

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y  
AGROINDUSTRIA**

**REDISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA  
PISCINA DE ALMACENAMIENTO DE LA FUENTE DE  
COBALTO-60 DEL LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE  
RADIACIONES, PARA MANTENER VALORES DE  
CONDUCTIVIDAD DEL AGUA MENORES A 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA  
QUÍMICA**

**MARÍA DEL CARMEN VEGA ZAMBRANO**  
maica\_88@hotmail.com

**DIRECTORA: ING. GLORIA MARIBEL LUNA AGUILERA, M.Sc.**  
maribel.luna@epn.edu.ec

**Quito, marzo 2015**

©Escuela Politécnica Nacional (2015)  
Reservados todos los derechos de reproducción.

## **DECLARACIÓN**

Yo, María del Carmen Vega, declaro que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por La ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

María del Carmen Vega Zambrano

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por María del Carmen Vega, bajo mi supervisión.

---

Ing. Maribel Luna, M.Sc.  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## **AUSPICIO**

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto interno PII-DCN-004-2012: Rediseño del sistema de tratamiento de agua de la piscina de almacenamiento de la fuente de cobalto-60 del Laboratorio de Tecnología de Radiaciones, para mantener valores de conductividad del agua menores a 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , que se ejecutó en el Departamento de Ciencias Nucleares.

## AGRADECIMIENTOS

*En primer lugar agradezco a Dios por haberme dado la fuerza para alcanzar este sueño, por iluminarme en los momentos oscuros y por nunca dejarme caer.*

*Agradezco inmensamente a mis padres, Franklin y Fe María, por haberme guiado con amor toda mi vida, y por siempre insistir en que las mejores recompensas se obtienen luego de un gran esfuerzo; A mi hermano Mateo que con su eterna pregunta ¿Qué fue ñaña ya te gradúas? me dio el ánimo que necesitaba para continuar con mi tarea; A mi hermana Érika, que a pesar de la distancia la siento como si estuviera a mi lado.*

*Quiero agradecer a Juan David, por apoyarme, ayudarme y confiar en que yo lograría alcanzar esta meta por más difícil que se pusiera el camino. Como olvidar a mi pequeña mostra, mi Sofía, que con sus preguntas inocentes me reprendía cada vez que no me veía trabajando en mi tesis, gracias mi amor, esto es para tí.*

*Agradezco a la Ing. Maribel Luna por haberme acogido como su tesista, y por brindarme sus conocimientos y su paciencia. Al Ing. Francisco Salgado, por haber aceptado ser parte de mi tribunal y por sus sabias sugerencias. A la Ing. Verónica Vallejo y al Ing. Ángelo Ávalos quienes me guiaron en el diseño de mi proyecto, gracias muchas gracias. Al Ing. Miguel Aldás, quien me regaló un poco de su tiempo para que mi proceso de graduación avanzara.*

*A mis amiguis, Jessy G., Jessy M., Sarita, Lourdy y Belenchis con quienes compartimos tantos momentos durante toda la carrera, y que a pesar del tiempo y de la distancia nuestra amistad sigue intacta. A mis amigas radicales Eli, Crix, Marluchis, y todas quienes formaron parte de este gran equipo que me dio tantas alegrías, enseñanzas y grandes momentos que jamás olvidaré. En fin, agradezco a todos y cada una de las personas que me acompañaron en esta etapa tan importante de mi vida.*

*Dedico este trabajo a mi bella Sofía,  
hermoso regalo de Dios que  
ilumina cada día de mi vida.*

*A mis padres, quienes con su amor me  
ayudaron a llegar tan lejos y que a pesar  
de todo estuvieron siempre a mi lado.*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>xi</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>xiii</b>
<b>1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>1</b>
1.1. Instalaciones de irradiación tipo IV	1
1.1.1. Introducción	1
1.1.2. Fuente de cobalto-60	2
1.1.3. Instalaciones de irradiación gamma	2
1.1.4. Irradiadores autocontenidos (categorías I y III)	3
1.1.5. Irradiadores panorámicos (categorías II y IV)	4
1.1.6. Principios de diseño de instalaciones de irradiación	5
1.1.7. Protección radiológica en irradiadores categoría IV	6
1.2. Fundamentos del tratamiento de aguas mediante resinas de intercambio iónico y carbón activado	7
1.2.1. Introducción	7
1.2.2. Resinas de intercambio iónico	8
1.2.3. Carbón activado	13
1.2.4. Resinas de intercambio iónico y carbón activado en el tratamiento de aguas	17
1.3. Fundamentos del diseño de plantas de tratamiento de aguas	18
1.3.1. Introducción	18
1.3.2. Análisis de la calidad del agua	18
1.3.3. Diseño de filtros de arena	21
1.3.4. Diseño de filtros de carbón activado	24
1.3.5. Diseño del proceso de intercambio iónico	26
1.3.6. Diagramas de procesos	30
1.3.7. Tipos de controladores	32
<b>2. PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>34</b>
2.1. Determinación de los parámetros de pH, conductividad, alcalinidad y dureza para el cálculo del Índice de Langelier	34
2.1.1. Muestreo	34
2.1.2. Determinación de pH, temperatura y conductividad	35
2.1.3. Determinación de la dureza del agua	35
2.1.4. Determinación de la alcalinidad del agua	36
2.1.5. Cálculo del Índice de Langelier	36
2.2. Caracterización de las resinas de intercambio iónico y carbón activado	37
2.2.1. Determinación de la capacidad de intercambio iónico	37



2.2.2.	Determinación del Índice de yodo del carbón activado	41
2.3.	Determinación de la mejor combinación de resinas de intercambio iónico y carbón activado para el tratamiento del agua de la piscina	42
2.3.1.	Adquisición de las resinas de intercambio iónico y carbón activado	42
2.3.2.	Regeneración de resinas de intercambio iónico y carbón activado	43
2.3.3.	Combinación de resinas y carbón activado	44
2.4.	Dimensionamiento de los equipos del sistema de tratamiento de agua	45
2.5.	Diseño del sistema redundante de reposición del agua de la piscina	45
2.6.	Determinación de la inversión económica	46
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>47</b>
3.1.	Determinación de los parámetros de ph, conductividad, alcalinidad y dureza para el cálculo del Índice de Langelier	47
3.1.1.	Resultados de pH, conductividad, temperatura y conductividad	47
3.1.2.	Resultados de alcalinidad, dureza cálcica e Índice de Langelier	52
3.2.	Caracterización de las resinas de intercambio iónico y carbón activado	57
3.2.1.	Resultados de la caracterización de la resina de intercambio aniónico	58
3.2.2.	Resultados de la caracterización de la resina de intercambio catiónico	60
3.2.3.	Resultados de la caracterización del carbón activado	62
3.3.	Determinación de la mejor combinación de resinas de intercambio iónico y carbón activado para el tratamiento del agua de la piscina	64
3.3.1.	Resultados de la mejor combinación de resinas de intercambio iónico y carbón activado	64
3.3.2.	Resultados de la cantidad de veces que el agua de la piscina debe pasar por las resinas de intercambio iónico para obtener valores menores a 10 $\mu\text{s/cm}$	70
3.4.	Dimensionamiento de los equipos del sistema de tratamiento del agua	74
3.4.1.	Evaluación del sistema actual de tratamiento de agua	74

3.4.2.	Dimensionamiento del filtro de arena	76
3.4.3.	Dimensionamiento del tanque para filtro de carbón activado	77
3.4.4.	Dimensionamiento de los filtros de resinas de intercambio iónico	78
3.4.5.	Planos PFD y P&ID	80
3.5.	Diseño del sistema redundante de reposición del agua de la piscina	84
3.5.1.	Dimensionamiento de la válvula	84
3.5.2.	Resultados de la simulación en MS EXCEL	85
3.6.	Determinación de la inversión económica	93
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>95</b>
4.1.	Conclusiones	95
4.2.	Recomendaciones	96
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>98</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>104</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

		<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 1.1.</b>	Parámetros físicos comúnmente analizados en el agua	18
<b>Tabla 1.2.</b>	Parámetros químicos comúnmente analizados en el agua	19
<b>Tabla 2.1.</b>	Equipo utilizado en la determinación de pH, temperatura y conductividad	35
<b>Tabla 2.2.</b>	Reactivos utilizados para el pretratamiento de resinas de intercambio iónico	38
<b>Tabla 2.3.</b>	Reactivos utilizados para la determinación de la capacidad total de resinas de intercambio catiónico	39
<b>Tabla 2.4.</b>	Reactivos utilizados para la determinación de la capacidad total de resinas de intercambio aniónico	40
<b>Tabla 2.5.</b>	Reactivos utilizados para la determinación del Índice de Yodo del carbón activado	42
<b>Tabla 2.6.</b>	Características de las resinas de intercambio iónico usadas para la experimentación	43
<b>Tabla 2.7.</b>	Combinación de resinas de intercambio iónico	44
<b>Tabla 3.1.</b>	Resultados promedio de pH, temperatura y conductividad de las muestras de agua tomadas en la piscina en el día 1	48
<b>Tabla 3.2.</b>	Resultados promedio de pH, conductividad, temperatura y conductividad de las muestras de agua tomadas en la piscina en el día 2	48
<b>Tabla 3.3.</b>	Resultados promedio de pH, conductividad, temperatura y conductividad de las muestras de agua tomadas en la piscina en el día 3	49
<b>Tabla 3.4.</b>	Resultados promedio de alcalinidad, dureza cálcica e Índice de Langelier de las muestras de agua tomadas en la piscina en el día 1	52
<b>Tabla 3.5.</b>	Resultados de alcalinidad, dureza cálcica e Índice de Langelier de las muestras de agua tomadas en la piscina en el día 2	53
<b>Tabla 3.6.</b>	Resultados de alcalinidad, dureza cálcica e Índice de Langelier de las muestras de agua tomadas en la piscina en el día 3	54
<b>Tabla 3.7.</b>	Resultados del Índice de Langelier promedio	57

<b>Tabla 3.8.</b>	Resultados de la capacidad de intercambio aniónico	58
<b>Tabla 3.9.</b>	Resultados de la capacidad de intercambio catiónico	60
<b>Tabla 3.10.</b>	Resultados del Índice de yodo del carbón activado	62
<b>Tabla 3.11.</b>	Resultados de conductividad de la combinación de carbón activado con resina catiónica DOWEX y resina aniónica LEWATIT	64
<b>Tabla 3.12.</b>	Resultados de conductividad de la combinación de carbón activado con resina catiónica DOWEX y resina aniónica SBG1P	65
<b>Tabla 3.13.</b>	Resultados de conductividad de la combinación de carbón activado con resina catiónica LEWATIT y resina aniónica LEWTIT	63
<b>Tabla 3.14.</b>	Resultados de conductividad de la combinación de carbón activado con resina catiónica LEWATIT y resina aniónica SBG1P	64
<b>Tabla 3.15.</b>	Resultados de la cantidad de veces que se debe tratar el agua de la piscina con la combinación 2	71
<b>Tabla 3.16.</b>	Resultados de la cantidad de veces que se debe tratar el agua de la piscina con la combinación 4	72
<b>Tabla 3.17.</b>	Dimensiones calculadas del filtro multimedia del sistema de tratamiento de aguas	76
<b>Tabla 3.18.</b>	Dimensiones del equipo según catálogo de GE Water Process and Technologies del filtro multimedia del sistema de tratamiento de aguas	76
<b>Tabla 3.19.</b>	Dimensiones calculadas del filtro de carbón activado del sistema de tratamiento de aguas	77
<b>Tabla 3.20.</b>	Dimensiones del equipo según equipo escogido de catálogo del filtro de carbón activado del sistema de tratamiento de aguas	78
<b>Tabla 3.21.</b>	Dimensiones calculadas del filtro de intercambio catiónico del sistema de tratamiento de aguas	78
<b>Tabla 3.22.</b>	Dimensiones según catálogo del tanque para el filtro de intercambio catiónico del sistema de tratamiento de aguas	79
<b>Tabla 3.23.</b>	Dimensiones calculadas del filtro de intercambio aniónico del sistema de tratamiento de aguas	79

<b>Tabla 3.24.</b>	Dimensiones según equipo escogido del catálogo del filtro de intercambio aniónico del sistema de tratamiento de aguas	80
<b>Tabla 3.25.</b>	Parámetros de simulación cuando entra en funcionamiento el control ON-OFF en la piscina	87
<b>Tabla 3.26.</b>	Parámetros de simulación cuando entra en funcionamiento el control redundante en la piscina	89
<b>Tabla 3.29.</b>	Inversión económica a realizarse en el sistema de tratamiento de aguas	93
<b>Tabla 3.30.</b>	Costos de instalación del sistema de tratamiento de agua	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
<b>Figura 1.1.</b>	Irradiador gamma auto contenido de almacenamiento en seco (IAEA, 2005, p.19)	3
<b>Figura 1.2.</b>	Irradiador Panorámico gamma de almacenamiento en húmedo (IAEA, 2005, p. 11)	5
<b>Figura 1.3.</b>	Representación esquemática de las resinas de intercambio iónico	8
<b>Figura 1.4.</b>	Fotografía de resinas de intercambio iónico de tipo gel.	9
<b>Figura 1.5.</b>	Fotografía de resinas de intercambio macrorreticulares	9
<b>Figura 1.6.</b>	Representación gráfica de la superficie del carbón activado	14
<b>Figura 1.7.</b>	Ilustración que muestra las composiciones y configuraciones de los medios de filtración (Nalco, 2009, p. 6.37)	23
<b>Figura 1.8.</b>	Ilustración de un sistema convencional de doble filtro	27
<b>Figura 1.9.</b>	Ilustración de un sistema de filtro mixto	27
<b>Figura 1.10.</b>	Ilustración de un sistema de doble filtro con unidad catiónica débil	28
<b>Figura 1.11.</b>	Ilustración de un sistema de doble filtro con unidad aniónica débil	29
<b>Figura 1.12.</b>	Ilustración de un diagrama de instrumentación y tuberías (Walker, 2009, p. 16)	32
<b>Figura 2.1.</b>	Configuración de puntos de muestreo en la piscina de almacenamiento de Co-60	34
<b>Figura 2.2.</b>	Aparato de prueba para la determinación de la capacidad total de resinas de intercambio catiónico (ASTM, 2004, p. 6)	39
<b>Figura 3.1.</b>	Representación gráfica del pH en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 1	50
<b>Figura 3.2.</b>	Representación gráfica de la temperatura en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 1	50
<b>Figura 3.3.</b>	Representación gráfica de la conductividad en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 1	51
<b>Figura 3.4.</b>	Representación gráfica de la alcalinidad en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 1	55

<b>Figura 3.5.</b>	Representación gráfica de la dureza cálcica en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 1	55
<b>Figura 3.6.</b>	Representación gráfica del Índice de Langelier en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 1	56
<b>Figura 3.7.</b>	Representación gráfica de la capacidad de intercambio aniónico y su desviación estándar	59
<b>Figura 3.8.</b>	Representación gráfica de la capacidad de intercambio catiónico y su desviación estándar	61
<b>Figura 3.9.</b>	Representación gráfica del Índice de yodo y su desviación estándar	63
<b>Figura 3.10.</b>	Gráfica de medias de los valores de conductividad obtenidos con cada una de las combinaciones de resinas.	70
<b>Figura 3.11.</b>	Vista isométrica del sistema actual de tratamiento de aguas	75
<b>Figura 3.12.</b>	Diagrama de flujo de procesos del sistema de tratamiento de aguas del LTR	81
<b>Figura 3.13.</b>	Diagrama de instrumentación y tuberías del sistema de tratamiento de aguas del LTR	82
<b>Figura 3.14.</b>	Diagrama de instrumentación y tuberías de la piscina de almacenamiento de Co-60 del LTR	83
<b>Figura 3.15.</b>	Esquema de una válvula de control Fisher GX	84
<b>Figura 3.16.</b>	Coeficientes de caudal de la válvula Fisher GX	85
<b>Figura 3.17.</b>	Gráfica de la variación del nivel del agua a la piscina de almacenamiento versus tiempo cuando se simula la fuga de agua en una de las tuberías	86
<b>Figura 3.18.</b>	Gráfica de la variación del nivel del agua a la piscina de almacenamiento versus el tiempo cuando entra en funcionamiento el control ON-OFF	88
<b>Figura 3.19.</b>	Gráfica de la variación del flujo de entrada de agua a la piscina de almacenamiento versus tiempo cuando entra en funcionamiento el control ON-OFF	88
<b>Figura 3.20.</b>	Gráfica de la variación del nivel del agua de la piscina de almacenamiento versus tiempo cuando entra en funcionamiento la válvula de control REDUNDANTE	90

- Figura 3.21.** Gráfica de la variación del flujo de entrada de agua a la piscina de almacenamiento versus tiempo cuando entra en funcionamiento la válvula de control REDUNDANTE 91
- Figura 3.22.** Diagrama de instrumentación y tuberías del sistema redundante de la piscina de almacenamiento de Co-60 del LTR 92



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO I</b> Método para determinación de la dureza del agua	106
<b>ANEXO II</b> Método para determinación de la alcalinidad del agua	108
<b>ANEXO III</b> Representación gráfica de los valores de pH, temperatura, conductividad, dureza, alcalinidad e Índice de Langelier en los días 2 y 3	110
<b>ANEXO IV</b> Método ASTM para caracterizar resinas de intercambio iónico	117
<b>ANEXO V</b> Método ASTM para caracterización del carbón activado	126
<b>ANEXO VI</b> Ejemplos de cálculos	131
<b>ANEXO VII</b> Información técnica de resinas de intercambio iónico	133
<b>ANEXO VIII</b> Ejemplo del cálculo para el diseño del filtro de arena multicama	137
<b>ANEXO IX</b> Ejemplo de cálculo para el diseño del filtro de carbón activado	139
<b>ANEXO X</b> Ejemplo de cálculo para el diseño de las columnas de intercambio iónico	141
<b>ANEXO XI</b> Plano de la vista superior de la piscina de almacenamiento con sus respectivas dimensiones	144
<b>ANEXO XII</b> Código de Simulación	145
<b>ANEXO XIII</b> Gráficos de respuesta a diferentes valores de $K_c$ y $T_i$	151
<b>ANEXO XIV</b> Cotización Empresa AAI NAGANT para sistema de tratamiento de agua LTR	157

## RESUMEN

El objetivo del presente proyecto de titulación fue evaluar el sistema actual de tratamiento de aguas de la piscina de almacenamiento de la fuente de Co-60 del Laboratorio de Tecnología de Radiaciones (LTR) y posteriormente realizar un rediseño del sistema.

En primer lugar se caracterizó el agua de la piscina de almacenamiento mediante análisis de dureza, alcalinidad, pH y conductividad para así obtener el índice de Langelier, el valor obtenido fue de 0,42, lo que indica que el agua tiene un carácter incrustante, por lo cual la fuente no corre riesgo de sufrir corrosión debido a la calidad del agua.

Posteriormente se procedió a evaluar los medios filtrantes actuales que se encuentran en los filtros de adsorción e intercambio iónico. Es así que para el carbón activado se obtuvo un Índice de Yodo de 49,6 (mg/g); para la resina de intercambio catiónico se obtuvo una capacidad de intercambio de 0,28 (meq/g húmedo) y para la resina de intercambio aniónico se obtuvo una capacidad de intercambio de 0,41 (meq/g húmedo). Todos los resultados obtenidos son menores a los mínimos valores de operatividad de cada uno de los medios filtrantes, por lo tanto se concluye que deben ser reemplazados por materiales nuevos.

Luego de haber evaluado los materiales del sistema de tratamiento de agua, se procedió a buscar la mejor combinación de carbón activado y resinas que disminuyan la conductividad del agua a valores menores de 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Las mejores combinaciones fueron la combinación 2 (Resina catiónica DOWEX (Na<sup>+</sup>) y Resina aniónica SBG1P (OH<sup>-</sup>)) y la combinación 4 (Resina catiónica LEWATIT (Na<sup>+</sup>) y Resina aniónica SBG1P).

Posteriormente se realizó el dimensionamiento de los equipos que conforman el sistema de tratamiento de agua y se realizaron los diagramas PFD y P&ID del sistema rediseñado de tratamiento de agua.

Para diseñar el sistema redundante de control de nivel del agua se resolvió utilizar un control PI enlazado a una válvula de control. Para dimensionar el tamaño de la válvula a escoger, se realizó una simulación usando Visual Basic en MS EXCEL al tomar como peor escenario una gran fuga en la tubería de salida del agua de la piscina. El Kv de la válvula obtenido mediante simulación fue de  $5,00 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{atm}^{0.5}$ .

Finalmente se determinó la inversión económica a realizarse en el caso de implementar el rediseño realizado, tomando en cuenta que todo el sistema sería automatizado. El valor promedio fue de \$54 000 aproximadamente.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las energías ionizantes provenientes de fuentes radiactivas tienen una gran cantidad de aplicaciones. Se las usa tanto en la industria e investigación como en la medicina. Pero así como las instalaciones de irradiación brindan tantos beneficios, la seguridad que se maneja en ellas debe ser aún mayor. Uno de los ámbitos de la Protección Radiológica comprende un conjunto de normas para el manejo seguro de fuentes radiactivas. No seguir estas normas de seguridad podría provocar serios riesgos para el personal de la instalación y el medio ambiente aledaño, lo que se traduciría también en grandes pérdidas económicas (IAEA, 2006, p. 1).

En el Laboratorio de Tecnología de Radiaciones de la EPN, se encuentra instalado un irradiador gamma de almacenamiento en húmedo categoría IV, que data del año 1980. Este tipo de irradiadores se caracterizan por almacenar la fuente radioactiva, en este caso Co-60, en una piscina que sirve de blindaje húmedo cuando el irradiador no se encuentra en uso (IAEA, 2010, p. 8).

Este proyecto busca evaluar el desempeño del sistema de tratamiento del agua de la piscina de almacenamiento de la fuente de Co-60 del LTR, que es un sistema antiguo y se encuentra parcialmente operativo. Es así que, actualmente, la conductividad del agua de la piscina alcanza valores de alrededor de 375  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , los cuales superan en más de 35 veces el valor de 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  permitido por la Guía de Seguridad Específica No. SSG-8 de la Agencia Internacional de Energía Atómica, el cual se ha establecido para minimizar la posibilidad de corrosión en las vainas de acero inoxidable que albergan a los lápices de Co-60 (IAEA, 2010, p. 56).

El sistema consta de las siguientes unidades de tratamiento: filtro de arena, filtro de carbón activado, camas de resinas de intercambio iónico y tanques de regeneración de las resinas. Pero hoy en día, el agua solamente circula por el filtro de arena para eliminar sus impurezas y no así por el resto de equipos, como los tanques de resinas de intercambio iónico y carbón activado, debido a

las siguientes razones: a) no se han regenerado las resinas de intercambio iónico en los últimos años, b) después del último mantenimiento no se conoce con exactitud en qué depósito se encuentra cada resina, c) no se conoce si el carbón activado aún mantiene su capacidad de adsorción, d) no se ha realizado un mantenimiento del filtro de arena, y e) no se ha realizado un mantenimiento de las tuberías del sistema.

Por lo tanto, con los resultados del desempeño del sistema de tratamiento de agua de la piscina, se verificará la necesidad de realizar su rediseño, proyecto que se traducirá en protección para la salud de las personas que trabajan en el Laboratorio de Tecnología de Radiaciones. El proyecto ayudará a prevenir una potencial corrosión de las vainas de estos lápices y posterior contaminación radiológica en el agua de la piscina.

Con este proyecto se sentará la base para la posterior construcción y/o adecuación de un mejorado sistema de tratamiento del agua de la piscina de almacenamiento de la fuente de Co-60 en el Laboratorio de Tecnología de Radiaciones de la Escuela Politécnica Nacional.

# **1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

## **1.1. INSTALACIONES DE IRRADIACIÓN TIPO IV**

### **1.1.1. INTRODUCCIÓN**

Las radiaciones ionizantes alteran las propiedades químicas, físicas y biológicas de los materiales que han sido expuestos a ellas. Las aplicaciones de las radiaciones ionizantes son muy extensas y brindan muchos beneficios a la humanidad, siendo los campos en los que más se destacan, la industria, la medicina, la investigación y la agricultura (IAEA, 2009, p. VII).

Entre los distintos tipos de radiación ionizante que existen, se encuentra la radiación gamma, siendo el cobalto-60 una de sus principales fuentes para el uso en la esterilización de insumos médicos y la irradiación de alimentos. El cobalto-60 es muy usado actualmente como fuente de radiación en la industria debido a su fácil método de producción y a su insolubilidad en agua (IAEA, 2005, p. 2).

Existen ciertas ventajas que la radiación gamma tiene sobre otros sistemas de tratamiento, en el caso de la esterilización se incluyen las siguientes:

- Mínimo aumento de la temperatura durante el proceso
- Alta penetrabilidad
- Preciso y reproducible
- Fácil control del proceso

El uso de aceleradores de electrones ha aumentado en los últimos tiempos, sin embargo los irradiadores gamma son difíciles de reemplazar, especialmente para productos no uniformes y de alta densidad (IAEA, 2005, pp. 2-3).

### **1.1.2. FUENTE DE COBALTO-60**

Las fuentes de Cobalto-60 y Cesio-137, son las fuentes de radiación más usadas debido a la alta energía de sus rayos gamma y su larga vida media (5,27 años para el Co-60 y 30,1 años para el Cs-137). El uso de Cesio-137 se ha limitado a tareas muy específicas como la irradiación de sangre, por lo tanto la fuente más usada en la industria es la de cobalto-60 (IAEA, 2005, pp. 6-7).

La producción de cobalto radiactivo empieza con cobalto natural, específicamente cobalto-59, isótopo muy estable y abundante. Este cobalto puro es convertido en cilindros pequeños para posteriormente ser colocados en un reactor nuclear, en donde permanecen de 1,5 a 2 años. En el reactor un átomo de cobalto-59 absorbe un neutrón y se convierte en un átomo de Cobalto-60. Durante este tiempo, sólo un pequeño porcentaje de cobalto-59 se convierte en cobalto-60 (IAEA, 2005, p. 8).

Luego de la irradiación, los lápices de cobalto-60 son encapsulados en acero inoxidable resistente a la corrosión. El Cobalto-60 se desintegra en Niquel-60, en estado excitado, e inmediatamente emite 2 fotones para alcanzar su estado estable. Los lápices de Co-60 suelen ser removidos al finalizar su vida útil, generalmente después de 20 años (IAEA, 2005, p. 9).

### **1.1.3. INSTALACIONES DE IRRADIACIÓN GAMMA**

En la actualidad, existen irradiadores gamma de diversos tamaños. Los más pequeños son usados para la investigación mientras los más grandes pueden procesar grandes cantidades de productos (Rangel, 2010, p. 2).

Los elementos más importantes que componen una instalación de irradiación son:

- Cuarto de irradiación
- Blindaje contra radiación alrededor del cuarto de irradiación

- Sistema de control y seguridad

Los irradiadores se clasifican en autocontenidos (Categoría I y III) y panorámicos (Categoría II y IV). Según el Organismo Internacional de Energía Atómica, se caracterizan según el diseño de la instalación, la accesibilidad a la misma y el blindaje de la fuente radioactiva. La fuente de radiación puede estar tanto en el cuarto de irradiación como en el cuarto blindado de almacenamiento que puede ser húmedo o seco (IAEA, 2010, p. 4).

#### 1.1.4. IRRADIADORES AUTOCONTENIDOS (CATEGORÍAS I y III)

Los irradiadores autocontenidos son usados para aplicaciones que usen niveles bajos de radiación, como por ejemplo la esterilización de insectos para llevar a cabo programas en contra de las plagas. La gran mayoría de estos irradiadores son de almacenamiento seco (Categoría I) y la actividad de la fuente puede ser máximo de 25 000 Ci. Este tipo de irradiadores mantienen protegida la fuente en un blindaje de plomo, y tiene un mecanismo que se encarga de mover la muestra a la posición de irradiación, por lo que no se necesita blindaje adicional (IAEA, 2005, pp.18-20).



**Figura 1.1.** Irradiador gamma auto contenido de almacenamiento en seco (IAEA, 2005, p.19)

Las ventajas de los irradiadores auto contenidos radican en la facilidad de instalación y operación de los mismos, dosis altas y uniformes, características esenciales para la investigación en radiación.



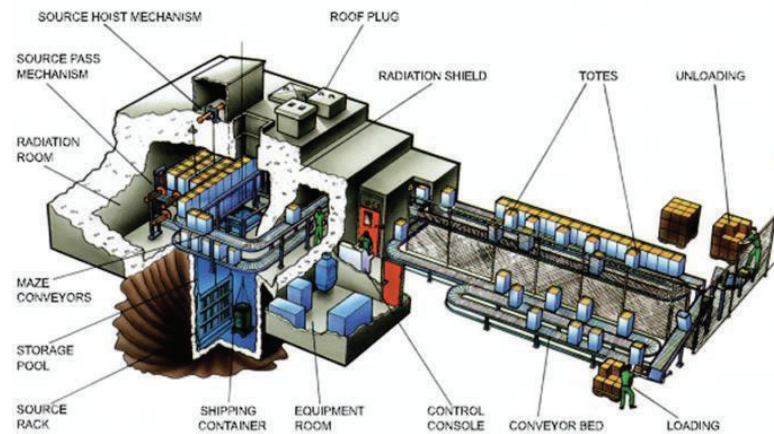
En el caso de los irradiadores submarinos o instalaciones de Categoría III, la diferencia radica en que la fuente radioactiva es almacenada en una piscina llena de agua y el acceso humano está restringido (IAEA, 2010, p. 5).

#### **1.1.5. IRRADIADORES PANORÁMICOS (CATEGORÍAS II Y IV)**

Los irradiadores panorámicos procesan grandes cantidades de productos por lo que son usados a escala comercial. Cuando la fuente no se encuentra en proceso de irradiación, es blindada sea por agua (almacenamiento húmedo) o plomo u otro material apropiado para la tarea (almacenamiento seco). En este tipo de irradiadores, la dosis es significativamente menor, comparándola con los autocontenidos, por lo cual el producto necesita ser irradiado por un mayor tiempo (IAEA, 2005, pp.20 – 22).

Los irradiadores de categoría II, llamados también irradiadores panorámicos de almacenamiento seco, se caracterizan porque la fuente radioactiva se encuentra encerrada en un contenedor seco y totalmente sellado cuando no se encuentra en uso. Adicionalmente se encuentra en un área que se mantiene inaccesible durante la operación (Atomic Energy Regulatory Board, 2007, p. 3).

En cambio, las instalaciones de categoría IV (irradiadores panorámicos de almacenamiento de fuentes húmedas) son controladas por humanos y la fuente radioactiva es almacenada y totalmente protegida en una piscina de agua cuando no está en uso. La fuente es expuesta en un cuarto de radiación que se mantiene inaccesible durante la operación (IAEA, 2010, pp. 5-6).



**Figura 1.2.** Irradiador Panorámico gamma de almacenamiento en húmedo (IAEA, 2005, p.

11)

### 1.1.6. PRINCIPIOS DE DISEÑO DE INSTALACIONES DE IRRADIACIÓN

Los principios de diseño para todos los irradiadores son maximizar la utilización de la energía de radiación, proveer dosis uniformes de radiación a los productos, y asegurar una operación segura y sencilla. Adicionalmente se deben agregar otros elementos al diseño, que son, lápices doblemente encapsulados de cobalto-60, agua desionizada para la piscina de almacenamiento, protección biológica hecha de concreto, etc (IAEA, 2005, p. 13).

La actividad instalada siempre debe ser menor a la actividad máxima para la cual fue diseñado cada irradiador (capacidad de diseño). La capacidad de diseño depende de la dosis requerida para las aplicaciones a realizar y las necesidades futuras. La actividad de las instalaciones de irradiación puede variar de varios kCi a cientos de MCi (IAEA, 1990, p.20).

La actividad de la fuente de cobalto-60 decrece alrededor de un 12% anualmente, por lo cual se compensa la pérdida de actividad incrementando el tiempo de irradiación aproximadamente un 1% por mes para mantener la misma dosis en el producto. Muchas veces el tiempo de irradiación es muy largo (poco práctico), por

lo que se adicionan lápices de cobalto-60 al rack, dependiendo de las necesidades operacionales (IAEA, 2005, pp. 13-14).

#### **1.1.7. PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN IRRADIADORES CATEGORÍA IV**

Existen ciertos requerimientos específicos según las condiciones de almacenamiento húmedo, algunas de estas se detallan a continuación (Atomic Energy Regulatory Board, 2007, pp. 5-8; IAEA, 2010, pp. 50-62):

- El material radioactivo a usarse debe ser insoluble en agua, de tal manera que si se produce algún derrame del mismo las consecuencias puedan ser mitigadas. Por ejemplo, el cloruro de cesio no debe ser usado en instalaciones de categoría IV debido a su alta solubilidad en el agua.
- Todo el equipo dentro del cuarto de irradiación debe ser seleccionado de tal manera que se minimicen fallas debido a exposición prolongada a la radiación.
- El rack de la fuente debe ser diseñado de tal manera que no se produzcan fisuras en la estructura que sostiene a la fuente, de esta manera no se promueve la corrosión.
- En caso de una falla del rack de la fuente, no debe ser posible mover la fuente en posiciones que puedan causar un peligro de radiación.
- Todo sistema al vacío usado para limpiar la piscina de almacenamiento, debe estar conectado a un filtro. Este filtro debe ser chequeado continuamente para detectar presencia de material radioactivo durante la operación de limpieza.
- Un monitor de radiación debería ser colocado en el sistema de tratamiento de agua para detectar cualquier contaminación dada por derrame de la fuente. Si la radiación excede un valor determinado, el monitor debe actuar de forma visible y sonora.
- Todos los materiales dentro de la piscina de almacenamiento deben ser metalúrgicamente compatibles unos con otros. Adicionalmente los materiales usados deben ser de acero inoxidable resistente a la corrosión.

- Debido a que el agua es usada como protección en los irradiadores de almacenamiento húmedo, un control de nivel automático debe ser provisto para mantener el nivel del agua de la piscina en niveles adecuados para proteger al personal. Todos los componentes del control que se encuentren bajo el nivel del agua deben tener gravedad específica de  $1,0 \text{ g/cm}^3$  o mayor.
- El control de nivel del agua es muy importante, en un nivel normal el agua que se ha perdido debido a la evaporación, debe ser repuesta.
- Es muy importante prevenir la migración del agua de la piscina de almacenamiento hacia los suministros de agua municipal.
- Cuando el nivel del agua es menor o mayor al nivel normal, señales visibles y sonoras se deben generar ya que la protección de la radiación está comprometida. Un nivel bajo es cuando el agua se encuentra 30 cm debajo del nivel normal. En cualquiera de los dos casos, el personal debe investigar la causa y tomar acciones correctivas.
- El agua de la piscina de almacenamiento debe ser equipada con un sistema de acondicionamiento de agua, que la mantenga limpia y con un valor de conductividad de  $1\ 000 \mu\text{S/m}$  durante operaciones de rutina y no debe exceder los  $2\ 000 \mu\text{S/cm}$  por situaciones extraordinarias que no superen los 90 días. Es debido a esto que la conductividad del agua de almacenamiento debe ser monitoreada continuamente.
- Se debe tener sumo cuidado para evitar la introducción de contaminantes, tales como regenerantes de los deionizadores, materiales de limpieza, etc.
- El pH del agua de la piscina debe mantenerse entre 7,5 y 8,0.

