

INTRODUCCIÓN

Caracas necesita aproximadamente un millón de metros cúbicos diarios de agua. Ésta demanda es solo posible satisfacerla transfiriendo agua desde largas distancias. Hoy en día, es del embalse de Camatagua donde se obtiene la mayor cantidad de agua que requiere la ciudad capitalina. Éste se encuentra a una distancia aproximada de ochenta kilómetros y a una altura inferior de setecientos metros, siendo éstos factores determinantes sobre el valor final del agua. En marzo de 2003 el embalse de Camatagua llegó a un nivel de extrema gravedad debido a la falta de un aporte significativo de lluvia, por lo que alcanzó el nivel más bajo de toda su historia. Pese a una recuperación del 60% de su volumen útil durante el año 2005, actualmente sigue estando por debajo de su volumen normal.

El requerimiento energético para enviar esta agua a Caracas es muy alto, y según incremente la demanda aumentará el costo energético debido a la necesidad de buscarla más lejos y más abajo.

Con el desarrollo de este proyecto se pretende adquirir una alternativa para evitar la necesidad de buscar agua cada vez más lejos y más abajo utilizando los recursos cercanos de los que se disponen. La propuesta consiste en diseñar una planta de tratamiento primario que permita reutilizar una porción de las aguas servidas de Caracas obteniendo como beneficio adicional una disminución de la carga orgánica del Río Guaire.

Es un proyecto a ser ejecutado por etapas el cual contempla, a groso modo, la depuración de las aguas del río por medio de unidades de elevación, aireación y mezcla (UEAM) y unidades de recuperación de agua (URA). Culminado el proceso de tratamiento, se realiza la distribución de las aguas desde los tanques de almacenamiento hasta la planta de tratamiento de La Guairita para obtener agua cien por ciento potable. El Lodo excedente de la planta será utilizado como acondicionador de suelos.

GLOSARIO

Aguas Servidas: Aguas utilizadas o residuales provenientes de una comunidad, industria u otro establecimiento, con contenido de materiales disueltos y suspendidos.

Calidad de un Cuerpo de Agua: Caracterización física, química y biológica para determinar su composición y utilidad al hombre.

Colectores: Infraestructura compuesta de alcantarillas y ductos que transportan las aguas residuales producidas en la vida diaria. En Caracas, los colectores poseen la misma trayectoria del río Guaire de forma subterránea. Son dos: el colector marginal izquierdo, que posee mayor descarga por estar ubicado entre el río y la zona con mayor densidad poblacional y el colector marginal derecho.

DBO: Es la medida del oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de materia orgánica.

Laguna de Aireación: Es un estanque donde se trata el agua residual mediante el suministro de aire.

BASES DE DISEÑO

Capacidad de la Planta

La ciudad capital posee un consumo de doce metros cúbicos por segundo. A partir de éste consumo, de la poca disponibilidad cercana de éste recurso y de los altos costos asociados al consumo energético se estima procesar aproximadamente una décima parte de la demanda (uno coma dos metros cúbicos por segundo), disponiendo de la cercanía del río Guaire para disminuir el consumo energético y por ende el costo del producto.

Especificaciones del Producto

Las especificaciones del agua tratada corresponden a los valores de la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 5.021, según ésta el producto se clasifica como tipo 1B que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración. La tabla N° 1 presenta las especificaciones establecidas como base de diseño para la calidad final del agua.

Tabla N°1. Especificaciones del agua tratada.

PARÁMETROS	VALOR
Oxígeno Disuelto (O.D)	Mayor de 4 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	Menor de 2,5 mg/L
pH	6,0 – 8,5
Sólidos Disueltos Totales	1500 mg/L
Organismos Coliformes Tot.	Promedio mensual menor 10.000 NMP por cada 100 mL

Características de la Materia Prima

El Río Guaire es un río extremadamente contaminado que posee alto contenido de sólidos suspendidos, muy bajo contenido de oxígeno disuelto, una carga bacteriana apreciable y gran cantidad de materia orgánica que origina el aspecto y olor desagradable. Ésta agua es la materia prima del proceso.

Un estudio de la calidad de agua del río permitió fijar las siguientes características ⁽¹⁾ que se muestran en la tabla N°2:

Tabla N°2. Condiciones de la materia prima.

PARÁMETROS	VALOR
Oxígeno Disuelto (O.D)	6,2 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	160 mg/L
pH	7,5
Sólidos Disueltos Totales	2.455,0 mg/L
Organismos Coliformes Tot.	2,4 x 10 ⁷

Se estima que las aguas del colector poseen una Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) de 600 ppm.

