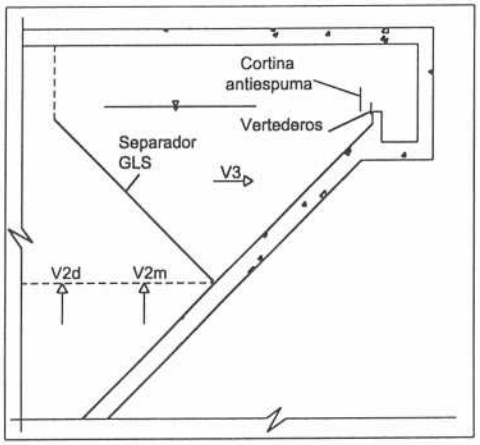
CUADRO V.2 - DIMENSIONADO DEL REACTOR ANAERÓBICO

Qd (lps)	N	Qd/N (lps)	Qd (m^3/h)	V1d (m/h)	A1n (m^2)	A5 (m^2)	A1n+A5 (m^2)	ϕ1 (m)	A1n/N. (m^2)	V2d (m/h)	A2 (m^2)	ϕ2 (m)	H (m)	h (m)	α inicial	α mod.	ϕ1 mod. (m)	ϕ2 mod. (m)	ϕ3 (m)
5,00	6	0,83	18,00	2,00	9,00	1,77	10,77	3,70	1,50	0,90	20,00	5,05	4,80	2,10	76,03	60,00	3,70	6,82	9,25
7,50	6	1,25	27,00	2,00	13,50	1,77	15,27	4,41	2,25	0,90	30,00	6,18	4,80	2,10	71,84	60,00	4,41	7,53	9,95
10,00	6	1,67	36,00	2,00	18,00	1,77	19,77	5,02	3,00	0,90	40,00	7,14	4,80	2,10	68,57	60,00	5,02	8,13	10,56
12,50	6	2,08	45,00	2,00	22,50	1,77	24,27	5,56	3,75	0,90	50,00	7,98	4,80	2,10	65,86	60,00	5,56	8,68	11,10
15,00	18	0,83	54,00	2,00	27,00	1,77	28,77	6,05	1,50	0,90	60,00	8,74	5,20	2,40	64,36	60,00	6,05	9,29	12,06
20,00	18	1,11	72,00	2,00	36,00	1,77	37,77	6,93	2,00	0,90	80,00	10,09	5,20	2,40	60,58	60,00	6,93	10,17	12,94
25,00	18	1,39	90,00	2,00	45,00	1,77	46,77	7,72	2,50	0,90	100,00	11,28	5,20	2,40	57,50	57,50	7,72	11,28	14,34
30,00	18	1,67	108,00	2,00	54,00	1,77	55,77	8,43	3,00	0,90	120,00	12,36	5,20	2,40	54,91	54,91	8,43	12,36	15,74
35,00	18	1,94	126,00	2,00	63,00	1,77	64,77	9,08	3,50	0,90	140,00	13,35	5,20	2,40	52,67	52,67	9,08	13,35	17,01
40,00	36	1,11	144,00	2,00	72,00	5,31	77,31	9,92	2,00	0,90	160,00	14,27	5,60	2,70	53,12	53,12	9,92	14,27	18,33
50,00	36	1,39	180,00	2,00	90,00	5,31	95,31	11,02	2,50	0,90	200,00	15,96	5,60	2,70	49,57	49,57	11,02	15,96	20,56
60,00	36	1,67	216,00	2,00	108,00	5,31	113,31	12,01	3,00	0,90	240,00	17,48	5,60	2,70	46,68	46,68	12,01	17,48	22,58
70,00	36	1,94	252,00	2,00	126,00	5,31	131,31	12,93	3,50	0,90	280,00	18,88	5,60	2,70	44,26	45,00	13,08	18,88	24,28
80,00	84	0,95	288,00	2,00	144,00	5,31	149,31	13,79	1,71	0,90	320,00	20,19	6,00	3,00	43,17	45,00	14,19	20,19	26,19
100,00	84	1,19	360,00	2,00	180,00	5,31	185,31	15,36	2,14	0,90	400,00	22,57	6,00	3,00	39,78	45,00	16,57	22,57	28,57
120,00	84	1,43	432,00	2,00	216,00	5,31	221,31	16,79	2,57	0,90	480,00	24,72	6,00	3,00	37,09	45,00	18,72	24,72	30,73
140,00	84	1,67	504,00	2,00	252,00	5,31	257,31	18,10	3,00	0,90	560,00	26,70	6,00	3,00	34,90	45,00	20,70	26,70	32,71



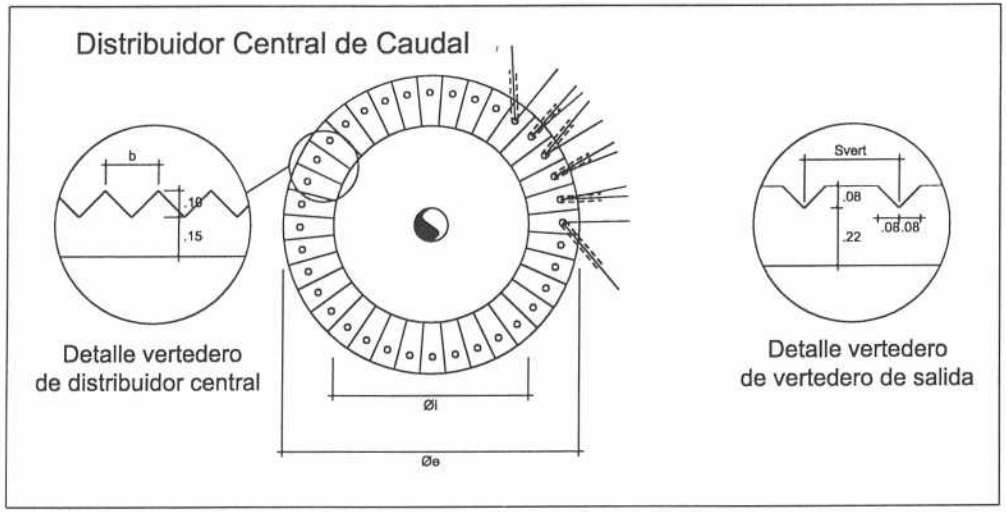
CUADRO V.3 - VERIFICACIÓN DEL DECANTADOR PERIMETRAL

Qd (lps)	N	Qmed (lps)	Qmed (m^3/h)	Vol.R (m^3)	Vol.D (m^3)	V.D/V.R (%)	V1d mod. (m/h)	V2d mod. (m/h)	V2m mod. (m/h)	V3 (m/h)	TRH (h)
5	6	1,64	5,92	163,89	52,51	32,04	2,00	0,49	0,21	0,40	27,68
7,5	6	2,47	8,88	199,04	57,55	28,92	2,00	0,61	0,25	0,54	22,41
10	6	3,29	11,84	232,18	61,84	26,64	2,00	0,69	0,29	0,67	19,61
12,5	6	4,17	15,01	263,96	65,62	24,86	2,00	0,76	0,32	0,79	17,59
15	18	5,08	18,30	338,48	92,32	27,28	2,00	0,80	0,33	0,77	18,49
20	18	6,98	25,11	404,70	100,41	24,81	2,00	0,89	0,37	0,94	16,12
25	18	8,93	32,16	498,35	122,90	24,66	2,00	0,90	0,38	1,06	15,50
30	18	10,95	39,42	598,13	148,57	24,84	2,00	0,90	0,38	1,16	15,17
35	18	13,03	46,90	697,92	174,23	24,96	2,00	0,90	0,38	1,25	14,88
40	36	15,15	54,55	881,13	233,01	26,44	2,00	0,90	0,38	1,19	16,15
50	36	19,55	70,38	1102,27	296,16	26,87	2,00	0,90	0,38	1,33	15,66
60	36	24,11	86,81	1323,42	359,32	27,15	2,00	0,90	0,38	1,46	15,24
70	36	28,83	103,80	1542,55	411,05	26,65	1,95	0,90	0,38	1,57	14,86
80	84	33,69	121,30	1931,58	544,89	28,21	1,89	0,90	0,38	1,51	15,92
100	84	43,79	157,65	2397,83	604,82	25,22	1,71	0,90	0,38	1,69	15,21
120	84	54,38	195,77	2863,86	658,23	22,98	1,60	0,90	0,38	1,85	14,63
140	84	65,31	235,12	3329,73	706,70	21,22	1,52	0,90	0,38	2,00	14,16