## **1.2. FUNDAMENTOS DEL TRATAMIENTO DE AGUAS MEDIANTE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO Y CARBÓN ACTIVADO**

### **1.2.1. INTRODUCCIÓN**

El agua contiene sales disueltas, que se disocian y forman iones. La característica de estos iones es que conducen la electricidad. Este tipo de impurezas iónicas

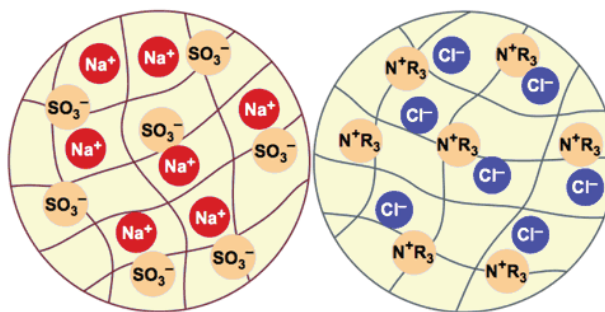
pueden generar problemas de corrosión, problemas en los sistemas de enfriamiento o calentamiento, y en los procesos en general; es así que las resinas de intercambio iónico conjuntamente con el carbón activado son usados para remover estos iones del agua y evitar futuros inconvenientes (DeSilva, 1999, p. 2).

## 1.2.2. RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

### 1.2.2.1. Estructura

El intercambio iónico se refiere al reemplazo de un ión removido de una solución acuosa por alguna otra especie iónica. Los llamados intercambiadores iónicos pueden ser usados en una gran cantidad de aplicaciones, es así que se usan en procesos de protección ambiental tales como, descontaminación, purificación y reciclaje (Neumann y Fatula, 2009, p. 14).

Las resinas de intercambio iónico se componen de una matriz polimérica entrecruzada tridimensional que posee grupos funcionales enlazados covalentemente con cargas iónicas fijas. Según su estructura física las resinas se pueden dividir en resinas microreticulares o de gel y resinas macroreticulares. Esta diferenciación depende del grado de entrecruzamiento con la estructura polimérica (Crittenden, C., Trussell, R., Hand, D., Howe, K. y Tchobanoglous, G , 2012, pp.1268-1269).



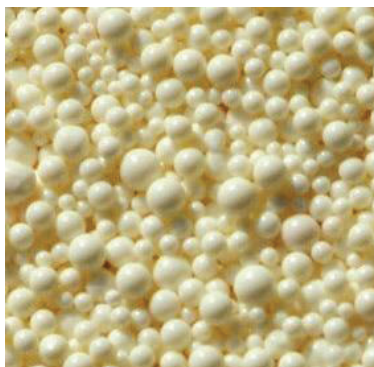
**Figura 1.3.** Representación esquemática de las resinas de intercambio iónico

Las resinas de tipo gel o microreticulares, son traslúcidas y con gran contenido de agua por lo que pueden mostrar gran porcentaje de hinchamiento o disminución de su tamaño; este tipo de resinas son las más comunes y tienen los sitios de intercambio distribuidos uniformemente a lo largo de la estructura (Crittenden et al. 2012, p.1269; De Silva, 1999, p. 3)



**Figura 1.4.** Fotografía de resinas de intercambio iónico de tipo gel.

Las resinas macroreticulares son opacas y están formadas de microesferas unidas entre sí. Estas resinas no se hinchan o disminuyen su tamaño significativamente, pero poseen menos sitios de intercambio. (Crittenden et al. 2012, p.1270).



**Figura 1.5.** Fotografía de resinas de intercambio macroreticulares

#### **1.2.2.2. Clasificación según los grupos funcionales**

Basados en los grupos funcionales enlazados a la estructura de las resinas, existen cuatro tipos generales de resinas de intercambio iónico. Catiónica ácida fuerte, catiónica ácida débil, aniónica básica fuerte y aniónica básica débil.

Las resinas catiónicas ácidas fuertes poseen un grupo sulfonado cargado el cual actúa como sitio de intercambio. Este tipo de resinas pueden ceder un protón en todo el rango de pH (1 a 14). Esta resina es usualmente la más escogida para casi todos los procesos de ablandamiento y desmineralización. Estas resinas usan grandes cantidades de ácido para su regeneración. (Cheremisinoff, 2002, pp. 381-382; Avilla, 2002, p.3).

Las resinas catiónicas ácidas débiles poseen como grupo funcional un carboxilato. Estas resinas funcionan a partir de un pH de 6. Este tipo de resinas son muy eficientes y utilizan menores cantidades de ácido para su regeneración al compararlas con las ácidas fuertes (Crittenden et al., 2012, p.1270; Nalco, 2009, p. 7.22).

Las resinas aniónicas fuertes poseen comúnmente un grupo amino cuaternario como carga positiva. Estas resinas pueden ceder un ion hidróxido a partir de un pH de 13. Estas resinas se dividen en dos grupos principales que son el tipo 1 y tipo 2. Las resinas del tipo 1, tienen sitios con tres grupos metílicos. Se encargan de remover todo tipo de aniones de todo tipo de aguas. Son resistentes a temperaturas elevadas, y suelen ser usadas en aguas con alta alcalinidad y alta concentración de sílice. Las resinas aniónicas del tipo 2, un grupo etílico reemplaza un grupo metílico. Este tipo de resinas presentan mejores resultados en aguas que contienen ácidos minerales, cloruros y sulfatos (Crittenden et al., 2012, p.1270; De Silva, 1999, p. 3).

Las resinas aniónicas débiles, contienen poliamina como grupo funcional que actúa como absorbedor ácido, que remueve ácidos fuertes del efluente. Este tipo de resinas suelen ser usadas en aguas que contienen altas concentraciones de sulfatos y cloruros y que no necesitan remover alcalinidad o sílice (De Silva, 1999, p. 5).

### 1.2.2.3. Propiedades de las resinas de intercambio iónico

Los dos tipos de propiedades más importantes con respecto al intercambio iónico son: las propiedades de ingeniería y las propiedades físicas. Las propiedades de ingeniería son la capacidad de intercambio y la selectividad de las resinas. Los ingenieros usan estas propiedades para determinar el desempeño de la resina bajo ciertos parámetros operacionales. Las propiedades físicas son el tamaño de partícula, la densidad, la estabilidad, la humedad y el hinchamiento de la resina. Estas propiedades son importantes para determinar qué tipo de resina se debe usar para un tratamiento específico (Crittenden et al., 2012, p.1274).

- **Capacidad de intercambio**

La capacidad de intercambio se refiere a la cantidad de iones que pueden ser intercambiados sobre la resina. La capacidad de intercambio iónico puede ser expresada en términos de capacidad total o capacidad efectiva. La capacidad efectiva es la parte de la capacidad total que puede ser usada en una columna de operación, lo cual depende de los parámetros de operación (Crittenden et al., 2012, p.1275).

La capacidad de intercambio puede ser expresada en cantidad por unidad de volumen, así como kilogramos por pie cúbico ( $\text{Kgr/ft}^3$ ), miliequivalentes por mililitros ( $\text{meq/ml}$ ), que también es igual a equivalentes por litro ( $\text{eq/l}$ ). Técnicamente la capacidad de una resina es igual a la capacidad total que puede ser determinada en laboratorio mediante titulación (Michaud, 2011, p.1).

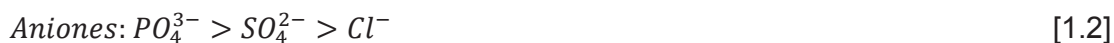
- **Selectividad**

La selectividad es la afinidad que tienen las resinas de intercambio por ciertos iones en solución acuosa. La selectividad de una resina depende de características físicas y químicas. Entre las propiedades químicas que influyen en la selectividad está la valencia y el número atómico. Dentro de las propiedades físicas se encuentra la distribución del tamaño de poro, los grupos funcionales en



las cadenas poliméricas, el hinchamiento de la resina y la presión en el tanque (Cheremisinoff, 2004, pp. 392-397).

Las resinas de intercambio iónico generalmente tienen mayor selectividad por iones con carga o valencia mayor, como se muestra en las ecuaciones 1.1 y 1.2. Si es que los iones poseen la misma carga, mayores afinidades se ven en iones con mayor número atómico. En el caso de soluciones concentradas estas relaciones son al contrario, lo cual hace posible que el proceso de regeneración en resinas sea posible (Avilla, 2002, p.2).



- **Hinchamiento**

El volumen de las resinas puede variar cuando intercambia iones debido a las interacciones de los mismos, el grado de entrecruzamiento de la resina y la hidratación de la misma. Para todo tipo de resinas, el porcentaje de hinchamiento es inversamente proporcional al grado de entrecruzamiento. El hinchamiento de las resinas debe ser considerado en el diseño de columnas de intercambio iónico (Crittenden et al., 2012, p. 1282).

- **Estabilidad**

La estabilidad de las resinas de intercambio iónico se puede ver afectada debido a condiciones físicas o químicas. Dentro de las condiciones físicas están la presión excesiva dentro de los tanques, la excesiva expansión y contracción de las resinas y la abrasión, lo que puede reducir la vida operativa de las mismas (Crittenden et al., 2012, p. 1284).

Con respecto a las condiciones químicas, las resinas pueden ser susceptibles a la oxidación, por ejemplo debido al cloro libre presente en la corriente, lo cual debilita la resina estructuralmente. Finalmente el ensuciamiento de la resina se da

debido a la presencia de sílice o de materia orgánica, llevando también a las resinas a una degradación. Todo lo mencionado anteriormente puede afectar significativamente al rendimiento de las resinas y al costo de mantenimiento (Crittenden et al., 2012, p. 1284-85; Nalco, 2009, p.7.16-7.22).

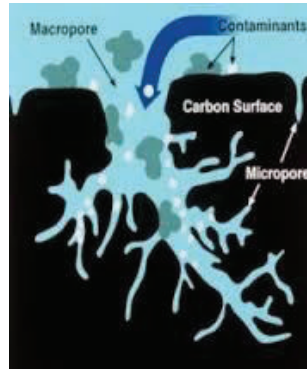
#### **1.2.2.4. Vida útil de las resinas de intercambio iónico**

La vida útil de las resinas de intercambio catiónico fuerte y débil se encuentra entre 10 a 15 años. Esta vida útil puede verse afectada debido a la presencia de cloro libre o cloraminas, choques térmicos y por ensuciamiento (Michaud, 1990, pp. 46-47).

Con respecto a las resinas aniónicas, su vida útil es considerablemente menor a la de las catiónicas, es así que las aniónicas fuertes tienen un promedio de vida de entre 2 a 5 años, la cual se puede ver reducida debido al ensuciamiento especialmente de materia orgánica. Las aniónicas débiles presentan una vida promedio de 4 a 7 años la cual se puede ver afectada especialmente debido a choques térmicos, baja calidad de regenerante y alta dureza del agua (Nalco, 2009, pp. 7.16-7.33).

#### **1.2.3. CARBÓN ACTIVADO**

El carbón activado es un término aplicado a un grupo de productos derivados de materiales carbonosos preparados artificialmente mediante un proceso de carbonización. Mediante este proceso se logra obtener una alta área superficial y un elevado grado de porosidad, lo cual le confiere al carbón activado grandes propiedades adsorbentes que son usadas en muchas áreas de la industria (Luna, González, Gordón y Martín, 2007, p.39; Giraldo, García y Moreno, 2007, p.8).



**Figura 1.6.** Representación gráfica de la superficie del carbón activado

### 1.2.3.1. Obtención del carbón activado

La producción de carbón activado depende de la disponibilidad y propiedades de las materias primas, tales como la porosidad y dureza. Entre los materiales más usados se encuentran diferentes tipos de madera, lignitos, cáscaras y huesos de diversos frutos como son el coco y las olivas (Gómez, Rincón y Klose, 2010, p.2).

Se utilizan dos métodos para la obtención de carbón activado, por medio de activación térmica o física, y por medio de activación química.

En el proceso de activación física se inicia por una etapa de carbonización de la materia prima y posteriormente se procede a gasificar el material carbonizado, principalmente con dióxido de carbono y vapor de agua a una temperatura entre 800 y 1000 °C (Gómez et al., 2010, p.2).

Con respecto al proceso de activación química, se desarrolla al calentar en atmósfera inerte una combinación de sustancias activantes con el material escogido. Los agentes activantes más usados son, ácido fosfórico, cloruro de zinc y ácido sulfúrico (Universidad de Sevilla, 2000, 26-31).

### **1.2.3.2. Propiedades del carbón activado**

El carbón activado es ampliamente usado en la industria debido a sus propiedades, tales como la estabilidad térmica, carácter hidrófobo, estructura porosa, resistencia al ataque ácido y bajo costo relativo (Luna et al., 2007, p. 39).

### **1.2.3.3. Usos del carbón activado**

Debido a sus variadas características, el carbón activado es ampliamente usado en las industrias de minería, de alimentos, farmacéuticas, cosméticas, cigarreras y muchas otras áreas (Luna et al., 2007, p. 40).

Dentro de sus aplicaciones en medio líquido se encuentran la decoloración de licores de azúcar, potabilización de aguas, tratamiento de aguas residuales, purificación de grasas, purificación de plasma sanguíneo, separación de elementos metálicos, etc. En medio gaseoso sus aplicaciones están en la separación de gases, máscaras antigás, protección radiactiva en plantas nucleares, desodorante de productos alimenticios, entre otros (Universidad de Sevilla, 2000, pp. 41-42).

### **1.2.3.4. El carbón activado en el tratamiento de aguas**

Debido a todas las características antes mencionadas el carbón activado es un material muy útil en el tratamiento de aguas. Se encarga de atrapar los contaminantes orgánicos y además elimina el cloro residual que no ha reaccionado (Universidad de Sevilla, 2000, p. 42).

La remoción de contaminantes orgánicos y del cloro residual, no solo mejora el olor y sabor del agua potable sino que minimiza los daños a la salud. Adicionalmente protege otras unidades de tratamiento como la ósmosis inversa y

las resinas de intercambio iónico de posible oxidación y ensuciamiento (DeSilva, 2000, p. 1).

El carbón activado remueve los contaminantes del agua mediante adsorción y reducción catalítica. La materia orgánica es removida mediante adsorción, mientras que los desinfectantes residuales se remueven mediante reducción catalítica. Es así que existen ciertos factores que afectan el rendimiento del carbón activado, los cuales son: peso molecular, pH, tamaño de partícula, flujo y temperatura (DeSilva, 2000, pp. 1-2).

#### **1.2.3.5. Tipos de carbón activado usado en el tratamiento de aguas**

Para el tratamiento de aguas se usan dos tipos de carbón activo, el carbón activado granular (GAC) y el carbón activado en polvo (PAC). El carbón activado en polvo tiene un pequeño tamaño de partícula (alrededor de 24  $\mu\text{m}$ ), y puede ser añadido a procesos de tratamiento de agua para proveer el tiempo necesario para que la adsorción ocurra y luego ser removido mediante sedimentación o filtración del mismo (Crittenden et al., 2012, p.1159).

El PAC, es usado principalmente en el tratamiento de compuestos que agregan olor y sabor al agua y en el tratamiento de bajas concentraciones de pesticidas y otros contaminantes orgánicos. El uso del PAC resulta conveniente debido a que se puede usar periódicamente con costos mínimos adicionales (Crittenden et al., 2012, p.1159).

El carbón activado granular puede ser usado en dos tipos de operaciones, remoción de trazas de contaminantes y remoción de compuestos orgánicos disueltos. Con respecto al GAC, el tamaño de partícula, la dureza y la porosidad son características muy importantes para que el funcionamiento del mismo sea el esperado (Crittenden et al., 2012, p.1189-93).

#### **1.2.4. RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO Y CARBÓN ACTIVADO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS**

Como se ha mencionado previamente, el carbón activado es casi siempre usado antes del proceso de intercambio iónico, para así proteger a las resinas de intercambio iónico de la materia orgánica y del cloro residual presente en el agua.

Los procesos más comunes en los que se usa carbón activado y resinas de intercambio iónico en conjunto, son la suavización, dealkalinización y desmineralización del agua. El proceso de suavización se encarga de eliminar los iones de calcio y magnesio. Se usa en el tratamiento de aguas para plantas industriales como agua de alimentación de las calderas (Nalco, 2009, p. 7.34).

El proceso de dealkalinización se encarga de eliminar la alcalinidad del agua, y es muy usado también como proceso de tratamiento del agua de entrada a los calderos. La desmineralización es el proceso que virtualmente remueve todos los sólidos disueltos del agua. El agua desmineralizada es usada para varias aplicaciones, tales como (Nalco, 2009, pp. 7.34-7.41):

- Agua de enjuague de alta pureza usada para eliminar defectos de rendimiento, como en la manufactura de chips de computadora, donde la conductividad del agua debe ser menor a  $0.055 \mu\text{S}/\text{cm}$ .
- Agua de alimentación para calderas para usos industriales de muchos tipos en un gran rango de presiones de operación.
- Agua de almacenamiento de fuentes radioactivas, usada como blindaje de protección al ambiente y seres vivos.

### 1.3. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS

#### 1.3.1. INTRODUCCIÓN

El diseño de plantas de tratamiento de aguas empezó debido a la necesidad de proveer agua libre de organismos infecciosos y que sea destinada para el consumo humano. Actualmente el tratamiento de aguas también es muy usado en la industria, tanto para mantener la calidad de agua de ingreso a la misma, o para tratar el agua de desecho antes de ser reinsertada en los cuerpos de agua y así evitar la contaminación al ambiente (American Water Works Association y American Society of Civil Engineers, 2005, p.1.1).

#### 1.3.2. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA

Independientemente del tipo de tratamiento a realizar, es importante que el agua a tratar sea analizada y se determine los contaminantes presentes en la misma. Adicionalmente se debe conocer las características de salida del agua tratada, es decir los parámetros que se desean alcanzar luego de realizado el tratamiento (Skipton, Dvorak y Niemeyer, 2008, p.1).

Para evaluar el agua a ser tratada se debe realizar un análisis fisicoquímico de la misma. En la tabla 1.1 se detallan los parámetros fisicoquímicos comúnmente analizados (Nalco, 2009, p.4.29; Jiménez, 2000, p.12)

**Tabla 1.1.** Parámetros físicos comúnmente analizados en el agua

PARÁMETROS FÍSICOS	
Turbiedad	Conductividad
Sólidos Totales	Temperatura
Color	pH
Olor y sabor	

En la tabla 1.2 se puede observar los parámetros químicos usualmente analizados para determinar la calidad del agua.

**Tabla 1.2.** Parámetros químicos comúnmente analizados en el agua

PARÁMETROS QUIMICOS	
Calcio	Nitratos
Magnesio	Dureza total
Sodio	Sílice
Potasio	Hierro
Bicarbonato	Aniones totales
Sulfatos	Cationes totales
Cloruros	Alcalinidad
DBO	DQO

#### 1.2.4.1. Análisis de la presencia de los parámetros fisicoquímicos

Después de realizar un análisis fisicoquímico del agua es importante entender los valores obtenidos, es decir cómo afectan los mismos en la calidad del agua.

- **Dureza**

Tradicionalmente la dureza se define como la capacidad del agua para reaccionar con el jabón. En términos técnicos, la dureza se define como el contenido de calcio y magnesio en el agua. La dureza se expresa en términos de equivalentes de carbonato de calcio. Un agua blanda con una dureza menor a 100 mg/l, puede provocar corrosión en tuberías o en estructuras metálicas (mg/L CaCO<sub>3</sub>) (Nalco, 2009, p. 4.28; Chillón y Prats, 2004, p. 147).



- **pH**

El pH es uno de los parámetros fundamentales en el tratamiento de aguas. Es usado para especificar si un agua es ácida o alcalina. El pH es un valor importante en la determinación de la corrosividad del agua, es así que un valor bajo indica una mayor corrosividad y viceversa (Nalco, 2009, p.4.31; Varó et al., 2004, pp. 146-147).

- **Alcalinidad**

La alcalinidad es la medida de las concentraciones de iones presentes en el agua que pueden neutralizar un ácido. Estos iones son, bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos. Este parámetro también es importante con respecto a un comportamiento incrustante o agresivo del agua (Varó et al., 2004, p. 147).

### 1.3.2.2. Índices de estabilidad de carbonato de calcio

Para determinar el carácter agresivo o incrustante del agua, se han propuesto ciertos índices que se encuentran en función de la temperatura, pH, dureza, alcalinidad y sólidos disueltos. Los índices más utilizados son el Índice de Langelier y el Índice de Riznar (De Sousa, Correia y Colmenares, 2010, p. 187).

- **Índice de Langelier**

El Índice de Langelier define la agresividad del agua con respecto al carbonato de calcio. Se basa en el efecto del pH sobre el equilibrio de la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ . De esta manera se tiene que el pH al cual el agua está saturada con  $\text{CaCO}_3$ , se define como pH de saturación (pHs), es así que este índice está definido por la diferencia entre el valor medido de pH del agua y el pH de saturación, como se indica en la ecuación 1.3 (De Sousa et al., 2010, p. 189).

$$I_L = \text{pH} - \text{pHs}$$

[1.3]

Si  $I_L > 0$ , el agua está sobresaturada, por lo tanto el agua es incrustante

Si  $I_L = 0$ , el agua está saturada con  $\text{CaCO}_3$ , lo que indica que no se precipita ni se disuelve.

Si  $I_L < 0$ , el agua esta insaturada, por lo tanto el agua es agresiva.

En la práctica se dice que: Si  $I_L > 0.5$ , el agua es incrustante y si  $I_L < 0.5$ , el agua es agresiva (Varó et al., 2004, p. 148).

- **Índice de Riznar**

El Índice de Riznar es un índice empírico que sirve para predecir la formación de incrustaciones o la tendencia a la corrosión, basado en el pH y en el pHs. Dicho índice se define como se indica en el ecuación 1.4 (Nalco, 2009, p.4.43).

$$\text{RSI} = 2\text{pHs} - \text{pH} \quad [1.4]$$

Si  $\text{RSI} < 6$ , el agua es incrustante,

Si  $6 < \text{RSI} < 7$ , el agua está cercana al equilibrio,

Si  $\text{RSI} > 7$ , el agua es corrosiva.

Se dice que se trata de un índice empírico porque fue desarrollado al realizar observaciones empíricas de tasas de corrosión y formación de películas en tuberías de acero y en serpentines de vidrio (De Sousa et al., 2010, p.190).

### 1.3.3. DISEÑO DE FILTROS DE ARENA

#### 1.3.3.1. Introducción

La filtración es la separación de sólidos en suspensión de un líquido mediante un medio poroso que retiene los sólidos y permite al líquido pasar. Generalmente los poros del medio son más grandes que las partículas a ser removidas, de esta

manera el filtro funciona más eficientemente solo después de que un depósito inicial ha sido atrapado en el medio (Richardson, Harker y Backhurst, 2002, pp. 372-373).

La filtración de medio granular, usada generalmente en tratamiento de agua, es generalmente aplicable en la remoción de sólidos suspendidos en un rango de entre 5 a 50 mg/L, donde un efluente con turbidez menor a 1 NTU es requerido. Los filtros de arena han sido usados por muchos años tanto en el tratamiento para obtener agua potable como en plantas industriales (Nalco, 2009, p. 6.31).

### **1.3.3.2. Filtración en medio granular**

Los filtros de medio granular generalmente se clasifican en:

- Filtros de gravedad
- Filtros presurizados

Los filtros de gravedad usan solo la presión del agua sobre el medio para forzar el paso del agua a través del mismo; mientras que los filtros presurizados usan la presión dada por una bomba para forzar al agua a pasar el medio. Un filtro presurizado es típicamente alimentado por la parte superior y enjuagado por el fondo (Roberts, 2007, pp.8.81-8.82).

Dentro de los filtros de gravedad, se encuentra la filtración lenta de arena y la filtración rápida de arena. En la filtración lenta la remoción del material en suspensión en el agua se da por percolación a baja velocidad. En este tipo de filtración se tiene suficiente profundidad para permitir el flujo libre del agua a través del filtro (Cheremisinoff, 2002, pp. 257-258).

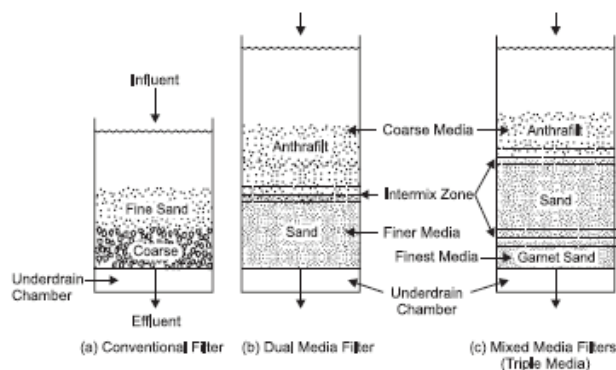
La filtración rápida permite operar a velocidades 100 veces mayores que la filtración lenta. Las características que permiten este proceso son: el material granular es previamente procesado para obtener un tamaño más uniforme, el uso

de un coagulante para pre acondicionar el agua, y sistemas mecánicos e hidráulicos para remover los sólidos recolectados en el filtro (Crittenden et al., 2012, p. 732).

La filtración presurizada es muy similar a la filtración por gravedad, la diferencia radica en que se da en un recipiente presurizado. La ventaja principal de este tipo de sistema es que el agua permanece presurizada continuamente, lo cual no provoca problemas cuando el agua de alimentación ingresa con presión extra. Este tipo de filtros son usados mayoritariamente en piscinas y aplicaciones industriales (Crittenden, 2012, p. 800).

### 1.3.3.3. Medios de filtración granular

Las composiciones comunes del medio de filtración y la configuración del mismo son: medio individual, al solo usar arena o antracita; medio dual, usa antracita y arena; y medio mixto, que usa antracita, arena y material silíceo (Nalco, 2009, pp. 6.37-6.38). En la figura 1.8 se observa lo anteriormente descrito.



**Figura 1.7.** Ilustración que muestra las composiciones y configuraciones de los medios de filtración (Nalco, 2009, p. 6.37)

Un filtro de medio dual típico contiene de 0,15 a 0,3 m de arena silícica, sobre esta se encuentra una capa de entre 0,46 a 0,76 m de antracita. Un filtro de medio mixto contiene de 5 a 10 cm de material silíceo, 0,15 a 0,3 m de arena silícica y 0,5 a 0,6 m de antracita (American Water Works Association et al, 2005, p.8.6).

#### **1.3.3.4. Retrolavado**

El retrolavado es una parte indispensable de la filtración. Un inadecuado retrolavado es una de las causas frecuentes de problemas en los filtros. El criterio del retrolavado se establece basado en la velocidad de flujo necesario para fluidizar el medio y remover los sólidos depositados (Crittenden, 2012, p. 790).

A medida que los sólidos retenidos en el medio se incrementan, la porosidad del filtro disminuye. Al mismo tiempo, la pérdida de carga a través del filtro se incrementa. Antes que la pérdida de presión aumente a niveles inaceptables o un aumento brusco de turbidez ocurra, es necesario el retrolavado (American Water Works Association et al., 2005, p. 8.11).

Los métodos comúnmente usados para retrolavar filtros de medio granular son:

- Retrolavado con agua únicamente
- Retrolavado con agua con lavado de superficie auxiliar
- Agua de lavado a contracorriente con la socavación de aire auxiliar
- Retrolavado combinado de aire-agua

#### **1.3.4. DISEÑO DE FILTROS DE CARBÓN ACTIVADO**

Existen tres opciones básicas para colocar un sistema de tratamiento de carbón activado granular en un sistema de tratamiento de agua:

- Pre filtro de adsorción, por delante del proceso de filtración convencional
- Post filtro de adsorción, después del proceso de filtración convencional
- Filtración/adsorción, al combinar filtración y filtración con carbón activado en un solo proceso

En general el diseño de filtración con carbón activado es similar al diseño de filtración con medio dual. El diseño se debe acomodar al flujo máximo de la

planta, al análisis del agua a tratar y a las propiedades del carbón granulado a utilizar (American Water Works Association et al., 2005, pp.14.10-14.11).

Un parámetro muy importante para el diseño de filtros de carbón activado es el EBCT (Tiempo de contacto de cama vacía/empty-bed contact time). El EBCT representa el tiempo en el que una corriente líquida está en contacto con un filtro de medio filtrante, sin que el medio esté presente (SenGupta, 2002, p. 231). Es igual al volumen del filtro ocupado por el adsorbente dividido para el flujo, como se muestra en la ecuación 1.5.

$$EBCT = \frac{V_F}{Q} = \frac{A_F L}{v A_F} = \frac{L}{v} \quad [1.5]$$

Donde:

EBCT = Tiempo de contacto de cama vacía en horas

$V_F$  = volumen ocupado por el medio adsorbente incluyendo el volumen de la porosidad,  $m^3$

$Q$  = caudal,  $m^3/h$

$A_F$  = Área de adsorción disponible para el flujo,  $m^2$

$L$  = profundidad del medio,  $m$

$v$  = velocidad superficial,  $m/h$

El rango del EBCT en procesos de adsorción puede variar entre 5 a 60 minutos para carbón activado granular. La velocidad superficial es igual al flujo dividido para el área perpendicular al flujo. Velocidades de adsorción típicas varían entre 5 a 15  $m/h$  (Crittenden et al., 2012, p. 1191-1192).

Luego de que el EBCT ha sido determinado, el volumen de carbón y la profundidad del filtro puede ser seleccionado. El diseño del volumen del tanque depende del espacio libre que se deje dentro del filtro. El espacio libre puede ser mayor al 50%. Si es que la expansión del lecho no es necesaria, un espacio libre de 20% o 30% puede ser adecuado para una adecuada expansión durante el retrolavado (American Water Works Association et al., 2005, p. 14.13).

Con respecto al retrolavado, un filtro de lecho de carbón activado granular debe ser lavado según los procedimientos típicos de filtros granulares.

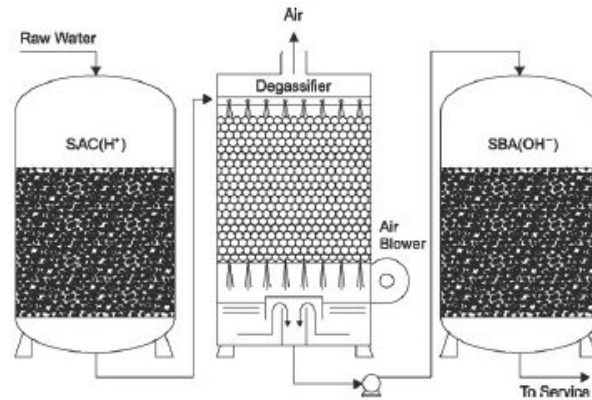
En filtros de lecho de carbón activado, la velocidad de carga superficial, está relacionada con el flujo de diseño de la planta de tratamiento. Este parámetro está definido, de la misma manera que los filtros convencionales de medio granular; es la velocidad a la que un volumen de agua pasa a través de un área dada de lecho de carbón activado granular, usualmente expresado como  $m^3/m^2$  o  $gpm/ft^2$ . El rango usado como criterio de diseño es entre 5 a 15 m/h (American Water Works Association, 2005, p. 14.13).

### **1.3.5. DISEÑO DEL PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO**

Como ya se ha mencionado previamente, la desmineralización del agua es la remoción total de sólidos disueltos en el agua y produce agua pura. Las unidades de intercambio iónico para desmineralización deben incluir los procesos de intercambio aniónico y catiónico. La configuración de los equipos está usualmente determinada por las características del agua de entrada, capital a usar y costos de regeneración de las resinas (Nalco, 2009, p. 7.41). A continuación se describen algunos de los diseños usados comúnmente.

#### **1.3.5.1. Desmineralización convencional de doble filtro**

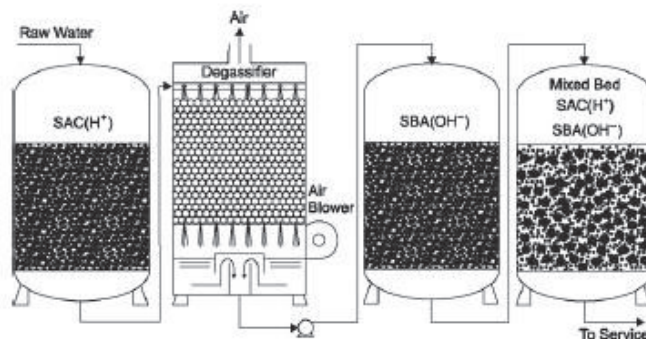
Los dos componentes de este sistema son una unidad de intercambio catiónico fuerte ( $H^+$ ), la cual remueve todos los cationes, seguido de una unidad de intercambio aniónico fuerte ( $OH^-$ ), que remueve todos los aniones. El resultado de este sistema es agua con muy baja conductividad. Algunas veces se coloca un decarbonatador entre las unidades de intercambio (Nalco, 2009, p. 7.41-7.42). En la figura 1.9, se puede observar cómo queda configurado este sistema.



**Figura 1.8.** Ilustración de un sistema convencional de doble filtro

### 1.3.5.2. Desmineralización de filtro mixto

Los desmineralizadores de filtro mixto contienen dos resinas, resina catiónica fuerte (H<sup>+</sup>) y resina aniónica fuerte (OH<sup>-</sup>), las cuales están mezcladas cuando se encuentran en operación. Cuando las resinas se saturan, son separadas debido a diferencias de densidad para su regeneración por separado. La resina catiónica fuerte es más densa que la aniónica fuerte. Con este tipo de configuración se pueden obtener conductividades menores a 0.055  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Nalco, 2009, pp. 7.47-7.48; Venkateswarlu, 1996, p.62). En la figura 1.10, se puede observar este tipo de configuración.

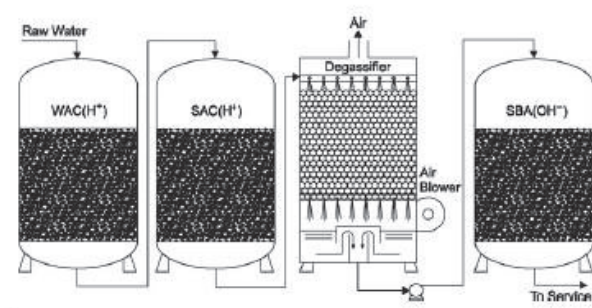


**Figura 1.9.** Ilustración de un sistema de filtro mixto



### 1.2.5.3. Desmineralización de doble filtro con unidad catiónica débil

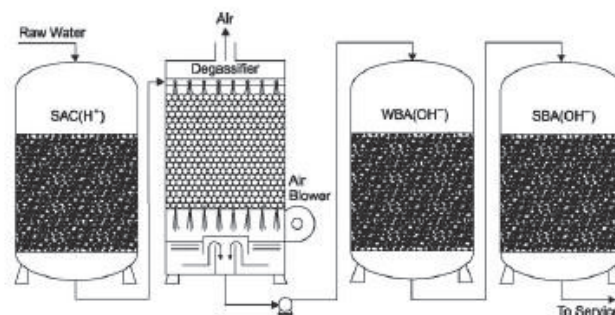
Cuando el agua contiene alta dureza y alcalinidad, se coloca una unidad de intercambio catiónico débil ( $H^+$ ) antes de la unidad de intercambio catiónico fuerte ( $H^+$ ). El intercambio catiónico débil remueve alcalinidad y dureza, y así la unidad de intercambio catiónico fuerte no se carga con estos iones y trata mejor al efluente. Luego de la unidad de intercambio catiónico fuerte se coloca un degasificador antes que el efluente ingrese a la unidad de intercambio aniónico fuerte ( $OH^-$ ) (Nalco, 2009, p. 7.43-7.45). En la figura 1.11 se puede observar un ejemplo de esta configuración.