Características de los servicios industriales

Los servicios industriales requeridos para la planta de tratamiento de agua del Río Guaire son los siguientes:

- **Energía Eléctrica:** Se utiliza para el funcionamiento de todos los equipos e instalaciones eléctricas. En la zona donde está ubicada la planta se cuenta con éste servicio disponible de la red urbana de caracas y convertida a un voltaje de 220v.

- **Aire para instrumentos:** Se emplea en las válvulas de control entre un rango de presión de 3 a 15 psig para cumplir con las normas de funcionamiento de las mismas.

Factor de Servicio

Debido a que la planta está conformada por módulos, el mantenimiento y cualquier otra operación que se requiera se harán de forma individual (por módulo) y no global disminuyendo su capacidad durante la realización de estas operaciones. Por esto, se considera que la operación es continua. Sin embargo, se consideraron 15 y 10 días de parada prevista (mantenimiento) e imprevista (fallas eléctricas o en los equipos), respectivamente. El factor de servicio correspondiente es de 0,93 que representa 340 días de servicios.

Ubicación de la Planta

Se utilizará el mismo cauce del río y sus alrededores para colocar las Unidades de Elevación Aireación Mezcla (UEAM), las Unidades Recuperadoras de Agua (URA) y los tanques pulmón de la planta que asegurarán el flujo de agua necesario para cubrir la producción. El río se dividirá en tramos con condiciones uniformes de seis kilómetros cada uno separados por diques y que harán la función de lagunas de oxidación aeróbica. Se concentrará en Petare los tanques de almacenamiento del producto final.

Manejo de Efluentes

- **Manejo de Lodos:** Estos productos son obtenidos en las unidades de filtración y en los depósitos de los tanques-sedimentadores, esencialmente compuestos por material putrefacto con alto contenido de materia orgánica. Su eliminación se hará por transporte a zonas de relleno (vertedero).

- **Material sólido:** Obtenido de la acumulación de basura producida en el desbaste, la cual puede eliminarse junto con la basura del municipio.

Requerimiento de Almacén

Basados en la capacidad de producción de la planta, se requiere un tanque-sedimentador por cada laguna de oxidación con una capacidad de 1000 m³ (tiempo de residencia de 2,85 hora) por tanque.

Por otro lado, se requiere 1 tanque de almacenamiento de agua tratada (producto final) con una capacidad de 10.000 m³, el cual servirá para proporcionar un flujo seguro y constante hacia la planta de tratamiento de La Guairita.

Condiciones del Sitio

Como se mencionó anteriormente, la ubicación de la planta es a lo largo del río, por lo que se tomaron las condiciones ambientales de la ciudad de Caracas. La tabla N°3, muestra estas condiciones:

Tabla N°3. Condiciones del sitio.

TEMPERATURA PROMEDIO	Max: 32°C
	Normal: 25°C
	Min: 18°C
PRESIÓN	0.97 bar
PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL	950 mm
VELOC. DEL VIENTO	24 Km/h (Este)

Normas y Códigos Aplicables

Entre las normas y códigos aplicables a este proyecto se puede mencionar:

- **Normas INOS para Tratamiento de Agua:** normativa aplicable para la pureza del producto según el tipo de agua y su disposición.
- **Normas PDVSA:** normativas relacionadas con los cálculos hidráulicos en tuberías, listado de tuberías, preparación de diagramas de procesos e identificación y numeración de tuberías.
- **Norma AWWA/ANSI:** normativa relacionada con el tratamiento de agua (American Water Works Association); normativa relacionada con tuberías, bombas y conexiones (ANSI).
- **Normas ASTM:** normativa sobre características y rendimientos de materiales, productos, sistemas y servicios. También existe normativa para el manejo y aplicaciones de materiales en base a sus propiedades.
- **Ley de Aguas**
- **Ley Orgánica del Ambiente**
- **Ley Penal del Ambiente**

FILOSOFÍA DE DISEÑO, CONTROL, SEGURIDAD Y PROTECCIÓN

Se proporcionará información acerca de los criterios considerados para el sobrediseño, control, seguridad y protección de los equipos involucrados en la planta de tratamiento de agua.

