



FACULTAD DE
INGENIERÍA



INSTITUTO DE
INGENIERÍA
QUÍMICA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Diseño de un sistema de adsorción con carbón activado granular para el tratamiento de agua en planta potabilizadora de OSE – Aguas Corrientes

Carol González	IA
Marcos Guido	IQ
Giuliana Marsella	IQ
Sebastián Szargala	IQ

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Republica en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniero Químico e Ingeniero Alimentario según corresponda.

Tutores:

Ing. Eduardo Testorelli
Ing. Roberto Kreimerman

Montevideo, Uruguay
Mayo 2026

Contenido

I.	Introducción	10
I.1.	Objetivo y motivación del proyecto.....	10
I.2.	Definición del problema a resolver	10
I.3.	Alcance del proyecto.....	14
II.	Descripciones principales	16
II.1.	Regulación para agua potable	16
II.2.	Empresa OSE	16
II.3.	Proceso de potabilización actual.	17
II.4.	Generalidades del carbón activado.....	19
II.5.	Problemática asociada al uso del CAP	21
II.6.	Análisis de alternativas de sustitución del CAP	22
II.7.	Análisis de alternativas	24
III.	Generalidades del CAG	26
III.1.	Condiciones de operación para CAG	26
III.2.	Impacto ambiental del uso de carbón activado	27
III.3.	Disposición y tratamiento del carbón activado agotado.....	27
III.3.1	Disposición en rellenos sanitarios.....	28
III.3.2	Incineración.....	28
III.3.3	Inertización.....	28
III.3.4	Regeneración	28
a.	Regeneración térmica.....	29
b.	Regeneración con vapor	29
c.	Regeneración química	30
III.4.	Riesgos laborales asociados al manejo del Carbón Activado	30
IV.	Aplicación del carbón activado: alternativas de implementación	31
IV.1.	Modo de aplicación.....	31
IV.1.1.	Filtros a presión:	31
IV.1.1.1.	Filtros por gravedad	34
IV.2.	Evaluación de equipos	35
IV.2.1	Alternativa 1: Modelo GAC 4000	36
IV.2.2	Alternativa 2: Modelo 14 – Calgon Carbon.....	36
IV.2.3	Alternativa 3: Filtros abiertos por gravedad tipo pileta (hormigón armado)	37
IV.2.4	Elección de alternativa.....	38

V.	Tamaño	41
V.1.	Estrategias de producción	41
V.2.	Capacidad de producción	41
V.3.	Cronograma de operación de la planta.....	42
V.4.	Turnos.....	42
V.5.	Paradas de mantenimiento y operación de sistemas con CAG.....	43
V.6.	Disposición física y dimensiones de los filtros.....	44
V.6.1.	Configuración seleccionada	45
V.7.	Criterios de implantación física.....	46
VI.	Diagrama de Bloques	47
VII.	Diagrama de flujo.....	47
VIII.	Localización.....	49
VIII.1.	Región.....	49
VIII.2.	Selección de la zona dentro de la región	49
VIII.3.	Alternativas de localización	50
VIII.4.	Selección del área dentro de la planta de Aguas Corrientes	50
VIII.5.	Conclusiones	51
IX.	Ingeniería.....	53
IX.1.	Materias primas	53
IX.1.1.	Comparación de proveedores de carbón activado bituminoso.....	56
IX.2.	Sistema de almacenamiento y manejo de CAG	58
IX.2.1.	Diseño de los sistemas de almacenamiento.....	58
IX.2.2.	Selección del material de los filtros	58
IX.2.3.	Transporte hidráulico del CAG.....	59
IX.2.4.	Equipos de transferencia y bombeo	59
IX.2.5.	Consideraciones operativas y de seguridad	60
IX.3.	Infraestructura destinada al acopio de CAG.....	60
IX.4.	Regeneración del CAG.....	61
IX.4.1.	Unidad de Reactivación Térmica.....	63
IX.4.2.	Etapas de la regeneración y funcionamiento del horno.....	64
IX.4.3.	Selección e implementación del sistema de regeneración	65
IX.4.4.	Ubicación de la planta de regeneración de CAG.....	65
IX.4.5.	Operativa y transporte	66
IX.4.6.	Stock y almacenamiento.....	67