**Figura 1.10.** Ilustración de un sistema de doble filtro con unidad catiónica débil

### 1.2.5.4. Desmineralización de doble filtro con unidad aniónica débil

Este tipo de configuración es usada cuando el efluente tiene gran cantidad de materia orgánica, ya que este tipo de materia afecta negativamente a la unidad aniónica fuerte pero no afecta a la unidad aniónica débil, es así que la unidad aniónica débil debe ir antes de la unidad aniónica fuerte para así obtener los resultados esperados y no afectar la integridad de las resinas (Nalco, 2009, pp.7.43-7.46). Un ejemplo de esta configuración se puede observar en la figura 1.12.



**Figura 1.11.** Ilustración de un sistema de doble filtro con unidad aniónica débil

### 1.3.5.3. Proceso operativo de intercambio iónico

El proceso de intercambio iónico se lleva a cabo en cuatro pasos de operación: retrolavado, regeneración, lavado y servicio. Con respecto al primer paso, el retrolavado se lleva a cabo en una instalación nueva o después de cada corrida. Este proceso conlleva a ingresar agua por el fondo del tanque a una velocidad suficiente para expandir el lecho de un 50% a 75% y así eliminar impurezas que puedan existir en la resina (Wachinski y Etzel, 1997, p. 48).

Con respecto al segundo paso, el método de regeneración a escoger se basa en los requerimientos de calidad en el efluente de agua y en la calidad de entrada y salida del agua. En general si el agua de alimentación es limpia y la calidad del agua de salida es alta, una regeneración a contracorriente debería ser empleada. Si el agua a tratar es sucia y menor la calidad de agua de salida, una regeneración co-corriente debería ser usada (American Water Works Association et al., 2004, pp. 12.34-12.35).

La regeneración co-corriente se da cuando el regenerante pasa a través del filtro de resinas de intercambio iónico en la misma dirección en la que el agua de alimentación es tratada. Por otro lado, la regeneración a contracorriente, se da cuando el regenerante pasa en la dirección contraria a la del agua de alimentación. El segundo método es conocido como más eficiente (Venkateswarlu, 1996, pp. 62-63).

La reducción típica en lo que concierne a conductividad en un sistema de dos filtros es aproximadamente 90 % en un sistema en contracorriente. La conductividad puede ser causada por hidróxido de sodio debido a la fuga de sodio del tanque de resina catiónica e hidróxido no neutralizado después de ser regenerada la resina aniónica.

Después de una regeneración y antes de poner en operación el sistema es necesario realizar un enjuague de las resinas para evitar el exceso de regenerante en el equipo y en las tuberías (Wachinski y Etzel, 1997, p. 48).

#### **1.3.5.4. Consideraciones de ingeniería**

A continuación se enumeran algunos factores importantes a tomar en cuenta al momento de diseñar un sistema de intercambio iónico (Roberts, 2007, p. 9.83):

- Profundidad mínima del filtro ----- 24 pulgadas
- Tasa de intercambio de flujo ----- 2 a 5 gpm/ft<sup>2</sup>
- Tasa de regeneración de flujo ----- 1 a 2 gpm/ft<sup>2</sup>
- Tasa de flujo de agua de enjuague -- 1 a 1,5 gpm/ft<sup>2</sup>
- Volumen de agua de enjuague ----- 30 a 100 gal/ft<sup>3</sup>

#### **1.3.6. DIAGRAMAS DE PROCESOS**

Los diagramas de procesos, o también llamados diagramas de flujo son usados usualmente en ingeniería y en el diseño de procesos y aplicaciones. El propósito de estos diagramas es reunir la cantidad necesaria de información de los procesos durante varias etapas de la ingeniería, procura, construcción y operación (Walker, 2009, p. 15).

La mayoría de plantas industriales usan gran cantidad de equipos y tuberías, además de que puede existir recirculación de flujo, bypass, etc. Es por este tipo

de complejidades que no es recomendable incluir toda la información de una planta en un sólo diagrama (Simpson y Sastry, 2013, p. 42).

Existen tres diagramas principales usados en ingeniería química para describir procesos: Diagrama de flujo de bloques, diagrama de flujo de procesos y diagrama de instrumentación y tubería.

#### **1.3.6.1. Diagrama de flujo de bloques (BFD)**

El diagrama de flujo de bloques o BFD por sus siglas en inglés (block flow diagram), usualmente se asemeja a un gráfico organizacional y contiene los procesos principales encerrados en cajas conectados entre sí mediante líneas con flechas que indican la dirección de los flujos (Walker, 2009, pp. 15, 16).

#### **1.3.6.2. Diagrama de flujo de proceso (PFD)**

Un diagrama de flujo de proceso o PFD por sus siglas en inglés (process flow diagram), es usado para indicar los flujos y equipos relevantes en una planta de procesos. En un PFD se puede encontrar toda la información necesaria para entender un proceso y si es necesario se incluirán elementos tales como válvulas de control y bombas (Simpson y Sastry, 2013, pp. 42,43).

#### **1.3.6.3. Diagrama de instrumentación y tubería (P&ID)**

El diagrama de instrumentación y tuberías o P&ID por sus siglas en inglés (piping and instrumentation diagram), resume todo lo referente a control de procesos y sus partes más críticas. Es más complejo que un PFD e incluye controladores, actuadores y sensores (Simpson y Sastry, 2013, p.43).

El P&ID es considerado el producto final de la ingeniería de procesos y proporciona la máxima información posible sobre la planta en cuestión (Gómez, Gómez, Aragonés, Sánchez y Gómez, 1997, p. 92). En la figura 1.15 se puede observar un ejemplo de un P&ID.

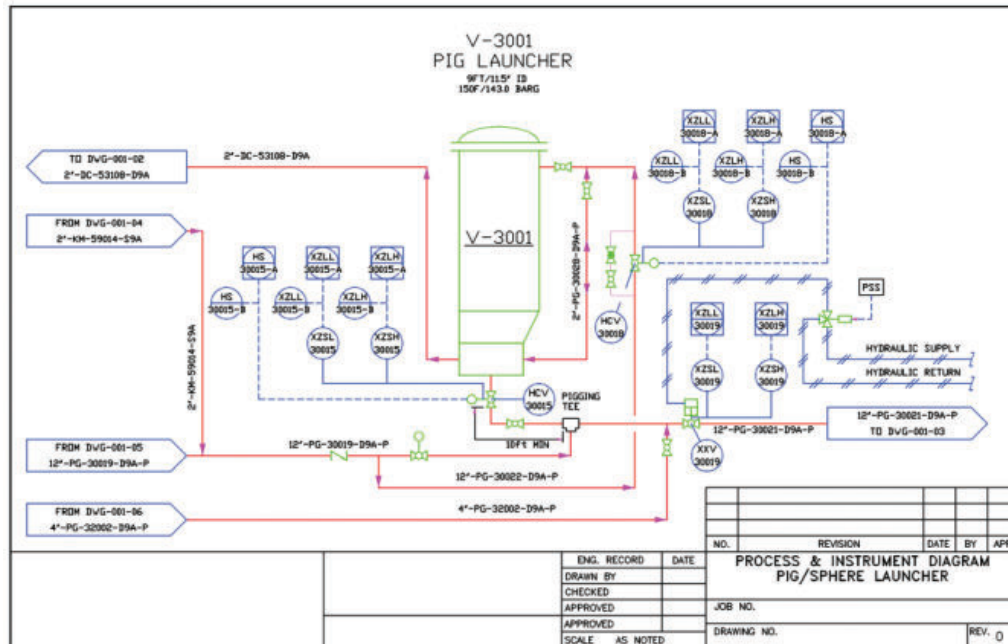


Figura 1.12. Ilustración de un diagrama de instrumentación y tuberías (Walker, 2009, p. 16)

### 1.3.7. TIPOS DE CONTROLADORES

Los métodos de control más utilizados son: control de dos posiciones (control ON-OFF), control proporcional con acción integral (PI) y control proporcional con acción integral y derivativa (PID).

En los controladores de dos posiciones, las válvulas sólo pueden asumir dos tipos de estado, totalmente abiertas (ON) o totalmente cerradas (OFF). Este tipo de control es barato de instalar y se usa en muchas instalaciones del hogar (Sánchez, 2013, p. 176). En el caso del control proporcional con acción integral, se elimina la desviación permanente que se produce al usar el control integral. En la ecuación 1.6 se representa el modelo matemático de esta modalidad (Guerra, 2007, p.98).

$$p = K_c \left( e + \frac{1}{t_i} \int e dt \right) + C \quad [1.6]$$

En los controles de tipo proporcional con acción integral y derivativa se reúnen las siguientes acciones: proporcional, integral y derivativa. La acción proporcional estabiliza la oscilación natural de la variable controlada. La acción integral proporciona una corrección para compensar las variaciones de carga. En la ecuación 1.7 se representa el modelo matemático de este tipo de control (Sánchez, 2013, p. 193).

$$p = K_c \left( e + \frac{1}{t_i} \int e dt + T_D \frac{de}{dt} \right) + C \quad [1.7]$$

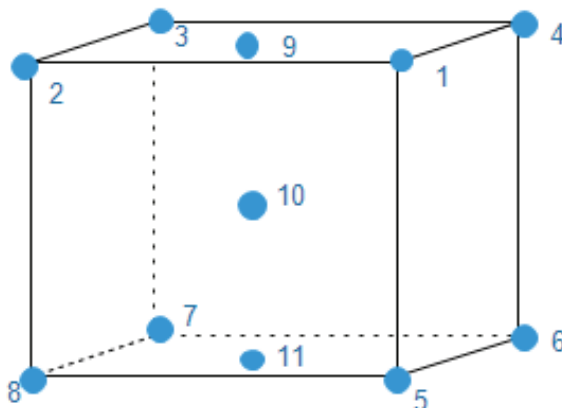
## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PH, CONDUCTIVIDAD, ALCALINIDAD Y DUREZA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE LANGELIER

#### 2.1.1. MUESTREO

Se determinaron once puntos de muestreo en la piscina, condicionados por la cantidad limitada de reactivos. Se ubicaron cinco puntos en la superficie de la piscina, un punto en el centro de la piscina y cinco puntos en el fondo de la piscina. En la figura 2.1 se puede observar la configuración de los puntos mencionados.

Para tomar las muestras se usó una botella de vidrio ámbar de 1 L, normalmente usada para tomar muestras regulares para medir conductividad y radioactividad en la piscina, según controles periódicos que se realizan en el laboratorio. Se tomaron tres muestras de 500 mL en cada punto por tres días durante el transcurso de una semana, y se repitió el muestreo por dos semanas más.



**Figura 2.1.** Configuración de puntos de muestreo en la piscina de almacenamiento de Co-

### 2.1.2. DETERMINACIÓN DE PH, TEMPERATURA Y CONDUCTIVIDAD

El pH, temperatura y conductividad se determinaron en cada muestra el mismo día del muestreo, se usó un equipo multiparámetros cuyas características se detallan en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Equipo utilizado en la determinación de pH, temperatura y conductividad

Equipo	Marca	Capacidad	Sensibilidad
Analizador de multiparámetros	Consort/C3010	pH: -2...+16 pH mV: $\pm 2\ 000$ mV Conductividad: 0- 2 000 mS/cm Temperatura: -5- +105°C	0,001 pH to 0,1 pH. 0,1 mV to 1 mV. 0,01 $\mu$ S/cm to 200 mS/cm 0,001 $\mu$ S/cm to 20 mS/cm 0,1 $\mu$ S/cm to 2 000 mS/cm 0,1°C

### 2.1.3. DETERMINACIÓN DE LA DUREZA DEL AGUA

Para la determinación de la dureza del agua en cada muestra, el procedimiento usado como base se tomó de la STANDARD METHODS (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, 1985, pp. 209-213).

Fue necesaria la preparación de soluciones, además de la normalización de las mismas frente a patrones determinados que se detallan en el Anexo I.



#### 2.1.4. DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD DEL AGUA

Para la determinación de la alcalinidad del agua en cada muestra, el procedimiento usado como base se tomó de la STANDARD METHODS (American Public Health Association et al., 1985, pp. 269-273).

Fue necesaria la preparación de soluciones, además de la normalización de las mismas frente a patrones determinados que se detallan en el Anexo II.

#### 2.1.5. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE LANGELIER

Para el cálculo del índice de Langelier se utilizaron los parámetros calculados o medidos previamente en el apartado 2.1, como son:

- pH
- temperatura
- conductividad
- alcalinidad
- dureza

Se calculó el índice de Langelier para cada una de las muestras, según las fórmulas 2.1 a la 2.6.

$$I_L = \text{pH} - \text{pH}_s \quad [2.1]$$

$$\text{pH}_s = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad [2.2]$$

Donde:

$$A = (\log_{10}[\text{TDS}] - 1)/10 \quad [2.3]$$

$$B = -13,12 \times \log_{10}(\text{°C} + 273) + 34,55 \quad [2.4]$$

$$C = \log_{10}[\text{Ca}^{2+} \text{ como CaCO}_3] - 0,4 \quad [2.5]$$

$$D = \log_{10}[\text{alcalinidad como CaCO}_3] \quad [2.6]$$

Posteriormente se calculó la desviación estándar del índice de Langelier para todas las muestras de agua. Esta desviación debía ser menor al 10% (Jurado, 2008, p.2) para así asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos y de esta manera poder caracterizar el agua de la piscina.

## **2.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO Y CARBÓN ACTIVADO**

### **2.2.1. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO IÓNICO**

Para el muestreo de las resinas se homogenizó cada uno de los tanques y posteriormente se tomó 20 muestras, tanto de la resina aniónica como de la catiónica. Con cada una de las muestras se siguió el procedimiento para determinación de la capacidad de intercambio iónico según la norma ASTM D2187 (ASTM, 2004, pp. 2-13).

#### **2.2.1.1. Pretratamiento de resinas de intercambio iónico**

Este método detalla el procedimiento para la conversión de una resina de intercambio iónico a una forma iónica conocida (ASTM, 2004, p. 2).

##### **a) Materiales y reactivos**

- El aparato de pretratamiento usado se puede observar en la figura 2.2, el cual consta de una columna de vidrio soportada verticalmente, con un diámetro interno de  $25 \pm 2,5$  mm y aproximadamente 1,5 m de longitud. El fondo de la columna es cerrado y con una salida de aproximadamente 6 mm de diámetro interno.

- El aparato para drenar constó de un embudo tipo buchner, con papel filtro y conectado a un frasco de succión de 1 L, una bomba de vacío, una torre de humidificación de gas de al menos 500 mL llena con 2/3 de material de relleno.

En la tabla 2.2 se detallan los reactivos utilizados para el pretratamiento de resinas de intercambio iónico.

**Tabla 2.2.** Reactivos utilizados para el pretratamiento de resinas de intercambio iónico

Nombre	Fórmula	Casa Comercial	Grado de Pureza
Ácido Clorhídrico (sp.gr. 1,19)	HCl	Merck	Reactivo
Cloruro de Sodio	NaCl	Merck	Reactivo
Hidróxido de Sodio	NaOH	Analema	Reactivo
Indicador azul de timol	C <sub>27</sub> H <sub>30</sub> O <sub>5</sub> S	Sigma Aldrich	Reactivo
Indicador Trapeolin O	C <sub>12</sub> H <sub>9</sub> N <sub>2</sub> NaO <sub>5</sub> S	Sigma Aldrich	Reactivo

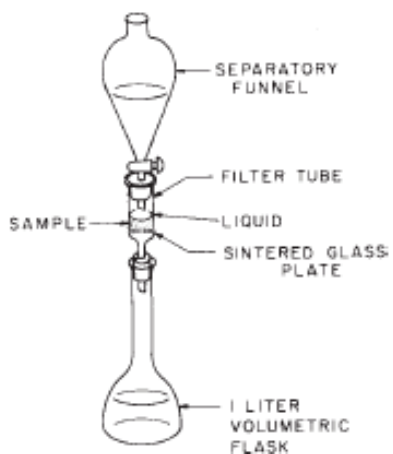
## b) Procedimiento

El procedimiento realizado fue tomado de la norma ASTM D2187, como se presenta en el Anexo IV.

### 2.2.1.2. Capacidad total de resinas de intercambio catiónico

#### a) Materiales y reactivos

- El aparato de prueba consistió de un embudo buchner de vidrio de por lo menos 30 mL de capacidad con un diámetro de por lo menos 20 mm que contenga una placa de vidrio grueso sinterizado, un embudo separador de 1 L de capacidad y un frasco volumétrico de 1 L de capacidad como se puede observar en la figura 2.2.



**Figura 2.2.** Aparato de prueba para la determinación de la capacidad total de resinas de intercambio catiónico (ASTM, 2004, p. 6)

- Bomba de vacío, capaz de crear una presión diferencial de 40 mmHg bajo la presión atmosférica.
- Botellas de 500 mL de capacidad con topes de vidrio.

En la tabla 2.3. se detallan los reactivos utilizados para la determinación de la capacidad total de resinas de intercambio catiónico.

**Tabla 2.3.** Reactivos utilizados para la determinación de la capacidad total de resinas de intercambio catiónico

Nombre	Fórmula	Casa Comercial	Grado de Pureza
Ácido Clorhídrico	HCl	Merck	Reactivo
Carbonato de Sodio	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Analar	Reactivo
Alcohol Isopropílico	CH <sub>3</sub> CH(OH)CH <sub>3</sub>	Riedel	Reactivo
Fenolftaleína	C <sub>2</sub> OH <sub>14</sub> O <sub>4</sub>	BDH Chemical	Reactivo
Hidróxido de Sodio	NaOH	Analema	Reactivo
Cloruro de Sodio	NaCl	Merck	Reactivo
Ftalato de Potasio Hidrogenado	C <sub>8</sub> H <sub>5</sub> O <sub>4</sub> K	Merck	Estándar primario

## b) Procedimiento

El procedimiento realizado fue tomado de la norma ASTM D2187, como se presenta en el Anexo IV.

### 2.2.1.3. Capacidad total de resinas de intercambio aniónico

#### a) Materiales y reactivos

Los materiales usados fueron los mismos usados para la determinación de la capacidad total de resinas de intercambio catiónico, detallados previamente en el apartado 2.2.1.2.

En la tabla 2.4. se detallan los reactivos utilizados para la determinación de la capacidad total de resinas de intercambio aniónico.

**Tabla 2.4.** Reactivos utilizados para la determinación de la capacidad total de resinas de intercambio aniónico

Nombre	Fórmula	Casa Comercial	Grado de Pureza
Hidróxido de Amonio	NH <sub>4</sub> OH	RP Carlo Erba	Reactivo
Ácido Clorhídrico	HCl	Merck	Reactivo
Alcohol Isopropílico	CH <sub>3</sub> CH(OH)CH <sub>3</sub>	Riedel	Reactivo
Ácido Nítrico	HNO <sub>3</sub>	Merck	Reactivo
Fenolftaleína	C <sub>2</sub> OH <sub>14</sub> O <sub>4</sub>	BDH Chemical	Reactivo
Cromato de Potasio	K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	Analar	Reactivo
Nitrato de Plata	AgNO <sub>3</sub>	BDH Chemical	Reactivo
Cloruro de Sodio	NaCl	Merck	Reactivo
Nitrato de Sodio	NaNO <sub>3</sub>	Riedel	Reactivo

## **b) Procedimiento**

El procedimiento realizado fue tomado de la norma ASTM D2187, como se presenta en el Anexo IV.

### **2.2.2. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE YODO DEL CARBÓN ACTIVADO**

Para el muestreo del carbón activado se procedió a homogenizar el carbón dentro del tanque y posteriormente se tomó 20 muestras del mismo. Con cada una de las muestras se siguió el procedimiento para determinación del índice de Yodo según la norma ASTM D1510 (ASTM, 2003, pp. 1-7).

#### **a) Materiales**

- Viales de vidrio
- Horno de secado de convección, capaz de mantener una temperatura de  $125 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Bureta de vidrio de  $25 \text{ cm}^3$ , graduada en  $0,05 \text{ cm}^3$
- Balanza analítica con sensibilidad de  $0,1 \text{ mg}$
- Centrífuga
- Frasco volumétrico,  $2\ 000 \text{ cm}^3$
- Embudo grande para empatar con el frasco volumétrico de  $2\ 000 \text{ cm}^3$
- Agitador
- Desecador

En la tabla 2.5 se detallan los reactivos utilizados para la determinación del Índice de Yodo del carbón activado.

**Tabla 2.5.** Reactivos utilizados para la determinación del Índice de Yodo del carbón activado

Nombre	Fórmula	Casa Comercial	Grado de Pureza
Yoduro de Potasio	KI	BDH Chemical Ltda.	Reactivo
Yodo	I <sub>2</sub>	Merck	Reactivo
Tiosulfato de Sodio	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * 5H <sub>2</sub> O	BDH Chemical Ltda.	Reactivo
Alcohol n amílico	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	Riedel	Reactivo
Ácido Sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Merck	Reactivo
Almidón	(C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub>	Riedel	Reactivo
Ácido salicílico	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	Riedel	Reactivo
Yodato de Potasio	KIO <sub>3</sub>	Merck	Grado analítico

## b) Procedimiento

El procedimiento realizado fue tomado de la norma ASTM D 1510, como se detalla en el Anexo V.

## 2.3. DETERMINACIÓN DE LA MEJOR COMBINACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO Y CARBÓN ACTIVADO PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE LA PISCINA

### 2.3.1. ADQUISICIÓN DE LAS RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO Y CARBÓN ACTIVADO

Se adquirieron dos tipos de resinas de intercambio aniónico y dos tipos de resinas de intercambio catiónico. En la tabla 2.6 se encuentran las especificaciones de las resinas.

**Tabla 2.6.** Características de las resinas de intercambio iónico usadas para la experimentación

<b>Material</b>	<b>Marca</b>	<b>Tipo</b>	<b>Capacidad de intercambio</b>
Resina aniónica	Lewatit	Forma anión cloruro (Cl <sup>-</sup> )	1,2 eq/L
Resina aniónica	SBG1P	Forma anión hidroxilo (OH <sup>-</sup> )	1,0 eq/L
Resina catiónica	HCR S / DOWEX	Forma catión sodio (Na <sup>+</sup> )	2,0 eq/L
Resina catiónica	LewatitMonoPlus	Forma catión sodio (Na <sup>+</sup> )	2,2 eq/L

### **2.3.2. REGENERACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO Y CARBÓN ACTIVADO**

Para regenerar las resinas de intercambio iónico se procedió a sumergir 100 mL de resina en la solución regenerante por aproximadamente 1 hora. En el caso de la resina catiónica, la solución regenerante fue ácido clorhídrico al 10%; en el caso de la resina aniónica, la solución regenerante fue Hidróxido de Sodio al 10%.

Posteriormente se procedió a enjuagar todas las resinas en agua destilada, hasta que la conductividad de salida al pasar por cada resina sea menor a 12  $\mu$ S/cm, y que adicionalmente el pH sea de 7 o muy cercano a este.

Con respecto al carbón activado, se lo enjuagó con agua destilada hasta que la conductividad de salida del agua al pasar por el carbón no varió.



### 2.3.3. COMBINACIÓN DE RESINAS Y CARBÓN ACTIVADO

Para este paso del procedimiento, se combinaron las resinas según la tabla 2.7.

**Tabla 2.7.** Combinación de resinas de intercambio iónico

<b>Combinación 1</b>	
Resina catiónica Lewatit	Resina aniónica SBG1P
<b>Combinación 2</b>	
Resina catiónica Lewatit	Resina aniónica Lewatit
<b>Combinación 3</b>	
Resina catiónica Lewatit Monoplus	Resina aniónica SBG1P
<b>Combinación 4</b>	
Resina catiónica Lewatit Monoplus	Resina aniónica Lewatit

En cada columna se colocó 50 mL de agua potable cuya conductividad fue medida antes de pasarla por las resinas. Se dejó que la resina actúe por alrededor de 30 min en cada muestra y se midió la conductividad luego de salir de cada columna. Se realizó el mismo procedimiento 3 veces y se registraron los resultados.

Luego de escoger la mejor combinación de carbón activado y resinas de intercambio iónico, se procedió a tratar el agua de la piscina con la combinación escogida hasta obtener valores de conductividad menor a 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (IAEA, 2010, p.56). Este procedimiento fue realizado con el objetivo de conocer la cantidad de veces que el agua de la piscina debe ser tratada para alcanzar la conductividad deseada.

## **2.4. DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA**

En primer lugar se hizo una evaluación visual de los equipos y tuberías del sistema actual de tratamiento de agua. Posteriormente se diseñaron los equipos que conforman el sistema, es así que primero se diseñó el filtro de arena, para lo cual se determinó el medio filtrante, las dimensiones y el material de construcción. Con todos estos datos se procedió a escoger de un catálogo el tanque más acorde a lo calculado.

Se procedió a diseñar el filtro de carbón activado. Se usó el EBCT encontrado en bibliografía para la remoción de cloro libre, y conjuntamente con el caudal de diseño se determinó las dimensiones y material de construcción. Con los resultados obtenidos se escogió en un catálogo el tanque apropiado según lo diseñado. Posteriormente se diseñaron los filtros de intercambio iónico, para lo cual se calculó la carga iónica del agua de entrada y con esto se pudo determinar las dimensiones de los tanques para luego ser escogidos en el catálogo de tanques de GE Water & Process Technologies.

Finalmente se procedió a la realización de los planos PFD y P&ID del sistema de tratamiento de aguas.

## **2.5. DISEÑO DEL SISTEMA REDUNDANTE DE REPOSICIÓN DEL AGUA DE LA PISCINA**

Para el diseño del sistema redundante de reposición del agua de la piscina se realizó una simulación para determinar la constante de descarga de la válvula. Con este valor se seleccionó la válvula de catálogo.

Posteriormente se procedió a simular varios posibles escenarios en los que se representó el vaciado de la piscina y la respuesta de los diferentes controles automáticos. Los distintos escenarios se detallan a continuación:

- Cuando existe falla en el control ON-OFF actual
- Cuando el control ON-OFF funciona correctamente
- Cuando entra en funcionamiento el control redundante PI

Para estas simulaciones se utilizó la herramienta Macros de MS EXCEL<sup>®</sup>, para determinar el tiempo que tarda en actuar los distintos controles, la variación de flujo y el nivel de agua de la piscina.

## **2.6. DETERMINACIÓN DE LA INVERSIÓN ECONÓMICA**

Con el rediseño calculado en las secciones anteriores, se determinó la inversión económica a realizarse en función de proformas de equipos obtenidas nacionalmente a empresas especializadas en diseño y construcción de plantas de tratamiento de aguas.

Se determinaron los costos de instalación mediante el método de estimación de factores múltiples, donde cada actividad aporta con una fracción del costo total de los equipos. De esta manera, el costo de tuberías y accesorios equivale al 33% del costo de los equipos, el costo de control e instrumentación equivale al 13%, la instalación eléctrica al 9% y la mano de obra de la instalación al 8% del costo de los equipos (Carrillo, 2007, p. 402).

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PH, CONDUCTIVIDAD, ALCALINIDAD Y DUREZA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE LANGELIER**

En esta sección se explica los resultados obtenidos de la determinación de los parámetros de pH, conductividad, alcalinidad y dureza para el cálculo del índice de Langelier.

##### **3.1.1. RESULTADOS DE PH, CONDUCTIVIDAD, TEMPERATURA Y CONDUCTIVIDAD**

A continuación se presentan las tablas 3.1, 3.2, y 3.3, las cuales detallan los resultados promedio obtenidos de pH, temperatura y conductividad de las muestras de agua tomadas de la piscina de almacenamiento de la fuente de Co-60.

En la tabla 3.1, se pueden observar los datos de pH, temperatura y conductividad medidos en todos los puntos de muestreo en el día 1. Es así que el pH se mantiene en un rango entre 8,39 y 8,47, con una desviación estándar de 0,02, lo que indica que las mediciones se encuentran muy cercanas unas de otras como se puede observar en la figura 3.1. La temperatura se mantiene en un rango de entre 16,50 a 17,60 grados centígrados, con una desviación estándar de 0,44, lo que indica la mínima variación entre los datos, como se puede ver representado en la figura 3.2. La conductividad se encuentra entre 373 y 407  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valores mayores a los máximos permitidos en instalaciones de irradiación (IAEA, 2010, p.56) y con una desviación estándar de 3,89, que muestra una mínima variación entre datos como se representa gráficamente en la figura 3.3.

**Tabla 3.1.** Resultados promedio de pH, temperatura y conductividad de las muestras de agua tomadas en la piscina en el día 1

Punto	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (µS/cm)
1	8,44	16,50	374,33
2	8,42	16,47	373,67
3	8,43	16,53	373,67
4	8,43	16,43	374,33
5	8,43	17,50	378,67
6	8,40	17,17	378,00
7	8,40	17,37	375,67
8	8,41	17,53	376,33
9	8,45	16,50	386,00
10	8,42	17,07	371,67
11	8,41	16,87	378,67
Promedio	8,42	16,90	376,45
Desviación Estándar	0,02	0,44	3,89

**Tabla 3.2.** Resultados promedio de pH, conductividad, temperatura y conductividad de las muestras de agua tomadas en la piscina en el día 2

Punto	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (µS/cm)
1	8,46	17,50	374,67
2	8,42	17,43	375,00
3	8,46	17,53	373,33
4	8,41	17,77	374,33
5	8,43	17,57	376,00
6	8,40	17,17	376,67
7	8,38	14,30	375,67
8	8,42	17,63	376,67
9	8,46	17,57	375,00

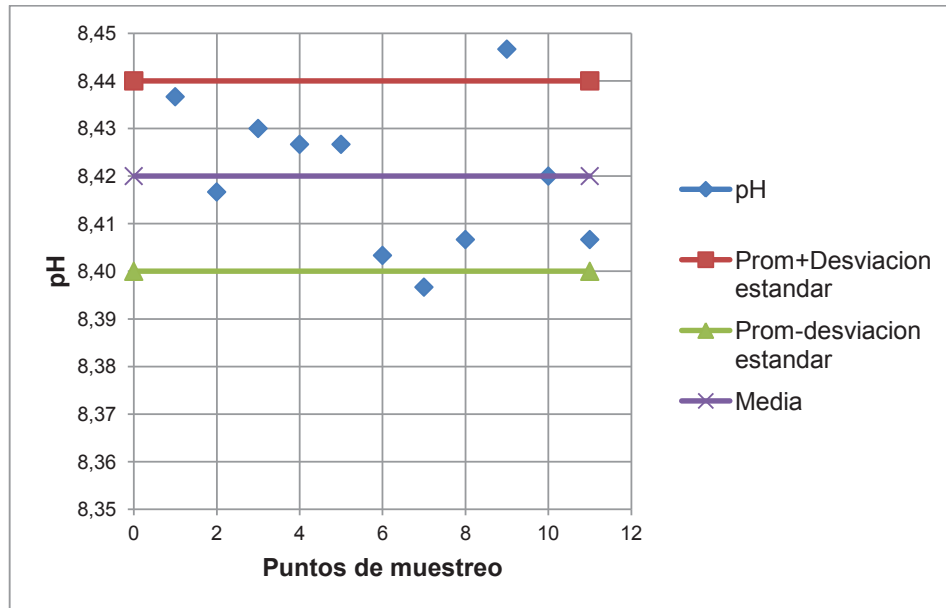
**Tabla 3.2.** Resultados promedio de pH, temperatura y conductividad de las muestras de agua tomadas en la piscina en el día 1 (continuación...)

<b>Punto</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Conductividad (μS/cm)</b>
10	8,43	17,50	373,33
11	8,44	17,20	377,33
Promedio	8,43	17,20	375,27
Desviación Estándar	0,03	0,98	1,33

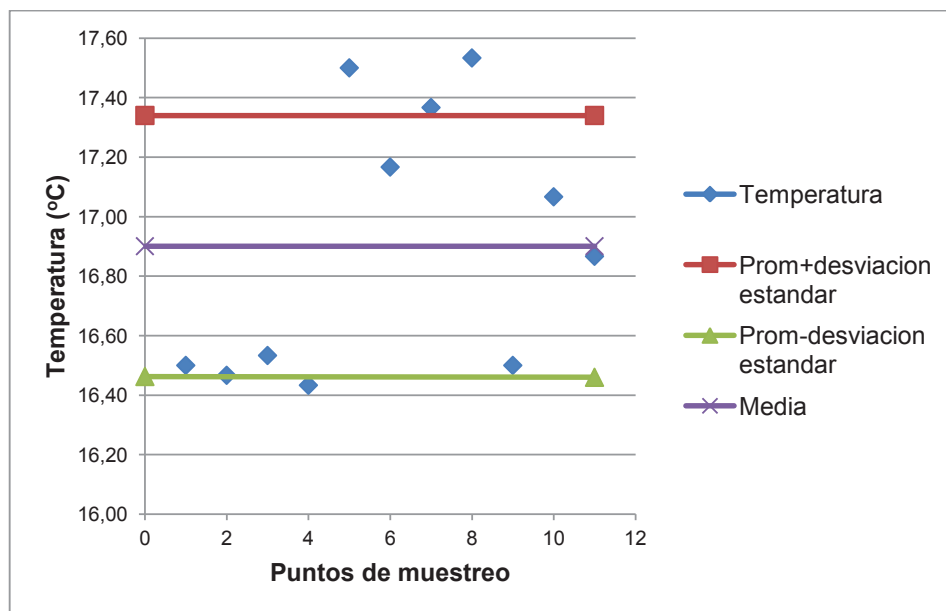
**Tabla 3.3** Resultados promedio de pH, conductividad, temperatura y conductividad de las muestras de agua tomadas en la piscina en el día 3

<b>Punto</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura ( C)</b>	<b>Conductividad (μS/cm)</b>
1	8,43	15,70	373,67
2	8,41	15,80	373,67
3	8,44	16,03	373,67
4	8,43	16,20	375,00
5	8,43	15,77	384,33
6	8,41	15,83	378,00
7	8,41	16,00	376,67
8	8,41	16,17	377,00
9	8,42	16,43	376,67
10	8,42	15,57	375,33
11	8,44	15,53	375,33
Promedio	8,42	15,91	376,30
Desviación Estándar	0,01	0,28	3,04

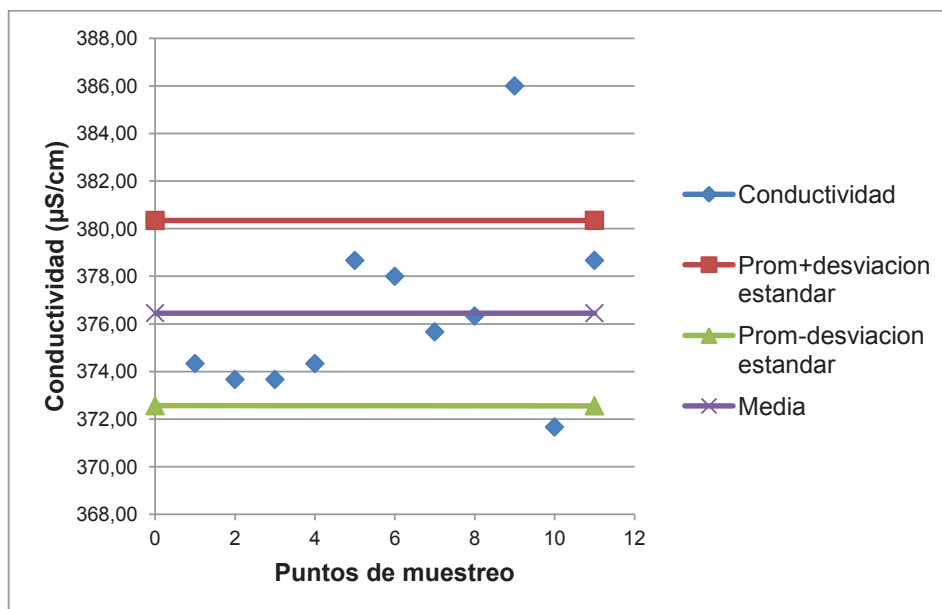
A continuación se muestran las figuras 3.1, 3.2 y 3.3, que son la representación gráfica de los resultados detallados en las tablas 3.1, 3.2, 3.3.