CUADRO V.4 - DISTRIBUIDOR CENTRAL DE CAUDAL Y VERTEDERO PERIMETRAL

Qd (lps)	N	A2 (m^2)	α mod.	ϕ3 (m)	ϕ3 mod. (m)	QvertE (lps)	HvertE (cm)	ϕT1 (mm)	VT1 (m/s)	ϕT2 (mm)	ϕT3 (mm)	b (m)	Pi (m)	ϕi (m)	ϕe (m)	M	M/A2 (vert/m^2)	QvertD (lps)	HvertD (cm)	Svert (m)
5,00	6	20,00	60,00	9,25	8,90	0,83	5,22	100	0,64	75	200	0,20	1,20	0,60	1,20	36	1,80	0,14	2,55	0,78
7,50	6	30,00	60,00	9,95	9,61	1,25	6,14	150	0,42	75	200	0,20	1,20	0,60	1,20	36	1,20	0,21	3,00	0,84
10,00	6	40,00	60,00	10,56	10,21	1,67	6,88	150	0,57	75	200	0,20	1,20	0,60	1,20	36	0,90	0,28	3,36	0,89
12,50	6	50,00	60,00	11,10	10,75	2,08	7,53	150	0,71	75	200	0,20	1,20	0,60	1,20	36	0,72	0,35	3,68	0,94
15,00	18	60,00	60,00	12,06	11,71	0,83	5,22	200	0,48	75	200	0,20	3,60	1,15	1,75	90	1,50	0,17	2,74	0,41
20,00	18	80,00	60,00	12,94	12,59	1,11	5,85	200	0,64	75	200	0,20	3,60	1,15	1,75	90	1,13	0,22	3,08	0,44
25,00	18	100,00	57,50	14,34	13,96	1,39	6,40	250	0,51	75	200	0,20	3,60	1,15	1,75	90	0,90	0,28	3,36	0,49
30,00	18	120,00	54,91	15,73	15,31	1,67	6,88	250	0,61	75	200	0,20	3,60	1,15	1,75	90	0,75	0,33	3,62	0,53
35,00	18	140,00	52,67	17,01	16,55	1,94	7,32	250	0,71	75	200	0,20	3,60	1,15	1,75	90	0,64	0,39	3,85	0,58
40,00	36	160,00	53,12	18,32	17,87	1,11	5,85	300	0,57	75	200	0,20	7,20	2,29	3,49	144	0,90	0,28	3,36	0,39
50,00	36	200,00	49,57	20,56	20,05	1,39	6,40	300	0,71	75	200	0,20	7,20	2,29	3,49	144	0,72	0,35	3,68	0,44
60,00	36	240,00	46,68	22,57	22,01	1,67	6,88	400	0,48	75	200	0,20	7,20	2,29	3,49	144	0,60	0,42	3,95	0,48
70,00	36	280,00	45,00	24,28	23,68	1,94	7,32	400	0,56	75	200	0,20	7,20	2,29	3,49	144	0,51	0,49	4,21	0,52
80,00	84	320,00	45,00	26,19	25,59	0,95	5,50	400	0,64	75	200	0,20	16,80	5,35	6,55	252	0,79	0,32	3,55	0,32
100,00	84	400,00	45,00	28,57	27,97	1,19	6,02	400	0,80	75	200	0,20	16,80	5,35	6,55	252	0,63	0,40	3,88	0,35
120,00	84	480,00	45,00	30,72	30,12	1,43	6,47	500	0,61	75	200	0,20	16,80	5,35	6,55	252	0,53	0,48	4,17	0,38
140,00	84	560,00	45,00	32,70	32,10	1,67	6,88	500	0,71	75	200	0,20	16,80	5,35	6,55	252	0,45	0,56	4,44	0,40



CUADRO V.5 - DIMENSIONES FINALES ADOPTADAS PARA EL REACTOR

Qd (lps)	N	H (m)	h (m)	ϕ1 mod. (m)	ϕ2 mod. (m)	ϕ3 mod. (m)	α mod.	ϕT1 (mm)	ϕT2 (mm)	ϕT3 (mm)	b (m)	ϕi (m)	ϕe (m)	M	Svert (m)
5,00	6	4,80	2,10	3,70	6,82	8,90	60,00	100,00	75	200,00	0,20	0,60	1,20	36,00	0,78
7,50	6	4,80	2,10	4,40	7,52	9,60	60,00	150,00	75	200,00	0,20	0,60	1,20	36,00	0,84
10,00	6	4,80	2,10	5,00	8,12	10,20	60,00	150,00	75	200,00	0,20	0,60	1,20	36,00	0,89
12,50	6	4,80	2,10	5,60	8,72	10,80	60,00	150,00	75	200,00	0,20	0,60	1,20	36,00	0,94
15,00	18	5,20	2,40	6,10	9,33	11,70	60,00	200,00	75	200,00	0,20	1,20	1,80	90,00	0,41
20,00	18	5,20	2,40	6,90	10,13	12,60	60,00	200,00	75	200,00	0,20	1,20	1,80	90,00	0,44
25,00	18	5,20	2,40	7,70	11,27	14,00	57,50	250,00	75	200,00	0,20	1,20	1,80	90,00	0,49
30,00	18	5,20	2,40	8,40	12,33	15,30	54,91	250,00	75	200,00	0,20	1,20	1,80	90,00	0,53
35,00	18	5,20	2,40	9,10	13,37	16,60	52,67	250,00	75	200,00	0,20	1,20	1,80	90,00	0,58
40,00	36	5,60	2,70	9,90	14,25	17,90	53,12	300,00	75	200,00	0,20	2,30	3,50	144,00	0,39
50,00	36	5,60	2,70	11,00	15,94	20,10	49,57	300,00	75	200,00	0,20	2,30	3,50	144,00	0,44
60,00	36	5,60	2,70	12,00	17,47	22,00	46,68	400,00	75	200,00	0,20	2,30	3,50	144,00	0,48
70,00	36	5,60	2,70	13,10	18,90	23,70	45,00	400,00	75	200,00	0,20	2,30	3,50	144,00	0,52
80,00	84	6,00	3,00	14,20	20,20	25,60	45,00	400,00	75	200,00	0,20	5,40	6,60	252,00	0,32
100,00	84	6,00	3,00	16,60	22,60	28,00	45,00	400,00	75	200,00	0,20	5,40	6,60	252,00	0,35
120,00	84	6,00	3,00	18,70	24,70	30,10	45,00	500,00	75	200,00	0,20	5,40	6,60	252,00	0,38
140,00	84	6,00	3,00	20,70	26,70	32,10	45,00	500,00	75	200,00	0,20	5,40	6,60	252,00	0,40

V.4 PREDISEÑO ESTRUCTURAL

V.4.1 CRITERIOS Y PARÁMETROS DE DISEÑO

El prediseño estructural se ha basado en establecer un sistema conformado por un muro tronco-cónico invertido y un conjunto de columnas, todos los cuales se apoyan en la losa circular del fondo del reactor; sobre estas últimas se apoya la losa circular superior, y adicionalmente sobre el muro circular vertical y perimetral, el cual a su vez es soportado por el muro tronco-cónico. Este conjunto estructural actúa como un sistema de losa plana apoyada en la zona central sobre columnas sin capitel ni ábaco, y en el perímetro exterior sobre un muro contínuo.

Una vez definido el comportamiento de la estructura, se procedió a la ubicación de las columnas en determinados puntos de estancamiento de la losa de fondo, es decir en ciertos vértices de los hexágonos con alineamiento radial. Estas columnas están ubicadas en forma perimetral a lo largo de la losa de fondo y dispuestas de tal manera de no generar luces libres entre ellas que puedan provocar espesores de losa excesivos en función de los momentos que se puedan generar, y por la gran magnitud del corte por acción del punzonado. Los ejes radiales de las columnas están separados en múltiplos de 30°, debido a la simetría hexagonal que nos ofrece la disposición de la losa de fondo.

Una vez definida la disposición de las columnas, se procedió a la determinación de las franjas de columna en la losa superior, las cuales no se cortan ortogonalmente, ya que se generan franjas en las tres direcciones cortándose entre ellas con un ángulo de 60°. Dichas franjas se apoyan sobre las columnas anteriormente ubicadas, generando distintas luces en las franjas. De esta forma quedan establecidas las luces más desfavorables, las cuales coinciden con la franja más alejada del centro del reactor y en el tramo extremo cuyos apoyos son una columna y el muro perimetral. Las columnas en los casos de 6,18 y 36 tubos de distribución están alineadas a lo largo del eje de la franja, cosa que no ocurre en el caso de 84 tubos de distribución, donde por la disposición de las columnas se generan ligeros desplazamientos respecto al eje de la franja, aún cuando se mantiene la simetría hexagonal. El ancho de las franjas de columna será igual a la mitad de la longitud que existe entre los ejes de franjas consecutivas, excepto en los casos de 6 tubos de distribución donde el ancho ha sido adoptado igual a las dos terceras partes de la distancia entre el eje de franja y el eje que une los centros de las dos columnas opuestas. Los paños de losa generados tienen, en general, la forma de triángulos equiláteros.

Los criterios y parámetros para el prediseño estructural de la losa superior, columnas y muro tronco-cónico han sido adoptados a partir de lo pautado en las Ref. 6 y 7. A continuación se describen los mismos:

En función de la agresividad de los procesos bioquímicos que se desarrollan dentro del cuerpo del reactor, fue adoptado un recubrimiento del acero de refuerzo igual a 7cm en todas las superficies de concreto en contacto con el agua servida, y un recubrimiento igual a 5cm para la losa superior del reactor en contacto con el aire. Dichos recubrimientos determinan un espesor mínimo igual a 30cm para la losa inferior, muro tronco-cónico y losa de fondo del canal perimetral exterior, y un espesor mínimo igual a 25cm para la losa

superior y muro vertical del canal perimetral. El diámetro mínimo adoptado para las columnas es igual a 40cm. con el fin de evitar sobredimensionado del espesor de la losa por efecto de punzonado de las columnas.

El prediseño de la losa superior y de las columnas fue realizado según lo pautado en el método empírico para el diseño de losas planas (Ref. 6): fue calculado un espesor mínimo de losa L/36 el cual fue comparado con el espesor mínimo de 25cm establecido. Con la ayuda de la fórmula que se presenta a continuación fueron calculadas las inercias de todas las columnas. Dicho valor debe ser superior a 42000cm^4.

$$Ic = \left(2 - \left(\frac{2.3 * t_1}{Hmax.}\right)\right) * \left(\frac{8.3 * t_1{}^3 * Hmax.}{0.5 + Wd / Wl}\right)$$

Donde: *Hmax* representa la altura del reactor,
t1 representa el primer valor de espesor hallado (L/36),
Wd/Wl representa la relación entre la carga muerta y la viva.