IX.5.	Evaluación de pérdidas asociadas al uso y regeneración del CAG	67
IX.6.	Balance de materia del sistema de adsorción con CAG.....	67
IX.6.1.	Balance de agua	68
IX.6.2.	Balance de CAG	69
IX.7.	Balance de Energía	70
IX.7.1.	Evaluación del término de adsorción (<i>Q_{ads}</i>)	71
IX.7.2.	Consumo energético por subsistema.....	71
IX.8.	Requerimiento de Automatismos y control de procesos.....	71
IX.8.1.	Automatización.....	72
IX.9.	Necesidad y dimensionamiento de tanques.....	74
IX.10.	Tanque de agua para retrolavado (uno por módulo).....	74
IX.10.1.	Pileta de almacenamiento previo a cloración	74
IX.11.	Parada de Línea y retrolavado de un filtro.....	76
IX.12.	Diseño.....	77
IX.13.	Servicios industriales.....	78
IX.14.	Cañerías y Bombas.....	79
IX.14.1.	Sistema de distribución y criterio de diseño	79
IX.14.2.	Bombas	81
IX.14.3.	Válvulas y accesorios	82
IX.15.	Estructura edilicia	83
IX.16.	Estructura Organizacional.....	85
IX.17.	Sistema de Gestión	85
IX.17.1.	Sistema de Gestión de Calidad.....	86
IX.17.2.	Gestión Ambiental y de Salud Ocupacional.....	86
IX.17.3.	Análisis de Riesgos	87
IX.18.	Montaje, instalación y puesta en marcha del sistema de filtración con CAG	87
IX.18.1.	Montaje e instalación del sistema	87
IX.18.2.	Consideraciones operativas para la implementación del sistema	88
IX.18.3.	Evaluación de factibilidad de la interconexión con la infraestructura actual	90
IX.19.	Elementos gráficos de AutoCAD	91
IX.19.1.	Plano general de Localización	91
IX.20.	Unifilar eléctrico.....	91
IX.21.	Sistema de protección contra incendios.....	92
IX.21.1.	Identificación y clasificación de riesgos.....	93

IX.21.2.	Sistema de protección propuesto	94
X.	Análisis Económico y Financiero.....	95
X.1.	Inversiones amortizables:.....	95
X.2.	Inversiones no amortizables capital de trabajo	96
X.3.	Viabilidad económica:	96
X.4.	Viabilidad financiera:	97
XI.	Evaluación de Proyecto.....	98
XI.1.	Evaluación desde la perspectiva del empresario.....	98
XI.1.1.	Rentabilidad.....	98
XI.1.2.	Seguridad	99
XI.2.	Evaluación desde la perspectiva de la institución financiera	99
XI.3.	Evaluación desde la perspectiva general nacional.....	99
XI.4.	Conclusiones y Recomendaciones	100
XII.	Bibliografía.....	103
XIII.	Apéndice.....	108
XIII.1.	Diseño y dimensionamiento del sistema de adsorción con CAG	108
XIII.1.1.	Modelo CAG 4000 – KHN Whater Treatment Equipment Co.,Ltd.	108
XIII.1.2.	Model 14: Calgon Carbon.....	109
XIII.1.3.	Filtros abiertos por gravedad tipo pileta (hormigón armado)	109
XIII.1.4.	Adaptación de alternativa de filtro de presión.....	110
XIII.1.5.	Dimensionamiento de tuberías.....	111
XIII.2.	Dimensionamiento de Tanque de Agua para Retrolavado	113
XIII.2.1.	Caudal de retrolavado por filtro	113
XIII.2.2.	Pileta de Almacenamiento Previo a Cloración.....	114
XIII.3.	Sistema de Bombeo: Bomba KSB RDLO	116
XIII.3.1.	Estimación de la curva del sistema y punto de operación	116
XIII.3.2.	Aptitud para agua potable	121
XIII.4.	Balance de Energía.....	122
XIII.4.1.	Evaluación detallada del término de adsorción del CAG	123
XIII.4.2.	Ruta de cálculo del consumo energético por subsistema.....	124
XIII.4.3.	Diagrama unifilar	127
XIII.4.4.	Asunciones y criterios de diseño adoptados	128
XIII.5.	Extrapolación de costo de filtros	132
XIII.6.	Capacidad del horno de regeneración térmica.....	133

XIII.7.	Planos y diagramas.....	134
XIII.8.	Evaluación económica y financiera.....	138
XIII.8.1.	Cuadro de inversión	138
XIII.9.	Análisis económico.....	139
XIII.9.1.	Flujo de fondos.....	139
XIII.9.2.	Resultados.....	140
XIV.	Anexo	142
XIV.1.	Comunicación con proveedores de filtros de adsorción con CAG.....	142
XIV.1.1.	KHN Whater Treatment Equipment-GAC 4000	142
XIV.1.2.	Calgon Carbon-Modelo 14	144
XIV.2.	Elección de materia prima – Comunicación con proveedores.....	145
XIV.2.1.	Qizhong Chemical – ZLGAC-A830	145
XIV.2.2.	Jacobi – AquaSorb™ 1200	151
XIV.2.3.	Carbotecnía- Gama B + Micro 4.....	154
XIV.3.	Plano general de distribución del agua en OSE, Aguas Corrientes	159
XIV.4.	Planos canales de distribución de agua en OSE, Aguas Corrientes.....	160