**Figura 3.1.** Representación gráfica del pH en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 1



**Figura 3.2.** Representación gráfica de la temperatura en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 1



**Figura 3.3.** Representación gráfica de la conductividad en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 1

En la tabla 3.2 se pueden observar los resultados referentes al día 2 de muestreo. Los valores de pH se encuentran en un rango de entre 8,39 y 8,55, con una desviación estándar de 0,04. La temperatura se mantiene entre 17,00 y 18,10 grados centígrados, con una desviación estándar de 1,73. Los valores de conductividad se encuentran entre 373 y 379  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valores mayores a los máximos permitidos en instalaciones de irradiación (IAEA, 2010, p.56). Las gráficas que representan la mínima variación entre los datos de pH, temperatura y conductividad se encuentran en el Anexo III.

En la tabla 3.3 se encuentran los resultados del día 3 de muestreo. Los valores de pH se encuentran entre 8,38 y 8,46, con una desviación estándar de 0,02. La temperatura se encuentra entre 15,50 y 16,50 grados centígrados, con una desviación estándar de 0,30. Los valores de conductividad se mantienen en un rango de entre 373 y 401  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valores mayores a los máximos permitidos en instalaciones de irradiación (IAEA, 2010, p.56). Las gráficas donde se puede observar la representación de los valores antes expuestos se encuentran en el Anexo III.



En general los valores obtenidos de pH son mayores a los permitidos según el Organismo Internacional de Energía Atómica que establece que el pH del agua en piscinas de almacenamiento de fuentes radioactivas debe mantenerse entre 7,5 y 8,0; de igual manera los valores de la conductividad medida son 35 veces más altos que los permitidos por la misma institución, ya que el valor máximo establecido es de 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (IAEA, 2010, p. 56). Estos valores obtenidos fuera de norma se deben a que no se ha realizado ningún tratamiento del agua de la piscina en más de cinco años.

Cabe recalcar que según los valores de desviación estándar en todos estos parámetros, se evidencia la repetitividad y reproducibilidad de los datos, lo que indica que los resultados obtenidos son estadísticamente confiables.

### 3.1.2. RESULTADOS DE ALCALINIDAD, DUREZA CÁLCICA E ÍNDICE DE LANGELIER

A continuación se presentan las tablas 3.4, 3.5, y 3.6, las cuales detallan los resultados promedio obtenidos de alcalinidad, dureza cálcica e Índice de Langelier de las muestras de agua tomadas de la piscina de almacenamiento de Co-60 por tres días.

**Tabla 3.4.** Resultados promedio de alcalinidad, dureza cálcica e Índice de Langelier de las muestras de agua tomadas en la piscina en el día 1

Punto de muestreo	Alcalinidad (mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$ )	Dureza cálcica (mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$ )	Índice de Langelier
1	137,20	77,92	0,42
2	135,77	80,98	0,42
3	138,63	79,45	0,43
4	137,20	77,92	0,41
5	137,20	76,39	0,42
6	137,20	79,45	0,41

**Tabla 3.4.** Resultados promedio de alcalinidad, dureza cálcica e Índice de Langelier de las muestras de agua tomadas en la piscina en el día 1 (continuación...)

<b>Punto de muestreo</b>	<b>Alcalinidad (mg CaCO<sub>3</sub>/L)</b>	<b>Dureza cálcica (mg CaCO<sub>3</sub>/L)</b>	<b>Índice de Langelier</b>
7	137,20	80,98	0,42
8	135,77	77,92	0,41
9	137,20	82,51	0,46
10	137,20	77,92	0,42
11	140,05	76,39	0,40
Promedio	137,33	78,89	0,42
Desviación Estándar	1,19	1,97	0,01

**Tabla 3.5.** Resultados de alcalinidad, dureza cálcica e Índice de Langelier de las muestras de agua tomadas en la piscina en el día 2

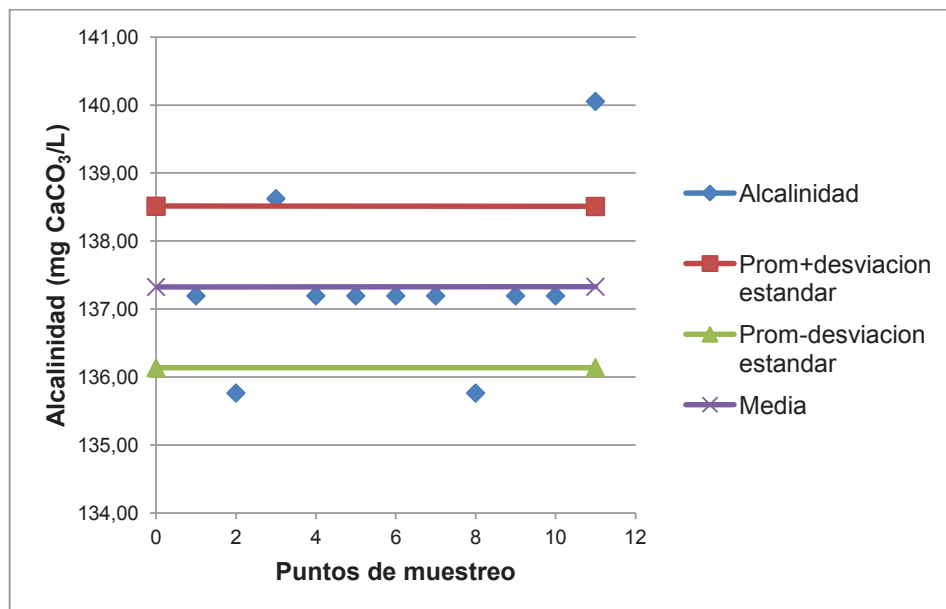
<b>Punto de muestreo</b>	<b>Alcalinidad (mg CaCO<sub>3</sub>/L)</b>	<b>Dureza cálcica (mg CaCO<sub>3</sub>/L)</b>	<b>Índice de Langelier</b>
1	135,77	79,45	0,47
2	135,77	77,92	0,42
3	137,20	82,51	0,50
4	137,20	74,87	0,40
5	137,20	79,45	0,45
6	137,20	79,45	0,41
7	137,20	79,45	0,34
8	138,63	76,39	0,43
9	135,77	80,98	0,48
10	138,63	74,87	0,42
11	135,77	77,92	0,44
Promedio	136,94	78,48	0,43
Desviación Estándar	1,07	2,39	0,04

**Tabla 3.6.** Resultados de alcalinidad, dureza cálcica e Índice de Langelier de las muestras de agua tomadas en la piscina en el día 3

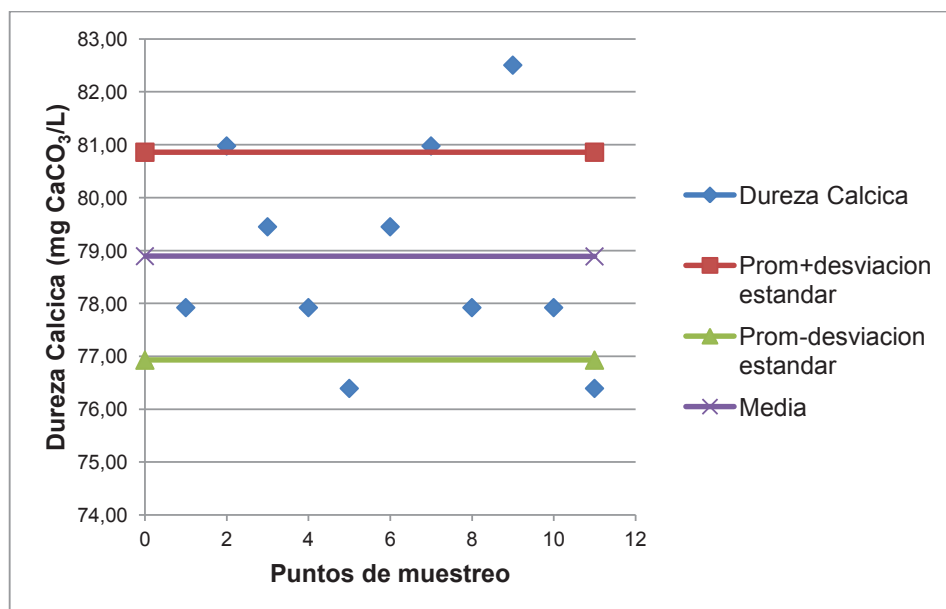
<b>Punto de muestreo</b>	<b>Alcalinidad (mg CaCO<sub>3</sub>/L)</b>	<b>Dureza cálcica (mg CaCO<sub>3</sub>/L)</b>	<b>Índice de Langelier</b>
1	137,20	74,87	0,39
2	137,20	79,45	0,40
3	138,63	77,92	0,42
4	134,34	77,92	0,40
5	137,20	77,92	0,40
6	135,77	76,39	0,37
7	137,20	77,92	0,38
8	134,34	77,92	0,38
9	135,77	82,51	0,43
10	135,77	77,92	0,38
11	140,05	74,87	0,40
Promedio	136,68	77,78	0,40
Desviación Estándar	1,72	2,10	0,02

A continuación se muestran las gráficas 3.4, 3.5 y 3.6 que representan gráficamente los resultados detallados en las tablas 3.4, 3.5 y 3.6.

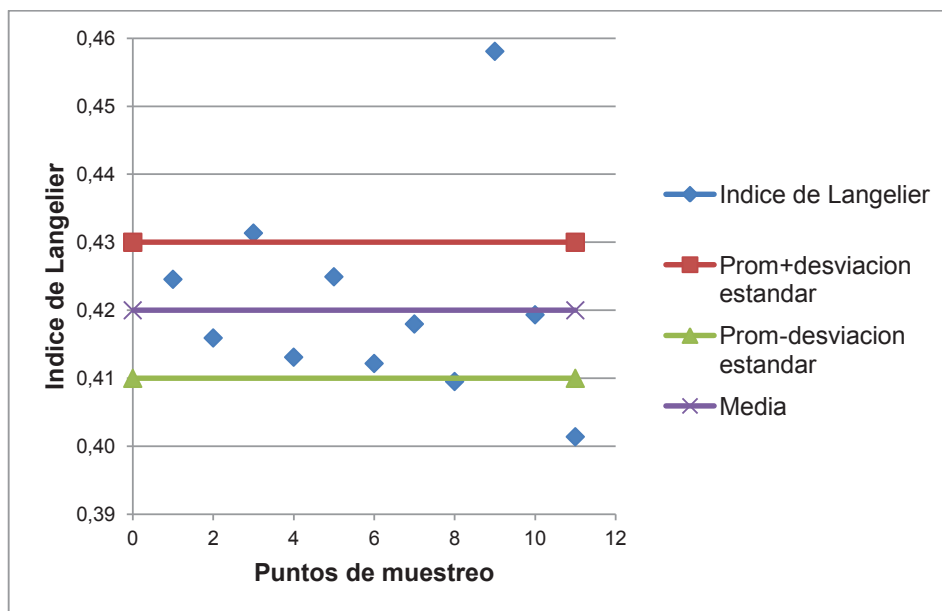
En la tabla 3.4, se pueden observar los datos de alcalinidad, dureza cálcica e Índice de Langelier medidos y calculados en todos los puntos de muestreo en el día 1. Es así que la alcalinidad se mantiene en un rango entre 137 y 140 mg CaCO<sub>3</sub>/L, con una desviación estándar de 1,19, lo que indica que las mediciones se encuentran muy cercanas unas de otras. La dureza cálcica se mantiene en un rango entre 76 y 82 mg CaCO<sub>3</sub>/L, con una desviación estándar de 1,97. El Índice de Langelier calculado con todos los parámetros anteriormente mencionados se encuentra entre 0,40 y 0,43, con una desviación estándar de 0,01. La representación gráfica de los parámetros mencionados se pueden observar en en el Anexo III.



**Figura 3.4.** Representación gráfica de la alcalinidad en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 1



**Figura 3.5.** Representación gráfica de la dureza cálcica en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 1



**Figura 3.6.** Representación gráfica del Índice de Langelier en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 1

En la tabla 3.5, se pueden observar los datos de alcalinidad, dureza cálcica e Índice de Langelier medidos y calculados en todos los puntos de muestreo en el día 2. Es así que la alcalinidad se mantiene en un rango entre 135 y 148 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ , con una desviación estándar de 1,07, lo cual indica que las mediciones se encuentran muy cercanas unas de otras. La dureza cálcica se mantiene en un rango de entre 74 y 78 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ , con una desviación estándar de 2,39. El Índice de Langelier calculado con todos los parámetros anteriormente mencionados se encuentra entre 0,41 y 0,47, con una desviación estándar de 0,04. La representación gráfica de los parámetros mencionados se pueden observar en el Anexo III.

En la tabla 3.6, se pueden observar los datos de alcalinidad, dureza cálcica e Índice de Langelier medidos y calculados en todos los puntos de muestreo en el día 3. Es así que la alcalinidad se mantiene en un rango entre 134 y 140 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ , con una desviación estándar de 1,72, lo cual indica que las mediciones se encuentran muy cercanas unas de otras. La dureza cálcica se mantiene en un rango entre 74 y 82 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ , con una desviación estándar de 2,10. El Índice de Langelier calculado con todos los parámetros anteriormente mencionados se encuentra entre 0,37 y 0,43, con una desviación estándar de 0,02. La

representación gráfica de los parámetros mencionados se pueden observar en el Anexo III.

A continuación se muestra la tabla 3.7, que detalla los resultados promedio del Índice de Langelier obtenidos.

**Tabla 3.7.** Resultados del Índice de Langelier promedio

	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>	<b>Día 3</b>
<b>Promedio Índice de Langelier</b>	0,42	0,43	0,40
<b>Índice de Langelier total</b>	<b>0,42</b>		

En la tabla 3.7 se detallan los valores promedio del Índice de Langelier calculado para cada día, y el valor del Índice de Langelier total que caracteriza el estado del agua de la piscina. El Índice de Langelier total tiene un valor de 0,42, este valor es mayor a cero, por lo tanto el agua está sobresaturada e indica que la misma tiene carácter incrustante (DeSousa et al., 2010, p. 189). Cabe señalar que Varó (2004), indica que si el índice de Langelier es mayor a 0,5 el agua es incrustante y si es menor a 0,5 es agresiva (p. 148). Si se toma en cuenta que el valor de 0,42 es muy cercano a 0,5, se concluye que el agua de la piscina de almacenamiento tiene carácter incrustante. Este resultado es favorable, ya que las vainas de Co-60 no corren riesgo de corrosión debido a la calidad de agua hasta el momento de realizados los análisis. Es importante mencionar que los parámetros medidos pueden variar en los próximos años provocando que la calidad del agua empeore y ponga en riesgo la integridad de las vainas de Co-60.

### **3.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO Y CARBÓN ACTIVADO**

En esta sección se explica los resultados obtenidos de la caracterización de las resinas de intercambio iónico y carbón activado.

### 3.2.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA RESINA DE INTERCAMBIO ANIÓNICO

A continuación se muestra la tabla 3.8, que detalla los resultados de la capacidad de intercambio aniónico.

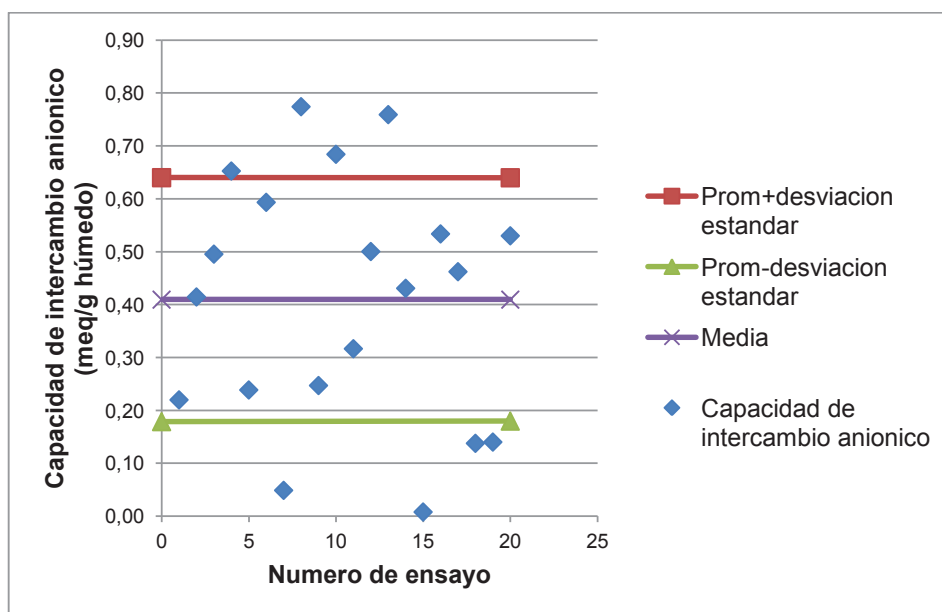
**Tabla 3.8.** Resultados de la capacidad de intercambio aniónico

Muestra	Capacidad de intercambio (meq/g húmedo)
1	0,22
2	0,41
3	0,50
4	0,65
5	0,24
6	0,59
7	0,05
8	0,77
9	0,25
10	0,68
11	0,32
12	0,50
13	0,76
14	0,43
15	0,01
16	0,53
17	0,46
18	0,14
19	0,14
20	0,53

**Tabla 3.9.** Resultados de los valores promedio de la capacidad de intercambio aniónico y la desviación estándar

<b>Promedio</b>	0,41
<b>Desviación</b>	0,23

A continuación se observa la figura 3.7 que representa gráficamente los valores obtenidos de capacidad de intercambio aniónico además de la representación de la desviación estándar obtenida.



**Figura 3.7.** Representación gráfica de la capacidad de intercambio aniónico y su desviación estándar

En la tabla 3.8 se detallan los resultados de la capacidad de intercambio iónico de la resina aniónica que se encuentra actualmente en el sistema de tratamiento de agua del LTR. Los valores de capacidad de intercambio se encuentran entre 0,008 y 0,58 meq/g húmedo, con un promedio de 0,41 meq/g húmedo y una desviación estándar de 0,23. El valor de la desviación es menor a 10 lo que indica homogeneidad en los valores calculados. Wachinski (1997), señala que los valores típicos de intercambio aniónico varían alrededor de 5 meq/g húmedo (p. 45), por lo tanto los valores obtenidos son excesivamente menores a los valores usuales, por lo que se concluye que la resina aniónica ya no se encuentra apta para cumplir sus funciones y debe ser reemplazada por una resina nueva.



### 3.2.2. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA RESINA DE INTERCAMBIO CATIONICO

A continuación se pueden observar las tablas 3.10 y 3.11 que detallan los resultados obtenidos de la capacidad de intercambio catiónico.

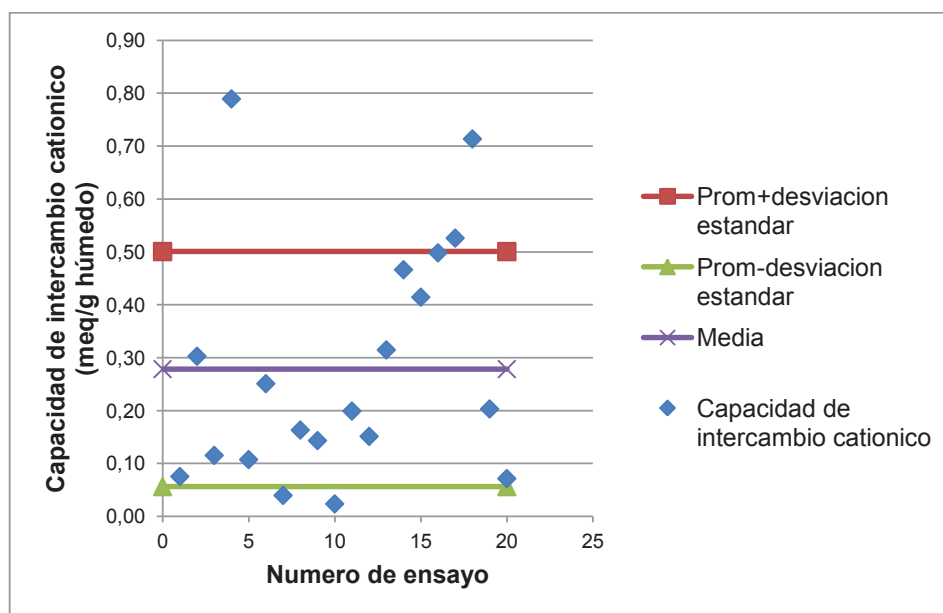
**Tabla 3.10.** Resultados de la capacidad de intercambio catiónico

Muestra	Capacidad de intercambio (meq/g húmedo)
1	0,08
2	0,30
3	0,12
4	0,79
5	0,11
6	0,25
7	0,04
8	0,16
9	0,14
10	0,02
11	0,20
12	0,15
13	0,31
14	0,47
15	0,41
16	0,50
17	0,53
18	0,71
19	0,20
20	0,07

**Tabla 3.11.** Resultados de los valores promedio de la capacidad de intercambio catiónico y la desviación estándar

Promedio	<b>0,28</b>
Desviación estándar	<b>0,22</b>

A continuación se presenta la figura 3.8, que representa gráficamente los valores obtenidos de intercambio catiónico.



**Figura 3.8.** Representación gráfica de la capacidad de intercambio catiónico y su desviación estándar

En la tabla 3.10 se detallan los resultados de la capacidad de intercambio iónico de la resina catiónica que se encuentra actualmente en el sistema de tratamiento de agua del LTR. Los valores de capacidad de intercambio se encuentran entre 0,03 y 0,70 meq/ g húmedo, con un promedio de 0,28 y una desviación estándar de 0,22 que se muestra en la tabla 3.11. El valor de la desviación estándar indica homogeneidad en los valores calculados. Long (1995), señala que los valores típicos de intercambio catiónico varían entre 2 a 5 meq/g húmedo (p. 398), por lo tanto los valores obtenidos son excesivamente menores a los valores usuales, por lo que se concluye que la resina catiónica ya no se encuentra apta para cumplir sus funciones y debe ser reemplazada por una resina nueva.

### 3.2.3. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

A continuación se observa la tabla 3.12 que detalla los resultados del índice de yodo del carbón activado.

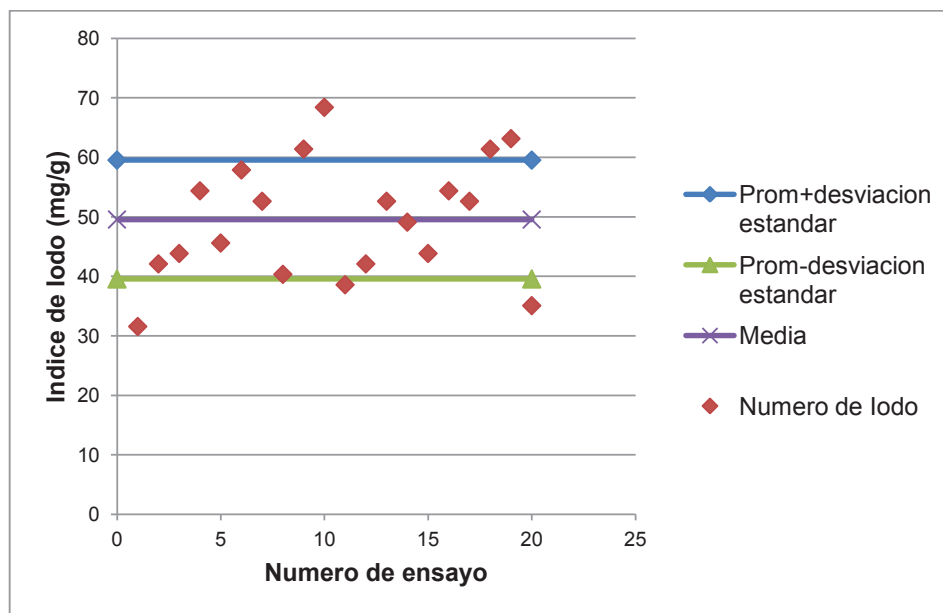
**Tabla 3.12.** Resultados del Índice de yodo del carbón activado

Muestra	Índice de yodo (mg/g)
1	31,57
2	42,09
3	43,85
4	54,37
5	45,60
6	57,88
7	52,62
8	40,34
9	61,39
10	68,40
11	38,59
12	42,09
13	52,62
14	49,11
15	43,85
16	54,37
17	52,62
18	61,39
19	63,14
20	35,08

**Tabla 3.13.** Resultados de los valores promedio del Índice de yodo y la desviación estándar

Promedio	49,55
Desviación estándar	9,98

A continuación se presenta la figura 3.9 que representa gráficamente los resultados obtenidos de la caracterización del carbón activado.



**Figura 3.9.** Representación gráfica del Índice de yodo y su desviación estándar

En la tabla 3.12. se detallan los resultados del Índice de Yodo para todas las muestras de carbón activado tomado del sistema de tratamiento de agua del LTR. El Índice de Yodo se encuentra entre 31 y 68 mg/g, con una desviación estándar de 9,98 como se muestra en la tabla 3.13. Se tiene un valor promedio del Índice de Yodo de 49,5 mg/g. Cooney (1999), señala que los valores típicos del índice de yodo se encuentran entre 800 y 1 000 mg/g. (p. 21). El valor obtenido es menor a los valores usuales de índice de yodo en carbón activado, por lo tanto se concluye que el carbón activado actual ha concluido su vida útil y debe ser reemplazado por un carbón activado nuevo. Adicionalmente cabe recalcar, que se observó la presencia de turbidez en el agua luego de colocar el carbón activado, es por esto que el nuevo carbón activado no debe presentar esta situación debido

a que es muy importante mantener el agua totalmente transparente para poder monitorear visualmente la fuente de Co-60.

### **3.3. DETERMINACIÓN DE LA MEJOR COMBINACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO Y CARBÓN ACTIVADO PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE LA PISCINA**

En esta sección se explica los resultados obtenidos de la determinación de la mejor combinación de resinas de intercambio iónico y carbón activado para el tratamiento del agua de la piscina.

#### **3.3.1. RESULTADOS DE LA MEJOR COMBINACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO Y CARBÓN ACTIVADO**

A continuación se observan las tablas 3.14, 3.15, 3.16 y 3.17 que detallan los resultados de conductividad de la combinación de carbón activado con las diferentes combinaciones de resinas de intercambio iónico.

En la tabla 3.14 se observan los valores de conductividad tanto del agua de entrada, como al paso por el carbón activado, por la resina catiónica DOWEX (Na-) y por la resina aniónica LEWATIT(Cl-). Se obtuvo un valor promedio de conductividad de salida de 9,80  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con una desviación estándar de 0,20, lo que indica que los valores son repetibles. El valor obtenido de conductividad se encuentra dentro de la norma establecida por el Organismo Internacional de Energía Atómica, que establece que la conductividad del agua de una piscina de almacenamiento de una fuente radioactiva debe ser menor a 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (IAEA, 2010, p.56).

**Tabla 3.14.** Resultados de conductividad de la combinación de carbón activado con resina catiónica DOWEX y resina aniónica LEWATIT

Día	Muestra	Conductividad del agua potable ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Conductividad después de pasar por carbón activado ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Conductividad después de pasar por resina catiónica DOWEX (Na- ) ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Conductividad después de pasar por resina aniónica LEWATIT(Cl-) ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Promedio ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
1	1	102,00	100,00	25,85	9,37	9,98
	2	103,00	103,00	27,10	9,77	
	3	102,00	102,00	23,43	10,81	
2	1	89,10	89,00	26,35	9,98	9,58
	2	89,00	88,00	26,01	9,01	
	3	89,00	88,00	28,67	9,75	
3	1	90,20	90,00	28,67	9,47	9,84
	2	90,20	90,00	25,26	10,15	
	3	90,20	89,00	27,10	9,89	
				<b>Desviación estándar</b>	<b>0,51</b>	<b>0,20</b>
				<b>Promedio</b>	<b>9,80</b>	<b>9,80</b>

**Tabla 3.15.** Resultados de conductividad de la combinación de carbón activado con resina catiónica DOWEX y resina aniónica SBG1P

Día	Muestra	Conductividad del agua potable ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Conductividad después de pasar por carbón activado ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Conductividad después de pasar por resina catiónica Dowex(Na-) ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Conductividad después de pasar por resina aniónica SBG1P(OH-) ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Promedio ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
1	1	104,00	103,20	13,37	9,39	8,72
	2	102,60	101,00	10,15	6,98	
	3	102,00	101,00	15,00	9,78	
2	1	85,20	85,00	20,20	8,50	8,88
	2	86,00	85,30	18,60	9,65	
	3	86,00	85,00	21,52	8,50	
3	1	105,60	104,30	23,54	9,02	9,18
	2	103,00	102,00	17,95	9,88	
	3	103,00	103,00	25,20	8,63	
				Desviación estándar	<b>0,91</b>	<b>0,23</b>
				Promedio	<b>8,93</b>	<b>8,93</b>

**Tabla 3.16.** Resultados de conductividad de la combinación de carbón activado con resina catiónica LEWATIT y resina aniónica LEWTIT

Día	Muestra	Conductividad del agua potable ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Conductividad después de pasar por carbón activado ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Conductividad después de pasar por resina catiónica Lewatit ( $\text{Na}^-$ ) ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Conductividad después de pasar por resina aniónica Lewatit ( $\text{Cl}^-$ ) ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Promedio ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
1	1	100,00	100,00	26,20	9,75	9,69
	2	98,30	97,50	25,00	9,71	
	3	100,00	99,00	24,30	9,60	
2	1	87,20	87,00	22,60	10,55	9,80
	2	87,40	87,20	26,45	9,86	
	3	87,00	86,20	23,38	9,00	
3	1	81,00	80,50	20,10	10,21	9,59
	2	82,10	82,10	22,10	9,32	
	3	81,60	80,80	22,00	9,25	
				Desviación estándar	<b>0,48</b>	<b>0,11</b>
				Promedio	<b>9,69</b>	<b>9,69</b>



**Tabla 3.17.** Resultados de conductividad de la combinación de carbón activado con resina catiónica LEWATIT y resina aniónica SBGIP

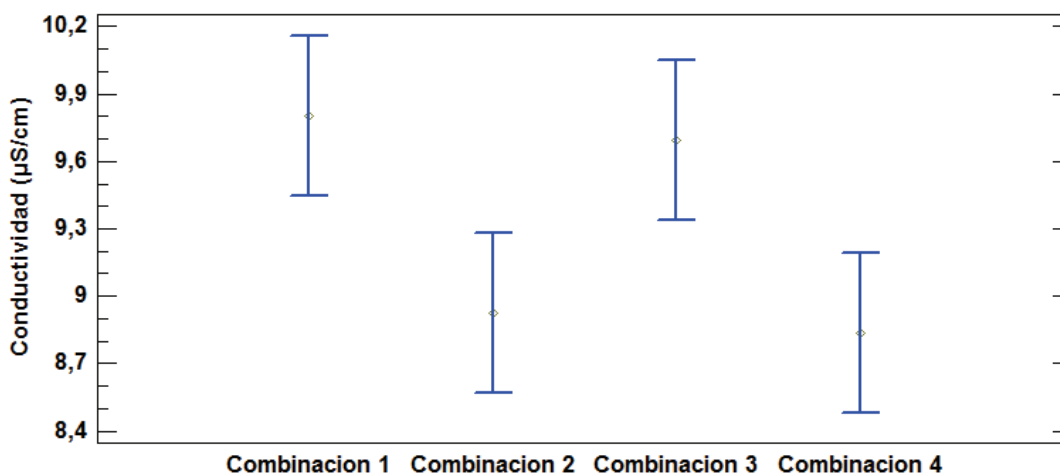
Día	Muestra	Conductividad del agua potable ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Conductividad después de pasar por carbón activado ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Conductividad después de pasar por resina catiónica Lewatit(Na-) ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Conductividad después de pasar por resina aniónica SBGIP(OH-) ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Promedio ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
1	1	93,80	93,00	28,23	9,89	9,57
	2	93,60	93,00	27,50	9,60	
	3	93,00	93,00	23,20	9,23	
2	1	87,60	87,00	19,80	7,65	8,29
	2	86,90	85,80	20,40	8,21	
	3	87,50	87,40	28,10	9,02	
3	1	98,30	98,10	28,40	7,25	8,65
	2	97,00	96,00	27,30	9,74	
	3	97,60	96,20	25,70	8,96	
				Desviación estándar		<b>0,94</b>
				Promedio		<b>8,84</b>

En la tabla 3.15, se observan los valores de conductividad tanto del agua de entrada, como al paso por el carbón activado, por la resina catiónica DOWEX (Na-) y por la resina aniónica SBG1P(OH-). Se obtuvo un valor promedio de conductividad de 8,93  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con una desviación estándar de 0,23, lo que indica que los valores son repetibles. El valor obtenido de conductividad se encuentra dentro de la norma establecida por el Organismo Internacional de Energía Atómica, que establece que la conductividad del agua de una piscina de almacenamiento de una fuente radioactiva debe ser menor a 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (IAEA, 2010, p.56).

En la tabla 3.16, se observan los valores de conductividad tanto del agua de entrada, como al paso por el carbón activado, por la resina catiónica LEWATIT (Na-) y por la resina aniónica LEWATIT(Cl-). Se obtuvo un valor promedio de conductividad de 9,69  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con una desviación estándar de 0,11, lo que indica que los valores son repetibles. El valor obtenido de conductividad se encuentra dentro de la norma establecida por el Organismo Internacional de Energía Atómica, que establece que la conductividad del agua de una piscina de almacenamiento de una fuente radioactiva debe ser menor a 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (IAEA, 2010, p.56).

En la tabla 3.17, se observan los valores de conductividad tanto del agua de entrada, como al paso por el carbón activado, por la resina catiónica LEWATIT(Na-) y por la resina aniónica SBG1P(OH-). Se obtuvo un valor promedio de conductividad de 8,84  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con una desviación estándar de 0,66, lo que indica que los valores se mantienen cercanos unos a otros. El valor obtenido de conductividad se encuentra dentro de la norma establecida por el Organismo Internacional de Energía Atómica, que establece que la conductividad del agua de una piscina de almacenamiento de una fuente radioactiva debe ser menor a 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (IAEA, 2010, p.56).

A continuación se observa la figura 3.10 que es la representación gráfica de medias para la conductividad de salida de cada una de las combinaciones.



**Figura 3.10.** Gráfica de medias de los valores de conductividad obtenidos con cada una de las combinaciones de resinas.

Se puede saber qué media es significativamente diferente al ver si un par de intervalos se traslapan o no en dirección vertical (StatPoint, 2005, p. 15). En el caso de la figura 3.10, se puede observar que las combinaciones 1 y 3 se traslapan, lo que indica que los resultados de éstas son estadísticamente iguales. De igual manera con las combinaciones 2 y 4 se observa el mismo fenómeno. La gráfica también demuestra que se obtienen mejores resultados con las combinaciones 2 y 4, ya que la conductividad de salida es menor a la obtenida por las demás combinaciones. Este resultado es debido a la presencia de la resina aniónica SBG1P (OH<sup>-</sup>), que tiene mejores resultados en desmineralización de agua.