Con estas inercias fueron determinados los diámetros definitivos de las columnas; mediante la fórmula que se presenta a continuación se calculó un segundo espesor de losa:

$$t_2 = 0.106 * Luz * \left(1 - \frac{2 * \phi c}{3 * Luz}\right) * \sqrt{\frac{W}{f'c/140}} + 4$$

Donde: *Luz*, representa la luz más desfavorable.
ϕc representa el diámetro definitivo de las columnas,
W representa la carga total calculada para el espesor de tanteo mayor calculado Previamente.
f'c es igual a 250 kg/cm^2.

A continuación fue realizado el diseño por momento, calculando el momento de diseño Mo, el cual fue comparado con el momento resistente de la sección, y en función de ésto, fueron calculados los espesores de losa. El momento resistente de la sección viene dado por la expresión:

$$R*B*d^2$$

Donde: *R* es igual a 15,65 kg/cm^2 (f'c=250kg/cm^2; Fy=4200 kg/cm^2).
B es el ancho adoptado para la franja de columna.
d representa la altura efectiva de la losa (último espesor calculado menos el recubrimiento del acero de refuerzo más interno).

El momento de diseño viene dado por la siguiente expresión:

$$M_0 = 0.09 * Pfr * Luz * \left(1.15 - \frac{\phi c}{100 * Luz}\right) * \left(1 - \frac{2 * \phi c}{300 * Luz}\right)^2$$

Donde: *Pfr* representa el peso del área comprendida entre los ejes de franja de columnas.

Seguidamente fue realizada la verificación por punzonado, donde el esfuerzo de corte permisible σc, debe ser menor a $0.5*(f'c)^{0.5}$. El esfuerzo de corte fue determinado por la expresión:

$$\sigma c = \frac{V}{A}$$

Donde: V representa el peso del área tributaria de la columna más desfavorable.
A representa el área de corte para el punzonado.

El prediseño del espesor de los muros del tronco-cono ha sido realizado en función del esfuerzo crítico para la inestabilidad de la superficie tronco-cónica y el esfuerzo del suelo para condición de empuje en reposo, considerando un factor de seguridad igual a 5. El espesor de la losa fue adoptado igual al del tronco-cono.

$$FS = \frac{qcritico}{qsuelo}$$

De donde se despeja el espesor del muro del tronco-cono:

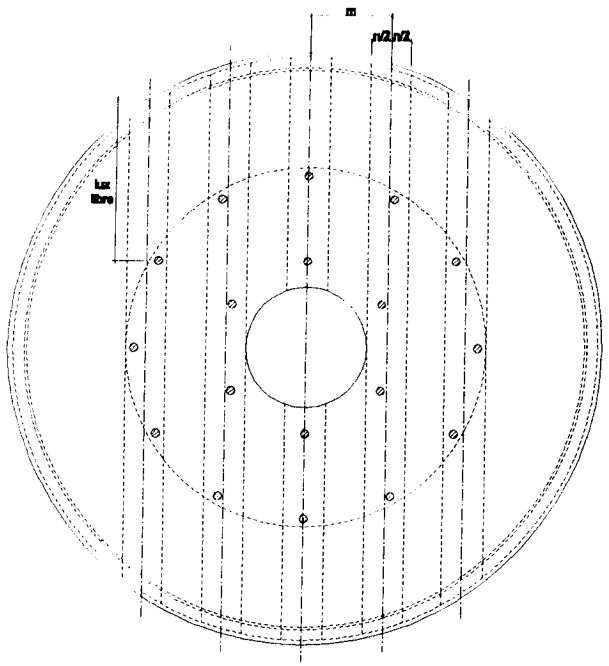
$$e2 = \left(\frac{FS * qsuelo * R^3 * 12}{3000 * E} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Donde: R representa el radio medio del tronco-cono.
E representa el módulo de Elasticidad del concreto igual a 240333 kg/cm^2.
FS representa el factor de seguridad adoptado igual a 5.
qsuelo representa el esfuerzo del suelo, siendo un valor constante de 3780 kg/m, para una carga de suelo de 3,60m, un coeficiente de empuje en reposo Kr igual a 0,50 obtenido para un ángulo de fricción ϕ de 30° $(Kr=1-sen\phi)$, y un peso específico de suelo saturado igual a 2100 kg/m^3.

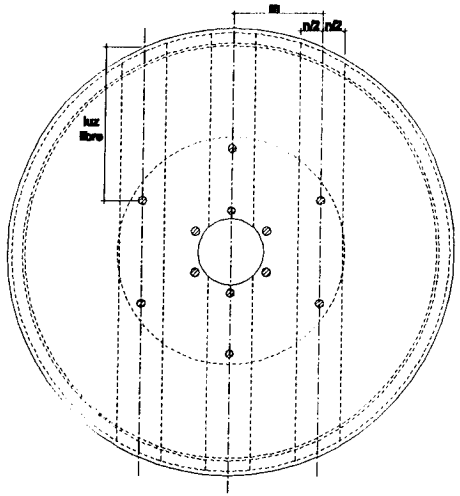
V.4.2 PREDIMENSIONADO DE LOSAS, MUROS Y COLUMNAS.

En función de los criterios de diseño anteriormente expuestos y mediante los dos formularios que se presentan a continuación, fueron determinados los espesores de las losas y muros y diámetros de columna, los cuales se presentan en los CUADROS V.6 y V.7.

FIGURA V.2
DEFINICIÓN DE FRANJAS DE COLUMNAS Y LUCES DE CÁLCULO

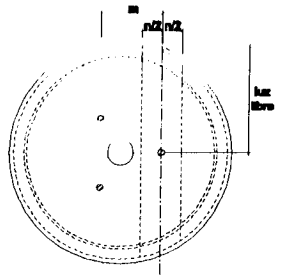


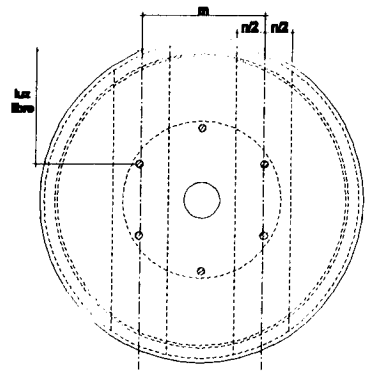
Reactor Anaeróbico 84 distribuidores - 18 columnas



Reactor Anaeróbico 36 distribuidores - 12 columnas

Reactor Anaeróbico 6 distribuidores - 3 columnas

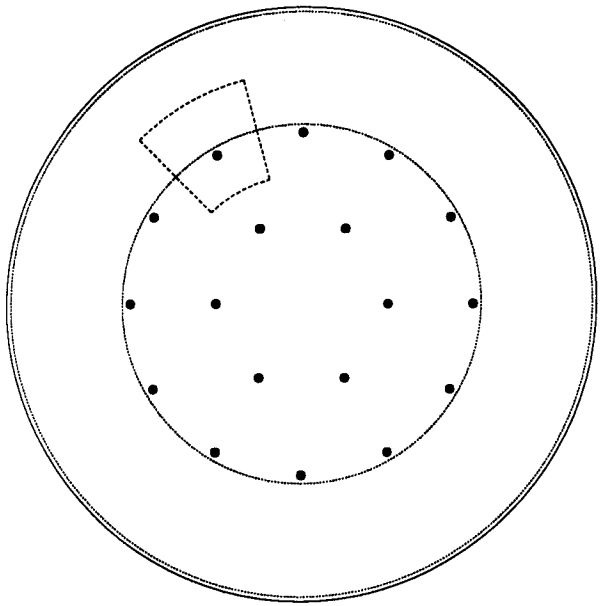




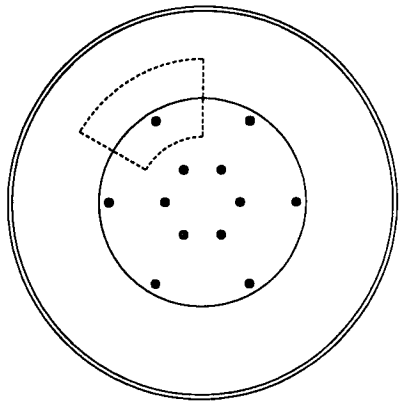
Reactor Anaeróbico 18 distribuidores - 6 columnas

FIGURA V.3

ÁREAS TRIBUTARIAS DE COLUMNAS

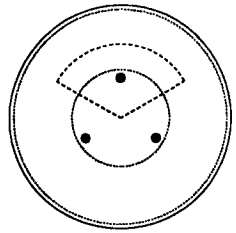


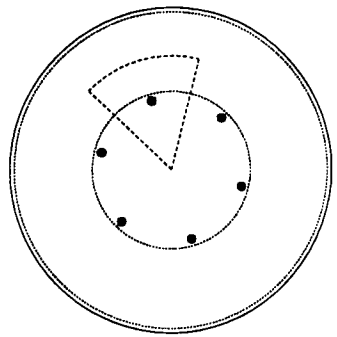
Reactor Anaeróbico 84 distribuidores - 18 columnas



Reactor Anaeróbico 36 distribuidores - 12 columnas

Reactor Anaeróbico 6 distribuidores - 3 columnas





Reactor Anaeróbico 18 distribuidores - 6 columnas

REACTOR ANAERÓBICO-LOSA SUPERIOR Y COLUMNAS

FORMULARIO DEL CUADRO V.6

COLUMNA 1, Qd: Caudal de diseño en lps.—.

