

Diseño del emisario submarino de la playa El Chivo

Ing. Marlon Mederos Corrales
Empresa de Servicios Ingenieros de Occidente. La Habana
e-mail: marlonmederos@nauta.cu

Dr. Ing. Luis Fermín Córdova López
Centro de Investigaciones Hidráulicas.
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae).
e-mail: cordova@tesla.cujae.edu.cu

RESUMEN

En este artículo se propone un sistema de tratamiento de aguas residuales para evitar los problemas de contaminación que pueden generar las aguas colectadas por el alcantarillado central de La Habana. El objetivo es dimensionar un sistema de tratamiento mediante un emisario submarino, para las aguas albañales conducidas por el sistema de alcantarillado central de La Habana. Luego de coleccionar los datos necesarios, se presenta el dimensionamiento de los diferentes componentes del sistema, analizando los resultados de los procesos de remoción de bacterias y comparando los mismos con las simulaciones realizadas con el modelo Visual Plumes. La propuesta del nuevo emisario está basada en recomendaciones internacionales y en el cumplimiento de la norma cubana que regula la calidad del vertido de residuales líquidos al mar.

Palabras clave: aguas residuales, alcantarillado central, emisario submarino, remoción de bacterias, sistema de tratamiento.

Design of the submarine outfall of El Chivo beach

ABSTRACT

In this article, a wastewater treatment system is proposed to avoid the pollution problems that can be generated by the water collected by the central sewer system of Havana. The objective is to size a treatment system by means of an underwater outlet as a submarine outfall, for sewage water collected by the central sewerage system of Havana. After collecting the necessary data, the sizing of the different components of the system is presented, analyzing the results of the bacteria removal processes and comparing them with the simulations carried out with the Visual Plumes model. The proposal of the new emissary is based on international recommendations and compliance with the Cuban norm that regulates the quality of the spillage of liquid waste to the sea.

Keywords: sewage, central sewage, submarine outfall, bacteria removal, treatment system.

INTRODUCCIÓN

Los ríos Luyanó, Martín Pérez y Arroyo Tadeo impactan de forma severa a la bahía de La Habana, provocando graves problemas de insalubridad en la ciudad, con la consecuente proliferación de enfermedades en la población y la contaminación del ecosistema asociado con la bahía. Además, se tiene previsto un Plan de Desarrollo Económico y de Turismo a mediano y largo plazo, lo que aumentaría la demanda de nuevos sistemas de alcantarillado, para darle respuesta a este crecimiento planificado. Uno de los mecanismos para darle solución a estos problemas es el diseño del emisario submarino de la playa El Chivo, como sistema de tratamiento de las aguas residuales de la ciudad, debido a que, según las últimas inspecciones realizadas, el emisario actual se encuentra en estado crítico, según afirma Artiles (1996).

En este artículo se presenta el dimensionamiento de un emisario a partir de un conjunto de restricciones y recomendaciones internacionales, velando porque se cumpla la norma cubana en cada caso. No existe una técnica única para el procedimiento de diseño, más bien este depende de factores particulares, como las características oceanográficas, dentro de las que se encuentran las corrientes marinas, oleaje, topografía y geología de la zona, entre otros factores. Una vez diseñado el emisario, se proponen las características de la estación de bombeo a emplear.

DESARROLLO DE ESTUDIOS PRELIMINARES

Información actualizada sobre el estado del sistema de conducción, tratamiento y disposición del agua residual en la zona de estudio

El sistema de alcantarillado central de la ciudad de La Habana, que se construyó entre 1908 y 1915, comprende dos colectores principales: uno llamado Colector Norte, el cual va paralelo a la costa, por la parte norte de la ciudad y el otro llamado Colector Sur, que se extiende hacia la parte sur y oeste y se va ramificando hacia esa parte de la ciudad, según JICA (2004).

El agua residual que no es vertida a los ríos Luyanó, Martín Pérez, Arroyo Tadeo o a la propia bahía, es conducida principalmente por estos colectores, hasta la cámara de rejillas del Muelle de Caballería, donde ocurre la eliminación de los sólidos flotantes gruesos y la sedimentación de las arenas y gravas. Después de cribadas, estas aguas residuales entran en un sifón invertido de 2,13 m de diámetro y con una longitud total de 375 m, que pasa por debajo de la bahía de La Habana a 30 m bajo el nivel del mar en su parte más profunda y que las descarga en el pozo de succión de la estación de bombeo de Casablanca. A partir de ese lugar, son elevadas por medio de cinco bombas centrífugas hasta el túnel de la loma de La Cabaña. Cada bomba tiene un diámetro nominal de 600 mm, una capacidad de 1,3 m³/s y 8 m de carga. Dicho túnel consta de dos tramos principales: uno de 1 332,31 m de longitud y pendiente 0,001 que pasa por debajo de la loma de La Cabaña y otro construido en trinchera abierta en la playa El Chivo de 114,80 m de longitud y que conduce los residuales por gravedad hasta la playa. Es en este lugar donde comienza el emisario submarino, que las descarga a 147 m de la costa y a una profundidad de 10,70 m por debajo del nivel medio del mar. El emisario fue construido con tubos de bocina y espiga de 1,50 metros de diámetro y 5,08 cm de espesor colocados en una zanja, recubiertos con hormigón y juntas de filamentos de plomo. Debido a la magnitud del caudal que vierte, la poca longitud, profundidad y el estado de deterioro en que se encuentra, hace que no se logre la

dilución adecuada en el mar, lo que provoca condiciones sanitarias desfavorables en la costa, según Alfonso (2000).