### **3.3.2. RESULTADOS DE LA CANTIDAD DE VECES QUE EL AGUA DE LA PISCINA DEBE PASAR POR LAS RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO PARA OBTENER VALORES MENORES A 10 µS/cm**

A continuación se observan las tablas 3.18 y 3.19 que detallan el número de veces que debe ser tratada el agua de la piscina para obtener valores de conductividad menores a 10 µS/cm. Para tratar el agua se usaron las 2

combinaciones que arrojaron mejores resultados para disminuir la conductividad del agua.

En la tabla 3.18 se detallan los resultados al tratar el agua de la piscina de almacenamiento con la combinación 2 de resinas de intercambio iónico. Fue necesario pasar el agua de la piscina tres veces por el sistema para obtener valores de conductividad menores a 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Se obtuvo un valor promedio de conductividad de salida de 6,74  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con una desviación estándar de 0,95, lo que indica que los valores son repetibles. El valor obtenido de conductividad se encuentra dentro de la norma establecida por el Organismo Internacional de Energía Atómica, que establece que la conductividad del agua de una piscina de almacenamiento de una fuente radioactiva debe ser menor a 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (IAEA, 2010, p.56).

En la tabla 3.19 se detallan los resultados al tratar el agua de la piscina de almacenamiento con la combinación 4 de resinas de intercambio iónico. Fue necesario pasar el agua de la piscina tres veces por el sistema para obtener valores de conductividad menores a 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Se obtuvo un valor promedio de conductividad de salida de 6,48  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con una desviación estándar de 0,82, lo que indica que los valores son repetibles. El valor obtenido de conductividad se encuentra dentro de la norma establecida por el Organismo Internacional de Energía Atómica, que establece que la conductividad del agua de una piscina de almacenamiento de una fuente radioactiva debe ser menor a 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (IAEA, 2010, p.56)

**Tabla 3.18.** Resultados de la cantidad de veces que se debe tratar el agua de la piscina con la combinación 2

Día	Muestra	Conductividad del agua de la piscina ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Conductividad después de pasar por carbón activado	Conductividad después de pasar por resina Dowex(Na-) (1)	Conductividad después de pasar por resina SBGIP(OH-) (1)	Conductividad después de pasar por resina Dowex(Na-)(2)	Conductividad después de pasar por resina SBGIP (OH-)(2)	Conductividad después de pasar por resina catiónica Dowex(Na-)(3)	Conductividad después de pasar por resina SBGIP (OH-)(3)	Promedio
1	1	379,12	379,12	201,36	135,12	76,23	25,36	9,85	5,00	5,71
	2	369,25	369,25	195,21	131,28	79,50	27	10,23	6,11	
	3	373,00	373,00	196,02	129,36	66,97	22,6	8,74	6,02	
2	1	373,27	373,27	187,95	125,67	69,38	23,71	9,07	6,89	7,56
	2	381,32	381,32	205,31	134,42	72,25	23,99	9,58	7,92	
	3	376,41	376,41	191,54	132,83	71,00	22,54	9,36	7,88	
3	1	377,05	377,05	199,66	134,76	68,82	20,83	9,05	6,99	6,96
	2	375,11	375,11	185,74	128,39	64,63	20,14	8,71	6,34	
	3	378,00	378,00	194,23	119,85	60,79	18,27	8,02	7,55	
								<b>Desviación estándar</b>	<b>0,97</b>	<b>0,95</b>
								<b>Promedio</b>	<b>6,74</b>	<b>6,74</b>

**Tabla 3.19.** Resultados de la cantidad de veces que se debe tratar el agua de la piscina con la combinación 4

Día	Muestra	Conductividad del agua de la piscina ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Conductividad después de pasar por carbón activado	Conductividad después de pasar por resina Lewatit(Na-) (1)	Conductividad después de pasar por resina SBG1P(OH-) (1)	Conductividad después de pasar por resina Lewatit(Na-) (2)	Conductividad después de pasar por resina SBG1P(OH-) (2)	Conductividad después de pasar por resina Lewatit(Na-) (3)	Conductividad después de pasar por resina SBG1P(OH-) (3)	Promedio
1	1	375,15	375,15	205,25	138,91	73,69	22,47	9,08	7,80	7,41
	2	374,56	374,56	198,30	136,75	73,01	21,96	8,96	7,26	
	3	374,00	374,00	203,00	141,03	75,95	24,25	9,85	7,18	
2	1	378,31	378,31	195,61	132,67	69,61	20,05	7,62	6,07	6,18
	2	380,28	380,28	196,32	135,09	71,36	20,58	7,99	6,21	
	3	381,01	381,01	196,97	136,88	72,84	21,63	8,23	6,25	
3	1	373,51	373,51	188,44	127,12	61,32	18,67	7,55	6,06	5,85
	2	375,40	375,40	187,65	127,00	61,02	18,64	7,45	5,87	
	3	375,33	375,33	186,84	126,42	60,84	17,89	7,23	5,63	
								<b>Desviación estándar</b>	<b>0,74</b>	<b>0,82</b>
								<b>Promedio</b>	<b>6,59</b>	<b>6,48</b>

### **3.4. DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL AGUA**

#### **3.4.1. EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE TRATAMIENTO DE AGUA**

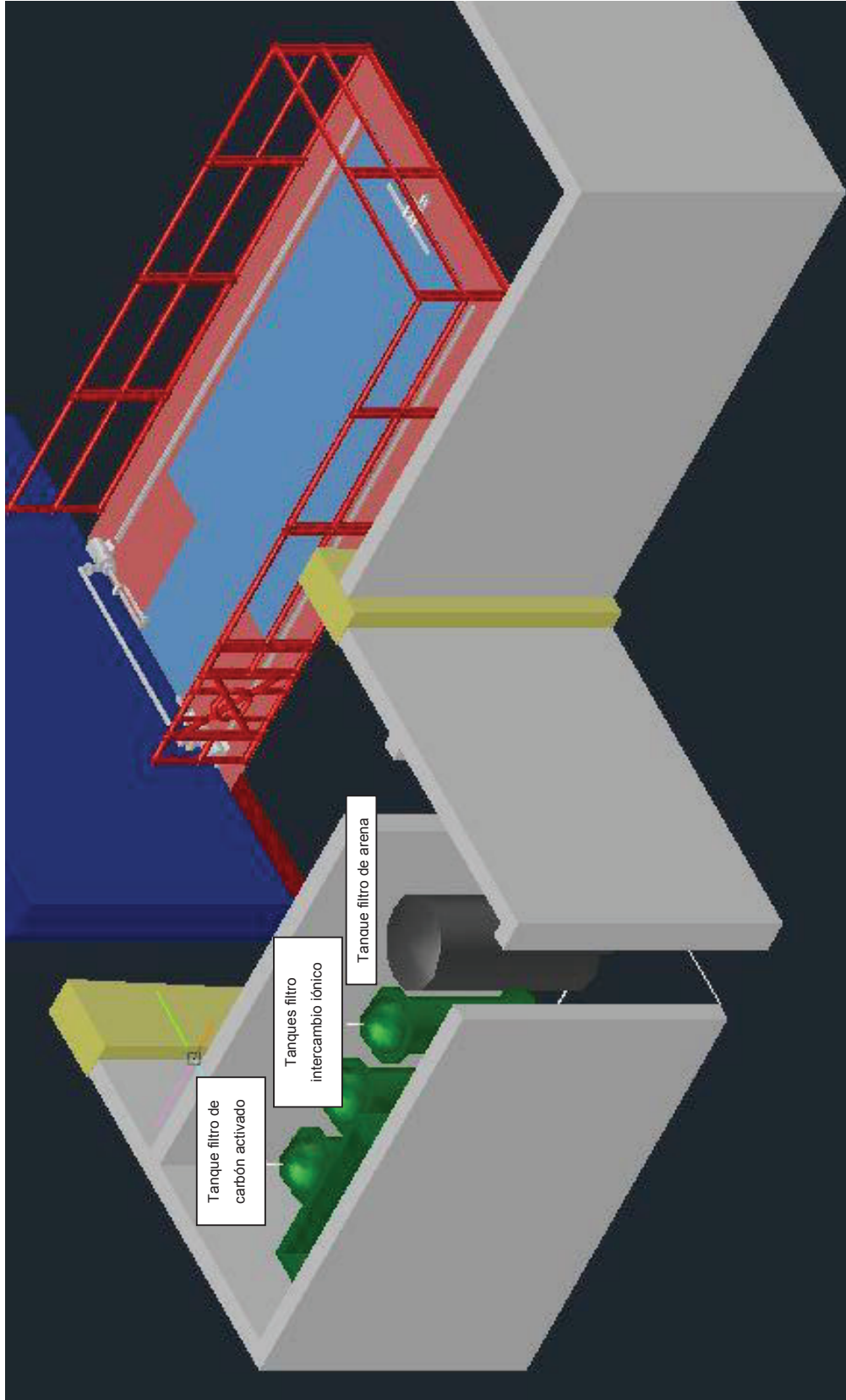
El sistema actual de tratamiento de agua de la piscina de almacenamiento de Co-60 del LTR, consta de un filtro de arena, un filtro de carbón activado, dos filtros de intercambio iónico, una cisterna de almacenamiento de agua, y dos tanques con químicos usados para la regeneración de las resinas de intercambio iónico.

El filtro de arena se encuentra en buenas condiciones, sin signos de corrosión externa ni interna, pero no se le ha hecho un retrolavado al mismo desde hace más de cinco años, lo que no garantiza que el mismo esté cumpliendo su función.

Tanto el filtro de carbón activado como los filtros de intercambio iónico, no presentan corrosión interna ni externa, y luego de la caracterización tanto de las resinas como del carbón activado, los datos obtenidos previamente demuestran que deben ser reemplazados por materiales nuevos.

Las tuberías fueron reemplazadas por tuberías de PVC, lo que garantiza su buen funcionamiento y se evita la corrosión.

En la figura 3.11 se observa una vista isométrica del actual sistema de tratamiento de aguas del Laboratorio de Tecnología de Radiaciones. En la figura mencionada se observa la piscina y el cuarto de tratamiento de aguas con los tres filtros de carbón activado y resinas de intercambio iónico, además del filtro de arena, y el tanque de almacenamiento de agua.



**Figura 3.11.** Vista isométrica del sistema actual de tratamiento de aguas



### 3.4.2. DIMENSIONAMIENTO DEL FILTRO DE ARENA

Para este equipo se decidió el uso de un filtro multimedia, que es más eficiente que un filtro de arena, debido a las mayores velocidades de filtración y a las corridas más largas (Nalco, 2009, p. 6.37). Este filtro va a poseer cuatro capas de medios filtrantes y será de fibra de vidrio. En la parte inferior para cubrir los distribuidores, se tendrá grava, seguido de granate, arena 30-40 y antracita. Para realizar un retrolavado efectivo se debe usar un flujo de 5,25 gpm, según los cálculos explicados en el Anexo VIII. A medida que se acumulan los sólidos, menos agua pasa a través del filtro; es por esta razón que el retrolavado del mismo es un factor muy importante.

En la tabla 3.20 se detalla las dimensiones del filtro multimedia según los cálculos realizados y en la tabla 3.21 se observan las dimensiones del mismo de acuerdo al catálogo de GE Water Process and Technologies.

**Tabla 3.20.** Dimensiones calculadas del filtro multimedia del sistema de tratamiento de aguas

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Capacidad	V	0,009	m <sup>3</sup>
Diámetro del tanque	D	0,18	m
Altura del tanque	H	0,36	m

**Tabla 3.21.** Dimensiones del equipo según catálogo de GE Water Process and Technologies del filtro multimedia del sistema de tratamiento de aguas

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Capacidad	V	0,033	m <sup>3</sup>
Diámetro del tanque	D	0,20	m
Altura del tanque	H	1,12	m
Volumen de grava	h1	0,004	m <sup>3</sup>

**Tabla 3.21.** Dimensiones del equipo según catálogo de GE Water Process and Technologies del filtro multimedia del sistema de tratamiento de aguas (continuación)

Volumen del lecho de granate	h2	0,003	m <sup>3</sup>
Volumen del lecho de arena	h3	0,006	m <sup>3</sup>
Volumen del lecho de antracita	h4	0,013	m <sup>3</sup>

### 3.4.3. DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE PARA FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO

El tanque que contendrá carbón activado será de fibra de vidrio y el carbón activado a usar será granulado debido a que arroja mejores resultados en sistemas que usan lechos estáticos en los cuales el agua pasa a través de los mismos, mientras que el carbón activado en polvo es utilizado en sistemas bien agitados en los cuales el agua se encuentra siempre en movimiento con el carbón (Benjamin y Lawler, 2013, p. 263)

En la tabla 3.22 se pueden observar las dimensiones calculadas del tanque mencionado.

**Tabla 3.22.** Dimensiones calculadas del filtro de carbón activado del sistema de tratamiento de aguas

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Capacidad	V	0,066	m <sup>3</sup>
Diámetro del tanque	D	0,35	m
Altura del tanque	H	0,700	m
Volumen del lecho	h1	0,040	m <sup>3</sup>

En la tabla 3.23 se detallan las dimensiones según el equipo escogido en catálogo de GE Water Process and Technologies, el cual se observa en el Anexo IX.

**Tabla 3.23.** Dimensiones del equipo según equipo escogido de catálogo del filtro de carbón activado del sistema de tratamiento de aguas

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Capacidad	V	0,088	m <sup>3</sup>
Diámetro del tanque	D	0,305	m
Altura del tanque	H	1,219	m
Volumen del lecho	h1	0,040	m <sup>3</sup>

#### 3.4.4. DIMENSIONAMIENTO DE LOS FILTROS DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

Al dimensionar los filtros según la carga de iones en el agua a tratar, y según la capacidad de intercambio de cada resina, se obtuvo que el filtro de resina de intercambio aniónico tiene mayor capacidad que el filtro de intercambio catiónico, es así que para mantener la estética del sistema, se diseña el tanque catiónico del mismo tamaño que el aniónico (Carrillo, 2007, p. 96).

- **Filtro de resina de intercambio catiónico**

En la tabla 3.24, se detallan las dimensiones calculadas del tanque filtro de intercambio catiónico y los cálculos se muestran en el Anexo X.

**Tabla 3.24.** Dimensiones calculadas del filtro de intercambio catiónico del sistema de tratamiento de aguas

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Capacidad	V	0,053	m <sup>3</sup>
Diámetro del tanque	D	0,323	m
Altura del tanque	H	0,646	m
Volumen del lecho	h1	0,032	m <sup>3</sup>

En la tabla 3.25 se observan las dimensiones según el tanque seleccionado en el catálogo GE Water Process and Technologies. El tanque escogido tendrá las mismas dimensiones que el tanque de intercambio aniónico, para mantener la estética del sistema.

**Tabla 3.25.** Dimensiones según catálogo del tanque para el filtro de intercambio catiónico del sistema de tratamiento de aguas

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Capacidad	V	0,102	m <sup>3</sup>
Diámetro del tanque	D	0,330	m
Altura del tanque	H	1,37	m
Volumen del lecho	h1	0,061	m <sup>3</sup>

- **Tanque para el Filtro de resina de intercambio aniónico**

En la tabla 3.26, se detallan las dimensiones del tanque para el filtro de intercambio aniónico, y los cálculos realizados se observan en el Anexo X.

**Tabla 3.26.** Dimensiones calculadas del filtro de intercambio aniónico del sistema de tratamiento de aguas

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Capacidad	V	0,102	m <sup>3</sup>
Diámetro del tanque	D	0,402	m
Altura del tanque	H	0,804	m
Volumen del lecho	h1	0,061	m <sup>3</sup>

En la tabla 3.27 se observan las dimensiones según el tanque escogido en el catálogo de GE Process and Technology.

**Tabla 3.27.** Dimensiones según equipo escogido del catálogo del filtro de intercambio aniónico del sistema de tratamiento de aguas

<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Capacidad	V	0,102	m <sup>3</sup>
Diámetro del tanque	D	0,330	m
Altura del tanque	H	1,37	m
Volumen del lecho	h1	0,061	m <sup>3</sup>

#### 3.4.5. PLANOS PFD Y P&ID

La figura 3.12 es un PFD, diagrama de flujo del sistema de tratamiento de aguas. La figura 3.13 detalla un P&ID, Diagrama de instrumentación y tuberías, del sistema de tratamiento de aguas. Por último en la figura 3.14 se observa el P&ID de las entradas y salidas de la piscina de almacenamiento.

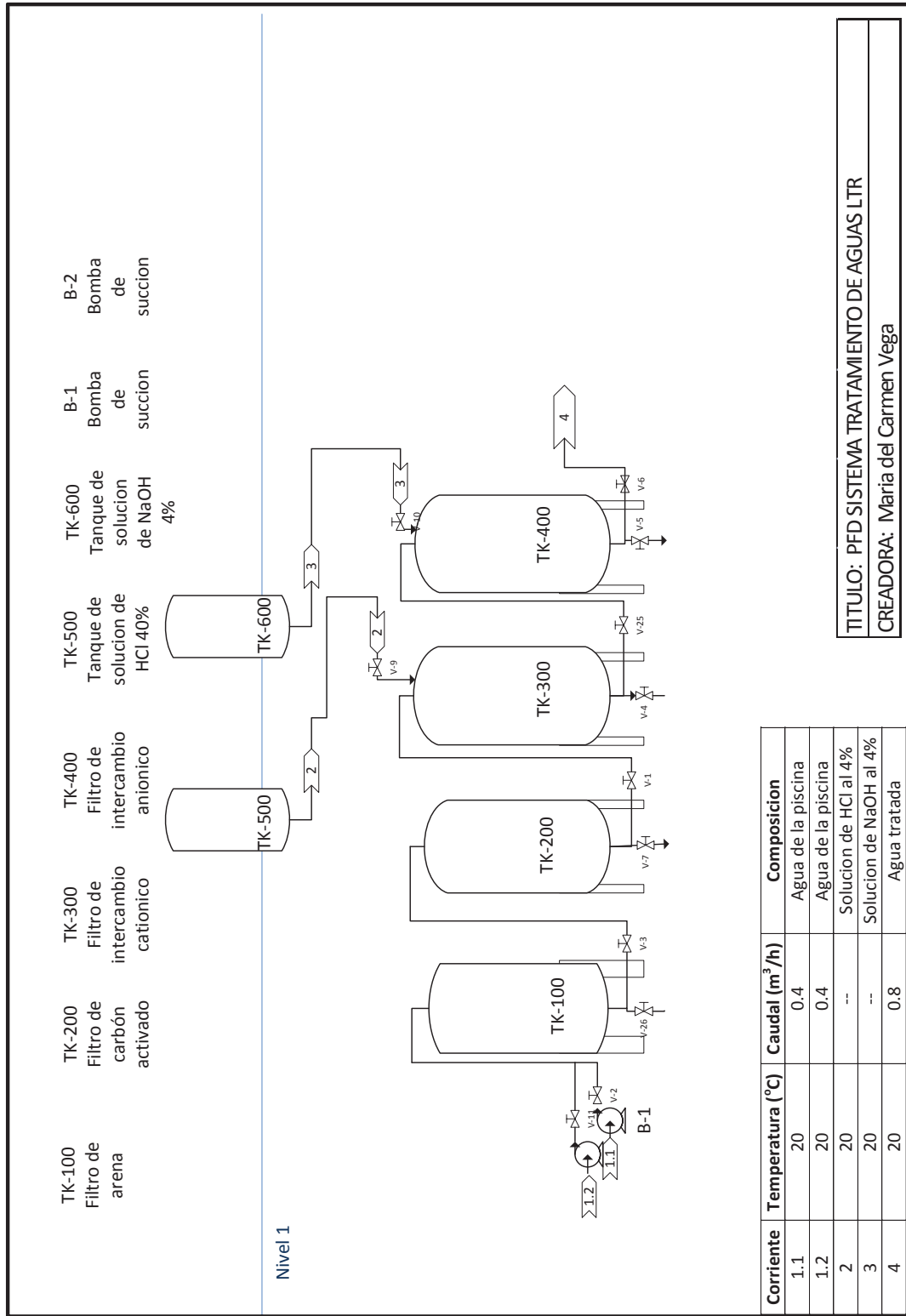


Figura 3.12. Diagrama de flujo de procesos del sistema de tratamiento de aguas del LTR

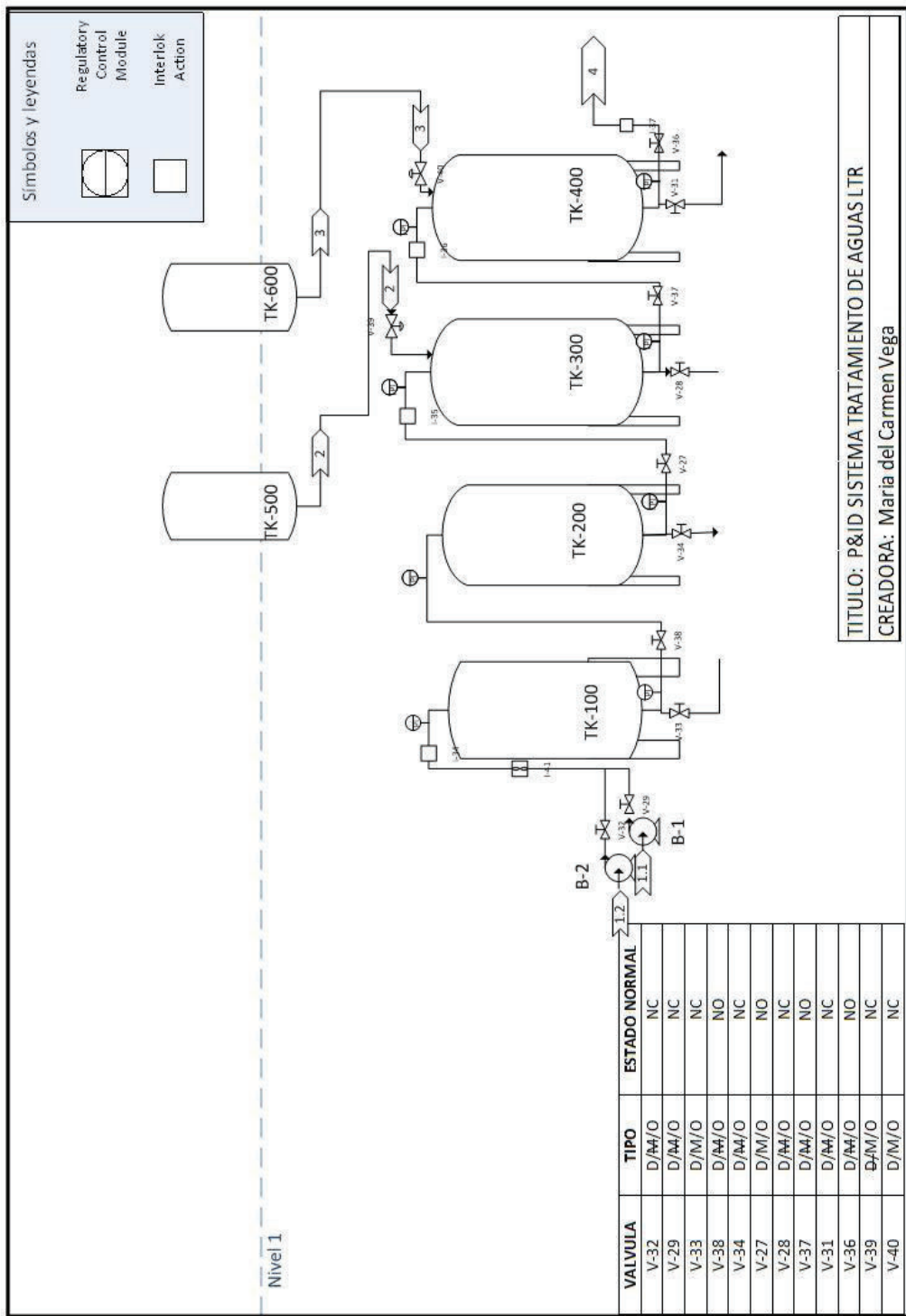
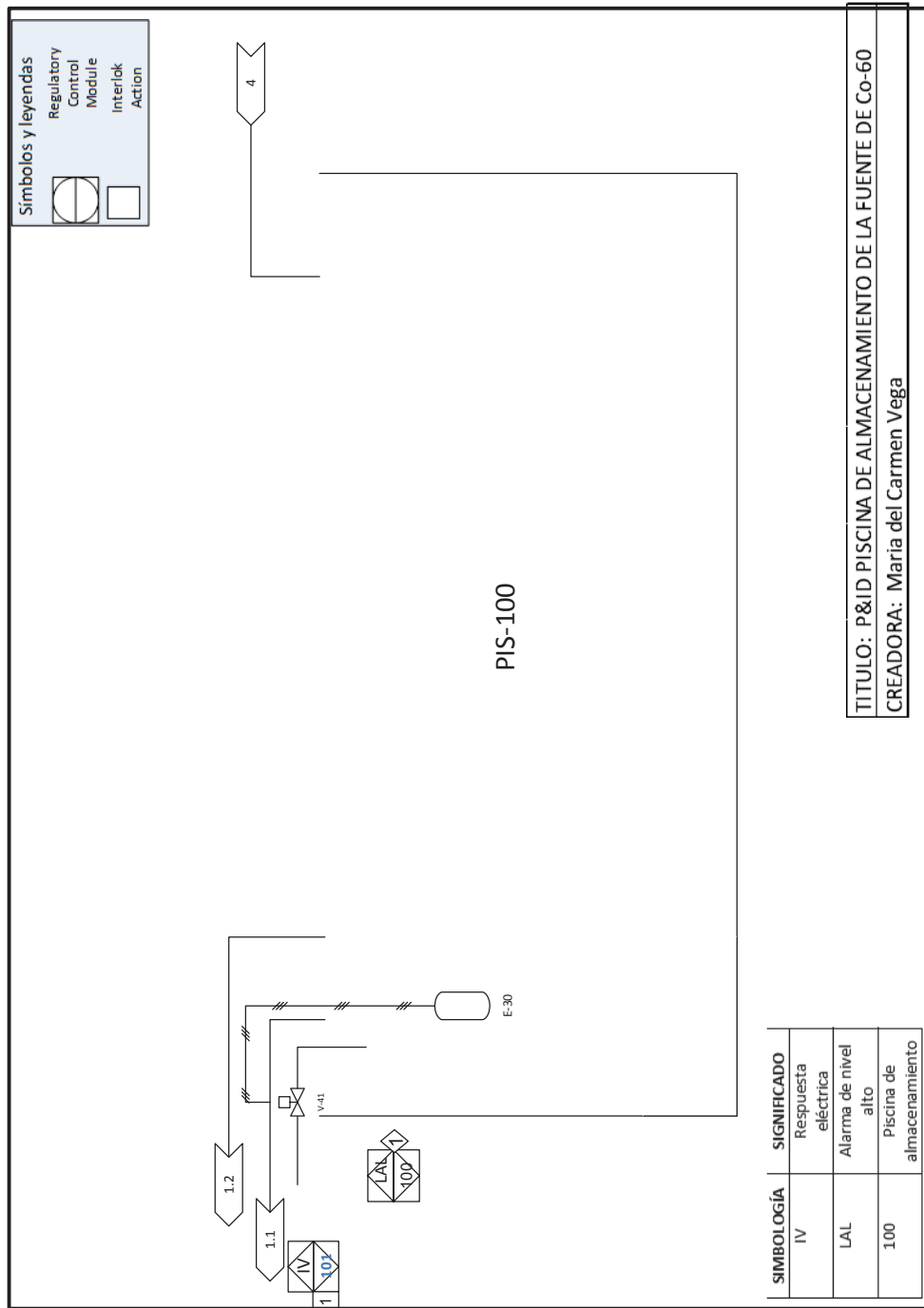


Figura 3.13. Diagrama de instrumentación y tuberías del sistema de tratamiento de aguas del LTR



**Figura 3.14.** Diagrama de instrumentación y tuberías de la piscina de almacenamiento de Co-60 del LTR



### 3.5. DISEÑO DEL SISTEMA REDUNDANTE DE REPOSICIÓN DEL AGUA DE LA PISCINA

En esta sección se detallan los resultados obtenidos en el diseño del sistema redundante de reposición del agua de la piscina de almacenamiento de Co-60.

#### 3.5.1. DIMENSIONAMIENTO DE LA VÁLVULA

A través de la simulación realizada se obtuvo el coeficiente de descarga de la válvula  $K_v$  con un valor de  $5,0 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{atm}^{0,5})$  y con el mismo se seleccionó el diámetro nominal que deberá tener la válvula que tiene un valor de 2 pulgadas. Con base en estos parámetros se escogió una válvula FISHER GX DN 50 NPS 2, del catálogo Fisher GX Control Valve and Actuator D103171X012 (Fisher, 2012, p. 28). Esta válvula fue escogida debido a que el valor de  $K_v$  es  $5,45 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{atm}^{0,5})$  a una apertura del 50%, el valor más cercano al obtenido mediante simulación. Como se detalla en la tabla 3.29 la válvula escogida tiene un diámetro de puerta de 30 mm y la distancia máxima de viaje tiene un valor de 20 mm. En la figura 3.15 se observa un esquema de este tipo de válvulas.



**Figura 3.15.** Esquema de una válvula de control Fisher GX

**Tabla 3.28.** Coeficientes de caudal de la válvula Fisher GX (Fisher, 2012, p. 28)

Tamaño de la válvula	Diámetro de puerta (mm)	Distancia máxima de recorrido (mm)	Coeficiente de Flujo	Porcentaje de abertura de la válvula				
				10	30	50	80	100
DN 50 (NPS 2)	46	20	Kv	0,931	3,24	8,20	26,7	37,8
	36	20	Kv	0,931	2,42	5,45	14,9	24,7
	22	20	Kv	0,511	1,04	2,17	6,12	12,4

Adicional al diseño de la válvula de control es importante mencionar que el sistema de reposición de agua de emergencia debe poseer alarmas de tipo sonoro y visual, para que en caso de que exista una disminución significativa del nivel de agua de la piscina, el personal del Laboratorio de Tecnología de Radiaciones sea alertado del evento.

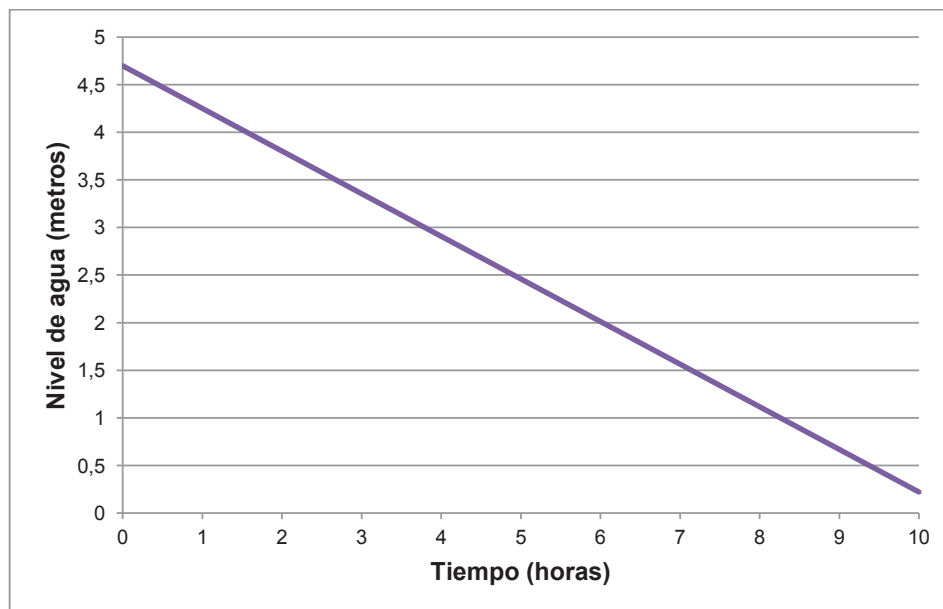
### 3.5.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN MS EXCEL

En esta sección se detallan los resultados obtenidos de la simulación en MS EXCEL para los controles On-Off y Redundante en las válvulas de entrada de agua a la piscina en caso de una emergencia.

#### 3.5.2.1. Escenario cuando existe una falla en el control On-Off actual

En esta sección se muestran los resultados de la simulación en el escenario cuando existe una falla en el control On-Off actual, es decir cuando el control se encuentra en la posición Off.

A continuación se muestra la figura 3.17 que representa el escenario cuando el primer control de nivel del agua de la piscina falla, simulando así que la piscina se vacía por completo.



**Figura 3.16.** Gráfica de la variación del nivel del agua a la piscina de almacenamiento versus tiempo cuando se simula la fuga de agua en una de las tuberías

En la figura 3.17 se observa la representación gráfica de la variación de la altura del nivel del agua de la piscina cuando se simula una fuga en la tubería de salida con respecto al tiempo. Como se puede observar el nivel de agua disminuye provocando que se vacíe la piscina en 10,5 horas, lo cual dejaría a la fuente de Co-60 sin blindaje y provocaría la exposición del personal que trabaja en el LTR a la radiación gamma.

### **3.5.2.2. Simulación del escenario en el cual el control On-Off funciona correctamente**

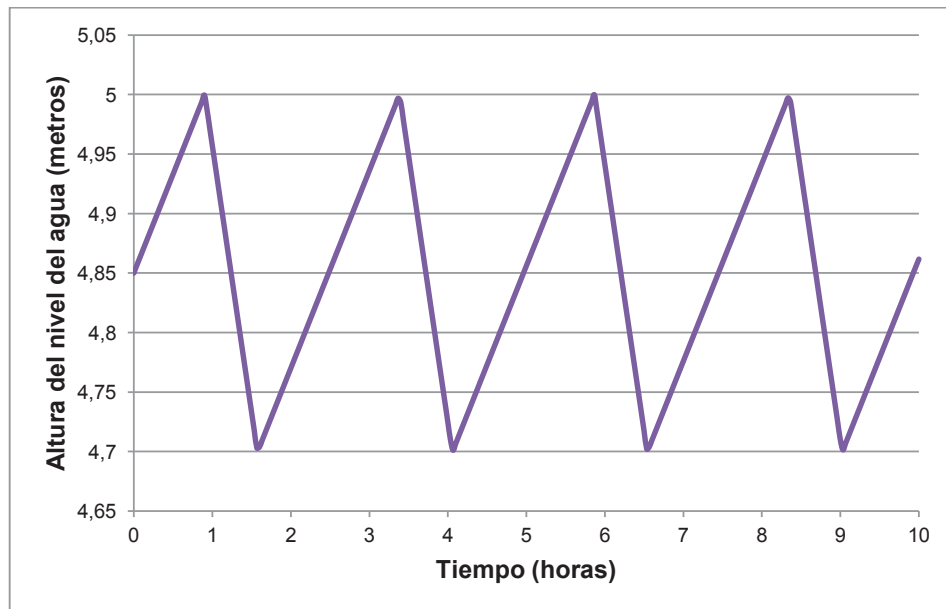
A continuación se presenta la tabla 3.25 que detalla los parámetros de simulación empleados para obtener las figuras 3.18 y 3.19 que muestran el resultado del comportamiento de la válvula ON-OFF cuando entra en funcionamiento al disminuir el nivel de la piscina bajo el mínimo permitido de 30 cm bajo el nivel normal.

En la tabla 3.25 se presentan los parámetros utilizados para simular en el escenario mencionado. Para la simulación fue necesario el uso de las dimensiones de la piscina, coeficiente de descarga de la válvula, peso específico del agua, nivel inicial del agua, así como el tiempo de simulación y el intervalo de tiempo.

