



FACULTAD DE  
INGENIERÍA



INSTITUTO DE  
INGENIERÍA  
QUÍMICA



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

## Planta de producción de dióxido de cloro para alimentar planta potabilizadora de Aguas Corrientes

Germán Astol Iriarte	IQ
Mateo Bentancur Rodríguez	IQ
Santiago Bianchi Chebataroff	IQ
María Sol Cabrera Rodríguez	IQ
Gabriel Agustín Gutiérrez Álvarez	IQ

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniero Químico.

### **Tutores:**

Ing. Raúl García  
Msc. Ing. Roberto Kreimerman

### **Consultor especialista:**

MBA. Ing. Javier Medina

Montevideo, Uruguay  
Diciembre 2024

# Índice general

Agradecimientos	1
Descargo de responsabilidad	2
Resumen ejecutivo	3
<b>0. Glosario</b>	<b>5</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>6</b>
1.1. Objetivo y motivación del proyecto . . . . .	6
1.2. Definición del problema a resolver . . . . .	6
1.3. Alcance del proyecto . . . . .	7
<b>2. Producto</b>	<b>8</b>
2.1. Desinfección con dióxido de cloro . . . . .	8
2.2. Comparación con el desinfectante actual . . . . .	9
2.3. Problemas asociados a la desinfección con dióxido de cloro . . . . .	11
2.4. Tendencia mundial hacia la oxidación con dióxido de cloro . . . . .	11
<b>3. Tamaño</b>	<b>13</b>
3.1. Etapas de desinfección . . . . .	13
3.2. Rango de producción . . . . .	15
3.2.1. Estimación de la demanda de dióxido de cloro . . . . .	16
3.3. Cronograma de operación . . . . .	18
<b>4. Localización</b>	<b>19</b>
4.1. Potenciales ubicaciones . . . . .	20
4.2. Factores locacionales considerados . . . . .	21
4.3. Valoración de factores locacionales . . . . .	22
<b>5. Tecnologías para la producción de dióxido de cloro</b>	<b>23</b>
5.1. Tecnologías disponibles . . . . .	24
5.2. Análisis de tecnologías disponibles . . . . .	26
5.2.1. Factores tecnológicos a considerar . . . . .	26
5.2.2. Factores a considerar en evaluación inicial . . . . .	26
5.2.3. Evaluación inicial de tecnologías . . . . .	27
5.3. Tecnologías viables . . . . .	28
5.3.1. Materias primas y proveedores de productos químicos . . . . .	28
5.3.2. Proveedores de sistemas de producción . . . . .	29
5.3.3. Producción mediante clorito acuoso y cloro acuoso . . . . .	29
5.3.4. Producción mediante clorito sólido y cloro gaseoso . . . . .	31
5.3.5. Producción mediante clorato, peróxido de hidrógeno y ácido sulfúrico . . . . .	31
5.3.6. Producción mediante clorito y ácido clorhídrico . . . . .	33
5.3.7. Producción mediante vías electroquímicas . . . . .	35

5.4.	Análisis de tecnologías viables . . . . .	36
5.4.1.	Factores a considerar en la evaluación secundaria . . . . .	36
5.4.2.	Evaluación del CAPEX para las tecnologías . . . . .	37
5.4.3.	Consumo eléctrico . . . . .	37
5.4.4.	Evaluación del OPEX para las tecnologías . . . . .	38
5.4.5.	Evaluación secundaria de tecnologías . . . . .	39
5.5.	Diagramas de flujo de bloques . . . . .	39
5.6.	Tecnología elegida . . . . .	40
<b>6.</b>	<b>Ingeniería</b>	<b>41</b>
6.1.	Materias primas . . . . .	41
6.2.	Sistema de producción . . . . .	41
6.2.1.	Elección de módulo para la preoxidación . . . . .	43
6.2.2.	Elección de módulo para la intercloración . . . . .	44
6.2.3.	Descripción del sistema de producción . . . . .	44
6.3.	Infraestructura de almacenamiento y distribución de fluidos . . . . .	45
6.3.1.	Agua motriz . . . . .	46
6.3.2.	Cloro . . . . .	48
6.3.3.	Clorito de sodio . . . . .	49
6.3.4.	Dióxido de cloro . . . . .	53
6.4.	Automatismo y control del proceso . . . . .	59
6.5.	Análisis de riesgos . . . . .	60
6.5.1.	Riesgos asociados a la producción . . . . .	61
6.5.2.	Riesgos laborales . . . . .	63
6.6.	Servicios auxiliares . . . . .	65
6.6.1.	Energía eléctrica . . . . .	65
6.7.	Estructura edilicia . . . . .	69
6.7.1.	Materiales y resumen de las dimensiones . . . . .	71
6.8.	Sistema de gestión . . . . .	72
6.9.	Estructura organizacional . . . . .	72
6.10.	Cronograma de implementación . . . . .	73
6.11.	Estudio de impacto ambiental . . . . .	74
6.11.1.	Características del medio receptor . . . . .	74
6.11.2.	Identificación y evaluación de impactos . . . . .	74
6.11.3.	Determinación de las medidas de mitigación . . . . .	79
6.11.4.	Plan de seguimiento, vigilancia y auditoría . . . . .	80
<b>7.</b>	<b>Análisis económico</b>	<b>81</b>
7.1.	Introducción . . . . .	81
7.2.	Tasa de descuento . . . . .	81
7.3.	Inversiones . . . . .	82
7.3.1.	Inversiones amortizables tangibles . . . . .	82
7.3.2.	Inversiones amortizables intangibles . . . . .	83
7.3.3.	Inversiones no amortizables . . . . .	84
7.3.4.	Inversión total . . . . .	84
7.4.	Costos . . . . .	85
7.4.1.	Costos en materia prima . . . . .	85