Establecer la descarga actual y futura del emisario

En la actualidad, el gasto entregado por la estación de bombeo de Casablanca, oscila entre 1,3 m³/s y 3,9 m³/s de agua residual. El gasto mínimo se debe a que, generalmente, se encuentra al menos una bomba en funcionamiento y se partirá de este criterio para el dimensionamiento del emisario. Para que exista una correspondencia con el proyecto de reparación del alcantarillado central, se pronostica un gasto máximo de 5,2 m³/s y mínimo de 1,3 m³/s.

Caracterizar la calidad de agua a verter

Las características de las aguas residuales evacuadas por el emisario actual corresponden con un albañal típico según Tur (1997) y los siguientes resultados son extraídos de recientes mediciones in situ en playa El Chivo, con la supervisión de la empresa de proyecto ESIHO. La concentración de coliformes totales es de $3,56 \times 10^7$, según Mancebo (1997) y la concentración de coliformes fecales es de $2,8 \times 10^7$ NPM/100 ml, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Resultado del muestreo en la playa El Chivo

Muestra	pH (u); T (°C)	CE (μS/cm) 25 °C	DBO ₅ ^{20°C} mg/L	DQO mg/L	O ₂ dis mg/L	SS mL/L	Pt mg/L
playa El Chivo	7,56;25,9	13 520	110	253	1,4	4	4,2
Incertidumbre (U)	±0,038u	±0,16 mS/ cm	±11 %	±7 %	-	-	-

Definir el T₉₀

El tiempo requerido para el decaimiento del 90 % de los coliformes remanentes, es afectado considerablemente por la temperatura del agua marina. Este parámetro debe ser medido, pues es variable según el lugar, pero en ocasiones no se cuenta con su valor exacto, por lo que deberá ser supuesto.

Para aguas cálidas tropicales, son comunes los valores de T₉₀ de 1 a 1,5 horas, según Ludwig (1988). Sin embargo, debido al hecho que el valor del T₉₀ tiene una influencia extrema en la longitud del emisario, se ha adoptado un valor conservador de 1,5 horas.

Establecer criterios ambientales y de calidad de agua a cumplir

Donde se descarguen efluentes al mar solo son importantes y aplicables algunos parámetros, como son la protección a la salud pública, las consideraciones estéticas, especialmente las relacionadas con el material flotante y las sustancias tóxicas.

Los demás constituyentes de las aguas negras, como DBO, pH, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, salinidad, nutrientes y metales no son de gran significado, cuando se emplean emisarios y difusores bien diseñados. Será la NC:22 1999, por la cual se registrará el vertido de residual al mar, que establece que el contenido de coliformes totales y fecales, presentes en las aguas de baño en costas, con contacto directo, no debe exceder los 1000 NMP/100ml y los 200 NMP/100ml, respectivamente.

DESARROLLO DE ESTUDIOS ESPECÍFICOS

Estudios topográficos y batimétricos

La plataforma insular en la playa El Chivo, aparece estructurada por dos niveles de terrazas submarinas, escalonadas entre profundidades de 1 m a 15 m y de 15 m a 25 m respectivamente. Se puede concluir que está compuesta por 5 tramos: el primero con una longitud de poco más de 140 m, presenta una pendiente del 5 %; el segundo, con muy poca distancia, de apenas 70 m, tiene una pendiente del 15,7 %; el tercero es casi horizontal, ideal para la colocación del sistema difusor, con una pendiente de 0,2 %, el cual se extiende hasta los 300 m de la línea de costa; el cuarto llega, aproximadamente, a los 480 m de la costa, alcanzando profundidades cercanas a los 22 m; mientras que el quinto alcanza los 600 m, con profundidades superiores a los 40 m. En la figura 1, se puede observar lo expuesto anteriormente.

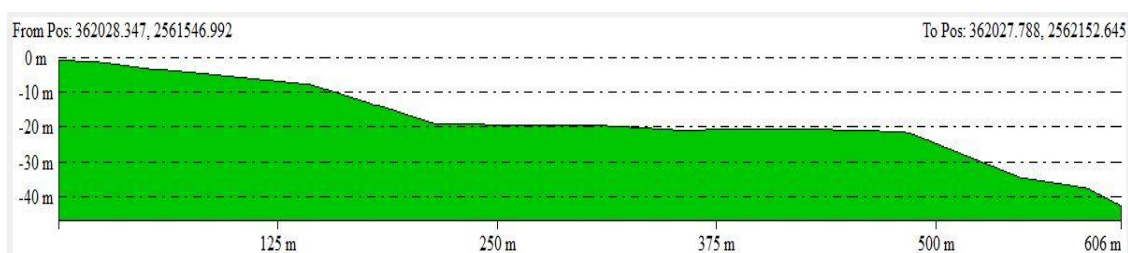


Figura 1. Perfil longitudinal de la zona de estudio

Con relación a los estudios batimétricos, se toman los resultados de Mederos (2018).

Definir área de posible vertido y establecer los lugares a proteger

Para la selección de los posibles sitios de descarga y lugares a proteger, se realizaron diversas visitas de reconocimiento a la zona. La zona de vertido debe ser lo más cercana posible al emisario actual, para evitar grandes gastos de materiales a la hora de recubrir la parte terrestre del emisario. Se observó que la zona de posible vertido debe ser hacia la derecha del emisario actual, pues hacia su izquierda la línea de costa se hace irregular con la aparición de una ensenada.

Al tener en cuenta lo planteado anteriormente y analizando la batimetría y perfiles longitudinales de la zona en cuestión, se decidió que el eje del futuro emisario pase paralelo al emisario actual, pero a 40 m a la derecha de este, para una longitud de 38 m aproximadamente de la parte terrestre del emisario. Se utiliza una estructura de desviación existente en forma de “Y”, pues se debe aprovechar al máximo la instalación de conducción procedente del túnel de la loma de La Cabaña, como se puede apreciar en la figura 2.