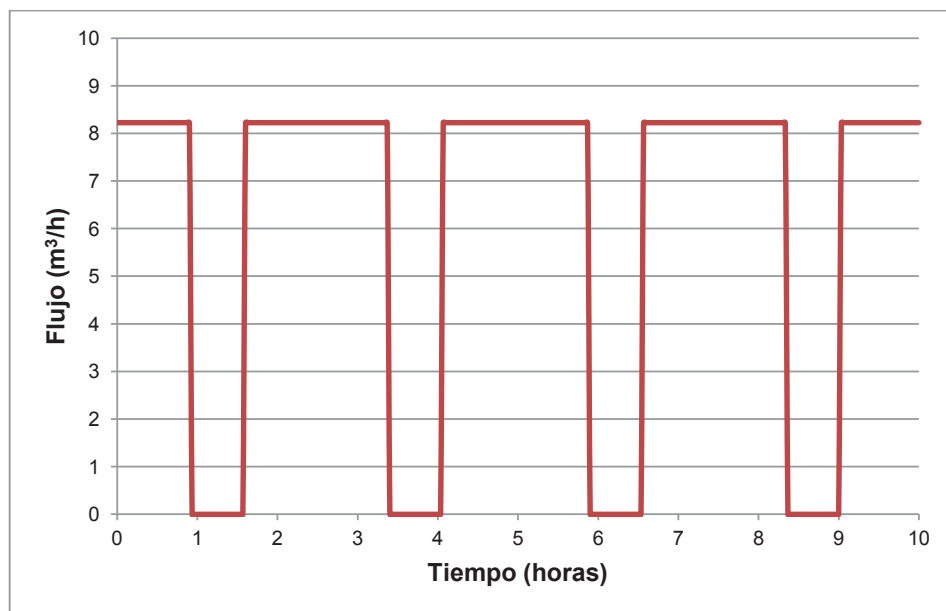
**Tabla 3.29.** Parámetros de simulación cuando entra en funcionamiento el control On-Off en la piscina

PARÁMETROS DE SIMULACIÓN			
Nombre de variable	Símbolo	Valor	Unidades
Largo de la piscina	l	5	m
Ancho de la piscina	a	2,68	m
Coeficiente de descarga válvula 1	kv1	12	$m^3/(h*atm^{0.5})$
Factor V1	N1	1	.....
Peso específico	w	1 000	kgf/m <sup>3</sup>
Altura inicial	ho	4,85	m
Presión	P	0,68	atm
Tiempo de simulación	Tmax	10	h
Intervalo de tiempo	Deltat	1,00E-03	h

En la figura 3.17 se observa la representación gráfica de la variación de la altura del nivel del agua de la piscina cuando al simularse una fuga en una de las tuberías de salida y disminuir el nivel del agua entra en funcionamiento la válvula de control ON-OFF. Como se puede observar el nivel del agua varía conforme actúa la válvula de control, es decir cuando el nivel de agua alcanza un valor de 4,70 m se abre la válvula y el nivel del agua aumenta. De igual manera cuando el nivel del agua alcanza los 5 m la válvula se cierra y el nivel del agua disminuye, permitiendo así que la piscina no se vacíe. La banda muerta, que es el rango en el que oscila la señal de error hasta que suceda el cambio, se fijó en un valor de 15 cm con base en las recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica que indica que el nivel del agua puede ser máximo 30 cm por debajo del nivel normal del agua (IAEA, 2010, p. 32), por lo tanto el valor del set point es de 4,85 m.



**Figura 3.17.** Gráfica de la variación del nivel del agua de la piscina de almacenamiento versus el tiempo cuando entra en funcionamiento el control ON-OFF



**Figura 3.18.** Gráfica de la variación del flujo de entrada de agua a la piscina de almacenamiento versus tiempo cuando entra en funcionamiento el control On-Off

En la figura 3.18 se observa la variación del flujo de entrada de agua a la piscina con respecto al tiempo. El flujo solo puede tomar dos valores, 0 m<sup>3</sup>/h cuando la válvula se cierra y 8 m<sup>3</sup>/h cuando la válvula se abre, esto demuestra el funcionamiento normal de una válvula de control ON-OFF. Es así que para mantener el nivel de la piscina y evitar que se vacíe, la válvula se abre inyectando un flujo de 8 m<sup>3</sup>/h cuando el nivel disminuye y se cierra cuando el nivel aumenta sobre el valor del set point.

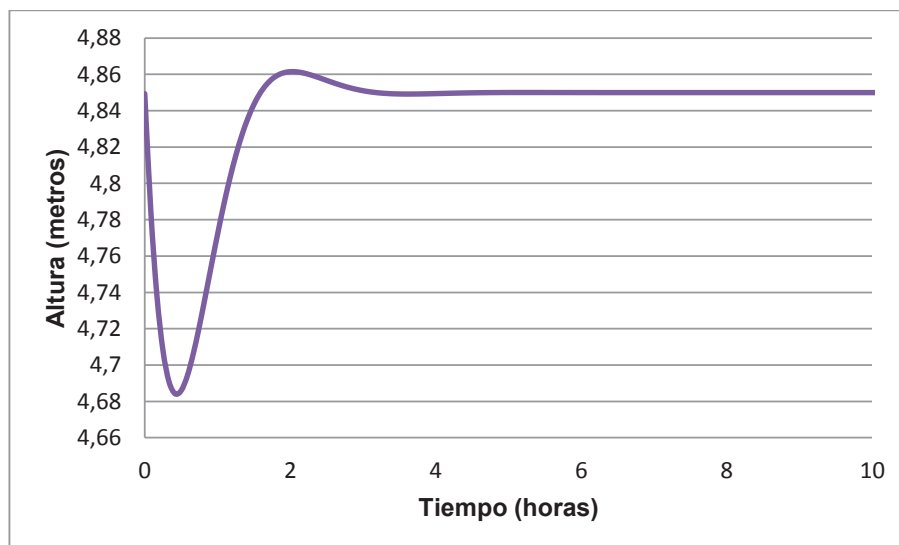
### 3.5.2.3. Simulación del escenario cuando entra en funcionamiento el control redundante PI

A continuación se muestra la tabla 3.26 que detalla los parámetros de simulación cuando entra en funcionamiento el control redundante en la piscina.

**Tabla 3.30.** Parámetros de simulación cuando entra en funcionamiento el control redundante en la piscina

PARÁMETROS DE SIMULACIÓN			
Nombre de variable	Símbolo	Valor	Unidades
Largo de la piscina	l	5	m
Ancho de la piscina	a	2,68	m
Coefficiente de descarga válvula 1	kv1	5,00	m <sup>3</sup> /(h*atm <sup>0,5</sup> )
Factor V1	N1	1	.....
Peso específico	w	1000	kgf/m <sup>3</sup>
Altura inicial	ho	4,85	m
Presión	P	0,68	atm
Altura mínima	hmin	0	m
Tiempo de simulación	Tmax	25	h
Intervalo de tiempo	Deltat	1,00E-03	h
Ganancia del controlador	Kc	12	.....
Tiempo integral de controlador	Ti	30	min
Valor deseado de nivel	Hset	4,85	m

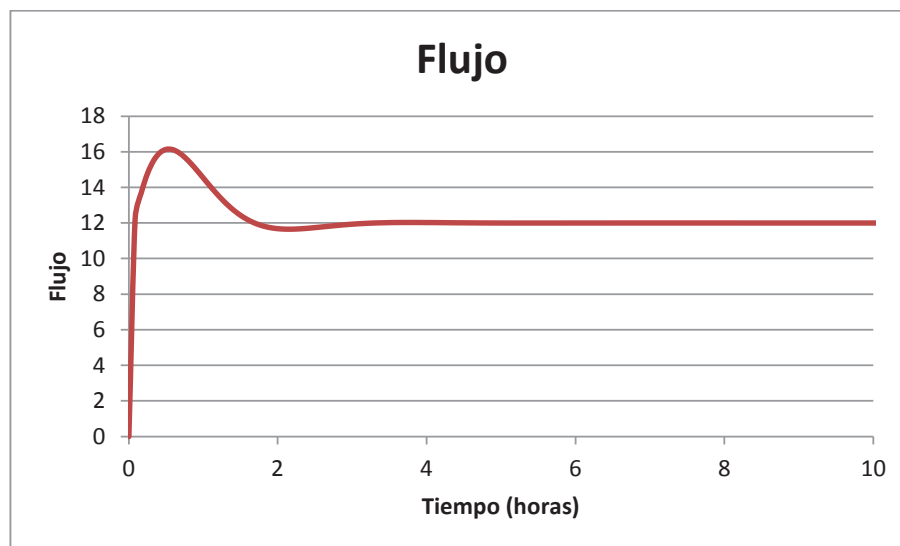
A continuación se muestran las gráficas 3.20 y 3.21 en las que se simula una gran fuga del agua de salida, provocando que el control ON-OFF no sea suficiente y entre en funcionamiento el control redundante conformado por una válvula de característica igual porcentaje y un controlador PI.



**Figura 3.19.** Gráfica de la variación del nivel del agua de la piscina de almacenamiento versus tiempo cuando entra en funcionamiento la válvula de control REDUNDANTE

En la figura 3.20 se observa la variación del nivel del agua de la piscina con respecto al tiempo cuando al fallar el control ON-OFF, entra en funcionamiento el control redundante. Como se puede ver el nivel de agua de la piscina se estabiliza en aproximadamente 3,5 horas, lo que permite constatar el correcto funcionamiento del control redundante que a pesar de la fuga, mantiene el nivel de agua en 4,85 m y evita el vaciado de la piscina.

Como se puede observar sobresale un pico a las 2,5 horas, el cual es menor al nivel máximo de la piscina, por lo tanto no se desborda mientras se estabiliza el flujo.



**Figura 3.20.** Gráfica de la variación del flujo de entrada de agua a la piscina de almacenamiento versus tiempo cuando entra en funcionamiento la válvula de control REDUNDANTE

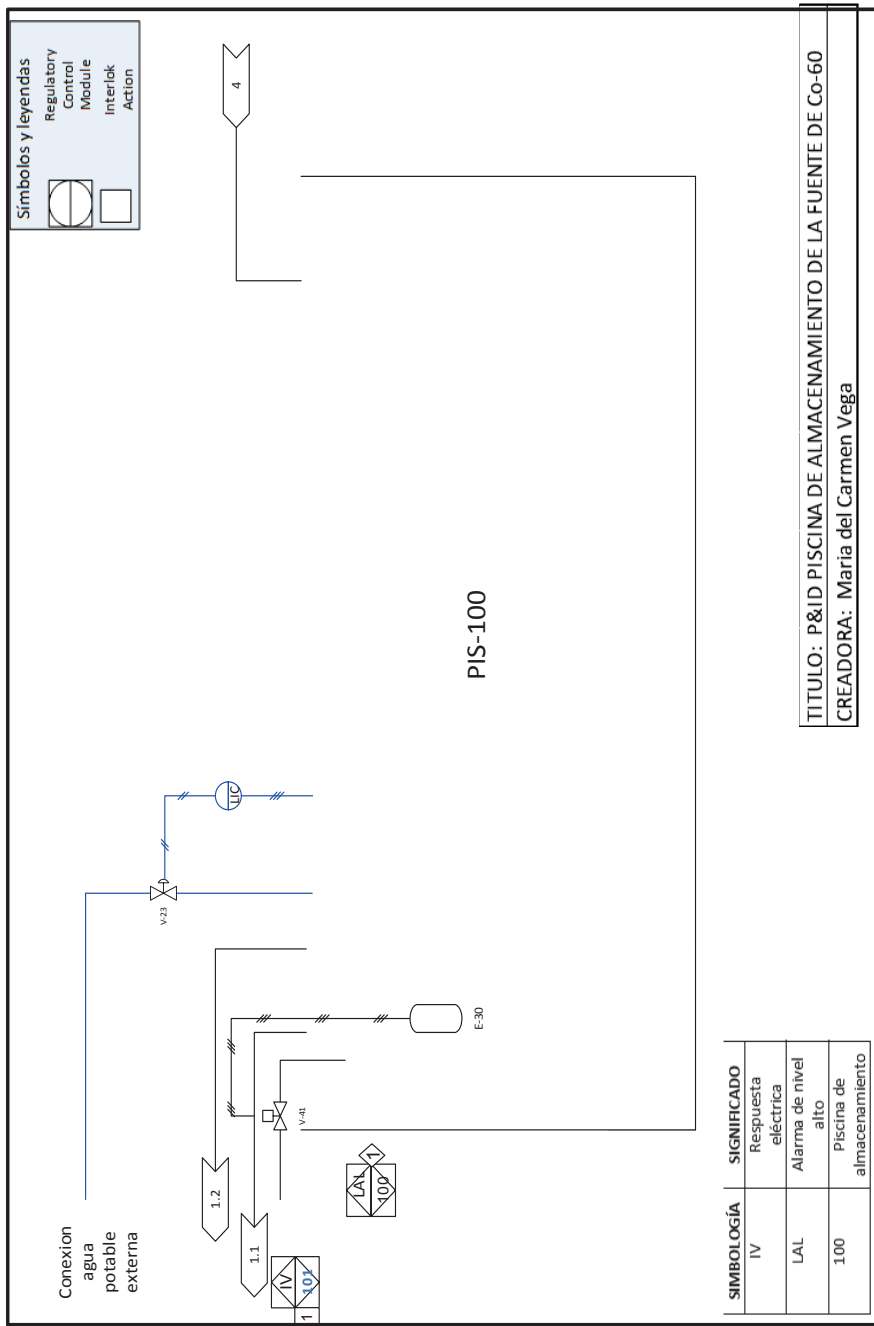
En la figura 3.21 se observa la variación del flujo de agua a través de la válvula de control redundante con respecto al tiempo. El gráfico muestra que el flujo se estabiliza en aproximadamente 3,5 horas con un valor de  $12 \text{ m}^3/\text{h}$ , flujo con el cual se mantiene el nivel de la piscina y se asegura que la fuente de Co-60 permanezca cubierta de agua todo el tiempo.

Para obtener los resultados se utilizó como valor de la ganancia del controlador 12 y como tiempo integral del controlador el valor de 30 min. Para llegar a estos valores óptimos se aumentó paulatinamente la ganancia desde 3 a 15 y el tiempo integral desde 10 a 40 min hasta que el valor del flujo de ingreso por la válvula fue menor al flujo máximo de diseño de la válvula, que es  $20,37 \text{ m}^3/\text{h}$ , y hasta que el tiempo de estabilización sea menor al tiempo que se necesitaría para vaciar la piscina hasta la mitad, de esta manera se asegura que la piscina no se vacíe ni se desborde mientras se estabiliza el controlador.

En el Anexo XIII se observan las gráficas obtenidas con diferentes valores de  $K_c$  y  $T_i$  hasta obtener los valores óptimos.

En la figura 3.22 se observa el diagrama de instrumentación y tuberías del sistema redundante de reposición de la piscina de almacenamiento de Co-60.





**Figura 3.21.** Diagrama de instrumentación y tuberías del sistema redundante de la piscina de almacenamiento de Co-60 del LTR

### 3.6. DETERMINACIÓN DE LA INVERSIÓN ECONÓMICA

Para la determinación de la inversión económica, se cotizaron los filtros multimedia, de carbón activado y de intercambio iónico, así como los medidores de conductividad, bombas y válvulas de control, alarmas, e instalación.

A continuación en la tabla 3.32 se detalla cada ítem y su precio.

**Tabla 3.31.** Inversión económica a realizarse en el sistema de tratamiento de aguas

ITEM	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
Filtro multimedia automático	1	2 200	2 200
Filtro de carbón activado automático	1	1 900	1 900
Desmineralizador catiónico automático	1	4 500	4 500
Desmineralizador aniónico automático	1	4 800	4 800
Tablero de control con PLC y HMI	1	2 854	2 854
Sensores de conductividad en línea	2	3 730	7 460
Sensor de pH en línea	1	2 688	2 688
Bomba centrífuga 1 HP MYERS	2	1 500	3 000
Medidor de radioactividad SM 5D	1	985	985
Válvula de control PI FISHER GX	1	1 800	1 800
Válvula de control On-Off	1	900	900
COSTO TOTAL			33 087

Se determinaron los costos de instalación mediante el método de estimación de factores múltiples como se explica en la sección experimental. En la tabla 3.33 se detallan los costos de instalación del sistema de tratamiento de agua.

**Tabla 3.32.** Costos de instalación del sistema de tratamiento de agua

<b>COSTOS</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Costo Total (\$)</b>
Tuberías y accesorios	33%	10 918,71
Control e instrumentación	13%	4 301,31
Instalación eléctrica	9%	2 977,83
Mano de obra	8%	2 646,96
Costo total de instalación		20 844,81

El costo total de la inversión a realizarse para rediseñar el sistema de tratamiento de aguas del LTR, es de \$ 53 931, 81. El valor obtenido representa un ahorro del 25% respecto a la contratación de una empresa de diseño y construcción de sistemas de tratamiento de agua como se puede observar según el Anexo XIII.

Es por esto que, es importante la implementación del rediseño propuesto en este proyecto de titulación, debido a que de esta manera se cumple con la normativa del Organismo Internacional de Energía Atómica y adicionalmente los costos de implementación son menores a los ofertados por empresas externas.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. CONCLUSIONES

- Se obtuvo un valor promedio de Índice de Langelier de 0,42 para el agua de la piscina de almacenamiento del Co-60, que al ser mayor a cero le confiere al agua un carácter incrustante. Esto quiere decir que, las vainas de acero inoxidable que recubren la fuente no corren riesgo de corrosión actualmente, pero podrían presentarlo en los próximos años.
- La resina de intercambio catiónico que actualmente se encuentra en el filtro del sistema de tratamiento de agua posee una capacidad de intercambio promedio de 0,28 (meq/g húmedo), el cual es un valor menor al rango de valores típicos (Long, 1995, p. 398), por lo tanto, la resina ya no se encuentra en capacidad de cumplir sus funciones y debe ser reemplazada.
- La resina de intercambio aniónico que actualmente se encuentra en el filtro del sistema de tratamiento de agua posee una capacidad de intercambio promedio de 0,41 (meq/g húmedo), el cual es un valor menor al rango de valores típicos (Wachinski, 1997, p. 45). Por lo tanto, la resina ya no se encuentra operativa y debe ser reemplazada.
- El carbón activado que actualmente se encuentra en el filtro del sistema de tratamiento de agua posee un Índice de Yodo de 49,6 (mg/g), el cual es menor a los rangos usuales de índice de yodo (Cooney, 1999, p. 21). Por esta razón, se concluye que el carbón activado ya no se encuentra operativo y debe ser reemplazado.
- Los mejores resultados de conductividad del agua, 8,93 y 8,84  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente, se obtuvieron con las combinaciones 2 (Resina

catiónica DOWEX (Na<sup>+</sup>) y Resina aniónica SBG1P (OH<sup>-</sup>) y 4 (Resina catiónica LEWATIT (Na<sup>+</sup>) y Resina aniónica SBG1P).

- Es necesario realizar al menos tres tratamientos de intercambio iónico de todo el volumen de agua de la piscina de almacenamiento debido a su alta conductividad, para que alcance valores menores a 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
- De la simulación en MS EXCEL® del control redundante cuando se supone existe una gran fuga de agua, se obtuvo un valor de Kv 5,45  $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{atm}^{0.5}$ . Adicionalmente los mejores valores de Kc y Ti fueron 12 y 30 min respectivamente.
- El valor a invertir para la implementación del rediseño del sistema de tratamiento de aguas es de \$54 000 aproximadamente, que supone un ahorro mayor al 25%, al comparar con propuestas económicas de empresas de diseño y construcción de sistemas de tratamiento de aguas.

#### 4.2. RECOMENDACIONES

- Implementar el rediseño planteado en este proyecto de titulación, en virtud de cumplir con la norma establecida por el Organismo Internacional de Energía Atómica que establece que, el agua de almacenamiento de fuentes radioactivas debe tener una conductividad menor a 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (IAEA, 2010, p. 56).
- Adquirir nuevas resinas de intercambio iónico de tipo H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup> y carbón activado para reemplazar los materiales actuales que se encuentran obsoletos y además de realizar un retrolavado al filtro de arena para que entre en funcionamiento, esto si no es posible realizar la inversión completa del rediseño del sistema.

- Añadir manómetros a lo largo de las tuberías, medidores de conductividad, y un medidor de radioactividad para mantener vigilados dichos parámetros del agua de la piscina de almacenamiento y el buen funcionamiento de los equipos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. American Public Health Association, American Water Works Association y Water Pollution Control Federation. (1985). *STANDARD METHODS For the Examination of Water and Wastewater*. (16ta. ed.). Estados Unidos: Port City Press.
2. American Water Works Association y American Society of Civil Engineers. (2005). *Water treatment plant design*. (4ta. ed.). Estados Unidos: McGraw-Hill, Inc.
3. Atomic Energy Regulatory Board. (2007). *Land based stationary gamma irradiators*. Recuperado de <http://www.aerb.gov.in/AERBPortal/pages/English/t/publications/CODESGUIDES/ss-6.pdf> (Mayo, 2014)
4. ASTM. (2003). *Standard Test Method for Carbon Black-Iodine Adsorption Number. D 1510. United States*.
5. ASTM. (2004). *Standard Test Methods for Physical and Chemical Properties of Particulate Ion-Exchange Resins. D 2187. United States*.
6. Avilla, J. (2002). *Lo Esencial acerca del intercambio iónico*. Recuperado de <http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/5-6-02avilla.pdf> (Septiembre, 2013).
7. Benjamin, M., Lawler, D. (2013). *Water Quality Engineering*. Estados Unidos: Jhon Wiley & Sons, Inc.
8. Carrillo, A. (2007). *Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso*. Recuperado de <http://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/6484/33287132.pdf?sequence=1> (Mayo, 2013)

9. Cheremisinoff, N. (2002). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies*. Estados Unidos: Butterworth-Heinemann.
10. Cooney, D. (1999). *Adsorption design for wastewater treatment*. Estados Unidos: CRC Press LLC.
11. Crittenden, C., Trussell, R., Hand, D., Howe, K. y Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design*. (3era. ed.). New Jersey, United States: Jhon Wiley & Sons, Inc.
12. DeSilva, F. (1999). *Essentials of Ion Exchange*. Recuperado de <http://www.resintech.com/pdf/EssentialofIonExchange.pdf> (Junio, 2013)
13. DeSilva, F. (2000). *Activated carbon filtration*. Recuperado de <http://www.resintech.com/pdf/activatedcarbonfiltration.pdf> (Junio, 2013)
14. De Sousa, C., Correia, A. y Colmenares, M. (2010). Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de estrategias de control. *Boletín de malariología y salud ambiental*, 50(2), 187-196.
15. Fisher. (2012). GX Control Valve and Actuator. Recuperado de [www.Fisher.com](http://www.Fisher.com) (Marzo, 2014).
16. Giraldo, L., García, V. y Moreno, J. (2008). Caracterización superficial en fase gas y líquida de carbones activados. *Revista de Ingeniería*. N° 27, 7-16.
17. Gómez E., Gómez D., Aragonés P., Sánchez M., y López D. (1997). *Cuaderno de Ingeniería de proyectos I. Diseño básico de plantas industriales*. España: Servicio de publicaciones.



18. Gómez, A., Rincón, S. y Klose, W. (2010). *Carbón activado de cuesco de palma*. Alemania: Kassel University press Gmb/h.
19. IAEA. (1990). *Guidelines for industrial radiation sterilization of disposable medical products (Cobalt-60 Gamma Irradiation)*. Recuperado de [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_539\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_539_web.pdf) (Julio, 2014)
20. IAEA. (2005). *Gamma irradiators for radiation processing*. Recuperado de <http://www.naweb.iaea.org/napc/iachem/Brochure%20on%20gamma%20irradiators.pdf> (Enero, 2013)
21. IAEA. (2009). *Safety Assessment for Facilities and Activities*. Recuperado de [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1375\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1375_web.pdf) (Febrero, 2013)
22. IAEA. (2010). *Radiation Safety of Gamma, Electron and X ray Irradiation Facilities*. Recuperado de [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub14\\_54\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub14_54_web.pdf) (Septiembre, 2012)
23. Jiménez, A. (2000). Determinación de los parámetros fisicoquímicos de calidad de las aguas. *Gestión Ambiental*, 2(23), 12-19.
24. Jurado, J. (2008). Aplicación de Microsoft Excel a la Química Analítica: validación de métodos analíticos. Recuperado de <http://personal.us.es/jmjurado/docs/AQAEXCEL.pdf> (Noviembre 2014)
25. Long, R. (1995). *Separation Processes in Waste Minimization*. Estados Unido: Marcel Dekker, Inc.
26. Luna, D., González, A., Gordon, M., Martin, N. (2007). Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco. *ContactoS*. N° 64, 39-48.

27. Michaud, C. (1990). *Methods of degradation*. Recuperado de <http://www.systematixusa.com/articles/downloads/WCP/1990/1990-%20Jan%20-%20Ion%20Exchange%20Methods%20of%20Degradation.pdf> (Enero, 2013)
28. Michaud, C. (2011). *Defining Ion Exchange Capacity*. Recuperado de <http://www.wcponline.com/pdf/1103Michaud.pdf> (Enero, 2013)
29. Nalco Company. (2009). *The Nalco Water Handbook*. (3era. Ed.). Estados Unidos: The McGraw-Companies Hill, Inc.
30. Neumann, S. y Fatula P. (2009). *Principles of Ion Exchange in Wastewater Treatment*. Recuperado de [http://www.lewatit.com/imperia/md/content/ion/presseschau/090316\\_asian\\_water\\_principles\\_of\\_ion\\_exchange\\_neumann\\_03\\_09\\_.pdf](http://www.lewatit.com/imperia/md/content/ion/presseschau/090316_asian_water_principles_of_ion_exchange_neumann_03_09_.pdf) (Septiembre, 2013)
31. Powel, S. (1981). *Acondicionamiento de aguas para la industria*. (1era. ed.). México: Editorial Limusa.
32. Rangel, W. (2010). Aplicación de la radiación gamma. *Contacto Nuclear*, N° 57. 7-11.
33. Richardson, J., Harker, J. y Backhurst, J. (2002). *Chemical Engineering. Particle Technology and Separation Processes*. (5ta. ed.). Gran Bretaña: Butterworth-Heinemann.
34. Roberts, E. (2007). *Water Quality Control Handbook*. (2da. ed.). Estados Unidos: McGraw-Hill Companies, Inc.
35. SenGupta, A. (2002). *Environmental Separation of Heavy Metals. Engineering Processes*. (1era. ed.) Estados Unidos: Lewis Publishers/CRC Press LLC.

36. Sánchez, J. (2013). *Instrumentación y control avanzado de procesos*: España: Ediciones Díaz de Santos.
37. Simpson, R. y Sastry S. (2013). *Chemical and Bioprocess Engineering*. Estados Unidos: Springer Science + Business Media.
38. Skipton, S., Dvorak, B. y Niemeyer, S. (2008). *Drinking Water Treatment: Water Softening (Ion Exchange)*. Recuperado de <http://www.ianrpubs.unl.edu/live/g1491/build/g1491.pdf> (Abril, 2013)
39. StatPoint, Inc. (2005). *Anova Simple*. Recuperado de <http://www.statgraphics.net/wp-content/uploads/2011/12/tutoriales/ANOVA%20Simple.pdf> (Septiembre, 2014)
40. Universidad de Sevilla. (2000). *Manual del carbón activo*. Recuperado de [http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod\\_resource/content/1/CARBoN%20ACTIVO%20DEFINITIVO%20%20tar.pdf](http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod_resource/content/1/CARBoN%20ACTIVO%20DEFINITIVO%20%20tar.pdf) (Marzo, 2013)
41. Varó P., Chillón M. y Prats D. (2004). *Características Físicoquímicas de las aguas ablandadas*. Recuperado de <http://www.ingenieriaquimica.es/files/pdf/iq/409/09ARTICULOEN.pdf> (Junio, 2012).
42. Venkateswarlu, K. (1996). *Water Chemistry. Industrial and Power Station Water Treatment*. Nueva Delhi, India: New Age International Limited Publishers.
43. Wachinski, A. y Etzel, J. (1997). *Environmental Ion Exchange. Principles and Design*. Estados Unidos: CRC Press LLC.

44. Walker, V. (2009). *Designing a Process Flowsheet*. Recuperado de <http://coade.typepad.com/coadeinsider/2009/06/CEP-May-09-Piping-and-Instrument-Diagrams-COADE.pdf> (Septiembre, 2014)

## **ANEXOS**

**ANEXO I**  
**MÉTODO PARA DETERMINACIÓN DE LA DUREZA EN EL AGUA**  
**(American Public Health Association et al., 1985, pp. 209-213)**

**Tabla AI. 1.** Reactivos utilizados para la determinación de la dureza

Nombre	Fórmula	Casa Comercial	Grado de Pureza
Cloruro de Amonio	NH <sub>4</sub> Cl	Merck	Reactivo
Hidróxido de Amonio	NH <sub>4</sub> OH	RP Carlo Erba	Reactivo
Sal disódica de ácido etilendiaminatetraacético dihidratado	[CH <sub>2</sub> N(CH <sub>2</sub> COOH)CH <sub>2</sub> COONa] <sub>2</sub> * 2H <sub>2</sub> O	Merck	Reactivo
Sulfato de magnesio heptahidratado	MgSO <sub>4</sub> * 7H <sub>2</sub> O	Analar	Reactivo
Cloruro de magnesio hexahidratado	MgCl <sub>2</sub> * 6H <sub>2</sub> O	BDH Chemical Ltda.	Reactivo
Carbonato de Calcio anhidro	CaCO <sub>3</sub>	Riedel	Reactivo
Hidróxido de Sodio	NaOH	Analema	Reactivo
Acido Clorhídrico	HCl	Merck	Reactivo
Indicador de dureza total	-	Hach	Reactivo
Indicador de dureza cálcica	-	Hach	Reactivo
Ácido etilendiaminotetraacético	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> N <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Merck	Reactivo

### a) Preparación de soluciones

- **Solución Buffer:** Se disolvió 1,179 g de sal disódica de ácido etilendiaminatetraacético dihidratado y 780 mg de sulfato de magnesio heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) en 50 mL de agua destilada. Se añadió esta solución a 16,9 g de cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) y 143 mL de hidróxido de amonio concentrado, se mezcló y diluyó a 250 mL con agua destilada. Se almacenó la solución en un contenedor de borosilicato por no más de 1 mes.
- **Solución tituladora EDTA estándar, 0,01M:** Se pesó 3,723 g de EDTA, se disolvió en agua destilada, y diluyó a 1000 mL. Se estandarizó contra una solución de calcio estándar.
- **Solución de calcio estándar:** Se pesó 1,000 g de polvo de carbonato de calcio anhidro ( $\text{CaCO}_3$ ) dentro de un erlenmeyer de 500 mL. Se colocó un embudo en el frasco y se añadió poco a poco ácido clorhídrico HCl (1:1) hasta que el carbonato de calcio se disolvió. Se añadieron 200 mL de agua destilada y se hirvió por un par de minutos para expulsar el  $\text{CO}_2$ . Se enfrió, y posteriormente se añadió unas gotas de indicador rojo de metilo, y se ajustó a un color anaranjado intermedio al añadir una solución de hidróxido de sodio 3N o la de ácido clorhídrico, según se requirió. La preparación fue diluida a 1000 mL con agua destilada.
- **Solución de hidróxido de sodio, NaOH, 0,1 N**

### b) Procedimiento y cálculos

Se diluyó 25 mL de muestra a 50 mL con agua destilada. Se añadieron 1 o 2 mL de solución buffer. Se colocó el indicador y luego se añadió la solución tituladora de EDTA poco a poco con agitación continua hasta que el color rojo que apareció al agregar el indicador desapareció y la solución tomó un color azuláceo (punto de viraje). Se registró el volumen de EDTA utilizado en mililitros.

Se utilizó la fórmula A1.1 para calcular la dureza expresada como mg de  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  como se muestra a continuación:

$$\text{Dureza expresada como mg de } \frac{\text{CaCO}_3}{\text{L}} = \frac{A \times N \times 1000}{\text{ml de muestra}} \times 50 \quad [\text{Al.1}]$$

Donde:

A = mililitros de solución tituladora usado por muestra

N = normalidad de la solución de EDTA



**ANEXO II**

**MÉTODO PARA DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD EN EL AGUA (American Public Health Association et al., 1985, pp. 269-273)**

**Tabla AII. 1.** Reactivos utilizados para la determinación de la alcalinidad

Nombre	Fórmula	Casa Comercial	Grado de Pureza
Carbonato de sodio	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	BDH Chemical Ltda.	Estándar primario
Ácido sulfúrico	HCl	Merck	Reactivo
Fenolftaleína	$\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$	BDH Chemical	Reactivo
Tiosulfato de Sodio	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3^*$ $5\text{H}_2\text{O}$	BDH Chemical Ltda.	Reactivo
Indicador verde de bromocresol - rojo de metilo	-	Hach	Reactivo

**a) Preparación de soluciones**

A continuación se explica la preparación de las soluciones usadas para determinar la alcalinidad del agua de las muestras tomadas de la piscina.

- **Solución de carbonato de sodio, 0,05N:** Se secó de 3 a 5 g de carbonato de calcio,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , a  $250\text{ }^\circ\text{C}$  durante 4 horas y se enfrió en un desecador. Posteriormente se pesaron  $2,5 \pm 0,2$  g, se aforó a 1 L con agua destilada, se disolvió y mezcló el reactivo. La solución no se debió mantener por más de una semana.
- **Ácido sulfúrico, 0,1 N:** Se preparó la solución ácida de la normalidad indicada. Se procedió a estandarizar contra 40 mL de solución de carbonato de sodio 0,05N, con 60 mL de agua. Se tituló a un pH de alrededor de 5, y se hirvió durante 3 a 5 min. Se enfrió, y terminó de titular hasta el punto de inflexión.

Se utilizó la fórmula All.1 para calcular la normalidad del ácido sulfúrico estándar, 0.1N como se muestra a continuación.

$$\text{Normalidad, N} = \frac{A \times B}{53 \times C} \quad [\text{All.1}]$$

Donde:

A = gramos de carbonato de sodio

B = mililitros de solución de carbonato de sodio usados para la titulación

C = mililitros de ácido usado

- **Ácido sulfúrico, 0,02 N:** Se tomaron 200 mL de solución de ácido estándar 0,1 N y se diluyó a 1 000 mL de agua destilada. Se estandarizó contra 15 mL de solución de carbonato de sodio 0,05 N.
- **Solución de fenolftaleína**
- **Solución de tiosulfato de sodio, 0,1 N.**

#### b) Procedimiento y cálculos

Se tomó 25 mL de muestra, se agregó el indicador verde de bromocresol - rojo de metilo a lo que la solución tomó un color verde. Se tituló con ácido sulfúrico 0,02 N hasta el punto de viraje a color rosado. Se registró la cantidad usada de solución tituladora en mililitros.