Criterio para el sobredimensionamiento de los equipos

A continuación se presenta una tabla que expresa el porcentaje de sobrediseño de los equipos asociados a la planta de tratamiento de agua, con base a las variables críticas del diseño, siendo la razón fundamental el poder garantizar la producción deseada. Es válido acotar que este porcentaje se debe establecer mediante un compromiso entre los costos de inversión, los costos de operación y la flexibilidad que permite el sobrediseño del equipo, ya que se podría incurrir en costo innecesario en la planta, estos factores de sobredimensionamiento son mostrados en la tabla N° 4.

Tabla N°4. Criterios de sobrediseño de equipos.

EQUIPO	VARIABLE DE DISEÑO	PORCENTAJE DE SOBREDISEÑO (%)
Tanque sedimentador	Volumen del tanque	12,5
Tanque de Almacenamiento	Volumen del tanque	10
Filtro	Caudal	10
Membranas	Caudal	10
Bombas	Caudal	25
Compresor	Caudal	25

Filosofía de control

Para un diseño eficaz se deben tomar en cuenta la seguridad del personal, de los equipos, materiales y del medio ambiente. Por tanto se

establecieron estrategias de control para mantener las variables en su punto de control, así como también los tipos de señales entre los lazos de control, la configuración de las válvulas de control y la configuración del controlador.

- **Estrategias de control:** Se establecieron con base a los requerimientos específicos. Los controladores utilizados son automáticos del tipo proporcional (P). Siendo la estrategia de control establecida del tipo feedback (retroalimentación) relación y rango dividido.
- **Transmisión de señales:** Se utilizaron señales eléctricas en un rango de 4-20 mA para la relación entre los instrumentos afines con las mediciones y los controladores; señales neumáticas en un rango de 3-15 psi para la relación entre los controladores y los elementos finales de control y señales digitales para la relación entre los controladores y computadoras. Para la transformación entre las diferentes señales se utilizarán los transductores de tipo I/P, relacionando señales neumáticas con las eléctricas.
- **Tipos de válvulas de control:** Para el diseño de la planta, el tipo de válvula que figura es el de tipo lineal. La selección de esta válvula se estableció de acuerdo a la forma de operación y los requerimientos del proceso.
- **Configuración del controlador proporcional (P):** La selección de la configuración del controlador se estableció de acuerdo a la rigurosidad del control. El controlador proporcional es el tipo más simple y su error asociado es aceptable para el control de las variables de interés.

Flexibilidad operacional

El diseño de los equipos considera las variaciones de condición en la materia prima, la cual depende de la estación de año (lluvia o sequía). En caso

de desperfectos se cuentan con equipos de respaldo como bombas, filtros y compresores.

Síntesis de la tecnología

La planta consta de tres secciones fundamentales caracterizadas por los procesos que en ellas se realiza. En la primera sección se lleva a cabo la toma de agua de los colectores y el tratamiento preliminar para disminuir los sólidos gruesos para descargarla al río. La segunda sección se denomina Unidad de Elevación-Aireación y Mezcla, la cual aumenta el contenido de oxígeno, eleva y mezcla el agua del fondo de la laguna para asegurar una homogenización del líquido contenido en ella. La tercera sección se denomina Unidad Recuperadora de Agua en la cual se lleva a cabo la toma de agua del río y el tratamiento final utilizando un sistema de membranas de Nano-filtración.

ESTUDIO DE MERCADO

En esta sección del informe se presenta el estudio de mercado realizado con la finalidad de establecer la capacidad y la ubicación de la planta. En primer lugar, se analizó la oferta y la demanda en la región de estudio: Caracas. Se debe mencionar, que pese a que nuestro producto se va a vender como materia prima a las plantas potabilizadoras de agua: Hidrocapital, éste se basará únicamente en la capacidad instalada de estas plantas. La tabla que a continuación se presenta, muestra la demanda de agua de Caracas para los años 1998 – 2003:

Tabla Nº 5. Demanda de agua de Caracas para los años 1998-2003

AÑO	DEMANDA (m ³ /s)
1998	12-13
1999	11-12
2000	13-14
2001	9-10
2002	10-11
2003	8-9

En dicha tabla, se aprecia una irregularidad de la demanda, los últimos años muestran una disminución en la demanda con respecto a los años anteriores, esto se atribuyó a la situación crítica que había llegado el embalse de Camatagua el cual aparta más del 80% del agua que consume el área metropolitana de Caracas y al racionamiento empleado como medida preventiva para mantener el suministro de agua potable. Sin embargo, se estima una tendencia creciente en la demanda de este recurso que pueda proporcionar un mercado potencial para la comercialización de nuevas tecnologías en la obtención del producto. Es válido acotar que para tener un mejor estimado, debe contarse con datos más actuales.