Se detectaron tres puntos a proteger: el primero a la entrada de la bahía, que se encuentra aproximadamente a 1365 m al suroeste del emisario actual (X1), el segundo punto está ubicado a 1547 m al noreste del emisario y es la entrada del reparto Camilo Cienfuegos (X2); mientras que el tercer punto consiste en la intersección de la línea de costa y el inicio del emisario (X3). En la figura 3 se muestran estas posiciones, en las cuales se calculará la remoción de bacterias y los coliformes remanentes.



Figura 2. Localización del emisario futuro



Figura 3. Puntos a proteger

Resumen de la modelación numérica

Mediante la generación de disímiles mallas de cómputo y la selección de una que responda a los parámetros de densidad y calidad de resultados, es posible modelar las corrientes en ADCIRC y el oleaje en SWAN, para distintos escenarios, según Mederos (2018). La malla seleccionada tiene un total de 18192 nodos y 34279 elementos, 1 tramo de costa y 57 nodos en la frontera abierta.

En la modelación hidrodinámica se analizaron las direcciones y magnitudes de las corrientes de los vientos, dando como resultado, para el escenario más desfavorable, una velocidad de corriente igual a 1,60 cm/s.

En el caso de la modelación de oleaje, se registraron las mayores alturas de olas significativas en la costa a una altura 4,26 m y se determinó que el emisario debe tener una longitud mínima de 88 m y que debe estar provisto, a su vez, de una estructura de protección contra el oleaje, los primeros 18 m como mínimo, aunque es recomendable que se extienda hasta los 42 m.

DIMENSIONAMIENTO DEL EMISARIO SUBMARINO Y DE SUS COMPONENTES

Dimensionamiento del emisario

La selección del diámetro del emisario submarino es un problema hidráulico, que debe proporcionar velocidades adecuadas para flujos mínimos que ocurrirán durante los primeros años de operación, así como limitar la pérdida de carga al máximo posible, cuando los flujos lleguen a los valores de diseño.

Con esto presente, el diámetro exterior seleccionado es de 1,6055 m e interior de 1,5012 m, que genera velocidades máximas de 2,94 m/s y mínimas de 0,73 m/s, cumpliendo con la recomendación de que, en la tubería principal, las velocidades deben oscilar entre los 3 m/s y 0,6 m/s. Se selecciona una tubería de PEAD. En la tabla 2, se presenta un resumen de los datos recopilados para el correcto dimensionamiento del emisario.

Tabla 2. Resumen de datos para el dimensionamiento

Resumen de datos		Datos del medio receptor	
Datos de descarga		Temperatura	27 °C
Q _{máx}	5,2 m ³ /s	Densidad del medio receptor	1025 kg/m ³
Q _{mín}	1,3 m ³ /s	T90	1,5 hrs
Datos del efluente		Viscosidad del agua de mar	1,02E-06 m ² /s
Concentrac. coliformes totales	35600000 NMP/100ml	Datos hidrodinámicos	
Concentrac. coliformes fecales	28000000 NMP/100ml	Velocidad del viento promedio	5,2 m/s
Temperatura	25,9 °C	Veloc. de la corriente promedio	0,016 m/s
Densidad del efluente	1011 kg/m ³	Dirección respecto al difusor	27 °
DBO5	110 mg/l	Velocidad del viento extremo	34 m/s
DQO5	253 mg/l	Velocidad de la corriente extrema	0,172 m/s
Ph	7,56 adm	Dirección	27 °
Conductividad Eléctrica	13520 mS/cm	Altura de ola significativa	4,26 m
O2 disuelto	1,4 mg/l	Altura de marea máxima	0,33 m
Sólidos Sedimentables	4 mg/l	Zona de rompiente	18 m
Datos topográficos y batimétricos		Datos iniciales de diseño	
X1	1495 m	Profundidad de vertido	19,4 m
X2	1440 m	Longitud total del emisario	300 m
X3	300 m	Datos para el diseño de lastres	
Longitud del tramo 1	144,28 m	K	1,2 adm
Pendiente del tramo 1	5,0 %	Densidad del concreto	2400 kg/m ³
Cota inicial del tramo 1	0,862 m	m	0,3 adm
Cota final del tramo 1	8,054 m	Cd	1,2 adm
Longitud del tramo 2	71,24 m		
Pendiente del tramo 2	15,7 %		
Cota inicial del tramo 2	8,054 m		
Cota final del tramo 2	19,21 m		
Longitud del tramo 3	84,48 m		
Pendiente del tramo 3	0,2 %		
Cota inicial del tramo 3	19,21 m		
Cota final del tramo 3	19,40 m		

Datos de la tubería					
Coefficiente de Williams-Hazen	150 adm				
PN (kPa)	SDR	D ext (m)	D int (m)	esp (m)	W medio (kg/m)
2	32,5	1,6055	1,5012	0,0492	242,541
4	21	0,4572	0,411	0,0218	29,9865
5	17	0,8025	0,7026	0,0471	112,4903

Dimensionamiento del sistema difusor

El diámetro del difusor requiere que se tomen en consideración los problemas de construcción y las necesidades de limpieza, por lo que se recomienda que, con el objetivo simplificar la realización de esta última, el diámetro de la tubería se mantenga constante. Los orificios de pequeño diámetro del difusor, con poco espacio entre ellos, producirán valores más altos de dilución inicial que los orificios con mayor espacio entre ellos, para la misma descarga por unidad de longitud del difusor, según afirma Salas (1994). Todos los difusores deben estar equipados con estructuras finales que contengan compuertas que puedan abrirse para su limpieza periódica, siempre y cuando sea requerido. Usualmente se ubica un orificio final al terminar la estructura para proporcionar un flujo continuo en el terminal del emisario submarino.