Para calcular la alcalinidad expresada como mg de  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  de cada muestra tomada, se utilizó la fórmula 2.3, como se indica a continuación.

$$\text{Alcalinidad, expresada como mg de } \frac{\text{CaCO}_3}{\text{L}} = \frac{A \times N \times 50000}{\text{ml de muestra}}$$

[All.2]

Donde:

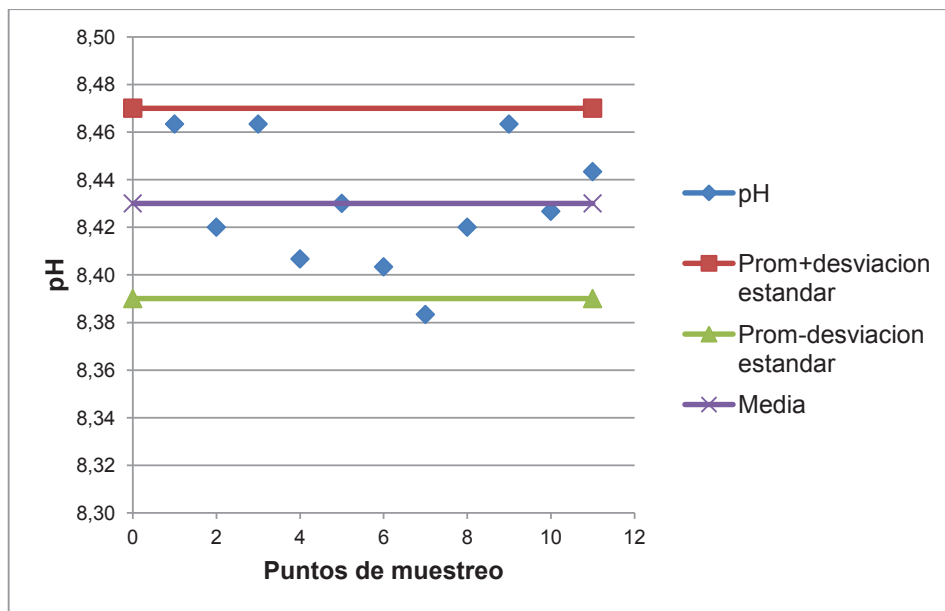
A = mililitros de ácido estándar usado

N = normalidad del ácido estándar

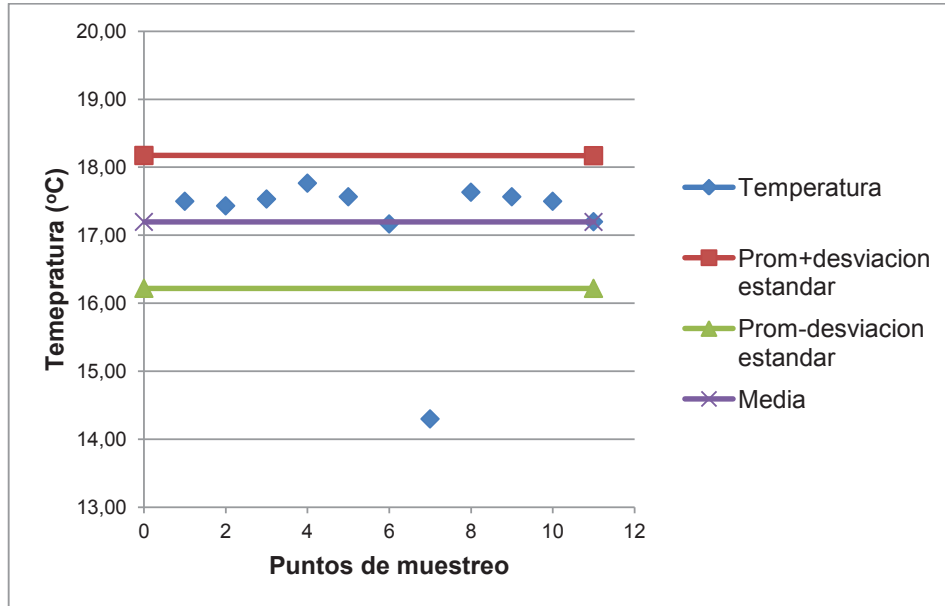
**ANEXO III**

**REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS VALORES DE pH,  
TEMPERATURA, CONDUCTIVIDAD, DUREZA, ALCALINIDAD E  
ÍNDICE DE LANGELIER EN LOS DÍAS 2 Y 3**

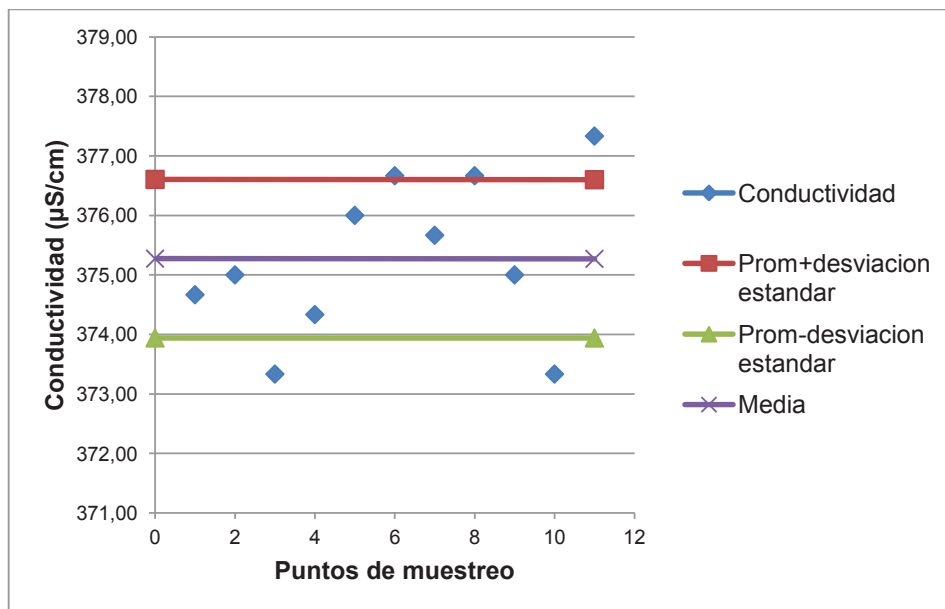
A continuación se observan las figuras AIII.1 a la AIII.12 que representan gráficamente los valores de pH, temperatura, conductividad, dureza alcalinidad e Índice de Langelier en los días 2 y 3.



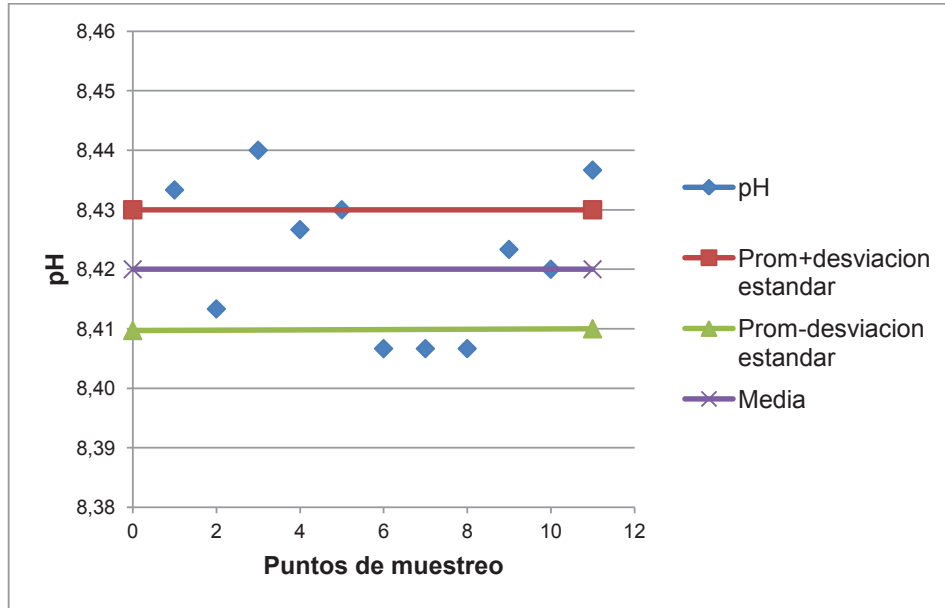
**Figura AIII. 1.** Representación gráfica del pH en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 2



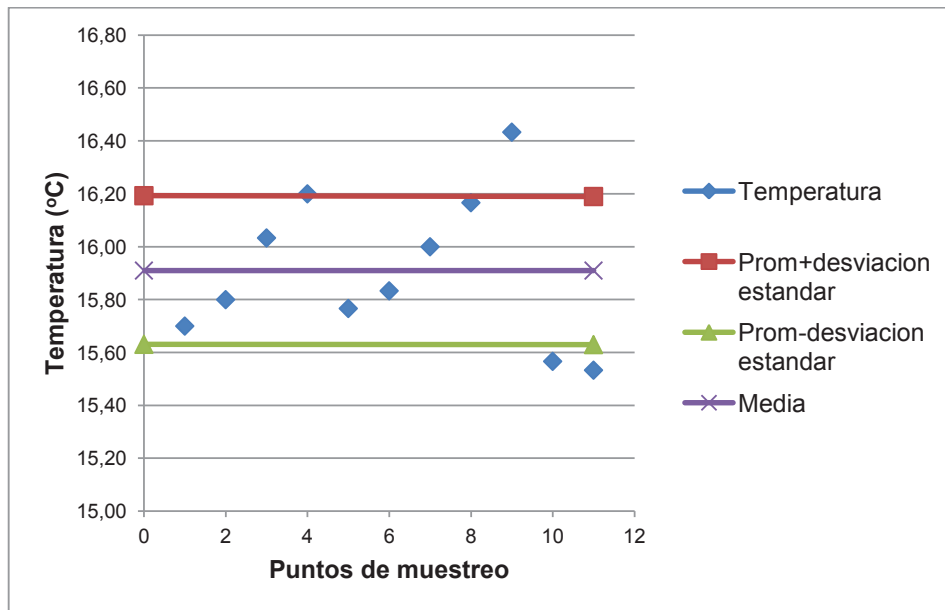
**Figura AIII. 2.** Representación gráfica de la temperatura en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 2



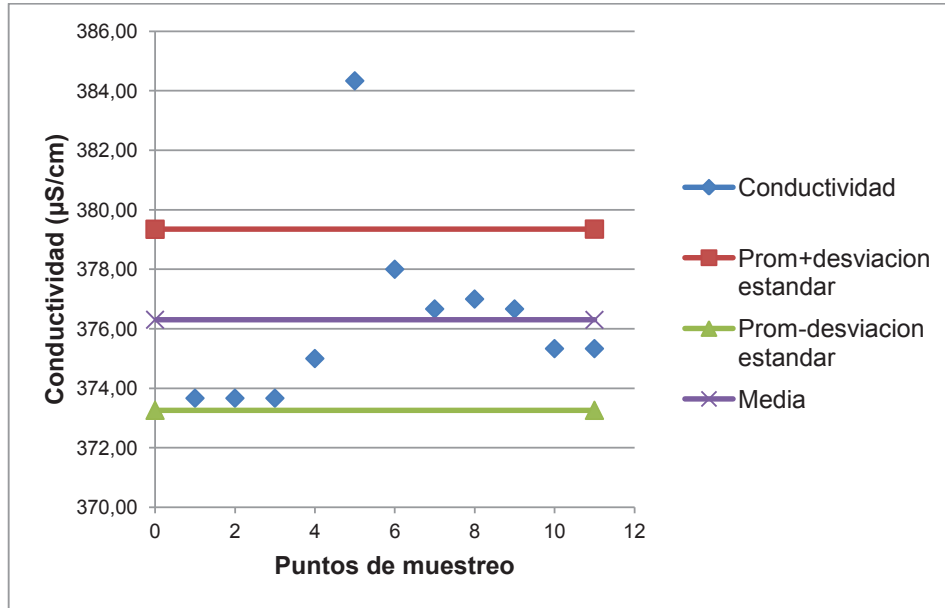
**Figura AIII. 3.** Representación gráfica de la conductividad en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 2



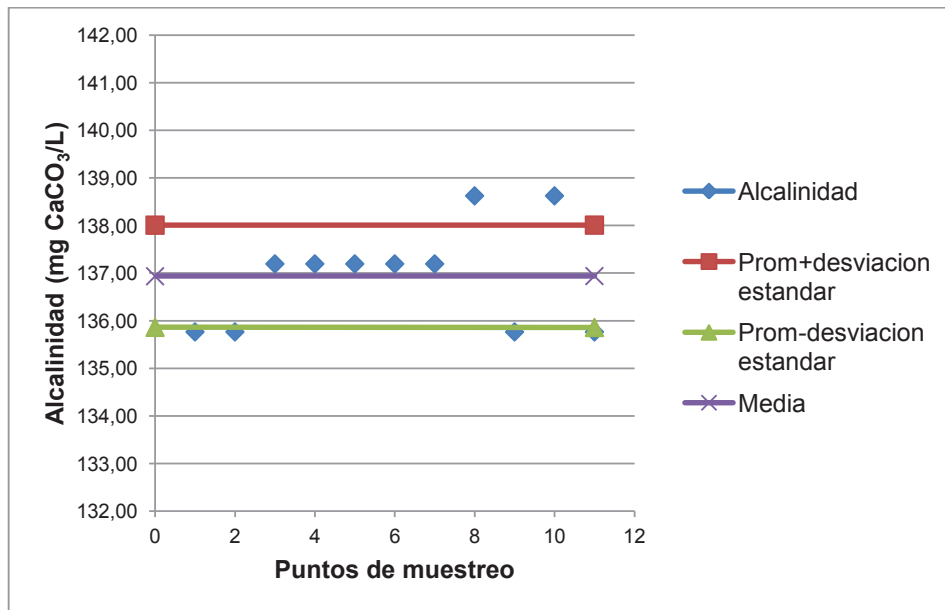
**Figura AIII. 4.** Representación gráfica del pH en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 3



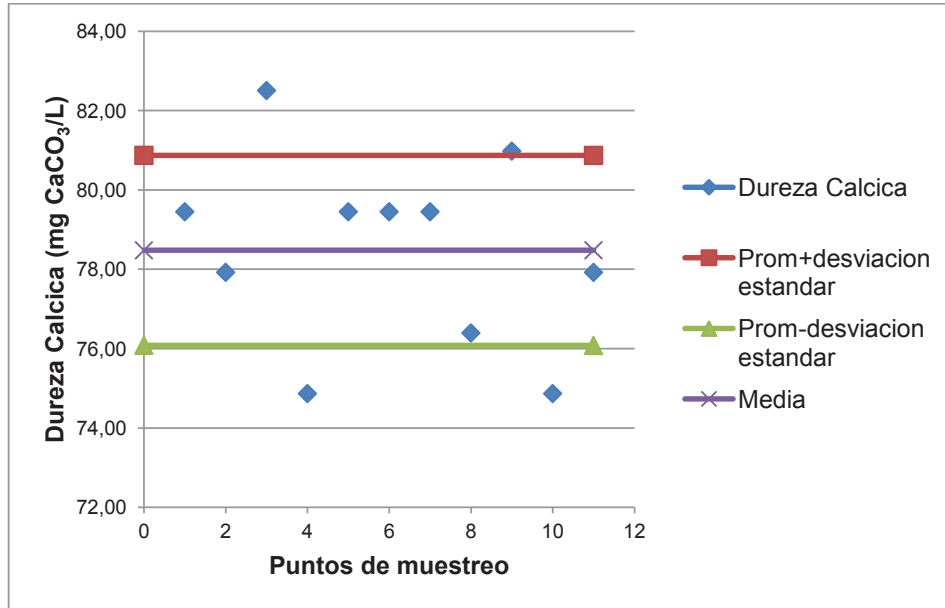
**Figura AIII. 5.** Representación gráfica de la temperatura en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 3



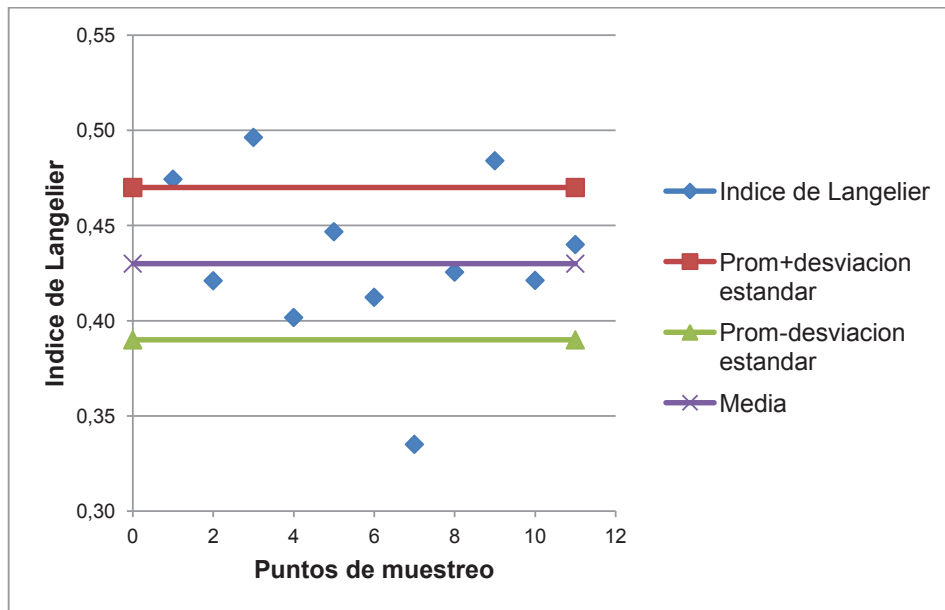
**Figura AIII. 6.** Representación gráfica de la conductividad en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 3



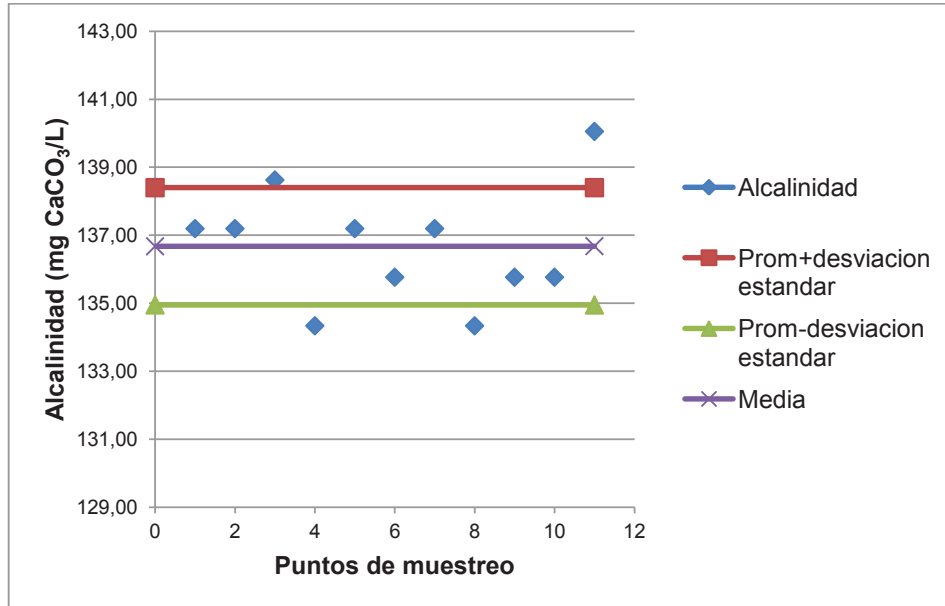
**Figura AIII. 7.** Representación gráfica de la alcalinidad en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 2



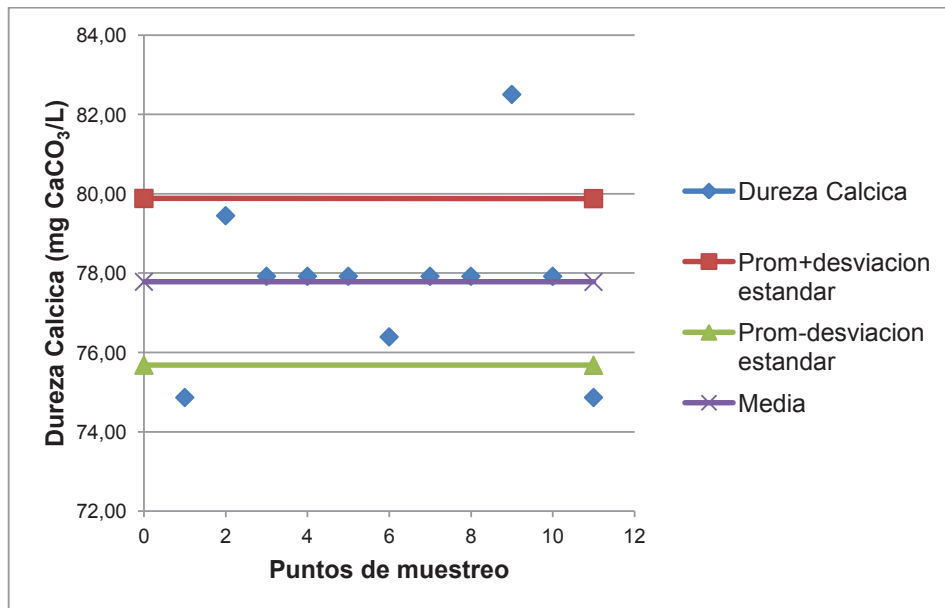
**Figura AIII. 8.** Representación gráfica de la dureza cálcica en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 2



**Figura AIII. 9.** Representación gráfica de el Índice de Langelier en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 2

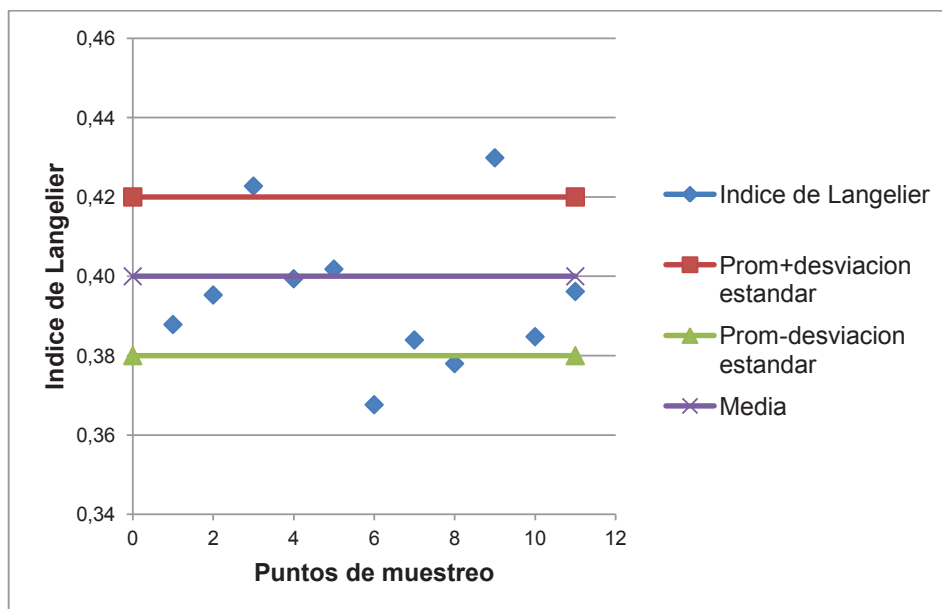


**Figura AIII. 10.** Representación gráfica de la alcalinidad en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 3



**Figura AIII. 11.** Representación gráfica de la dureza cálcica en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 3





**Figura AIII. 12.** Representación gráfica del índice de Langelier en todos los puntos de muestreo y de su desviación estándar en el día 3

En las figuras AIII.1 a AIII.3, se observa la variación de la temperatura, pH y conductividad en el día 2. Como se puede observar los valores no varían significativamente unos de otros, por lo que se evidencia la repetividad y la reproducibilidad de los datos. De igual forma en las figuras de la AIII.4 a AIII.6, que representan los resultados de los mismos parámetros en el día 3.

En las figuras AIII.7 a AIII.9, se observa la variación de la alcalinidad, dureza e Índice de Langelier en el día 2. Como se puede observar los valores no varían significativamente unos de otros, por lo que se evidencia la repetividad y la reproducibilidad de los datos. De igual forma en las figuras de la AIII.10 a AIII.12, que representan los resultados de los mismos parámetros en el día 3.

**ANEXO IV**  
**METODO ASTM PARA CARACTERIZAR RESINAS DE**  
**INTERCAMBIO IÓNICO (ASTM, 2004, pp. 2-13)**

**AIV.1. PRETRATAMIENTO RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO**

**a) Preparación de soluciones**

- **Ácido clorhídrico (1:9):** Se agregó ácido clorhídrico (sp gr. 1,19) en 900 mL de agua destilada, se agitó constantemente. Se enfrió a temperatura ambiente.
- **Solución de cloruro de sodio (100 g/l):** Se disolvió 100,0 g de cloruro de sodio en 800 mL de agua destilada y se diluyó a 1 L.
- **Solución de cloruro de sodio (240 g/l):** Se disolvió 240 g de cloruro de sodio en 800 mL de agua y diluyó a 1 L.
- **Solución de hidróxido de sodio (40 g/l):** Se disolvió 40,0 g de hidróxido de sodio en 800 mL de agua destilada. Se procedió a enfriar y diluir a 1 L.
- **Solución indicadora de azul de timol:** Se disolvió 0,1 g de azul de timol en 10,75 ml de solución de hidróxido de sodio 0,02 N y se diluyó en 250 mL de agua.
- **Solución indicadora de trapeolin O:** Se disolvió 0,10 g de trapeolin O en 50 mL de agua y diluyó a 100 mL en un frasco.

**b) Procedimiento**

- Se transfirió la muestra a un recipiente de 2 L usando agua para limpiar el recipiente. Se ajustó la cantidad de agua hasta el nivel de la muestra. Se mantuvo por un mínimo de 1 hora. Se procedió a mezclar y transferir una muestra representativa a un recipiente de 400 mL.
- Se llenó la mitad de la columna de pretratamiento con agua. Se transfirió el contenido del recipiente de 400 mL a la columna usando agua adicional si era necesario.

- Se enjuagó con agua usando un caudal que mantuviera un 50 % de expansión del lecho. Se continuó el flujo por 10 min mínimo o hasta que el efluente se mantuvo claro.
- Se permitió a la resina asentarse hasta que el nivel del líquido fue de 20 a 30 mm sobre el tope del lecho, y se estimó su volumen. Se pasó la solución de cloruro de sodio (100 g/l) a una velocidad aproximada de 0,133 mL/min por mL de muestra por 1 h. Se enjuagó con agua por 10 min a una velocidad de flujo suficiente para mantener un 50% de expansión en el lecho.
- Se permitió que el lecho se asiente y se drene el agua a un caudal aproximado de 100 mL/min hasta que el nivel de agua estuvo entre 20 y 30 mm sobre el tope del lecho. Se estimó el volumen de resina en mililitros.
- Para determinar la cantidad de reactivo y el caudal requerido para el pretratamiento inicial se usó de tabla 1, se tomó el volumen de muestra determinado en el punto anterior.
- Se colocó el volumen especificado de reactivo a través de la columna a la velocidad especificada hasta que solo 20 o 30 mm de una capa de líquido se mantuvo sobre el lecho. Se enjuagó el lecho con 2 volúmenes de muestra de agua a la misma velocidad.
- Para determinar la cantidad de reactivo y el caudal requerido para el segundo pretratamiento se usó la tabla 2, y se tomó el volumen de muestra determinado anteriormente. Se pasó el volumen especificado de reactivos a través de la columna con el caudal específico hasta que solo 20 a 30 mm de líquido se mantuvieron sobre el lecho. Se enjuagó el lecho con un volumen de muestra de agua a la misma velocidad. Se aumentó la velocidad de enjuague a 100 mL/min. Se enjuagó por 15 min. Posteriormente se analizó sucesivamente porciones de 100 ml del efluente de las resinas de intercambio aniónico al añadir 2 gotas de solución de azul de timol. Se continuó con el enjuague hasta que una porción de 100 mL del efluente se mantuvo amarillo ( $\text{pH} > 2,5$ ) al añadir el indicador. Se analizó el efluente de las resinas de intercambio catiónico de la misma forma con 2 gotas de solución de indicador Tropaeolin O. Se continuó con el enjuague hasta que una porción de 100 mL del efluente se mantuvo amarilla ( $\text{pH} < 11,0$ ) al añadir el indicador.

- Se removió la resina de la columna de pretratamiento, eliminando cualquier material extraño que se pueda haber acumulado en el fondo del lecho. Se colocó la resina en un embudo buchner, se drenó el agua de la muestra usando succión si era necesario.
- Finalmente se transfirió la muestra drenada a una botella de boca ancha.

## AIV.2. CAPACIDAD TOTAL DE RESINAS DE INTERCAMBIO CATIONICO

### a) Preparación de soluciones

- **Solución de indicador verde de bromocresol (1 g/l):** Se disolvió 0,1 g de verde de bromocresol en 2,9 mL de solución de hidróxido de sodio 0,02N. Se diluyó a 100 mL de agua.
- **Ácido Clorhídrico (1:9)**
- **Solución estándar de ácido clorhídrico, (0,10 N):** Se midió 8,5 mL de ácido clorhídrico (HCl, sp gr 1,19) en una probeta de 10 mL. Se colocó el ácido medido en un frasco volumétrico de 1 L y diluyó a 1 L con agua. Se mezcló bien. Para estandarizar, se secó carbonato de sodio estándar a 250 °C por 4 h y se enfrió en un desecador. Se pesaron 3 muestras de 0,22 g de carbonato de sodio seco y se las colocó en 3 erlenmeyers. Se tituló usando el indicador verde de bromocresol. Para calcular la normalidad del HCl se utilizó la fórmula A.1, detallada a continuación.

$$N_A = \frac{D}{0.05299 \times E} \quad [AIV.1]$$

donde:

$N_A$  = normalidad del HCl,

D = cantidad de  $Na_2CO_3$  usado en g,

E = cantidad de HCl usado en ml,

- **Solución indicadora de naranja de metilo (0,5 g/l):** Se disolvió 0,05 g de naranja de metilo en agua y diluyó a 100 mL con agua.

- **Solución indicadora de fenolftaleína (5,0 g/l):** Se disolvió 0,5 g de fenolftaleína en 50 mL de etanol al 95%. Se procedió a transferir a un frasco volumétrico y a diluir a 100 mL con agua.
- **Solución de Hidróxido de Sodio, 50 %:** Se preparó una solución saturada al disolver 162 g de hidróxido de sodio (pellets) en 150 mL de agua. Se enfrió a 25 °C y se decantó el líquido extra. Se almacenó en una botella plástica.
- **Solución de hidróxido de sodio, estándar (0,10 N) en solución de cloruro de sodio (50 g/l):** Se disolvieron 50,0 g de cloruro de sodio en 500 mL de agua destilada en un frasco de 1 L de capacidad. Se añadió 8 g de solución de hidróxido de sodio 50% a la solución de cloruro de sodio. Se diluyó a 1 L con agua y se agitó vigorosamente. Para estandarizar, se procedió a secar aproximadamente 10 g de ftalato hidrogenado de potasio grado estándar primario en un envase de vidrio a 120 °C por 2 h. Posteriormente se enfrió en un desecador. Se pesaron tres muestras de 1,00 g del reactivo seco y fue transferido a 3 frascos de 250 mL. Se añadió 100 mL de agua destilada y se agitó suavemente para disolver la muestra. Se tituló con solución de hidróxido de sodio 0,10 N. Se añadió 2 gotas de solución indicadora de fenolftaleína y se tituló hasta el punto de viraje de color rosado que persista 15 segundos con agitación. Para calcular la normalidad de la solución de hidróxido de sodio se utilizó la fórmula A.2, detallada a continuación.

$$N = \frac{B}{0.20423 \times C}$$

[AIV.2]

donde:

N = normalidad de la solución de hidróxido de sodio,

B = cantidad de ftalato hidrogenado de potasio en g,

C = cantidad de solución de hidróxido de potasio en ml.

#### b) Procedimiento y cálculos

- Se pesó en recipientes de 100 mL, 3 muestras de 2,00 g de resina pretratada.
- Se enjuagaron las muestras pesadas con agua dentro de los tubos filtro en el aparato de ensayo. Se llenó el embudo separador con 1 L de HCl (1:9). Se

llenó el filtro de tubo con ácido y se tapó para remover burbujas de aire. Fue necesario juntar el embudo al filtro con un caucho adecuado. Posteriormente se procedió a pasar el ácido a través de la muestra a una velocidad de 20 a 25 mL/min. Se mantuvo la muestra cubierta con ácido todo el tiempo. Se drenó el líquido hasta mantenerlo al nivel de la resina y se desechó el efluente.

- Se enjuagó el embudo separador fuertemente con agua y luego con alcohol isopropílico. Se pasó alcohol isopropílico a través de las muestras tratadas con ácido a un caudal de 20 a 25 mL/min hasta que 10 mL de agua fue de color amarillo de naranja de metilo o con un pH mayor a 3.9.
- Se transfirió el filtro al tope de un frasco de succión y se drenó el alcohol residual usando una bomba de vacío. Se continuó con la succión hasta que la muestra se movió libremente.
- Se transfirieron las muestras cuantitativamente a frascos de 500 mL. Se pipeteó en exactamente 200 mL de solución estándar de hidróxido de sodio (0,1 N) en cloruro de sodio. Se procedió a tapar inmediatamente y mezclar bien.
- Se permitió a las muestras equilibrarse por 16 h.
- Posteriormente se volvió a mezclar y permitir que las muestras se asienten. Se pipetearon 3 porciones de 50 mL de cada muestra y se tomaron las debidas precauciones para evitar material resinoso dentro de la pipeta. Se tituló con HCl (0,1 N) con el indicador de fenolftaleína. Se registró el volumen de HCl usado en cada titración con una apreciación de 0,01 ml. Se usó el promedio de las tres titulaciones para cada muestra como F.

Para calcular la capacidad de intercambio catiónico total en miliequivalentes por gramo húmedo,  $C_w$ , se utilizó la fórmula A.3, como se muestra a continuación:

$$C_w = \frac{[(200 \times N_B) - (F \times N_A \times 4)]}{W} \quad \text{[AIV.3]}$$

donde:

F = promedio de mililitros de HCl requeridos para la titulación

W = peso en gramos húmedos de la muestra,

$N_A$  = Normalidad de HCl usado, y

$N_B$  = Normalidad de solución de NaOH usado

### AIV.3. CAPACIDAD TOTAL DE RESINAS DE INTERCAMBIO ANIÓNICO

#### a) Preparación de soluciones

- **Hidróxido de amonio (1:19):** Cuidadosamente se colocaron 50 mL de hidróxido de amonio en 500 mL de agua, mezclando constantemente. Se enfrió y diluyó a 1 L con agua.
- **Solución indicadora de verde de bromocresol (1 g/l)**
- **Acido clorhídrico (1 : 9)**
- **Acido clorhídrico, estándar (0,1 N)**
- **Solución indicadora naranja de metilo**
- **Acido Nítrico (1 : 9):** Se colocó 1 volumen de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ , sp gr 1,42) en nueve volúmenes de agua y se mezcló vigorosamente.
- **Solución indicadora de fenolftaleína (5 g/l)**
- **Solución de Cromato de Potasio (50 g/l):** Se disolvió 5,0 g de cromato de potasio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) en 50 mL de agua. Se diluyó a 100 mL con agua.
- **Solución estándar de nitrato de plata, (0,10 N):** Se secó nitrato de plata cristalino ( $\text{AgNO}_3$ ) a  $105^\circ\text{C}$  por 1 h y se procedió a enfriar en el desecador. Se pesaron  $17 \pm 0,05$  g y fueron transferidos a un frasco de 1 L con agua. Se disolvió en 500 mL de agua y se mezcló vigorosamente. Se diluyó a 1 L con agua. La solución fue almacenada en un frasco de vidrio ámbar correctamente tapado. Para estandarizar, se secó aproximadamente 5 g de cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ) en un contenedor de vidrio a  $105^\circ\text{C}$  por 2 h. Se enfrió en un desecador. Se pesaron 3 porciones de  $0,25 \pm 0,01$  g de cloruro de sodio seco y se transfirieron las porciones a frascos de 250 mL. Se añadieron 100 mL de agua y agitó hasta disolver el NaCl. Se pipeteó 1 mL de solución de  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  (50 g/l) y se procedió a titular con la solución estándar de  $\text{AgNO}_3$  (0,1 N) con agitación constante hasta que la solución cambió de un color amarillo a un rojo-naranja y persistiera por 30 s.