COLUMNA 2, N: Número de tubos de distribución.—

COLUMNA 3, Luz: Luz más desfavorable existente entre todas las luces de todas las tiras de columnas.—*Se calculó por medio de Auto Cad.*

COLUMNA 4, Hmax: Altura total comprendida entre los lados internos de la losa superior y la losa inferior.— *Se asumió que la altura del gasómetro será igual a 1 m para todos los casos.—*

COLUMNA 5, t_0: Espesor mínimo de la losa superior.—*Se asumió que es igual a 25 cm.*

COLUMNA 6, ϕ_0: Diámetro mínimo.—*Se asumió que el diámetro mínimo de las columnas será igual a 40 cm.*

COLUMNA 7, Wd: Carga muerta inicial en kgf/m^2.—

$$Wd = \frac{t_0 * 2400}{100}$$

COLUMNA 8, Wl: Carga Viva.—*Se asumió una carga viva de 200 kgf/m^2.*

COLUMNA 9, WT: Carga total en kgf m^2 .

$$WT = Wd + Wl$$

COLUMNA10, t_1: Primer tanteo del espesor en cm.—

$$t_1 = Luz/36$$

COLUMNA 11, Ic: Inercia de la columna en cm^4.—

$$Ic = \left(2 - \left(\frac{2.3 * t_1}{Hmax.}\right)\right) * \left(\frac{8.3 * t_1^{\,3} * Hmax.}{0.5 + Wd / Wl}\right)$$

COLUMNA 12, r: Radio de la columna en cm.—

$$r = \left(\frac{Ic * 4}{\pi}\right)^{0.25}$$

COLUMNA 13, ϕc: Diámetro definitivo de la columna.—*Será igual al mayor valor redondeado en 5 entre 2r y ϕ_0.*

COLUMNA 14, t_2: Segundo espesor de tanteo en cm.—

$$t_2 = 0.106 * Luz * \left(1 - \frac{2 * \phi c}{3 * Luz}\right) * \frac{W}{fc/140} + 4$$

donde W será la carga total calculada para el espesor de tanteo mayor calculado previamente, y f'c es igual a 250 kg/cm^2.

COLUMNA 15, m: Longitud equivalente entre ejes de franjas de columnas.—*Éstas fueron calculadas mediante Auto Cad.*

COLUMNA 16, Pfr: Peso del área comprendida entre ejes de franjas de columnas (kg).—

Pfr= WT*Le*Luz

COLUMNA 17. M_0: Momento flexionante en kg*m.—

$$M_0 = 0.09 * Pfr * Luz * \left(1.15 - \frac{\phi c}{100 * Luz}\right) * \left(1 - \frac{2 * \phi c}{300 * Luz}\right)^2$$

COLUMNA 18. % de M_0: Porcentaje del momento flexionante correspondiente al momento de diseño en tableros de losas planas.—

COLUMNA 19. Md: Momento de diseño en kg*m.—

$$Md = M_0 * \%M_0$$

COLUMNA 20. d: Altura útil de la losa en cm.—*Obtenido de restarle 8 cm al espesor mayor calculado.*

COLUMNA 21. Rbd^2: Máximo momento que soporta la sección en kg*m.—

$$Rbd^2 = \frac{15.65 * m * d^2}{2}$$

*Se divide entre dos para los casos de 18, 36 y 84 distribuidores. Para el caso de 6 distribuidores se divide entre 3 y se multipilca*2.*

COLUMNA 22. t_3: Tercer y último espesor de tanteo en cm.—*Si $Rbd^2 > Md$, entonces $t_3 = d + 8cm$, sino*

$$t_3 = \left(\frac{2 * Md}{15.65 * m}\right)^{0.5} + 8cm$$

COLUMNA 23. A trib.: Área tributaria por columna más desfavorable en m^2.—*Éstas fueron obtenidas mediante el uso del Auto Cad.*

COLUMNA 24. V: Peso del área tributaria de la columna más desfavorable kg.—

$$V = (200 + (2400 * t_3)) * A\ trib.$$

COLUMNA 25. A: Área de la corteza de corte para el punzonado en cm^2.—

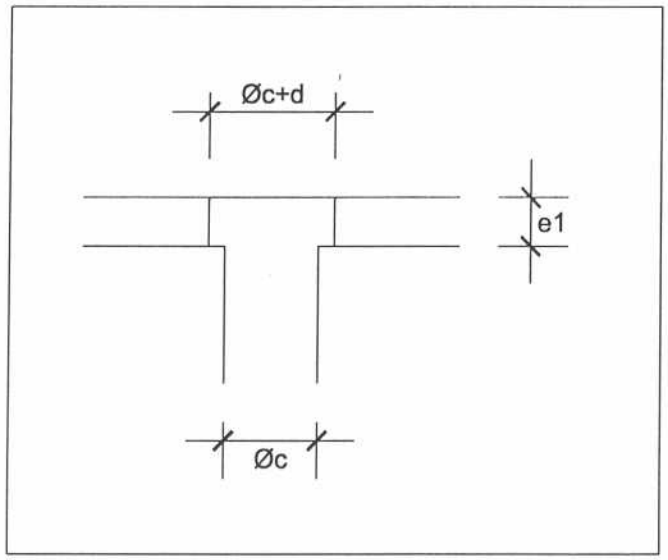
$$A = t_3 * (\pi * (\phi c + d))$$

COLUMNA 26. σc: Esfuerzo de compresión para punzonado en kg/cm^2.-- $\sigma c = V/A$

COLUMNA 27. e1: espesor desfinitivo de la losa superior.—*Si σc es menor que $0.5 * f'c^{0.5}$, cumple con el punzonado siendo e1 igual al valor de t_3*

CUADRO V.6 - PREDISEÑO DE LA LOSA SUPERIOR Y COLUMNAS DEL REACTOR

Qd (lps)	N	Luz (m)	Hmax (m)	t0 (cm)	ϕ0 (cm)	Wd (kg/m^2)	Wl (kg/m^2)	WT (kg/m^2)	t1 (cm)	Ic (cm^4)	r (cm)	ϕc (cm)	t2 (cm)	m (m)	Pfr (kg)	Mo (kg*m)	% de Mo	Md (kg*m)	d (cm)	Rbd^2 (kg*m)	t3 (cm)	A trib. (m^2)	V (kg)	A (cm^2)	σc (kg/m^2)	e1 (cm)
5	6	4,18	5,8	25	40	600	200	800	12	46404	15,59	40	13	2,31	7725	2685	50	1343	17	6965	25	9,28	7424	3044	2,44	25
7,5	6	4,44	5,8	25	40	600	200	800	13	58879	16,55	40	14	2,74	9732	3642	50	1821	17	8262	25	11,41	9128	3044	3,00	25
10	6	4,66	5,8	25	40	600	200	800	13	58879	16,55	40	14	3,12	11631	4614	50	2307	17	9408	25	13,26	10608	3044	3,48	25
13	6	5,69	5,8	25	40	600	200	800	16	109101	19,31	40	17	3,49	15886	7980	50	3990	17	10523	25	18,51	14808	3044	4,86	25
15	18	3,95	6,2	25	40	600	200	800	11	38340	14,86	40	13	4,8	15168	4917	50	2459	17	10855	25	9,62	7696	3044	2,53	25
20	18	4,12	6,2	25	40	600	200	800	12	49682	15,86	40	13	5,43	17897	6112	50	3056	17	12280	25	11,56	9248	3044	3,04	25
25	18	4,56	6,2	25	40	600	200	800	13	63047	16,83	40	14	6,06	22107	8543	50	4272	17	13704	25	14,37	11496	3044	3,78	25
30	18	4,99	6,2	25	40	600	200	800	14	78594	17,79	40	15	6,62	26406	11356	50	5678	17	14971	25	17,07	13656	3044	4,49	25
35	18	6,21	6,2	25	40	600	200	800	18	165768	21,43	45	18	7,17	35621	19429	50	9715	17	16214	25	22,53	18024	3311	5,44	25
40	36	5,83	6,6	25	40	600	200	800	17	149235	20,88	45	17	3,88	18096	9165	50	4583	17	8774	25	17,62	14096	3311	4,26	25
50	36	6,6	6,6	25	40	600	200	800	19	207598	22,67	50	19	4,3	22704	13061	50	6531	17	9724	25	22,15	17720	3578	4,95	25
60	36	7,23	6,6	25	40	600	200	800	21	279288	24,42	50	20	4,7	27185	17397	50	8698	17	10629	25	26,51	21208	3578	5,93	25
70	36	8,55	6,6	25	40	600	200	800	24	414635	26,96	55	23	5,13	35089	26854	50	13427	17	11601	27	34,29	29078	4417	6,58	27
80	84	7,72	7,0	25	40	600	200	800	22	340737	25,66	55	21	3,18	19640	13355	50	6678	17	7191	25	18,21	14568	3845	3,79	25
100	84	7,92	7,0	25	40	600	200	800	22	340737	25,66	55	21	3,71	23507	16468	50	8234	17	8390	25	22,02	17616	3845	4,58	25
120	84	8,07	7,0	25	40	600	200	800	23	388681	26,52	55	22	4,17	26922	19275	50	9637	17	9430	26	25,62	21111	4128	5,11	26
140	84	9,11	7,0	25	40	600	200	800	26	540081	28,80	60	24	4,61	34606	28118	50	14059	18	11688	28	31,85	27773	5027	5,53	28



REACTOR ANAERÓBICO-MUROS DEL TRONCO-CONO

FORMULARIO DEL CUADRO V.7

COLUMNA 1, Q_d: Caudal de diseño en lps.—
COLUMNA 2, N: Número de tubos de distribución.—.
COLUMNA 3, FS: Factor de Seguridad adoptado para el diseño de las paredes del tronco-cono.—
COLUMNA 4, E: Módulo de elasticidad del concreto en kg*cm^2.—

$$E = 15200 * \sqrt{f'c}$$

COLUMNA 5, qsuelo: esfuerzo del suelo en kg/m.—*Se adoptó el valor de 3780 en todos los casos, partiendo del criterio de que la altura efectiva del suelo es 3.60 m.*