A continuación se presenta la tabla N° 6, la cual representa las diferentes regiones donde se ubican las plantas de tratamiento de agua pertenecientes a Hidrocapital, con su respectiva capacidad y el año de construcción de la mayoría con el fin de tener noción de las tecnologías empleadas.

Tabla N° 6. Plantas de tratamiento de agua pertenecientes a Hidrocapital

PLANTA DE TRATAMIENTO, AÑO DE CONSTRUCCIÓN	CAPACIDAD, l/s	UBICACIÓN
Planta de tratamiento Caujarito	15000	Charallave, Santa Teresa del Tuy
Planta de tratamiento La Mariposa	4900	Las Mayas
Planta de tratamiento La Guairita	8000	Macaracuay, Caracas
Planta de tratamiento Taguaza, 1987	1200	La Chata, vía Araguaita
Planta de tratamiento Ocumarito, 1980	1500	Ocumare del Tuy
Planta de tratamiento Macarao, 1958	120	Macarao, Caracas
Planta de tratamiento TM-1, 1972	290	Santa Tereza
Planta de tratamiento El Guapo, 1981	1200	El Guapo, Edo. Miranda
Planta de tratamiento Picure, 1978	1500	Carayaca, Edo. Vargas
Planta de tratamiento Naiguatá, 1958	480	Naiguatá, Edo. Vargas
Planta de tratamiento Carayaca, 1963	25	Carayaca, Edo. Vargas

Analizando la tabla anterior, se puede establecer la siguiente conclusión, las plantas de tratamiento de agua disponibles en el área metropolitana, son dos, la Planta de Tratamiento Macarao y la Planta de Tratamiento La Guairita. Debido a que esta última tiene mayor capacidad y una tecnología más reciente, se seleccionó dicha planta como punto final de descarga de nuestro producto. Se pudiera pensar en otra planta fuera del área de Caracas como otra alternativa, sin embargo, esto implica un mayor costo debido al bombeo lo que

encarecería el producto y aumentaría el costo de inversión por lo que se descartó dicho planteamiento.

Con respecto a la capacidad, debido a que se plantea el reuso del agua servida de la ciudad, lo cual ha sido probado satisfactoriamente en muchas partes del mundo pero no en el área de interés, se desea establecer inicialmente una capacidad baja que puede ir aumentando en el tiempo debido a la versatilidad del diseño. Esta capacidad se fijó en un 10% del caudal de aguas servidas de Caracas, el cual corresponde a 1,2 m³/s.

Con respecto a la ubicación de la planta, se seleccionó la ciudad de Caracas, por ser la más poblada del país y la que mayor consumo de agua genera; debido a la disponibilidad y cercanía de los servicios necesarios (energía) y debido a que las obras a realizar no generan impactos ambientales adversos adicionales, ya que son obras en lugares urbanizados.

Se seleccionó al Río Guaire como el cuerpo de agua a emplear de donde se extraerá la materia prima (el agua a tratar) debido a su cercanía a la ciudad; su baja pendiente que permite utilizar el mismo cauce como laguna de oxidación; su abundante caudal de agua que permite cubrir la capacidad deseada para lo cual se le reinyectarán el agua tratada de los colectores con el fin de asegurar y mantener el caudal y finalmente, debido a que se encuentra canalizado en todo su recorrido lo que se traduce en obras menos a realizar.

DOCUMENTOS DE INGENIERÍA

En esta sección del informe, se presenta una breve descripción de todos los documentos de ingeniería producidos, su contenido y su ubicación dentro del informe.

Descripción del Proceso

Se presenta la descripción detallada del proceso en función del recorrido de todas las líneas del proceso tomando en cuenta los equipos principales. Esta información está íntimamente relacionada con el diagrama de flujo de proceso (DFP) y con el diagrama de instrumentación y tuberías (DTI). Para tener una información más detallada, consulte el tópico de descripción del proceso.

Diagrama de Flujo de Proceso (DFP)

El proceso de tratamiento de agua consta de tres diagramas de flujos de proceso correspondientes a cada zona de la planta (ver sección síntesis de la tecnología). Estos diagramas son elaborados bajo las normas PDVSA L-TP1.1 *Preparación de Diagramas de Procesos*, los mismos cuentan con la descripción de los aspectos más importantes de cada uno de los equipos, sus condiciones normales de operación, su control básico y su respectivo balance de materia que contiene: número y descripción de la corriente, flujo volumétrico, estado físico, entre otros. Dicha información se encuentra en el tópico de diagrama de flujo de proceso.

Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI)

Constan de 5 hojas que representan de forma detallada los equipos. Fueron realizados siguiendo las normas PDVSA L-TP1.1 *Preparación de Diagramas de Procesos* y las normas ISA para los lazos de control e instrumentación con el fin de garantizar una operación segura de la planta.

Para profundizar esta información consulte el tópico de diagramas de tuberías e instrumentación.

Lista de Equipos de Proceso

Se elaboró la lista que muestra todo los equipos involucrados en el proceso, la ubicación de cada equipo en el diagrama de tuberías e instrumentación, número de equipos y material de construcción, entre otros. Para mayor información, consulte el tópico de lista de equipos de proceso.

Hojas de Especificaciones

Conformado por 7 hojas que contienen la información mínima necesaria para un diseño detallado posterior de los equipos mayores o principales del proceso. Toda la información relacionada con estos documentos se presenta en el tópico de hojas de especificaciones.

Diseño de Equipos principales del Proceso y Estrategias Principales de Control

Se describe la síntesis de la tecnología y la justificación de su lazo de control. Para más información, consulte el tópico de hojas de especificaciones.

Lista de Tuberías

Contiene la información básica sobre las redes de tuberías de la planta. A saber: número de la tubería, diámetro nominal, origen y destino, fase y el posible uso de un aislante. El diseño se rige por las normas PDVSA N° 90616.024 *Dimensionamiento de Tuberías de Proceso*, PDVAS N° L-TP 1.3 *Identificación y Numeración de Tuberías*, PDVSA H-221 *Índice de Servicio de Especificación de Ingeniería*. Para mayor información relacionada con este punto, consulte el tópico de lista de tuberías.

CONCLUSIONES

Después de haber culminado con el objetivo principal del diseño de un sistema de recuperación de agua potabilizable de la cuenca del Río Guaire, se obtienen las siguientes conclusiones:

- El flujo procesado en cada laguna se estableció en $0,24 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que la capacidad de la planta es de $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$.
- El producto final tendrá una demanda bioquímica de oxígeno menor a $2,5 \text{ mg/L}$.
- Se utilizará el mismo cauce del río y sus alrededores para colocar las (UEAM), (URA) y los tanques pulmón de la planta que asegurarán el flujo de agua necesario para cubrir la producción.
- El factor de servicio de la planta fue establecido en $0,93$.

RECOMENDACIONES

Para un buen diseño y operatividad de la planta de recuperación de agua potabilizable de la cuenca del Río Guaire, se recomienda:

- Realizar un estudio económico detallado, con el fin de obtener una información confiable acerca de la factibilidad de construcción de dicha planta.
- La supervisión periódica del sistema de control general de la planta, ya que cambios en las condiciones de algunas corrientes puede afectar de forma significativa el proceso.
- Obtener datos experimentales de otras plantas a fin de ajustar los modelos tecnológicos y tener una simulación que permita estudios de optimización de los procesos más complejos con la intención de mejorar la producción y disminuyendo al máximo los costos de operación.
- Realizar programas de concientización para el tratado y manejo de aguas servidas en todo el territorio Nacional.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Awwa. **Tratamiento de aguas por membranas**. Editorial Mc Graw Hill. 2000.

BLANCO, Berenice. **Elaboración de diagramas de proceso**. Facultad de Ingeniería-UCV.

CORRIPIO, Armando. **Control automático de procesos**. Editorial Mimusa. 1^{ra} Edición 1991. México.

CRANE. **Flujos de fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías**. Editorial Mc Graw Hill. México. 1989.

PARIS, Joseph. **Aplicación del filtro anaerobio a la depuración de aguas residuales**. Universidad Autónoma de Barcelona.

PONCE, Juan. **Tratamientos anaerobios de aguas residuales**. Sereland, S.A.

TURTON, Richard. **Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes**. Editorial Prentice Hall. Estados Unidos de América. 1998.

WALAS, S. **Chemical process equipment**. Editorial Elsevier. 2002.

Manual de PDVSA. **Principios Básicos**. Capitulo MDP-02FF-02

Manual de PDVSA. **Consideraciones básicas de diseño**. Capitulo MDP-02FF-03

Publicación de PDVSA-INTEVEP, **Proyecto de reutilización de las aguas servidas de la ciudad de Maracaibo**, Venezuela. Volumen 9-2, 2002.