7.4.2.	Costos en mano de obra . . . . .	86
7.4.3.	Amortizaciones . . . . .	87
7.4.4.	Costos fiscales . . . . .	89
7.4.5.	Costos totales . . . . .	90
7.4.6.	Distribución porcentual de los costos totales . . . . .	91
7.4.7.	Ingresos . . . . .	92
7.5.	Análisis financiero . . . . .	93
7.5.1.	Condiciones del préstamo . . . . .	93
7.5.2.	Punto de equilibrio . . . . .	93
7.5.3.	Análisis de sensibilidad . . . . .	94
7.5.4.	Indicadores financieros . . . . .	95
7.5.5.	Comparación con el OPEX actual . . . . .	96
<b>8.</b>	<b>Evaluación</b>	<b>97</b>
8.1.	Evaluación empresarial . . . . .	97
8.1.1.	Rentabilidad . . . . .	97
8.1.2.	Seguridad . . . . .	97
8.2.	Evaluación desde el punto de vista de la institución financiera . . . . .	98
8.3.	Evaluación desde el punto de vista nacional . . . . .	98
8.4.	Conclusiones . . . . .	98
8.5.	Posibles mejoras . . . . .	99
	<b>Referencias</b>	<b>101</b>
<b>A.</b>	<b>Apéndices</b>	<b>105</b>
A.1.	UNIT 833:2008 - Desinfección . . . . .	105
A.2.	Parámetros característicos de la desinfección . . . . .	106
A.3.	Diagrama de sectores de planta . . . . .	107
A.4.	Cotas de la planta potabilizadora e historial de inundaciones . . . . .	109
A.5.	Análisis estadístico del flujo másico de agente oxidante . . . . .	110
A.6.	Análisis estadístico de la cantidad de hierro en los puntos de dosificación . . . . .	110
A.7.	Tecnologías alternativas de producción . . . . .	111
A.7.1.	Producción mediante clorato y ácido clorhídrico . . . . .	111
A.7.2.	Producción mediante clorato y ácido oxálico . . . . .	111
A.7.3.	Producción mediante clorato y metanol en medio ácido . . . . .	112
A.7.4.	Producción mediante clorato, ácido sulfúrico y dióxido de azufre . . . . .	112
A.7.5.	Producción mediante clorato, cloruro de sodio y ácido sulfúrico . . . . .	113
A.7.6.	Producción mediante clorito y ácido sulfúrico . . . . .	113
A.7.7.	Producción mediante clorito, hipoclorito y ácido clorhídrico . . . . .	114
A.8.	Reuniones con especialistas técnicos . . . . .	115
A.8.1.	Entrevistas con técnicos de OSE . . . . .	115
A.8.2.	Entrevistas con técnicos externos a OSE . . . . .	116
A.8.3.	SANEPAR - Experiencia en tratamiento de agua potable con dióxido de cloro	116
A.8.4.	Reuniones con proveedores . . . . .	118
A.9.	OPEX Actual . . . . .	124
A.10.	Materiales para cañerías . . . . .	125
A.11.	Pérdida de carga en eductor de intercloración . . . . .	126

A.12.Visita a planta actual . . . . .	126
A.13.Luminaria . . . . .	128
A.14.Planos . . . . .	130
A.14.1. Diagramas de flujo de bloques . . . . .	130
A.14.2. Diagramas de tuberías e instrumentación . . . . .	135
A.14.3. Constructivos . . . . .	139
A.14.4. Diagramas unifilares . . . . .	143
A.15.Fichas técnicas . . . . .	147

# Resumen ejecutivo

El presente proyecto desarrolla el diseño y evalúa la viabilidad técnico-económica para la instalación de una planta destinada a la producción de dióxido de cloro, con el objetivo de abastecer las etapas de preoxidación e interoxidación en el proceso de potabilización de agua realizado por Obras Sanitarias del Estado (OSE) en la usina de bombeo y tratamiento de la planta de Aguas Corrientes.