COLUMNA 6, ϕ1mod.: Diámetro del fondo del reactor en m.—
COLUMNA 7, ϕ3mod.: Diámetro superior del reactoren m.—
COLUMNA 8, R: Radio medio en m.—

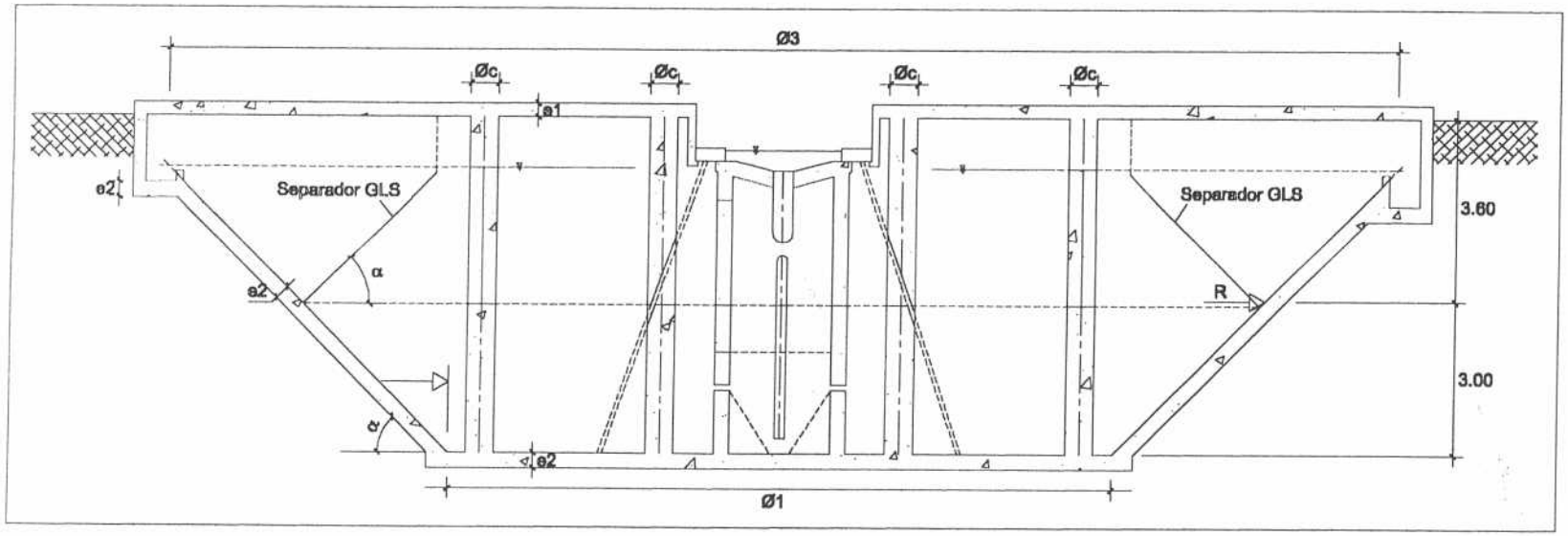
$$R=(\phi 1mod+\phi 3mod)/4.$$

COLUMNA 9, e2: Espesor definitivo del tronco-cono en cm.— *Se asumió que el espesor mínimo es 30 cm. y será el mismo al de la losa de fondo.*

$$e2 = \left(\frac{FS * qsuelo * R^3 * 12}{3000 * E} \right)^{\frac{1}{3}}$$

CUADRO V.7 - PREDISEÑO DE MURO TRONCO-CÓNICO DEL REACTOR

Qd (m^3/s)	N	FS	E (kg/cm^2)	q suelo (kg/m)	ϕ1 mod. (m)	ϕ3 mod. (m)	R (cm)	e2 (cm)
5	6	5	240333	3780	3,70	8,90	315,00	30,00
7,5	6	5	240333	3780	4,40	9,60	350,00	30,00
10	6	5	240333	3780	5,00	10,20	380,00	30,00
12,5	6	5	240333	3780	5,60	10,80	410,00	30,00
15	18	5	240333	3780	6,10	11,70	445,00	30,00
20	18	5	240333	3780	6,90	12,60	487,50	30,00
25	18	5	240333	3780	7,70	14,00	542,50	30,00
30	18	5	240333	3780	8,40	15,30	592,50	30,00
35	18	5	240333	3780	9,10	16,60	642,50	30,00
40	36	5	240333	3780	9,90	17,90	695,00	30,00
50	36	5	240333	3780	11,00	20,10	777,50	30,00
60	36	5	240333	3780	12,00	22,00	850,00	30,00
70	36	5	240333	3780	13,10	23,70	920,00	30,00
80	84	5	240333	3780	14,20	25,60	995,00	32,00
100	84	5	240333	3780	16,60	28,00	1115,00	36,00
120	84	5	240333	3780	18,70	30,10	1220,00	39,00
140	84	5	240333	3780	20,70	32,10	1320,06	42,00



VI PERFIL HIDRÁULICO DEL SISTEMA

VI.1 GENERALIDADES

El perfil hidráulico para cada uno de los sistemas diseñados, fue determinado en función de la variación del nivel del agua por efecto de las pérdidas: entre la tanquilla de desbaste y el desarenador; entre el desarenador y la embocadura de la tubería de alimentación del reactor en la descarga del controlador de caudal; a lo largo de la tubería de alimentación del reactor; y entre el distribuidor central de caudal y el nivel operativo del reactor. Dichas pérdidas fueron establecidas para el caudal de diseño del reactor en la forma siguiente:

- Caída entre tanquilla de desbaste y desarenador: De acuerdo al criterio de selección de la tubería que conecta ambas estructuras, dichas pérdidas oscilan en el entorno de 5cm, valor adoptado para la misma.
- Caída entre desarenador y embocadura de tubería de alimentación al reactor: El nivel de agua en la embocadura de la tubería de alimentación al reactor se ha considerado en forma muy conservadora coincidente con el nivel de fondo del canal del controlador de caudal, evitando cualquier afectación al flujo aguas abajo de la contracción; dicho nivel podrá incrementarse en función del flujo aguas abajo de la contracción realizando el cálculo apropiado. El valor adoptado en cada caso es igual a la diferencia altimétrica entre el nivel de agua del desarenador y el fondo del canal del controlador.
- Pérdida a lo largo del tubo de alimentación al reactor: De acuerdo al criterio de selección de la tubería que alimenta el reactor, dichas pérdidas oscilan en el entorno de 10cm, valor adoptado para la misma.
- Caída entre el distribuidor central y el nivel operativo del reactor: En función de los criterios de diseño establecidos en la Ref. 3, dicha caída para caudal máximo no debe ser inferior a 30 cm, adoptándose un valor para la misma igual a 35cm.

VI.2. RESULTADOS OBTENIDOS

En el CUADRO V.1 se presentan los niveles de agua en la tanquilla de desbaste, desarenador, distribuidor central de caudal y reactor.

CUADRO VI.1 – NIVELES DE AGUA

Qd (lps)	NA1 (m)	NA2 (m)	NA3 (m)	NA4 (m)
5	0	-0.05	-0.356	-0.706
7.5	0	-0.05	-0.421	-0.771
10	0	-0.05	-0.479	-0.829
12.5	0	-0.05	-0.532	-0.882
15	0	-0.05	-0.419	-0.769
20	0	-0.05	-0.477	-0.827
25	0	-0.05	-0.529	-0.879
30	0	-0.05	-0.578	-0.928
35	0	-0.05	-0.624	-0.974
40	0	-0.05	-0.495	-0.845
50	0	-0.05	-0.550	-0.900
60	0	-0.05	-0.601	-0.951
70	0	-0.05	-0.651	-1.001
80	0	-0.05	-0.616	-0.966
100	0	-0.05	-0.691	-1.041
120	0	-0.05	-0.761	-1.111
140	0	-0.05	-0.827	-1.177

VII CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO PRELIMINAR

VII.1 CÓMPUTOS MÉTRICOS PRELIMINARES

Una vez realizado el diseño hidráulico-sanitario y pre-dimensionado estructural de todos los componentes que conforman el sistema de tratamiento de aguas servidas (tanquilla de desbaste / desarenador / controlador de caudal y reactor anaeróbico), ha sido realizado el cómputo métrico de las principales partidas de cada sistema propuesto, representadas por la excavación, el relleno, el concreto, el acero de refuerzo, y el acero inoxidable requerido en el distribuidor central, dispositivo antiespuma y aliviadero perimetral del reactor. Las partidas mencionadas se describen a continuación:

- Excavación: Corresponde al total de m^3 de suelo a ser removidos para la construcción de las diferentes estructuras. En el caso de la tanquilla de desbaste, desarenador y controlador de caudales, se adoptó un sobreancho de 0,60m por cada lado, tomando como referencia el lado más exterior entre las paredes de dichos componentes; todo esto con la finalidad de dar un espacio razonable para el ensamblaje del encofrado y para su posterior vaciado.

- Relleno: Corresponde al total de m^3 de suelo utilizados principalmente para el relleno de los tres primeros componentes mencionados anteriormente, ya que el vaciado del concreto del tronco-cono del reactor anaeróbico fue considerado directamente sobre el suelo.

- Concreto: Corresponde al total de m^3 requeridos en el vaciado de la estructura tanquilla de desbaste / desarenador / controlador de caudal y del reactor anaeróbico.

- Acero de Refuerzo: Corresponde al acero estructural en todas las secciones de concreto; en función de las Ref. 13 y 14, fue adoptado un valor igual a 100 kg de acero por metro cúbico de concreto.