Con el objetivo de evitar obstrucciones en los difusores y cumplir con las recomendaciones de diseño, se decide colocar 8 orificios, separados cada 7 m, para una longitud del sistema difusor de 49 m. Los primeros 7 tendrán un diámetro exterior de 0,4572 m e interior de 0,4110 m, mientras que el último, tendrá diámetros de 0,8025 m y 0,7026 m, respectivamente, para una relación del área del emisario con respecto a la suma de las áreas de los orificios del 74 %. La figura 4 es una representación del sistema difusor, mediante la herramienta de visualización gráfica CORSPY del software CORMIX, que simula el vertido de chorros múltiples a través de la modelación de campo lejano.

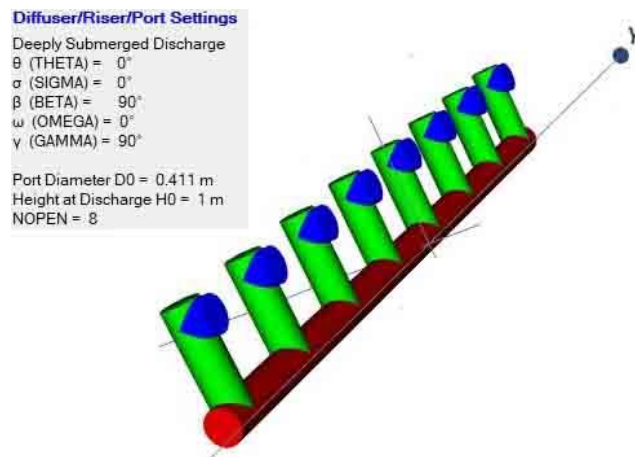


Figura 4. Representación del sistema difusor en el software CORMIX

Cumplimiento de las normas y recomendaciones

- Longitud mínima del emisario: 88 m según los resultados de la simulación con el modelo ADCIRC.
- Profundidad mínima de vertido: 15 m, para asegurar los valores óptimos de dilución.
- Velocidad máxima en el emisario: 3,0 m/s.
- Velocidad mínima en el emisario: 0,6 m/s.
- La longitud del sistema difusor: 9 m, no debe ser inferior al 3 % de la longitud del emisario y estará dispuesto para conseguir la mayor longitud normal a la dirección de la corriente.
- El diámetro de los orificios debe ser mayor que 0,075 m o 0,15 m, en dependencia del tratamiento preliminar que reciba el agua residual.
- Distancia entre los orificios: 6,5 m, $L_o \geq Y/3$, donde Y es la profundidad de vertido.

- Velocidad máxima en los orificios: 5 m/s.
- Velocidad mínima en los orificios: 0,6 m/s.
- Relación de las áreas: 74 %, la suma de las áreas de las secciones de todos los orificios no debe ser superior a 0,75 veces la sección inicial de la tubería de emisario. También resulta notable asegurar que el área total de los orificios sea significativamente menor que el área de la tubería.

Resultados de la remoción de bacterias

En la tabla 3 se presentan los resultados de la remoción de bacterias en los sitios a proteger, para los distintos procesos, empleando las fórmulas de Cederwall para la dilución inicial y la de Brooks para la dispersión horizontal.

Tabla 3. Resultados de la remoción de bacterias

Dilución inicial			Dispersión horizontal			
Q _{máx}	V	4,90 m/s	Sitios a proteger	X1	X2	X3
	F	14,71 Adm	Rumbo	SE	SW	W
	Di	23,14 Adm	a	27	27	27
Q _{mín}	V	1,22 m/s	V(cm/s)	1,6	1,6	1,6
	F	3,68 Adm	V(m/h)	57,6	57,6	57,6
	Di	34,63 Adm	b(m)	22,2	22,2	22,2
			X(m)	1495,0	1440,0	300,0
			Tr(h)	26,0	25,0	5,2
			Dh	235,5	222,9	24,1

Decaimiento bacteriano				
Sitios a proteger		X1	X2	X3
T90	1,5	2,01E+17	4,64E+16	2,97E+03
Db				

Dilución total					
Sitios a proteger		X1	X2	X3	
Q _{máx}	Dt	1,10E+21	2,39E+20	1,66E+06	NMP/100ml
	Crt	3,25E-14	1,49E-13	21,15	NMP/100ml
	Crf	2,56E-14	1,17E-13	16,9	NMP/100ml
Q _{mín}	Dt	1,64E+21	3,58E+20	2,48E+06	NMP/100ml
	Crt	2,17E-14	9,93E-14	14,4	NMP/100ml
	Crf	1,71E-14	7,81E-14	11,3	NMP/100ml

Se calcularon los coliformes remanentes totales y fecales cada cierta distancia del emisario futuro, con el objetivo de estimar el alcance de la contaminación por vertido de residuales en el mar, como se muestra en la tabla 4. En la figura 5 se muestran los resultados de este análisis, la circunferencia interior del círculo azul, representa un radio de 200 m a partir del extremo final

del emisario, mientras que la circunferencia exterior, un radio de 400 m. Los coliformes remanentes totales comienzan a ser aceptables a partir de los 180 m, mientras que los coliformes remanentes fecales comienzan a estar dentro del rango recomendado a los 222 m y son despreciables, coliformes remanentes totales y fecales a partir de los 400 m. Luego, la zona del malecón habanero, no corre riesgo de contaminación, debido al emisario, porque este se encuentra a una distancia aproximada de 1500 m del emisario futuro.