Figuras

Figura 1. Descripción del funcionamiento de la Cuenca del Río Santa Lucía destacando las presiones ambientales (entradas al sistema) que afectan los procesos internos y que determinan las características ambientales (salidas del sistema) de la cuenca.....	10
Figura 2. Índice del Nivel Trófico, escalas e intervalos de categorización.	12
Figura 3. Mapa de la cuenca del río Santa Lucía, estaciones de monitoreo y niveles de estados trófico del año 2017 de cada río y arroyo que integra la cuenca.....	13
Figura 4. Proceso de Potabilización actual en Aguas Corrientes: etapas del tratamiento para obtener agua potable.....	17
Figura 5. Mecanismo de absorción del CAG.....	19
Figura 6. Esquema de Operación de un Reactor de Lecho Fijo con CAG para el Tratamiento de Agua.....	31
Figura 7. Evolución del Perfil de Concentración en Reactores de Lecho Fijo durante el Proceso de Adsorción: Desde la Zona de Adsorción hasta la Saturación Completa.....	32
Figura 8. Configuración de piso filtrante con tuberías laterales de PVC y boquillas embebidas en hormigón.....	34
Figura 9. Piso plenum de hormigón armado con boquillas instaladas sobre falso fondo y cámara de distribución inferior.....	34
Figura 10. Régimen de descansos.....	42

Figura 11. Esquema del sistema de adsorción con carbón activado granular propuesto.....	47
Figura 12. Diagrama de bloques de proceso modificado.....	47
Figura 13. Diagrama de flujo del proceso completo de tratamiento de agua potable propuesto.....	48
Figura 14. Distribución de las Instalaciones Principales de la Planta Potabilizadora de Aguas Corrientes: Mapa Simplificado de las Áreas Funcionales Existentes.....	49
Figura 15. Horno MHF vertical para regeneración de CAG.....	51
Figura 16. Nueva zona de acopio de carbón activado en polvo.....	51
Figura 17. Disposición final de filtros en la localización definida.....	52
Figura 18. Horno MHF vertical para regeneración de CAG.....	64
Figura 19. Esquema de una planta de regeneración.....	65
Figura 20. Espacio para ubicación de planta de regeneración de CAG.....	66
Figura 21. Diagrama de una batería de filtros con elementos clave para el funcionamiento.....	73
Figura 22. Taque fuera de servicio OSE.....	75
Figura 23. Batería con una unidad en retrolavado. Se incorpora a operación la unidad de respaldo correspondiente.....	77
Figura 24. Representación frontal de filtro en AutoCAD. Elaboración propia.....	78
Figura 25. Distribución de tuberías, por batería de filtros.....	80
Figura 26. Distribución de tuberías para operación por batería.....	80
Figura 27. Organigrama Área de tratamiento Aguas Corrientes.....	85
Figura 28. Diagrama de Gantt de puesta en marcha de sistema de filtración con CAG.....	88
Figura 29. Plano general de localización del sistema de filtración en la planta de Aguas Corrientes.....	91
Figura 30. Evolución del flujo económico.....	98
Figura 31. Dimensionamiento de tuberías de operación.....	111
Figura 32. Gráfico de pérdida de carga del lecho de CAG.....	116
Figura 33. Tamaño de la bomba y velocidad nominal de operación.....	120
Figura 34. Unifilar eléctrico del sistema de adsorción con CAG.....	126
Figura 35. Representación +45° de filtro en AutoCAD.....	133
Figura 36. Representación -45° de filtro en AutoCAD.....	134
Figura 37. Disposición del sistema de filtros.....	134
Figura 38. Elementos en 3D.....	135
Figura 39. Batería de filtros con tuberías de proceso y retrolavado.....	135
Figura 40. Operación normal de una batería. 4 unidades en operación y una en reserva.....	136
Figura 41. Batería con una unidad en regeneración.....	136

Tablas

Tabla 1. Resultado de las variables medidas en el monitoreo de la cuenca del río Santa Lucía realizadas entre 2005 y 2016, y su grado de cumplimiento con los estándares de calidad establecidos en el decreto n.º 253/79.	11
Tabla 2. Balance de agua 2023-2024 OSE. (OSE, 2023).....	16
Tabla 3. Matriz de decisión con puntajes ponderados de las distintas alternativas para la sustitución de uso de CAP.....	25