- Acero Inoxidable: Corresponde al total de lámina de acero inoxidable requerida para la construcción del distribuidor central de caudal, cortina antiespuma y vertedero perimetral. Estos dispositivos metálicos están sometidos permanentemente a los procesos agresivos que se generan en el tratamiento anaeróbico de aguas servidas, por lo que requieren materiales totalmente inertes tal como sería el acero inoxidable tipo 316L. Se computó el total de m^2 de lámina, considerando un espesor de 3mm (1/8") a efecto de determinar el peso de la misma.

Estos cómputos métricos se dividieron en dos partes: la primera totalizando las cantidades de obra de la tanquilla de desbaste, el desarenador y el controlador de caudales, y la segunda para totalizar las cantidades de obra del reactor anaeróbico.

En los CUADROS VII.1 y VII.2 se presentan los cómputos métricos de las partidas antes descritas para cada caso en particular.

VII.2 PRESUPUESTO ESTIMADO

El presupuesto estimado de las cantidades de obra del aparte anterior fue realizado aplicando precios unitarios a dichas cantidades. Estos precios unitarios corresponden a los valores actuales presentes en el mercado (2do semestre-1999), y fueron obtenidos de las Ref. 13 y 14.

Los precios unitarios adoptados fueron los siguientes:

- Excavación: 4500 Bs/m^3.
- Relleno: 3500 Bs/m^3.
- Concreto: 200000 Bs/m^3.
- Acero de Refuerzo: 800 Bs/kg.
- Acero Inoxidable: 8000 Bs/kg.

Por cuanto el presupuesto estimado sólo considera las partidas anteriormente mencionadas, existe un grupo de elementos cuyo costo no ha sido considerado (tuberías, conexiones, válvulas, marcos y tapas de bocas de visita, soportería, elementos de suspensión, rejilla de desbaste, revestimiento protector de la superficie interna del reactor, etc.); por este motivo han sido adoptados unos porcentajes de incremento en cada caso específico. Estos porcentajes fueron obtenidos a partir de los presupuestos totales de construcción presentados en las Ref. 13 y 14, adoptándose los siguientes valores:

- Reactores con 6 tubos de distribución: 40% de incremento.
- Reactores con 18 tubos de distribución: 44% de incremento.
- Reactores con 36 tubos de distribución: 47% de incremento.
- Reactores con 84 tubos de distribución: 49% de incremento.

En los CUADROS VII.1.VII.2 y VII.3 se presenta el presupuesto estimado para cada caso en particular.

CUADRO VII.1 - CANTIDADES DE OBRA Y COSTOS
DE LA TANQUILLA DE DESBASTE / DESARENADOR / CONTROLADOR DE CAUDAL

		EXCAVACIÓN			RELLENO			CONCRETO			ACERO DE REFUERZO			
Caudal de diseño (lps)	N	Vol. (m^3)	Costo unitario (Bs/m^3)	Costo (Bs)	Vol. (m^3)	Costo unitario (Bs/m^3)	Costo (Bs)	Vol. (m^3)	Costo unitario (Bs/m^3)	Costo (Bs)	Peso (Kg)	Costo unitario (Bs/Kg)	Costo (Bs)	COSTO TOTAL (Bs)
5,0	6	11,7	4500	52683	7,6	3500	26598	3,3	200000	665699	333	800	266280	1011260
7,5	6	12,4	4500	55870	8,1	3500	28183	3,5	200000	709331	355	800	283732	1077116
10,0	6	13,4	4500	60174	8,7	3500	30328	3,8	200000	760717	380	800	304287	1155507
12,5	6	14,3	4500	64235	9,2	3500	32346	4,0	200000	807534	404	800	323014	1227129
15,0	18	22,9	4500	102840	14,7	3500	51409	5,5	200000	1099265	550	800	439706	1693220
20,0	18	24,8	4500	111540	15,8	3500	55451	5,9	200000	1175030	588	800	470012	1812033
25,0	18	26,6	4500	119513	16,9	3500	59083	6,2	200000	1245317	623	800	498127	1922040
30,0	18	28,4	4500	127792	18,0	3500	62839	6,6	200000	1317448	659	800	526979	2035058
35,0	18	30,3	4500	136339	19,0	3500	66428	6,9	200000	1389235	695	800	555694	2147695
40,0	36	28,9	4500	130140	17,0	3500	59565	7,2	200000	1439521	720	800	575808	2205034
50,0	36	31,4	4500	141129	18,2	3500	63745	7,7	200000	1543231	772	800	617293	2365397
60,0	36	33,9	4500	152672	19,5	3500	68089	8,3	200000	1650184	825	800	660074	2531019
70,0	36	36,6	4500	164765	20,7	3500	72596	8,8	200000	1760520	880	800	704208	2702090
80,0	84	44,8	4500	201630	23,7	3500	83009	11,9	200000	2388950	1194	800	955580	3629169
100,0	84	50,0	4500	225035	25,9	3500	90818	13,2	200000	2636596	1318	800	1054638	4007087
120,0	84	55,5	4500	249917	28,3	3500	98989	14,5	200000	2894018	1447	800	1157607	4400531
140,0	84	61,4	4500	276285	30,7	3500	107526	15,8	200000	3161409	1581	800	1264564	4809784

CUADRO VII.2 - CANTIDADES DE OBRA Y COSTOS DEL REACTOR ANAERÓBICO

		EXCAVACIÓN			CONCRETO			ACERO DE REFUERZO			ACERO INOXIDABLE			
Caudal de diseño (lps)	N	Vol. (m^3)	Costo unitario (Bs/m^3)	Costo (Bs)	Vol. (m^3)	Costo unitario (Bs/m^3)	Costo (Bs)	Peso (Kg)	Costo unitario (Bs/Kg)	Costo total (Bs)	Peso (Kg)	Costo unitario (Bs/Kg)	Costo (Bs)	COSTO TOTAL (Bs)
5,0	6	298,9	4500	1345105	85,0	200000	16991999	8496	800	6796799	504	8000	4029900	29163803
7,5	6	351,5	4500	1581731	94,4	200000	18888777	9444	800	7555511	539	8000	4315838	32341857
10,0	6	400,3	4500	1801231	102,9	200000	20581975	10291	800	8232790	570	8000	4560927	35176923
12,5	6	452,5	4500	2036127	111,7	200000	22337376	11169	800	8934950	601	8000	4806016	38114470
15,0	18	559,1	4500	2515795	130,1	200000	26025237	13013	800	10410095	697	8000	5576842	44527968
20,0	18	653,2	4500	2939355	144,2	200000	28841940	14421	800	11536776	743	8000	5944476	49262547
25,0	18	798,1	4500	3591346	166,0	200000	33206485	16603	800	13282594	815	8000	6516351	56596776
30,0	18	943,9	4500	4247738	187,7	200000	37538215	18769	800	15015286	881	8000	7047378	63848617
35,0	18	1102,1	4500	4959385	211,7	200000	42343673	21172	800	16937469	947	8000	7578405	71818932
40,0	36	1355,2	4500	6098213	254,5	200000	50890404	25445	800	20356161	1261	8000	10086989	87431767
50,0	36	1687,0	4500	7591563	301,4	200000	60271031	30136	800	24108412	1373	8000	10985650	102956656
60,0	36	2006,0	4500	9027045	343,2	200000	68639553	34320	800	27455821	1470	8000	11761766	116884185
70,0	36	2339,1	4500	10526061	397,1	200000	79424958	39712	800	31769983	1557	8000	12456185	134177189
80,0	84	2878,3	4500	12952133	469,3	200000	93850025	46925	800	37540010	2071	8000	16564086	160906255
100,0	84	3549,6	4500	15973119	577,9	200000	115570841	57785	800	46228336	2193	8000	17544444	195316740
120,0	84	4203,8	4500	18917079	689,0	200000	137791326	68896	800	55116531	2300	8000	18402256	230227192
140,0	84	4912,4	4500	22105846	842,4	200000	168478319	84239	800	67391328	2402	8000	19219220	277194713

CUADRO VII.3 - COSTO TOTAL DEL SISTEMA

Caudal de diseño (lps)	N	Costo Tanq. Desb. / Desarenador/ Con.de caudal (Bs)	Costo Reactor Anaeróbico (Bs)	Costo Total (Bs)	% de Incremento	COSTO TOTAL (Bs)
5,0	6	1011260	29163803	30175063	40	42245088
7,5	6	1077116	32341857	33418973	40	46786563
10,0	6	1155507	35176923	36332430	40	50865402
12,5	6	1227129	38114470	39341598	40	55078237
15,0	18	1693220	44527968	46221189	44	66558511
20,0	18	1812033	49262547	51074580	44	73547395
25,0	18	1922040	56596776	58518816	44	84267095
30,0	18	2035058	63848617	65883675	44	94872492
35,0	18	2147695	71818932	73966627	44	106511943
40,0	36	2205034	87431767	89636802	47	131766098
50,0	36	2365397	102956656	105322054	47	154823419
60,0	36	2531019	116884185	119415205	47	175540351
70,0	36	2702090	134177189	136879278	47	201212539
80,0	84	3629169	160906255	164535424	49	245157781
100,0	84	4007087	195316740	199323826	49	296992501
120,0	84	4400531	230227192	234627723	49	349595307
140,0	84	4809784	277194713	282004497	49	420186700

VII.3 COSTOS UNITARIOS

Una vez determinados los costos estimados totales de los sistemas de tratamiento propuestos, fueron calculados los costos unitarios por unidad de caudal medio, y los costos unitarios por habitante. El caudal medio y la población servida correspondiente a cada sistema de tratamiento, han sido tomados del CUADRO III.1. En el cuadro siguiente se presentan los costos unitarios considerando una relación igual a 630 Bs/US$.