Tabla 4. Concentración de coliformes remanentes para distintas distancias del emisario

X (m)	0	100	150	180	200	222	300	400	450	500	1000	2000
Crt (NMP/100ml)	6182425,0	17490,4	2861,2	1025,4	526,4	256,0	21,5	1,0	0,2	0,1	3,1E-08	3,0E-20
Crf (NMP/100ml)	4862581,5	13756,5	2250,4	806,5	414,0	201,3	16,9	0,8	0,2	0,0	2,5E-08	2,4E-20

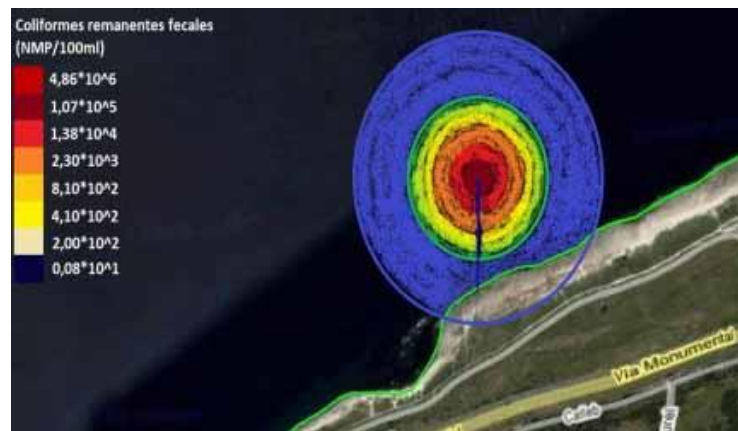


Figura 5. Concentración de coliformes remanentes fecales

Los resultados indican que, para una longitud del emisario submarino de 300 m, incluyendo los 49 m del tramo difusor, se cumplirá con el estándar de 1000 NMP/100 ml de coliformes totales y el conteo de coliformes fecales será menor a 200 NMP/100 ml, por lo cual es considerado satisfactorio.

Modelación de la Dilución inicial

Para la modelación de la dilución inicial y, a modo de comprobación de los resultados mediante el método analítico, se empleará el software Visual Plumes. El programa incluye distintos módulos para la simulación de vertidos mediante chorros sumergidos individuales o múltiples, considerando las condiciones ambientales del medio receptor. El programa simula fundamentalmente el comportamiento de campo cercano, aunque incluye alguna fórmula semiempírica para estimar el campo lejano, según Frick (2004). En la figura 6, se muestran los resultados del programa para la dilución inicial para el caudal máximo (5,2 m³/s), que es la condición más desfavorable, mientras que en la tabla 5 se comparan los resultados del software con el método analítico.

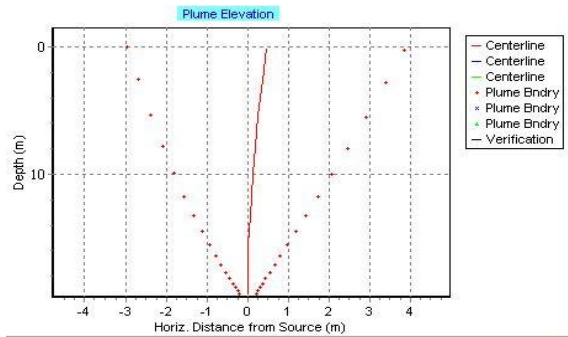


Figura 6. Gráfico que representa la elevación de la pluma para la descarga máxima Visual Plumes

Tabla 5. Comparación de los resultados analíticos con el Visual Plumes

Comparación de los resultados		
Dilución inicial		
	Qmáx	Qmín
Analítico	23,14	34,63
Visual Plumes	22,55	36,26
Error (%)	3	4

Dimensionamiento de lastres

Una causa de falla común de los emisarios submarinos de PEAD, ha sido el uso de metales no resistentes a la corrosión para asegurar los lastres a la tubería. Esto hace que las anclas se suelten y, debido a que la tubería y sus contenidos son menos pesados que el agua marina la tubería flota hacia la superficie. Por esta razón, se ha elegido que los lastres sean enterizos y de sección trapezoidal, con el objetivo que sean de relativa facilidad de construcción. El diseño correcto y la instalación adecuada son esenciales para asegurar una larga vida útil del emisor.

La gravedad específica (K) o factor de hundimiento, es empleada en los emisarios submarinos para describir el comportamiento entre las fuerzas que afectan al sistema, desde el punto de vista de las tensiones. Se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$K = \frac{S * (W_p + W_s) + W_a}{(S * V * W_m + W_a * W_m) / W_c} \quad (1)$$

donde,

K: gravedad específica (adm).

S: espaciamiento entre lastres (m).

W_p: peso unitario de la tubería (kg/m).

W_s: peso unitario del contenido de la tubería (kg/m).

W_a: peso total de cada lastre fuera del agua (kg).

V: volumen externo de la tubería por unidad de longitud (m³/m).

W_m: densidad del agua de mar (kg/m³).

W_c: densidad del concreto (kg/m³).

En la figura 7 se exponen los resultados del dimensionamiento de los lastres, se debe aclarar que serán 75 lastres, espaciados cada 4 m, lo cual arroja un factor de seguridad igual a 54,5, mucho mayor que el 1,5 necesario, por lo que el emisario es estable y seguro.

Empleo de una estación de bombeo de agua residual

Antes de poder decidir las características de las bombas de agua residual a colocar, se debe primero comprobar si realmente es necesario el empleo de una estación de bombeo, comparando la carga necesaria, con la que se contará al inicio del emisario.