Tabla 4. Principales parámetros de diseño de cada alternativa.....	38
Tabla 5: Comparación de propiedades de CAG a base de distinta materia prima	54
Tabla 6. Comparación de propiedades fisicoquímicas de Fichas Técnicas según proveedor ...	56
Tabla 7. Consumo eléctrico anual de bombeo.....	71
Tabla 8. Servicios industriales auxiliares.	78
Tabla 9. Diámetros de tuberías por batería	80
Tabla 10. Características constructivas y operativas de bomba RDLO.	81
Tabla 11. Resumen de parámetros de operación de la bomba RDLO en cada una de sus aplicaciones dentro del sistema de filtración CAG.....	82
Tabla 12. Indicadores de gestión del sistema de filtración con CAG	86
Tabla 13. Matriz de riesgos del sistema de filtración con CAG	87
Tabla 14. Principales parámetros del diagrama unifilar.....	92
Tabla 15. Matriz de riesgos asociados al CAG y las instalaciones.	93
Tabla 16. Parámetros y valores para las unidades de filtración de CAG.....	110
Tabla 17. Resumen componentes de la altura total para bomba de alimentación.	118
Tabla 18. Resumen componentes de la altura total para bomba de alimentación.	120
Tabla 19. Tabla resumen de parámetros hidráulicos por aplicación	121
Tabla 20. Resumen del balance y consumo específico total.....	126
Tabla 21. Resumen potencia demandada por el sistema de adsorción con CAG.....	130
Tabla 22 Dimensionamiento eléctrico preliminar de los equipos principales del sistema CAG..	131
Tabla 23. Energía total consumida anualmente	132
Tabla 24. Resumen de costos de filtros a presión.....	133
Tabla 25. Costo de CAG.....	133

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto aborda la necesidad de modernizar el proceso de potabilización de la Planta de Aguas Corrientes de OSE, frente al deterioro progresivo de la calidad del agua del río Santa Lucía y las limitaciones operativas, logísticas y ambientales del sistema actual basado en carbón activado en polvo (CAP). El objetivo principal fue diseñar e integrar un sistema de adsorción con carbón activado granular (CAG) que sustituya al CAP, optimizando la eficiencia del tratamiento, la seguridad operativa y la sostenibilidad ambiental. Tras un análisis multicriterio de alternativas tecnológicas, se seleccionó la implementación de filtros presurizados de lecho fijo con CAG, ubicados aguas abajo de la filtración convencional. El sistema se dimensionó para tratar un caudal máximo de diseño de 32.524 m³/h, requiriendo un tiempo de contacto en lecho vacío (EBCT) de 15 minutos. La configuración final contempla 30 unidades cilíndricas de 8 m de diámetro y 10,5 m de altura total, organizadas en tres módulos de dos baterías cada uno. De las 30 unidades, cinco se mantienen como respaldo operativo, asegurando la continuidad del servicio de abastecimiento. Como medio adsorbente se seleccionó carbón bituminoso (Qizhong ZLGAC-A830, malla 8×30), equilibrando capacidad adsorbente, resistencia mecánica y costo de adquisición. Dada la magnitud del sistema, se plantea la incorporación de una planta de regeneración térmica in situ con horno de múltiples etapas (MHF), capaz de procesar 16 toneladas diarias de CAG agotado, lo que permite extender y optimizar la vida útil del medio. Desde la perspectiva económica, la inversión total estimada asciende a USD 8,44 millones. El proyecto genera ahorros operativos anuales de aproximadamente USD 4,15 millones por la eliminación del CAP, con costos de operación y regeneración cercanos a USD 3,15 millones/año. Con una TIR del 7,5%, se estima un período de repago de 8,36 años y un VAN cercano a cero, demostrando viabilidad financiera a largo plazo. En materia ambiental y de seguridad laboral, la transición a CAG elimina la manipulación de polvo, reduce significativamente la generación de residuos sólidos (big bags y pallets) y minimiza los riesgos de salud ocupacional. La regeneración in situ promueve un modelo de economía circular, disminuyendo la huella de carbono asociada al transporte y disposición final del adsorbente. En síntesis, el sistema propuesto constituye una solución técnica robusta, económicamente sostenible y ambientalmente responsable. Su implementación fortalecerá la capacidad operativa de la principal planta potabilizadora del país, permitiendo mantener los parámetros de calidad del agua dentro de los valores establecidos por la normativa vigente frente a contaminantes emergentes y eventos de eutrofización, y posicionando a Uruguay a la vanguardia en tecnologías avanzadas de tratamiento hídrico.