CUADRO VII.4 - COSTOS UNITARIOS

Caudal de diseño (lps)	N° de tubos de distribución	COSTO TOTAL (Bs)	Caudal medio (lps)	Población servida (hab.)	COSTOS UNITARIOS			
					Por lps. Qmed		Por habitante	
					Bs/lps (MMBs)	US $/lps	Bs/hab.	US $/hab
5,0	6	42245088	1,6	450	25,69	40770	93878	149
7,5	6	46786563	2,5	690	18,96	30102	67807	108
10,0	6	50865402	3,3	940	15,46	24545	54112	86
12,5	6	55078237	4,2	1200	13,21	20968	45899	73
15,0	18	66096300	5,1	1460	13,00	20636	45271	72
20,0	18	73036649	7,0	2010	10,47	16620	36337	58
25,0	18	83681906	8,9	2570	9,37	14871	32561	52
30,0	18	94213655	11,0	3150	8,60	13656	29909	47
35,0	18	105772277	13,0	3750	8,12	12888	28206	45
40,0	36	130869730	15,2	4360	8,64	13708	30016	48
50,0	36	153770199	19,6	5630	7,87	12485	27313	43
60,0	36	174346199	24,1	6940	7,23	11476	25122	40
70,0	36	199843746	28,8	8300	6,93	11001	24078	38
80,0	84	245157781	33,7	9700	7,28	11549	25274	40
100,0	84	296992501	43,8	12600	6,78	10765	23571	37
120,0	84	349595307	54,4	15700	6,43	10204	22267	35
140,0	84	420186700	65,3	18800	6,43	10212	22350	35

VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las conclusiones más relevantes producto del diseño de los sistemas de tratamiento anaeróbicos, conformados por el conjunto tanquilla de desbaste-desarenador-controlador de caudal y un reactor anaeróbico tipo RALF.

- Los sistemas de tratamiento anaeróbico en referencia han sido diseñados para aguas servidas domiciliarias, es decir no se ha contemplado el tratamiento de efluentes industriales o de cualquier otro tipo cuya materia orgánica difiera de la generada por la actividad doméstica del ser humano.

- El conjunto tanquilla de desbaste-desarenador-controlador de caudal ha sido diseñado en todos los casos sin losa superior de concreto monolítica, en función de las escasas dimensiones libres de estos elementos, y en especial de la poca altura requerida por cada una de dichas estructuras. Por lo tanto, en caso de requerirse el cierre superior de las mismas deberán emplearse elementos planos prefabricados de concreto u otro material más liviano igualmente adecuado.

- El controlador de caudal en todos los sistemas diseñados limita adecuadamente el caudal influente al reactor en caso de presentarse fuertes incrementos del efluente cloacal producto de malos empotramientos durante el período de lluvias intensas. En tal sentido siempre se verifica que para caudales de la cloaca iguales al doble del caudal de diseño (200% Qd), el incremento del gasto influente en el reactor es inferior al 30% (130% Qd).

- El tiempo de retención hidráulica del reactor anaeróbico para el caudal medio está comprendido entre 27,7 horas y 14,2 horas, para caudales de diseño iguales a 5 y 140 lps, respectivamente. Estos valores de retención superan sensiblemente al tiempo mínimo de retención hidráulica igual a 8 horas. En el GRÁFICO VIII.1, se presenta la variación resultante entre el tiempo de retención hidráulica (horas) y el caudal medio en el reactor (lps); en el mismo se evidencia el fuerte incremento que sufre el tiempo de retención en la medida que disminuye el caudal medio, motivado a la relación existente entre el caudal de diseño y el caudal medio en función de la población servida.

- La caída del nivel de agua entre la tanquilla de desbaste y el nivel operativo del reactor ha sido determinada conservadoramente entre 0,71m y 1,18m, para caudales de diseño iguales a 5 y 140 lps, respectivamente. Dicha caída puede ser disminuida mediante un cálculo riguroso de la componente de pérdida entre el nivel del desarenador y la embocadura de la tubería de alimentación al reactor, ubicada al final de la contracción del controlador de caudal, considerando una ligera sumergencia en el flujo aguas abajo de dicha contracción.

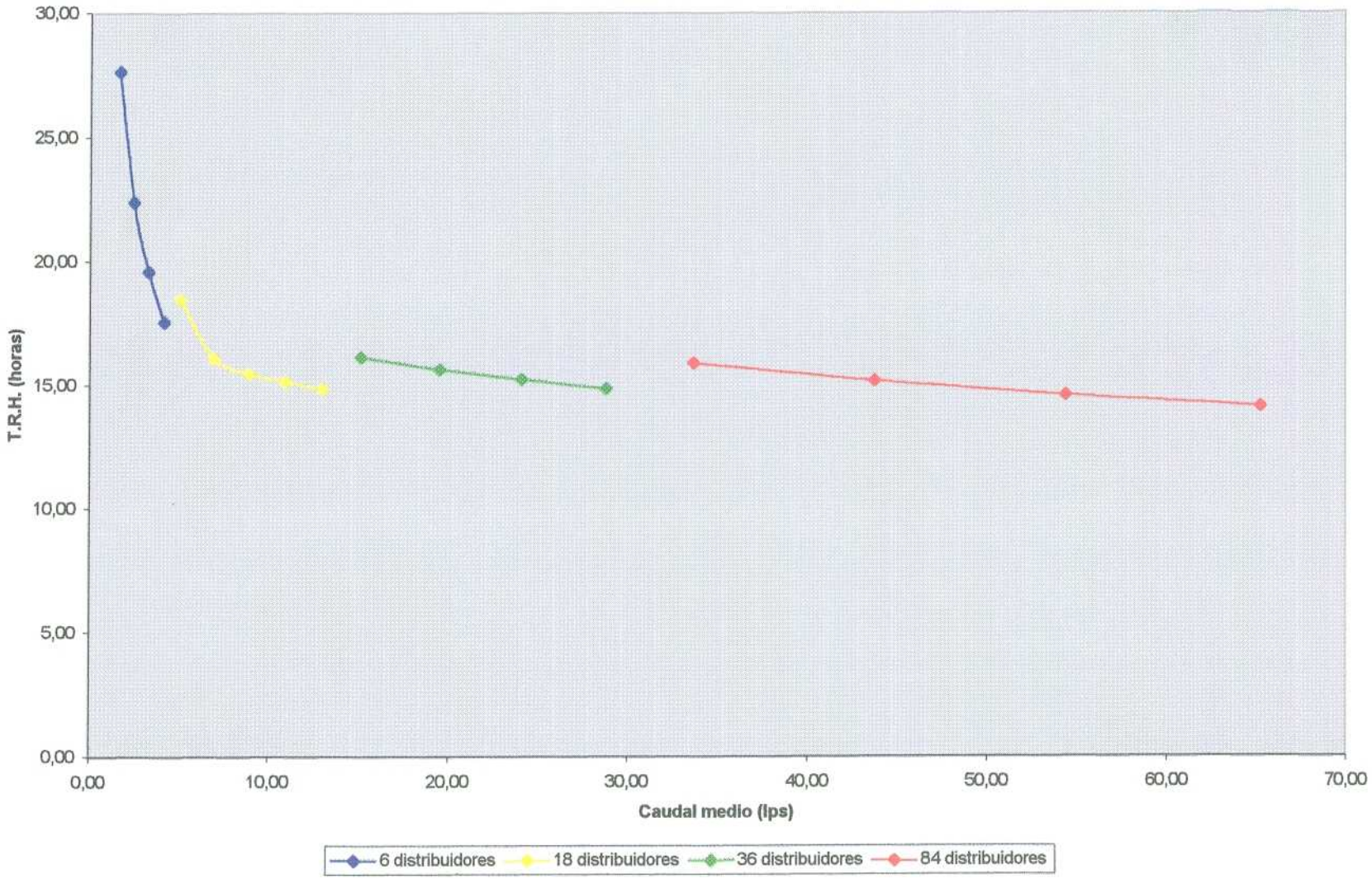
- El costo de cada uno de los sistemas de tratamiento propuestos ha sido estimado en función de precios unitarios actualmente vigentes en el mercado; con la finalidad de considerar el costo de todos los elementos no previstos en las partidas antes mencionadas (tuberías, conexiones, válvulas, rejilla de desbaste, marcos y tapas de bocas de visita, soportería, elementos de suspensión, protector de la superficie interna del reactor), ha sido determinado un porcentaje de incremento de costo a ser aplicado al monto de las partidas

computadas. Dicho porcentaje está comprendido entre 40% para reactores de 6 distribuidores y 49% para reactores de 84 distribuidores. En el GRÁFICO VIII.2 se presenta el costo total estimado de tratamiento anaeróbico propuesto en función de la población servida; en el mismo se evidencia una variación relativamente lineal entre las variables mencionadas.

- El costo por habitante de cada uno de los sistemas de tratamiento propuestos, en función de la población servida, se presenta en el GRÁFICO VIII.3; en el mismo se aprecia el fuerte incremento del costo unitario para poblaciones servidas menores de 3000 habitantes. En tal sentido, el menor costo unitario igual a 22050 Bs/hab (35 US $/hab) se mantiene para poblaciones mayores de 15000 habitantes, incrementándose a 31500 Bs/hab (50 US $/hab) para una población de 2800 habitantes, y obteniéndose un costo unitario máximo igual a 93870 Bs/hab (149 US $/hab) para la menor población servida, de 450 habitantes. El motivo del fuerte incremento en el costo unitario con la disminución de la población servida se debe a la misma causa de la variación del tiempo de retención hidráulico antes mencionada, y adicionalmente debido a la adopción de espesores mínimos en muros y losas para los reactores de menor caudal de diseño.