Determinación de la carga necesaria

Las pérdidas de carga a considerar son: las pérdidas de energía en la tubería principal y el difusor, pérdidas en los accesorios, también las pérdidas que resulta de la descarga de agua dulce al agua marina, la llamada diferencia de agua salada, que es 2,6 % de la profundidad del agua, en un ambiente marino normal y por último las pérdidas por diferencia de marea.

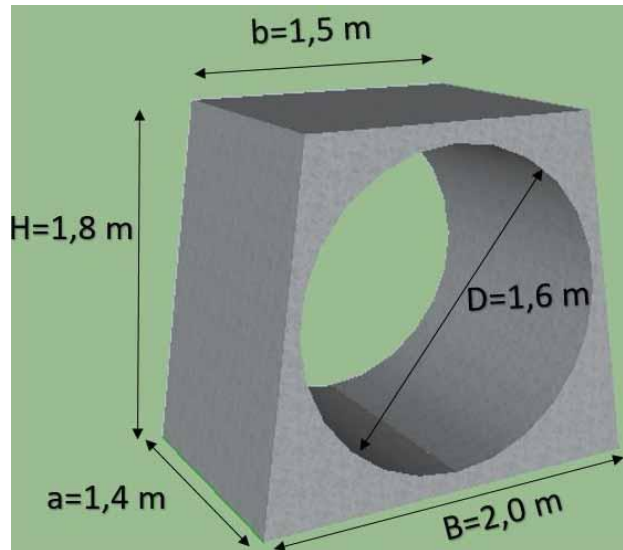


Figura 7. Dimensionamiento de los lastres

Las pérdidas por fricción se calculan mediante la fórmula de Williams-Hazen en la tubería principal y en el difusor, mediante un proceso iterativo, que comienza en el final de emisario y termina en el comienzo de este. Este análisis es un proceso paso a paso. Se hace evidente que no se puede decidir acerca de un flujo total en particular antes de iniciar los cálculos. Es necesario estimar primero el flujo desde el orificio terminal, luego calcular los flujos desde los orificios restantes, posteriormente comparar la suma resultante de todas las descargas de los orificios con el flujo total deseado, lo que se hace de forma iterativa hasta lograr errores despreciables. Durante este proceso, el diseñador puede modificar el diámetro de los orificios para mantener la descarga tan uniforme como sea posible, con el objetivo de mantener las velocidades de salida en los orificios casi constantes. El análisis de un difusor tendido en una pendiente cero es el más sencillo, ya que no ocurrirán diferencias en la presión de carga hidráulica, según CNA (2007). En la tabla 6, se muestran los resultados del análisis hidráulico del emisario.

Como se puede observar, las pérdidas por fricción a lo largo de la tubería y las pérdidas en el difusor tienen un valor de 3,429 m.

Las pérdidas por accesorios se tomarán como el 30 % de las pérdidas por fricción y pérdidas en el difusor, calculadas anteriormente en el análisis hidráulico del emisario, por lo que tienen un valor de 1,029 m.

Las pérdidas por diferencia de densidad quedan dadas por la siguiente expresión:

$$hf_{diferdens} = (\gamma_{am} - \gamma_{ar}) * p = 0,272m \quad (2)$$

donde, $hf_{diferdens}$: pérdidas por diferencia de densidad

γ_{am} : densidad del agua de mar = 1,025 t/m³
 γ_{ar} : densidad aguas residuales = 1,011 t/m³

p : profundidad media de la descarga = 19,4 m

Tabla 6. Resultados del análisis hidráulico

No Or	Est.	C.F.	D T	At	D Or	Ao	E1	R	Cd	Qo	Qt	Vt	hV	hf	E2	Vo
	0	0	1,5012	1,770			3,429				5,200	2,938	0,440			
	20	-1,36	1,5012	1,770			3,371				5,200	2,938	0,440	0,059	3,429	
	40	-2,76	1,5012	1,770			3,312				5,200	2,938	0,440	0,059	3,371	
	60	-3,65	1,5012	1,770			3,253				5,200	2,938	0,440	0,059	3,312	
	80	-4,57	1,5012	1,770			3,194				5,200	2,938	0,440	0,059	3,253	
	100	-5,58	1,5012	1,770			3,135				5,200	2,938	0,440	0,059	3,194	
	120	-6,64	1,5012	1,770			3,076				5,200	2,938	0,440	0,059	3,135	
	140	-7,66	1,5012	1,770			3,018				5,200	2,938	0,440	0,059	3,076	
	160	-10,43	1,5012	1,770			2,959				5,200	2,938	0,440	0,059	3,018	
	180	-13,78	1,5012	1,770			2,900				5,200	2,938	0,440	0,059	2,959	
	200	-16,74	1,5012	1,770			2,841				5,200	2,938	0,440	0,059	2,900	
	220	-19,23	1,5012	1,770			2,782				5,200	2,938	0,440	0,059	2,841	
	230	-19,26	1,5012	1,770			2,753				5,200	2,938	0,440	0,029	2,782	
	237	-19,27	1,5012	1,770			2,732				5,200	2,938	0,440	0,021	2,753	
	244	-19,28	1,5012	1,770			2,712				5,200	2,938	0,440	0,021	2,732	
1	251	-19,31	1,5012	1,770	0,411	0,133	2,691	0,132	0,554	0,534	5,200	2,938	0,440	0,021	2,712	4,023
2	258	-19,32	1,5012	1,770	0,411	0,133	2,674	0,103	0,570	0,548	4,666	2,636	0,354	0,017	2,691	4,130
3	265	-19,34	1,5012	1,770	0,411	0,133	2,661	0,077	0,585	0,561	4,118	2,327	0,276	0,013	2,674	4,228
4	272	-19,34	1,5012	1,770	0,411	0,133	2,651	0,055	0,598	0,572	3,557	2,010	0,206	0,010	2,661	4,315
5	279	-19,35	1,5012	1,770	0,411	0,133	2,643	0,036	0,609	0,582	2,985	1,686	0,145	0,007	2,651	4,389
6	286	-19,39	1,5012	1,770	0,411	0,133	2,639	0,020	0,618	0,590	2,403	1,358	0,094	0,005	2,643	4,448
7	293	-19,41	1,5012	1,770	0,411	0,133	2,636	0,009	0,625	0,596	1,813	1,024	0,053	0,003	2,639	4,492
8	300	-19,42	1,5012	1,770	0,703	0,388	2,634			1,217	1,217	0,687	0,024	0,001	2,636	3,138
										Suma	5,200 m ³ /s					
										Error	0 %					