Actualmente se dosifica cloro en etapas donde la materia orgánica es significativa, lo que genera ácidos haloacéticos y trihalometanos. Estos subproductos se encuentran en la categoría 2B (posiblemente cancerígenos) de la agencia internacional de investigación contra el cáncer (IARC).

Los trihalometanos, en períodos de temperaturas altas y/o de uso de agua salobre con mayor cantidad de halógenos en las muestras de la red de distribución, superan el valor máximo permitido (VMP) establecido en la norma UNIT 833:2008, norma que establece los requisitos de agua potable en Uruguay.

La dosificación de dióxido de cloro ofrece como principal ventaja la oxidación inicial de la materia orgánica y facilita la eliminación de hierro y manganeso, al mismo tiempo que ayuda a controlar el crecimiento del mejillón dorado en las cañerías.

El dióxido de cloro en solución no se disocia, por lo que no presenta la formación de dichos compuestos. Adicionalmente, cuenta con una mayor capacidad respecto al cloro para penetrar las membranas microbianas, consiguiendo una mayor efectividad de desinfección para *Giardia*, *Cryptosporidium*, *Escherichia Coli* y organismos heterotróficos en general.

El dióxido de cloro es un gas poco soluble e inestable, por lo que se debe producir en las cercanías de la dosificación. Por esta razón, se decide instalar la planta en el padrón n.º 1, propiedad de OSE, ubicado al norte de la planta de Aguas Corrientes, en un área de 2.400 m<sup>2</sup>. Para ello se ha considerado la distancia a los puntos de dosificación, la cercanía a las salidas de emergencia, y la posibilidad de expansión, entre otros.

Se prevé que la planta sea capaz de tratar 600.000 m<sup>3</sup>/d, capacidad de diseño y operación de la usina. La producción, considerando un factor de sustitución 1:1 con el cloro y la oxidación de TOC, hierro y manganeso, se encuentra en un rango de 18,5 a 68,0 kg/h. Esta demanda varía en función de la relación existente entre el DQO y el caudal tratado con la temperatura.

Para gestionar esta variación, se propone la utilización de módulos en paralelo con capacidad variable, lo cual constituye uno de los principales requisitos para la selección de la tecnología de producción.

Existe una amplia gama de reacciones que permiten la generación del producto requerido partiendo principalmente de clorito o clorato de sodio. Se analizaron 12 combinaciones de materias primas, analizando aspectos como la aplicabilidad para uso en agua potable, el *know-how*, la capacidad de producción en la escala requerida, el CAPEX y OPEX, entre otros. Tras este análisis, se seleccionó la tecnología basada en la reacción en fase líquida entre clorito de sodio y cloro.

El suministro de clorito de sodio en concentración 31 % en masa lo proveerá la empresa brasilera Sabará Químicos sita en San Pablo, Brasil, mediante camiones cisterna de 27 toneladas con frecuencia semanal, y será almacenado en 6 tanques de PRFV de 40 m<sup>3</sup>. Por otra parte, se utilizará el

---

cloro gaseoso disponible en la planta potabilizadora actualmente utilizado como desinfectante en la etapa de interoxidación. Este será tomado de la planta de cloro instalada en la usina, transportado inicialmente como cloro gas y luego como agua superclorada.

La inversión total en la planta se estima en 2,9 millones de dólares, siendo la compra e instalación de equipos la más significativa. Se realiza el análisis económico y financiero considerando dos escenarios: uno en el que la totalidad de la inversión proviene de capital propio y otro en el que se recurre a un préstamo bancario.

Dada la naturaleza particular del proyecto, el cual es sin fines de lucro, se ha decidido considerar comercializar el agua desinfectada con dióxido de cloro, para venta exclusiva a Aguas Corrientes. El precio se ha establecido para lograr un Valor Actual Neto (VAN) igual a cero con capital mixto, resultando en un valor de 21 USD/1000m<sup>3</sup>, lo que asegura la recuperación financiera de la inversión. Es debido a esto que la TIR coincide con la tasa de descuento en un valor de 4,87 %. Con una vida útil estimada de 10 años, el período de repago es de 9,6 años.

En cuanto a la sensibilidad del proyecto, se observa que la variable de mayor impacto es el precio de la solución de clorito de sodio. En el escenario más desfavorable, una variación del 50 % en el costo de este insumo generaría un incremento del 31 % en el precio de venta del agua desinfectada.

En síntesis, el proyecto presenta viabilidad técnica y económica, constituyendo a su vez una solución eficiente y sustentable para mejorar el proceso de potabilización de agua en la planta de Aguas Corrientes. Su diseño permite mitigar riesgos asociados a la formación de subproductos posiblemente cancerígenos, garantizar el cumplimiento de normativas de calidad y optimizar los procesos operativos de OSE, asegurando además la recuperación de la inversión en el horizonte planteado.

**Palabras clave:** Aguas Corrientes, cloro, clorito de sodio, desinfección de agua, dióxido de cloro, potabilización, trihalometanos.