La recomendación que se desprende del análisis económico de las soluciones de tratamiento anaeróbico propuestas en el presente trabajo, radica en la necesidad de realizar un análisis de costos totales y unitarios en función de la población servida, considerando tanto la inversión inicial como el costo operativo y de mantenimiento, de los sistemas de tratamiento aeróbicos intensivos; todo esto con la finalidad de establecer comparaciones entre ambos sistemas de tratamiento y determinar el rango óptimo de aplicación de cada uno de ellos.

GRÁFICO VIII.1 - VARIACIÓN DEL TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO Y EL CAUDAL MEDIO



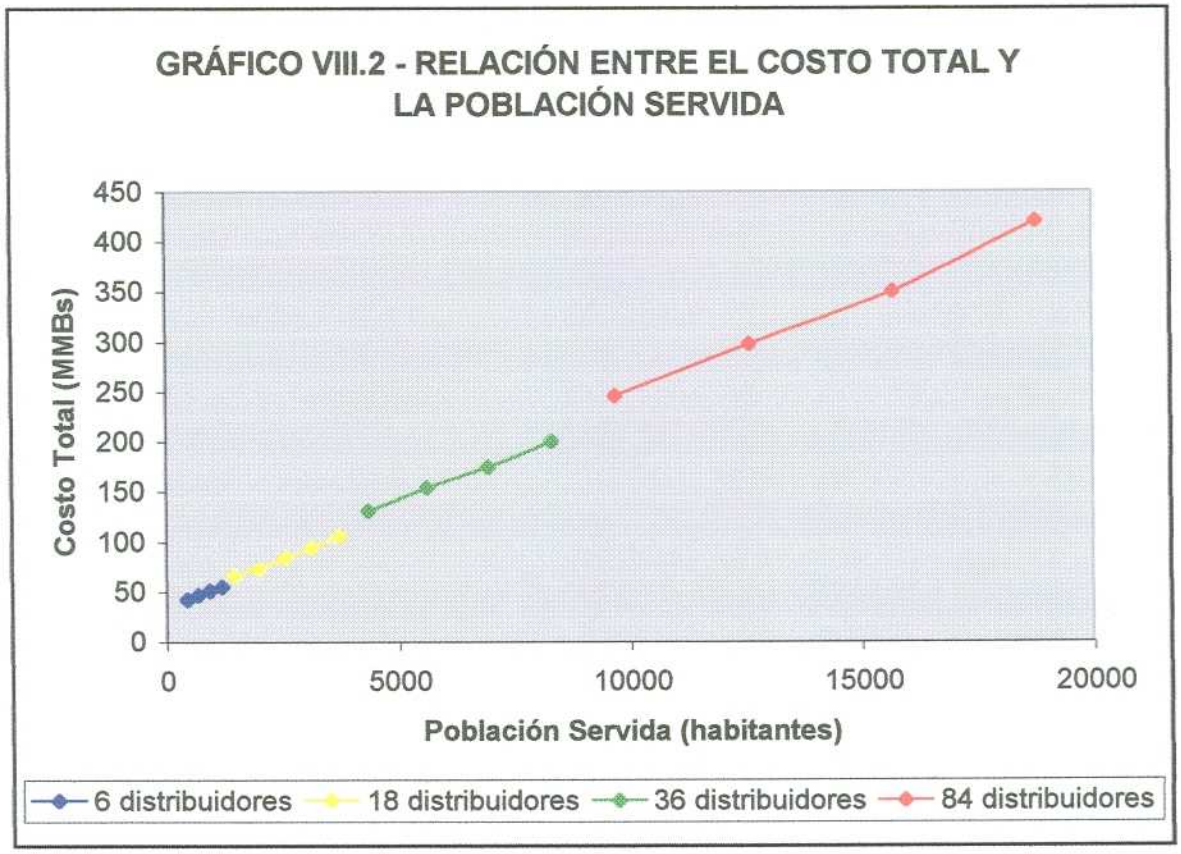


GRÁFICO VIII.2 - RELACIÓN ENTRE EL COSTO TOTAL Y LA POBLACIÓN SERVIDA
Costo Total (MMBs)
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0
5000
10000
15000
20000
Población Servida (habitantes)
6 distribuidores
18 distribuidores
36 distribuidores
84 distribuidores

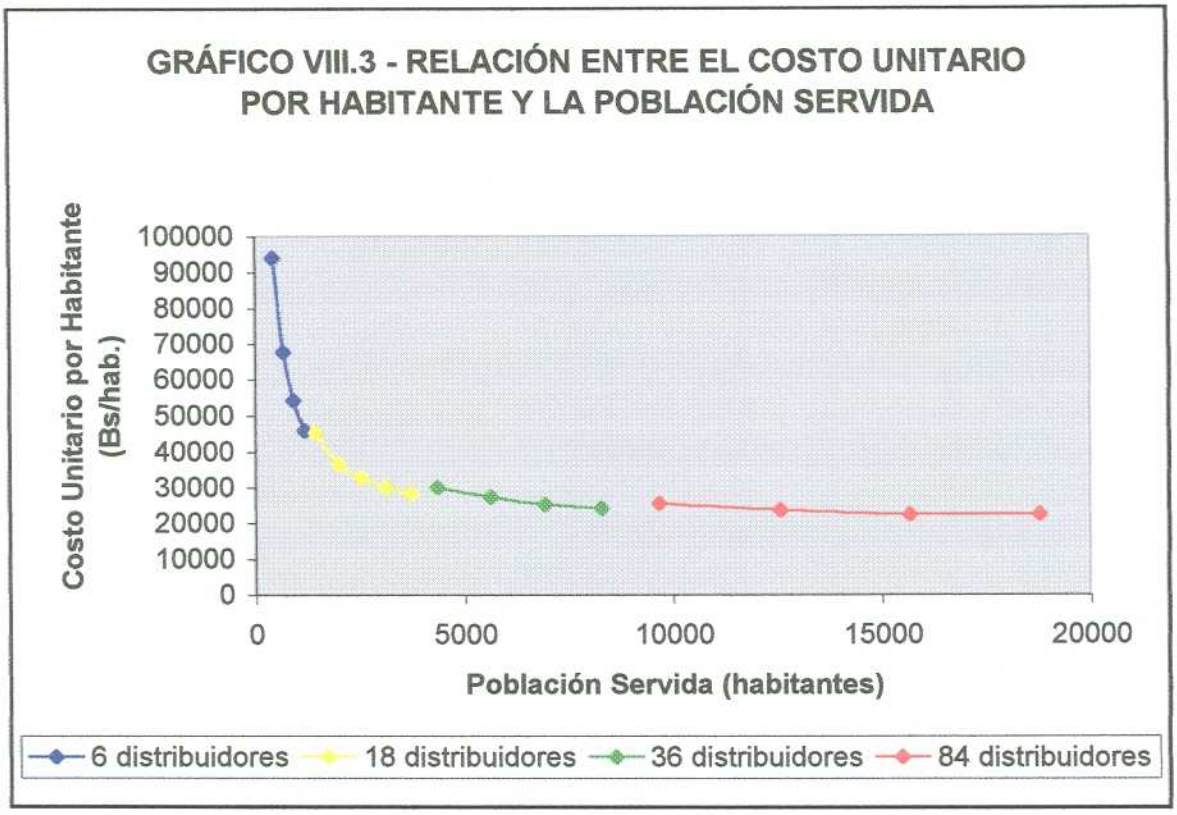


GRÁFICO VIII.3 - RELACIÓN ENTRE EL COSTO UNITARIO POR HABITANTE Y LA POBLACIÓN SERVIDA
Costo Unitario por Habitante (Bs/hab.)
100000
90000
80000
70000
60000
50000
40000
30000
20000
10000
0
0
5000
10000
15000
20000
Población Servida (habitantes)
6 distribuidores
18 distribuidores
36 distribuidores
84 distribuidores

IX REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. INOS. **Normas e Instructivos para el Proyecto de Alcantarillados**. 1975. (Ref. 1)

2. Jürgensen, Decio. **Aplicación de la Tecnología Anaerobia para el Tratamiento de Alcantarillados Utilizando los Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente Contra Manto de Lodo – RALF**. Conferencia Dictada en Caracas. Mayo 1998. (Ref. 2)

3. Van Haandel y Lettinga. **Anaerobics Sewage Treatment**. John Wiley & Sons. 1994. (Ref. 3)

4. Rivas Mijares, Gustavo. **Tratamiento de Aguas Residuales.** Ediciones Vega. 1978. (Ref. 4)

5. Ven Te Chow. **Open-Channel Hydraulics.** Mc Graw-Hill. 1959. (Ref.5)

6. ACI. **Reglamento de las Construcciones de Concreto Reforzado.** ACI 318-63. (Ref. 6)

7. MINDUR. **Normas para el Proyecto de Estructuras de Concreto Armado.** (Ref. 7)

8. King, Horace Williams. **Handbook of hidraulics**. Mc Graw Hill Book Company Inc. 1939. (Ref. 8)

9. AWWA. **Water Quality & Treatment.** (Ref. 9)

10. Lettinga G. **UASB – Process Desing for Varius Types of Wastewaters.** Volume 24. Número 8. 1991 – Water Science and Technology. (Ref. 10)

11. SANEPAR. **Operacao de Estacao de Tratamiento de Esgoto – RALF.** Manual de Treinamento. (Ref. 11)

12. Rich, Linvill G. **Low Maintenance, Mechanically Simple Wastewater Treatment Systems.** Mc Graw-Hill. 1980. (Ref. 12)

13. MGA Ingenieros Civiles. **Ingeniería de Detalle – Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente, Urb. Manzanares, Caracas.** Mayo 1999. (Ref. 13)

14. MGA Ingenieros Civiles. **Ingeniería de Detalle – Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente, Urb. La Candelaria, Guatire.** Junio 1999. (Ref. 14)