Por último, se debe agregar la altura de marea máxima, con el objetivo de que el emisario pueda descargar en cualquier condición de marea. Este valor es igual a 0,33 m y fue extraído del análisis de los resultados del ADCIRC, para el escenario más desfavorable escogido, según Mederos (2018).

Se resume que las pérdidas totales en el emisario son expresadas en la siguiente ecuación:

$$hf_{tot} = (hf_{fricc} + hf_{difus}) + hf_{acc} + hf_{difdens} + hf_{difmar} = 6,0m \quad (3)$$

(considerando, un factor de seguridad del 20 %)

Determinación de la carga disponible

Para conocer la carga hidráulica con la que el efluente llega al inicio de emisario se dividió en 3 tramos la zona comprendida desde la estación de bombeo de Casablanca hasta el inicio del emisario submarino, como se observa en la figura 8.

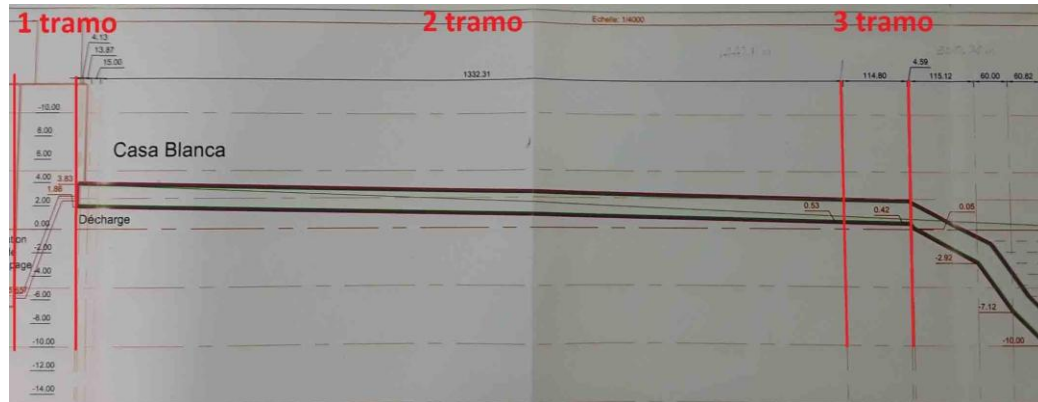


Figura 8. Conducción desde Casa Blanca hasta la playa El Chivo dividido en tramos

El primer tramo abarca desde la entrada de agua de las bombas de Casablanca (tubería de succión), hasta la entrada del túnel de la loma de La Cabaña. La sección transversal a la entrada del túnel presenta una forma de herradura: la base es rectangular de 2,00 m de longitud, con una altura de 1,15 m y la parte superior es un semicírculo de 1,00 m de radio. Para conocer el tirante a la entrada del túnel, se debe conocer primero la velocidad en este punto, pues se conoce el caudal y las dimensiones de la sección trasversal. Para determinar la velocidad al inicio del túnel se aplica la ecuación de Bernoulli, para la cual el plano de referencia se encuentra en la tubería de succión de las bombas de Casablanca. Para un caudal de diseño de $5,2 \text{ m}^3/\text{s}$, una velocidad de $7,44 \text{ m/s}$ y una base de 2,00 m de ancho en una sección rectangular, el tirante será de 0,35 m.

El segundo tramo va desde la entrada del túnel de la loma de La Cabaña hasta el cambio de sección de la tubería de conducción, a los 1332,31 m. Como este es un caso de conducción libre, para determinar la cota del agua a los 1332,31 m hay que calcular una curva superficial, pero antes se debe conocer el régimen de circulación, para determinar si la curva se calcula hacia aguas abajo o hacia aguas arriba. Como en esta ocasión el tirante de circulación ($y = 0,35 \text{ m}$) es menor que el tirante crítico ($y_c = 0,8834 \text{ m}$) y la pendiente crítica ($S_c = 0,0061$) es mayor que la pendiente del túnel para este tramo ($S = 0,001$), se puede concluir que el régimen de circulación es supercrítico y que la curva superficial que se forma es del tipo S3; por lo que hay que calcularla hacia aguas abajo. El cálculo de la curva superficial también emplea un proceso iterativo, donde se suponen profundidades y se detiene el proceso cuando el error entre las distancias, a las cuales se obtienen dichas profundidades, sea despreciable. Los cálculos arrojaron que, con un caudal de circulación de $5,2 \text{ m}^3/\text{s}$, a los 1 332,31 m, se alcanza un tirante de 1,7372 m.

El tercer tramo comprende desde el cambio de sección de la tubería de conducción hasta el inicio del emisario, con una longitud de 114,80 m. En esta ocasión, también se debe aplicar Bernoulli para determinar la carga hidráulica al inicio del emisario. En esta oportunidad el plano de referencia se encuentra en la cota de fondo del inicio del emisario. El resultado final de este Bernoulli es la carga al inicio del emisario, la cual es de 1,25 m.

Como las pérdidas totales en el emisario (6,0 m) son mayores que la carga hidráulica total con la que se llega al inicio del emisario (1,25 m), se confirma la necesidad de una estación de bombeo de agua residual. Se recomienda que las dimensiones del pozo húmedo sean las mismas que las de Casablanca. Se analizaron varias alternativas de equipos de bombeo y la propuesta final es de 5 bombas (4 funcionando y 1 de repuesto), con el punto de operación en $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ y 9 m de carga, como se muestra en la figura 9.

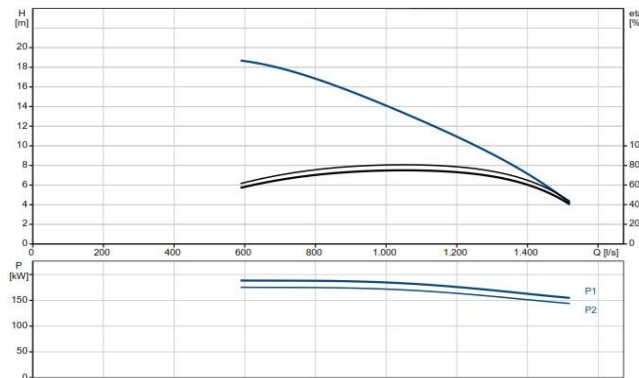


Figura 9. Representación gráfica del sistema de bombeo propuesto

CONCLUSIONES

- Se establecieron las descargas máxima y mínima del emisario como $5,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente y se estableció el valor del T_{90} como 1,5 h.
- El emisario tendrá un diámetro exterior de 1,6055 m e interior de 1,5012 m.
- Para facilitar la construcción y necesidades de limpieza, se decidió que el diámetro del sistema difusor será el mismo que el del emisario. Se colocarán 8 orificios, separados cada 7 m, para una longitud del sistema difusor de 49 m. Los primeros 7 tendrán un diámetro exterior de 0,4572 m e interior de 0,4110 m, mientras que el último tendrá un diámetro exterior e interior de 0,8025 m y 0,7026 m, respectivamente, para una relación de las áreas del 74 %.
- Para la propuesta de emisario submarino de longitud de 300 m y una profundidad de vertido de 19,40 m, se cumplieron las recomendaciones de diseño y las de calidad de agua, sobre todo, en el caso de los coliformes remanentes, se alcanzaron valores aceptables para la NC:22 1999.
- Los resultados de la dilución inicial, coincidieron con los resultados del Visual Plumes con errores menores que 5 %, tanto para la descarga máxima como para la mínima, alcanzando el radio de la pluma de contaminación un valor de 4 m para la máxima descarga.
- Las pérdidas totales fueron de 6 m de carga, superiores a los 1,25 m de carga disponible al inicio del emisario, por lo que es necesario el empleo de una estación de bombeo con 5 bombas (4 funcionando y 1 de reserva) de $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ de gasto y 9 m de carga cada una.
- Son necesarios para sostener el emisario en el fondo marino, 75 lastres trapezoidales espaciados a 4 m cada uno, con dimensiones $b = 1,50 \text{ m}$, $B = 2,00 \text{ m}$, $H = 1,80 \text{ m}$ y $a = 1,40 \text{ m}$, para un factor de seguridad igual a 54 el cual es muy superior a 1,5, lo cual es bueno para la certeza de que el emisario no será arrastrado, aún frente a eventos extremos.

REFERENCIAS

- Alfonso M. E.** (2000). "Experiencia cubana en emisarios submarinos, programa EMIS", Informe Técnico. Aguas de La Habana, La Habana, Cuba.
- Artiles R.** (1996). "Informe Técnico-Económico. Saneamiento Nacional de Recursos Hidráulicos", Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), La Habana, Cuba.
- CNA** (2007). "Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Guía para el diseño de emisores submarinos", Comisión Nacional del Agua (CNA), ISBN 978-968-817-880-5, México.
- Frick W. E.** (2004). "Visual Plumes mixing zone modeling software", Environmental Modelling & Software, vol. 19, pp. 645–654, ISSN 1364-8152, U.S. Environmental Protection Agency Papers, USA.
- JICA** (2004). "Estudio del desarrollo del alcantarillado y el drenaje pluvial en la cuenca tributaria de la bahía de La Habana en la República de Cuba", Agencia de Cooperación Internacional del Japón, La Habana, Cuba.
- Ludwig R. G.** (1988). "Evaluación del impacto ambiental. Ubicación y diseño de emisarios submarinos", Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Londres.
- Mancebo H.** (1997). "Estudio de mortalidad (T90) de bacterias coliformes en la zona de vertimiento del emisario de Playa del Chivo", Centro de Ingeniería y Manejo Ambiental de Bahías y Costas (CIMAB), Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), La Habana, Cuba.
- Mederos M. C.** (2018). "Propuesta de un sistema de tratamiento de aguas residuales, mediante emisario submarino, para La Habana, Cuba", Trabajo de Diploma en opción del título de Ingeniero Hidráulico, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- Salas H. J.** (1994). "Emisarios submarinos, alternativa viable para la disposición de aguas negras de ciudades costeras en América Latina y el Caribe", CEPIS. Presentado al XXIV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Buenos Aires, Argentina.
- Tur A. H.** (1997). "Calidad de las aguas residuales urbanas evacuadas por Playa del Chivo", Centro de Ingeniería y Manejo Ambiental de Bahías y Costas (CIMAB), Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). La Habana, Cuba.