Para calcular la normalidad de la solución estándar de  $\text{AgNO}_3$ , se usó la fórmula A.4, como se indica a continuación:

$$N = \frac{D}{0.05845 \times E} \quad [\text{AIV.4}]$$

Donde:

N = Normalidad de la solución estándar de  $\text{AgNO}_3$

D = Peso de NaCl usado en gramos,

E = Cantidad de solución estándar de  $\text{AgNO}_3$  requerida para la titulación en mL

- **Solución de cloruro de sodio (50 g/l)**
- **Solución de Nitrato de sodio (20 g/l):** Se disolvieron 20 g de nitrato de sodio en 500 mL de agua. Se mezcló y diluyó a 1 L.

#### b) Procedimiento y cálculos

- Se pesaron en recipientes separados de 100 mL 3 porciones representativas de 10 g del material pretratado anteriormente.
- Se enjuagó cuantitativamente las muestras pesadas dentro de los filtros con agua. Se llenaron 3 embudos de separación con 1 L de HCl (1:9) cada uno. Se llenaron los tubos de muestras con ácido y se taparon para remover las burbujas de aire. Los embudos fueron unidos con los filtros usando material de caucho. Se procedió a pasar el ácido por las muestras a una velocidad de 20 a 25 mL/min, y se mantuvieron las muestras cubiertas con ácido todo el tiempo. Se drenó el líquido hasta que se encontró al nivel de la muestra. El efluente fue desechado.
- Se enjuagaron los embudos de separación con agua y luego con 3 porciones de 10 mL de alcohol isopropílico. Se pasó el alcohol isopropílico a través de las muestras tratadas con ácido a una velocidad de 20 a 25 mL/min hasta que una porción de 10 mL del efluente mezclado con 10 mL de agua fue de color



amarillo de naranja de metilo o con un pH mayor a 3,9. Se drenó hasta el nivel de la muestra y se desechó el efluente de alcohol.

- Se procedió a enjuagar los frascos volumétricos con agua y a colocarlos bajo los tubos filtro. Se añadieron 500 mL de  $\text{NH}_4\text{OH}$  (1:9) a través de las muestras a una velocidad de 20 a 25 mL/min, y se mantuvo la muestra cubierta todo el tiempo. Cuando los embudos de separación estuvieron vacíos, se los enjuagó y rellenó con agua. Se enjuagaron las muestras con agua a una velocidad de 20 a 25 mL/min. Se recogió el agua de enjuague en frascos volumétricos conjuntamente con el efluente de  $\text{NH}_4\text{OH}$ , se debió parar el flujo de líquido cuando 1 L de solución combinada fue recolectada.
- Se mezclaron los efluentes combinados. Se pipetaron 3 porciones de 100 mL en frascos separados de 250 mL. Se añadieron 3 gotas de solución indicadora de naranja de metilo en cada recipiente. Se añadió  $\text{HNO}_3$  (1:9) poco a poco hasta que la solución se tornó de color rojo. Se añadió  $\text{NH}_4\text{OH}$  (1:9) poco a poco hasta que la solución fue amarilla otra vez. Se pipeteó 1 mL de solución de  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  (50 g/l) dentro del frasco y se tituló agitando vigorosamente con solución estándar 0,1 N de  $\text{AgNO}_3$  hasta que el líquido cambió de amarillo a rojo-anaranjado y el color persistió por 30 s. Se procedió a anotar el número de mililitros de solución estándar 0,1 N de  $\text{AgNO}_3$  usada a  $\pm 0,02$  ml como **F**.
- Se colocó 1 frasco volumétrico de 1 L debajo de cada tubo. Se colocaron 200 mL de solución de  $\text{NaCl}$  (50 g/l) en cada uno de los embudos de separación y se procedió a pasarla a través de la muestra a una velocidad de 20 a 25 mL/min, se mantuvo la muestra cubierta de solución todo el tiempo. Se enjuagó el embudo separador con agua para remover los restos de cloruro. Se lavaron las muestras con agua a una velocidad de 20 a 25 mL/min, recolectando el agua de lavado en el frasco con el efluente de  $\text{NaCl}$ . Se continuó con el lavado hasta que 1 L de solución combinada fue recolectada.
- Se mezcló la combinación de efluentes vigorosamente. Se procedió a pipetear 3 porciones de 100 mL y colocarlas en frascos separados de 250 mL. Se tituló con  $\text{HCl}$  0,1 N colorimétricamente usando 1 gota de indicador bromocresol. Se registraron los mililitros de  $\text{HCl}$  usado a  $\pm 0,02$  ml como **G**.
- Se colocó otro frasco volumétrico de 1 L bajo cada filtro. Se llenaron los embudos separadores con solución de  $\text{NaNO}_3$  (20 g/l). Se procedió a pasar

esta solución a través de las muestras a una velocidad de 20 a 25 mL/min hasta que 1 L de efluente fue recolectado, siempre manteniendo la muestra cubierta con líquido en todo momento.

- Cada efluente de  $\text{NaNO}_3$  fue mezclado vigorosamente. Se pipetearon 3 porciones de 100 mL y fueron colocadas en frascos de 250 mL. Se añadió una gota de fenolftaleína y una gota de naranja de metilo en cada frasco. Se añadió  $\text{HNO}_3$  (1:9) o  $\text{NH}_4\text{OH}$  (1:19) poco a poco hasta ajustar el pH en el rango donde la fenolftaleína es incolora y el naranja de metilo es amarillo. Se añadió 1 mL de solución de  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  (50 g/l). Se procedió a titular con agitación constante con solución estándar de  $\text{AgNO}_3$  0,1 N hasta que el color del líquido cambió de amarillo a rojo-naranja y persistiera por 30 s. Registrar el valor como **H**.

Para calcular la capacidad de intercambio aniónica total por gramo húmedo, se utilizó la ecuación A.5, como se indica a continuación.

$$\frac{\text{miliequivalentes totales aniónicos} - \text{capacidad de intercambio}}{\text{gramos húmedos}} = \frac{(10[(F+H) \times N] - 10[G \times N_A])}{W} \quad [\text{AIV.5}]$$

Donde:

F = promedio de mililitros de solución estándar de  $\text{AgNO}_3$

G = promedio de mililitros de HCl 0,1 N

H = promedio de mililitros de solución estándar de  $\text{AgNO}_3$

W = gramos húmedos de muestra

N = normalidad de solución estándar de  $\text{AgNO}_3$  y

$N_A$  = normalidad de HCl 0,1 N

**ANEXO V**  
**METODO ASTM PARA CARACTERIZACIÓN DEL CARBON**  
**ACTIVADO (ASTM, 2003, pp. 1-7)**

**a) Preparación de soluciones**

- **Solución de iodo,  $c(I_2) = 0,02364 \text{ mol/dm}^3$  (0,0473 N)**, contiene 57,0 g de ioduro de potasio KI por  $\text{dm}^3$ .
- **Solución de iodato de potasio,  $c(KIO_3) = 0,00657 \text{ mol/ dm}^3$  (0,0394 N)** contiene 45,0 g ioduro de potasio por  $\text{dm}^3$ .
- **Solución de tiosulfato de sodio,  $c(Na_2 S_2 O_3) = 0,0394 \text{ mol/ dm}^3$  (0,0394 N)**, contiene 5  $\text{cm}^3$  de n-amyl alcohol por  $\text{dm}^3$ .
- **Acido sulfúrico, 10 %.**
- **Solución de almidón soluble, 1 %**, contiene 0,02 g de ácido salicílico por  $\text{dm}^3$ .

**b) Estandarización de soluciones**

**Tiosulfato de sodio, 0,0394 N:**

- Se pipetearon exactamente 20  $\text{cm}^3$  de solución de iodato/ioduro de potasio 0,0394 N en un frasco de 250 mL.
- Se midió aproximadamente 5  $\text{cm}^3$  de ácido sulfúrico al 10% en una pequeña probeta y se añadió a la solución de iodato/ioduro.
- Se tapó inmediatamente y mezcló vigorosamente.
- Se tituló el contenido del frasco de iodo contra la nueva solución de tiosulfato de sodio.
- Se llenó una bureta con solución sin estandarizar de sulfato de sodio, se ajustó a la marca y se procedió a titular hasta un punto de viraje de color amarillo-verde pálido.
- Se lavó la bureta con agua.

- Se añadieron 5 gotas de solución de almidón al frasco de iodo.
- Se continuó con la adición de tiosulfato de sodio hasta que el punto de viraje fue alcanzado mostrando una solución incolora.
- Se registró el valor de la titulación al 0,025 mL más cercano y se repitió para una determinación en duplicado.

Para calcular la normalidad de la solución de tiosulfato de sodio, se usó la fórmula AV.6, como se detalla a continuación.

$$N = \frac{20(0.0394)}{T} \quad \text{[AV.6]}$$

Donde:

N = Normalidad,

T = volumen de titulación,  $\text{cm}^3$

NOTA: Si N no es igual a 0,0394, ajustar la solución de la siguiente forma: si la solución es muy concentrada, añadir agua ( $2,5 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$  de solución por cada 0,0001 N sobre 0,0394 N); si la solución es muy diluida, añadir tiosulfato de sodio sólido ( $0,025 \text{ g}/\text{dm}^3$  por cada 0,0001 N bajo 0,0394).

### **Solución de yodo 0,0473 N**

- Se pipetearon exactamente  $20 \text{ cm}^3$  de solución de iodo en un frasco de 250 mL y se tapó.
- Se llenó una bureta con solución sin estandarizar de sulfato de sodio, se ajustó a la marca y se tituló hasta un punto de viraje de color amarillo-verde pálido.
- Se lavó la bureta con agua.
- Se añadieron 5 gotas de solución de almidón al frasco de iodo.
- Se procedió a continuar con la adición de tiosulfato de sodio hasta que el punto de viraje sea alcanzado mostrando una solución incolora.
- Se registró el valor de la titulación al 0,025 ml más cercano y se repitió para una determinación en duplicado.

Para calcular la normalidad de la solución de iodo, se usó la fórmula AV.7, como se detalla a continuación.

$$N = \frac{(0.0394)T}{20} \quad \text{[AV.7]}$$

Donde:

N = Normalidad,

T = cm<sup>3</sup> de solución de tiosulfato de sodio 0,0394

Si N no es igual a 0,0473 N, ajustar la solución de la siguiente manera: si la solución es muy concentrada, añadir agua (2,1 cm<sup>3</sup>/dm<sup>3</sup> por cada 0,0001 N sobre 0,0473); si la solución es muy diluida, añadir iodo (12,7 mg/dm<sup>3</sup> por cada 0,0001 N bajo 0,0473).

### c) Procedimiento y cálculos

- Se secó una muestra adecuada de carbón por 1 h, en un horno de convección a 125°C, en un contenedor abierto, de tal forma que la profundidad del mismo no sea mayor a 10 mm. Se enfrió a temperatura ambiente en un desecador antes de usar.

**Tabla AV. 1.** Masa de carbón activado según el índice de Yodo esperado

Número de Yodo	Masa de la muestra (g)	Radio I <sub>2</sub> : Masa de la muestra
0-130,9	0,5000	50:1
131,0-280,9	0,2500	100:1
281,0-520,9	0,1250	200:1
521,0 y mayores	0,0625	400:1

- Se pesó una masa de muestra seca en un vial de vidrio como se muestra en la tabla AV.1. Todas las masas deben ser pesadas con una sensibilidad de 0,0001 g.
- Se usó la masa de muestra determinada según el índice de iodo esperado. Si el resultado fallara sea por encima o por debajo del rango para ese tamaño de muestra, se debe repetir la prueba con la masa especificada según el rango en el que se obtuvo el primer resultado.
- La masa de muestra dada en la tabla se relaciona a 25 cm<sup>3</sup> solución de iodo. Diferentes volúmenes de solución de iodo y de masas de muestras son solo permisibles si la solución de iodo mantiene la misma relación que la masa de la muestra. La masa de muestra debe ser máximo 1,0000 g.
- Se pipetearon 25 cm<sup>3</sup> de solución de iodo 0,0473 N en el contenedor de la muestra y se tapó inmediatamente.
- Se aseguró el vial en un agitador mecánico y se agitó por 1 minuto a 240 strokes/min.
- Se procedió centrifugar inmediatamente por 1 a 3 minutos.
- Se decantó inmediatamente. Si más de una muestra fueran analizadas, la solución debe ser decantada en frascos pequeños y limpios, secar los viales y tapar inmediatamente.
- Se pipetearon 20 cm<sup>3</sup> de solución en un frasco erlenmeyer de 250 cm<sup>3</sup> y se tituló con solución estándar de tiosulfato de sodio 0,0394 N usando una bureta de vidrio.
- Se añadió solución de tiosulfato de sodio hasta que la solución fue amarillo pálido. Se lavó el frasco con agua.
- Se añadieron 5 gotas de solución de almidón.
- Se continuó añadiendo tiosulfato de sodio hasta que el punto de viraje fue alcanzado cuando la solución se tornó incolora.
- Se registró el volumen de titulación.
- Se procedió determinar el blanco al pipetear 20 cm<sup>3</sup> de solución de iodo 0,0473 N y colocarla en un erlenmeyer de 125 cm<sup>3</sup> y titular con tiosulfato de sodio 0,0394 N. El blanco de 25 cm<sup>3</sup> debió ser multiplicado por 0,8 para ser usado en la fórmula. Se realizó un duplicado del blanco y se usó el promedio de los 2 en los cálculos. Si las 2 soluciones se encuentran en límites

aceptables, el blanco medirá  $24,00 \pm 0,05 \text{ cm}^3$ . Si no es así, las normalidades de ambas soluciones deben ser chequeadas.

Para calcular el número de adsorción de iodo al más cercano  $0,1 \text{ g/Kg}$ , se utilizó la fórmula A.8, como se indica a continuación.

$$I = [(B - S)/B] \times (V/W) \times N \times 126.91 \quad [\text{AV.8}]$$

Donde:

I = Numero de adsorción de iodo, gramos de iodo/kilogramos de carbón expresados en g/Kg

B =  $\text{cm}^3$  de tiosulfato de sodio requeridos para el blanco,

S =  $\text{cm}^3$  de tiosulfato de sodio requeridos para la muestra,

V = volumen de la pipeta  $25 \text{ cm}^3$ ,

W = gramos de muestra de carbón activado, y

N = normalidad de la solución de iodo,  $\text{meq/cm}^3$ , y  $126.91 =$  equivalente en masa del yodo,  $\text{mg/meq}$

## ANEXO VI

### EJEMPLOS DE CÁLCULOS

#### AVI.1. DETERMINACIÓN DE LA DUREZA DEL AGUA

$$\text{Dureza expresada como mg de } \frac{\text{CaCO}_3}{\text{L}} = \frac{A \times N \times 1000}{\text{ml de muestra}} \times 50 \quad [\text{AVI.9}]$$

$$\text{Dureza} = \frac{2,5 \text{ mL} \times 0,023 \text{ N} \times 1000}{25 \text{ mL}} \times 50 = 114,6 \text{ mg } \frac{\text{CaCO}_3}{\text{L}}$$

#### AVI.2. DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD DEL AGUA

$$\text{Alcalinidad, expresada como mg de } \frac{\text{CaCO}_3}{\text{L}} = \frac{A \times N \times 50\,000}{\text{ml de muestra}} \quad [\text{AVI.10}]$$

$$\text{Alcalinidad} = \frac{3,2 \text{ mL} \times 0,021 \text{ N} \times 50\,000}{25 \text{ mL}} = 134,4 \text{ mg } \frac{\text{CaCO}_3}{\text{L}}$$

#### AVI.3. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

$$C_w \left( \frac{\text{meq}}{\text{g}} \text{ húmedo} \right) = \frac{[(200 \times N_B) - (F \times N_A \times 4)]}{W} \quad [\text{AVI.11}]$$

$$C_w = \frac{[(200 \times 0,84 \text{ N}) - (421 \text{ mL} \times 0,0997 \text{ N} \times 4)]}{10 \text{ g}} = 0,08 \frac{\text{meq}}{\text{g}} \text{ húmedo}$$



#### AVI.4. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO ANIÓNICO

$$\frac{\text{miliequivalentes totales anionicos-capacidad de intercambio}}{\text{gramos humedos}} = \frac{(10[(F+H) \times N] - 10[G \times N_A])}{W} \quad [\text{AVI.12}]$$

$$C_w = \frac{(10[(1,2 \text{ mL} + 2 \text{ mL}) \times 0,0967 \text{ N}] - 10[2 \text{ mL} \times 0,0997 \text{ N}])}{5\text{g}} = 0,22 \frac{\text{meq}}{\text{g}} \text{ húmedo}$$

#### AVI.5. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE YODO

$$I \left( \frac{\text{mg}}{\text{g}} \right) = \left[ \frac{(B-S)}{B} \right] \times \left( \frac{V}{W} \right) \times N \times 126,91 \quad [\text{AVI.13}]$$

$$I \left( \frac{\text{mg}}{\text{g}} \right) = \left[ \frac{(24 \text{ mL} - 20,4 \text{ mL})}{24 \text{ mL}} \right] \times \left( \frac{25,2}{0,5} \right) \times 0,03 \times 126,91 = 31,57 \text{ mg/g}$$

**ANEXO VII**  
**INFORMACIÓN TÉCNICA DE RESINAS DE INTERCAMBIO**  
**IÓNICO**

## LEWATIT<sup>®</sup> MonoPlus M 500


General Description

Ionic form, as shipped	Cl <sup>-</sup>
Functional group	quaternary amine, type I
Matrix	crosslinked polystyrene
Structure	gel type beads
Appearance	light yellow, translucent

Physical and Chemical Properties

Bead size*	> 90%	mm	0.6 (± 0.05)
Bulk weight	(± 5%)	g/l	670
Density		approx. g/ml	1.08
Water retention		%	50 - 60
Total capacity*		min. eq/l	1.2
Volume change	Cl <sup>-</sup> → OH <sup>-</sup>	max. %	22
Stability	at temperature	max. °C	1 - 100 (Cl <sup>-</sup> Form)
Stability	in pH range		0 - 14
Storability	of the product	min. years	2
Storability	at temperature	°C	1 - 40

\* These data are specification values and are subject to continuous monitoring.



**Figura AVII. 1.** Escaneo de la hoja técnica de la resina de intercambio iónico Lewatit MonoPlus M500

FICHA TÉCNICA

**PRODUKTINFORMATION**  
**LEWATIT® MonoPlus S 108**

**X LEWATIT**  
ION EXCHANGE RESINS

### Produktbeschreibung

Lieferform	Na <sup>+</sup>
Funktionelle Gruppe	Sulfonsäure
Matrix	vernetztes Polystyrol
Struktur	gelförmige Perlen
Aussehen	schwarz-braun

### Produktdaten

		Metrische Einheiten	
Uniformitätskoeffizient*			1.05 (+/- 0.05)
Mittlerer Korndurchmesser*	mm		0.62 (+/- 0.05)
Schüttdichte (+/- 5 %)		g/l	840
Dichte		ca. g/ml	1,30
Wassergehalt		Gew. %	41 - 46
Totale Kapazität*		min. eq/l	2,2
Volumenänderung	Na <sup>+</sup> → H <sup>+</sup>	max. Vol. %	10
Beständigkeit	pH-Bereich		0 - 14
Lagerfähigkeit	des Produktes	max. Jahre	2
Lagerfähigkeit	Temp.-Bereich	°C	-20 - 40

\* Diese Produktdaten sind Spezifikationswerte. Ihre Einhaltung unterliegt der ständigen Kontrolle.

2/5

Dieses Dokument enthält wichtige Informationen und muss vollständig gelesen werden.  
Version: 2010-11-22

**LANXESS**

**Figura AVII. 2.** Escaneo de la hoja técnica de la resina de intercambio iónico Lewatit MonoPlus S108

## DOWEX HCR-S Strong Acid Cation Exchange Resin

### General Information

DOWEX® HCR-S strong acid cation exchange resin is produced by the sulfonation of a styrene divinylbenzene copolymer of controlled size distribution.

The resin features a high capacity with a porosity to assure an exemplary kinetic behavior. It exhibits good physical, chemical and thermal stability. These characteristics make it the resin of choice for most water treatment applications. DOWEX HCR-S resin is used in softening as well as single or mixed bed demineralization.

In addition to the standard grade, DOWEX HCR-S MB (H) and DOWEX HCR-S PS are specially graded resins for use in mixed bed and counter-current regeneration applications respectively. DOWEX HCR-S D (H) is a dark colored resin designed to give good optical separation when used in a mixed bed.

This brochure relates to water demineralization, using HCl or H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> as regenerants in co-current or counter-current operations. The presented data allows the calculation of operational capacities and

sodium leakages for different water qualities at different temperatures and levels of regeneration. Separate information is available on its use in softening applications. DOWEX HCR-S resin is delivered in either the sodium form or the hydrogen form.

In cases where physical stability is of major concern, premium quality DOWEX HGR resin is available. This resin exhibits superior stability under stringent chemical or physical conditions of operation.

Typical Physical and Chemical Properties			
Ionic form as delivered		Na.	H.
Total exchange capacity, min.	eq/l kgr/ft as CaCO <sub>3</sub>	2.0 43.7	1.8 39.3
Water content	%	44 - 48	50 - 56
Bead size distribution range	mm	0.3 - 1.2	0.3 - 1.2
>1.2 mm, max.	%	5	5
<0.3 mm, max.	%	1	1
Total swelling (Na H), approx.	%	8	8
Whole uncracked beads, min.	%	90	90
Particle density, approx.	g/ml	1.30	1.22
Shipping weight, approx.	g/l lbs/ft <sup>3</sup>	840 52	780 49
Recommended Operating Conditions			
Maximum operating temperature		120°C (250°F)	
pH range		0-14	
Bed depth, min.		800 mm (2.6 ft)	
Flow rates:			
Service fast rinse		5-50 m/h (2-20 gpm/ft <sup>2</sup> )	
Backwash		See figure 1	
Co-current regeneration/displacement rinse		1-10 m/h (0.4-4 gpm/ft <sup>2</sup> )	
Total rinse requirement		3-6 Bed volumes	
Regenerant		1-8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 4-8% HCl or 8-12% NaCl	

Figura AVII. 3. Escaneo de la hoja técnica de la resina de intercambio iónico Dowex HCR S



## RESINTECH® SBG1P

### PHYSICAL PROPERTIES

Polymer Structure	Styrene Crosslinked with DVB
Functional Group	R-N-(CH <sub>2</sub> ) <sup>3</sup> +X <sup>-</sup>
Ionic Form, as shipped	Chloride or Hydroxide
Physical Form	Tough, Spherical Beads
Screen Size Distribution	16 to 50
+16 mesh	< 5 percent
-50 mesh	< 1 percent
pH Range	0 to 14
Water Retention Cl Form	51 to 60 percent
Solubility	Insoluble
Approximate Shipping Weight	
Cl Form	43 lbs/cu. ft.
OH Form	41 lbs/cu. ft.
Swelling Cl- to OH- Form	Approx.25 to 30 percent
Total Capacity	
Cl Form	> 1.25 meq/ml
OH Form	> 1.0 meq/ml min
Sphericity	> 93 percent

### SUGGESTED OPERATING CONDITIONS

Maximum Temperature	
Hydroxide Form	140° F
Salt form	170° F
Minimum Bed Depth	24 Inches
Backwash Rate	60 to 75 percent Bed Expansion
Regenerant Concentration*	2 to 6 percent
Regenerant Flow Rate	0.25 to 1.0 gpm/cu.ft.
Regenerant Contact Time	At least 60 Minutes
Regenerant Level	4 to 10 lbs/cu.ft.
Displacement Rinse Rate	Same as Regenerant Flow Rate
Displacement Rinse Volume	10 to 15 gal/cu.ft.
Fast Rinse Rate	Same as Service Flow Rate
Fast Rinse Volume	35 to 60 gal/cu.ft.
Service Flow Rate	2 to 4 gpm/cu.ft.

### OPERATING CAPACITY

The operating capacity of *ResinTech SBG1P* for acid removal at various regeneration levels when treating an influent with a concentration of 500 ppm, as CaCO<sub>3</sub>, is shown in the following table.

Pounds NaOH/ft <sup>3</sup>	Capacity Kilograms per cubic foot				
	HCl	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
4	11.3	14.0	12.6	18.6	16.1
6	13.5	16.3	14.8	19.8	17.8
8	15.2	18.3	16.7	21.6	19.2
10	16.8	20.0	19.8	22.2	20.3

### APPLICATIONS

#### DEMINERALIZATION -

*ResinTech SBG1P* is widely used in multiple and mixed bed demineralizers, wherever complete ion and organic removal are required.

*ResinTech SBG1P*'s porosity provides the capability of reversibly sorbing naturally occurring organic substances that tend to foul anion resins. Its porosity also provides an increased operating capacity compared with *ResinTech SBG1*.

Type 1 anion exchangers have greater thermal and oxidation resistance than other types of strong base resins and can be operated at higher temperatures to insure low silica leakages. *ResinTech SBG1P*'s combination of porosity and functionality make it the resin of choice where the water temperature is in excess of 85°F or where the combination of carbon dioxide plus silica exceed 40% of the total anions.

*ResinTech SBG1P*'s low density provides maximum separation during the regeneration cycle of mixed bed demineralizers. This results in longer service runs and higher quality effluents.

#### DESILICIZERS -

In certain applications, water supplies with low dissolved solids need only be treated for hardness and silica removal. *ResinTech CG8* operating in the sodium cycle followed by *ResinTech SBG1P* operating in the hydroxide cycle is a very effective way of providing low silica, and low hardness water for medium pressure boilers. This represents considerable savings over the use of demineralization equipment.

### OTHER APPLICATIONS

*ResinTech SBG1P* can also be used to remove various acids from process streams. *ResinTech SBG1P* in either the chloride or hydroxide form can also be used for a variety of non-water treatment applications that involve the exchange of anions.

**CAUTION-DO NOT MIX ION EXCHANGE RESIN WITH STRONG OXIDIZING AGENTS.** Nitric acid and other strong oxidizing agents can cause explosive reactions when mixed with organic materials, such as ion exchange resins.

Material Safety Data Sheets (MSDS) are available for all ResinTech Inc. products. To obtain a copy, contact your local ResinTech sales representative or our corporate headquarters. They contain important health and safety information. This information may be needed to protect your employees and customers from any known health and safety hazards associated with our products. We recommend that you secure and study the pertinent MSDS for our products and any other products being used. These suggestions and data are based on information we believe to be reliable. They are offered in good faith. However, we do not make any guarantee or warranty. We caution against using these products in an unsafe manner or in violation of any patents, further we assume no liability for the consequences of any such actions.

RESINTECH is a registered trademark © of RESINTECH INC.

SBG1Pv06/01/02

Figura AVII. 4. Escaneo de la hoja técnica de la resina de intercambio iónico Resintech SBG1P

## ANEXO VIII

### EJEMPLO DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DEL TANQUE PARA EL FILTRO DE ARENA MULTICAMA

Es importante recalcar que los cálculos se presentan en unidades del Sistema Internacional, pero los catálogos se encuentran en Sistema Inglés.

$$\text{Caudal} = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para el diseño de filtros de arena multicama, se usa el valor de 12,5 gpm/ft<sup>2</sup> como flujo por área que equivale a (Grupo Novem, 2014, p. 19):

$$12,5 \frac{\text{gpm}}{\text{pie}^2} \times \frac{0,23 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{1 \text{ gpm}} \times \frac{1 \text{ ft}^2}{0,093 \text{ m}^2} = 30,91 \text{ m/h}$$

Para obtener el área del tanque:

$$\text{Área} = \frac{\text{Caudal}}{\text{Flujo por área}} \quad [\text{AVIII.13}]$$

$$A = \frac{0,8 \text{ m}^3/\text{h}}{30,91 \text{ m/h}}$$

$$A = 0,03 \text{ m}^2 = 0,28 \text{ pie}^2$$

Diam. Tanque	Área (pie <sup>2</sup> )	Vol. De Medio Filtrante (pie <sup>3</sup> )*
8"	0.35	0.75
9"	0.44	1.0
10"	0.55	1.5
12"	0.79	2.0
13"	0.92	2.5
14"	1.07	3.0
16"	1.4	4.0
18"	1.77	5.0
21"	2.41	7.0
24"	3.14	10
30"	4.91	15
36"	7.07	20
42"	9.62	30
48"	12.57	40

Figura AVIII. 1. Selección de diámetro de tanque en función del área

El área calculada equivale a un volumen de medio filtrante de 0,75 pie<sup>3</sup> y equivale a un tanque de 8 pulg de diámetro.

Tanque FIBRA	Grava		Granate		Arena 30-40		Antracita	
	Vol. pie3	Peso Kg	Vol. pie3	Peso Kg	Vol. pie3	Peso Kg	Vol. pie3	Peso Kg
8" x 44"	0.15	6.8	0.11	6.4	0.20	9	0.45	10
9" x 48"	0.19	8.5	0.15	8.6	0.26	12	0.60	14
10" x 54"	0.23	10.5	0.22	12.8	0.40	18	0.90	21
12" x 52"	0.33	15	0.29	17.3	0.53	24	1.2	27
13" x 54"	0.39	18	0.37	21.6	0.66	30	1.5	34
14" x 65"	0.45	20.5	0.43	25.5	0.79	36	1.8	41
16" x 65"	0.59	27	0.59	34.6	1.1	48	2.4	55
18" x 65"	0.99	45	0.73	43	1.3	60	3.0	68
21" x 62"	1.34	61	1.0	60.2	1.8	84	4.2	96
24" x 65"	1.76	80	1.5	86	2.6	120	6.0	137
30" x 72"	2.73	124	2.2	129	4.0	180	9.0	205
36" x 72"	3.9	179	2.9	172	5.3	240	12	274
42" x 72"	5.34	243	4.4	258	7.9	360	18	410
48" x 72"	7	319	5.9	344	10.6	480	24	547
63" x 67"	14	636	8.0	473	14.5	660	33	752

Figura AVIII. 2. Tabla de materiales para filtros multicama

Adicionalmente es importante el cálculo de la velocidad de retrolavado (Powell, 1981, p.77):

$$\text{Retrolavado} = \text{Área del tanque (pie}^2\text{)} \times 15\text{gpm/pie}^2 \quad [\text{AVIII.14}]$$

$$\text{Retrolavado} = 5,25 \text{ gpm} = 1,19 \text{ m}^3/\text{h}$$

Es importante mantener el caudal adecuado de retrolavado para evitar que el filtro se tapone y siga cumpliendo su función

## ANEXO IX

### EJEMPLO DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DEL TANQUE PARA FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO

Para el diseño de un filtro de carbón activado se debe conocer el valor del EBCT, que para el caso actual tiene un valor de 3 min, debido a que la función del carbón activado es eliminar el cloro residual antes de ingresar al proceso de intercambio iónico.

Volumen de lecho filtrante (ft<sup>3</sup>) =

$$\frac{\text{EBCT (minutos)} \times \text{Caudal (gpm)}}{7,481 \left(\frac{\text{gal}}{\text{pie}^3}\right)} \quad [\text{AIX.15}]$$

$$\text{Volumen} = \frac{3 \text{ min} \times 3,5 \frac{\text{gal}}{\text{min}}}{7,481 \left(\frac{\text{gal}}{\text{pie}^3}\right)} = 1,4 \text{ pie}^3$$

El volumen encontrado equivale al 60% del volumen total del tanque, ya que es necesario que exista espacio suficiente para la expansión del lecho.

$$\text{Volumen del tanque} = 2,33 \text{ pie}^3 = 0,066 \text{ m}^3$$

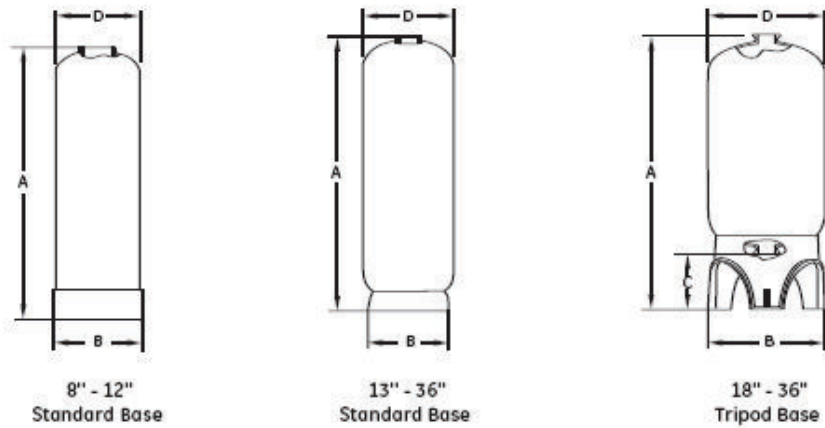
Con el volumen calculado, se escoge del catálogo el equipo que posea las dimensiones más cercanas a los cálculos realizados. En la tabla AIX.1 se observa el tanque seleccionado.

$$\text{Diametro del tanque} = 0,305 \text{ m}$$

$$\text{Altura del tanque} = 1,219 \text{ m}$$

$$\text{Volumen del lecho} = 0,040 \text{ m}^3$$





Available in natural, blue, almond, and black colors

Size	Volume		Weight (lbs.)		Top Opening	Bottom Opening	Base	A	B	C	D
	Gallon	Cubic Foot	Empty	Full							
7 x 13	2.0	0.2	3.09	19.85	2.5" - 8NPSM		Standard	13.15	7.44		7.13
7 x 17	2.6	0.3	4.30	25.91	2.5" - 8NPSM		Standard	16.85	7.44		7.13
7 x 35	5.7	0.7	7.50	55.57	2.5" - 8NPSM		Standard	35.59	7.44		7.13
7 x 44	7.1	0.9	8.93	68.02	2.5" - 8NPSM		Standard	44.57	7.44		7.13
8 x 13	2.2	0.3	3.64	22.38	2.5" - 8NPSM		Standard	13.19	8.43		8.11
8 x 17	3.1	0.4	4.41	30.43	2.5" - 8NPSM		Standard	17.56	8.43		8.11
8 x 35	7.1	0.9	9.15	69.15	2.5" - 8NPSM		Standard	35.63	8.43		8.11
8 x 44	9.1	1.2	10.58	86.33	2.5" - 8NPSM		Standard	44.53	8.43		8.11
9 x 17	3.8	0.5	4.96	36.94	2.5" - 8NPSM		Standard	16.81	9.45		9.13
9 x 35	7.1	0.9	9.26	68.13	2.5" - 8NPSM		Standard	35.63	9.45		9.13
9 x 42	8.5	1.1	11.14	82.36	2.5" - 8NPSM		Standard	48.50	9.45		9.13
9 x 48	11.8	1.6	13.34	112.12	2.5" - 8NPSM		Standard	48.50	9.45		9.13
10 x 17	4.8	0.6	5.51	42.78	2.5" x 8NPSM		Standard	18.39	10.39		10.12
10 x 35	10.4	1.4	10.14	96.95	2.5" - 8NPSM		Standard	35.55	10.39		10.12
10 x 44	13.5	1.8	13.34	126.68	2.5" - 8NPSM		Standard	44.49	10.39		10.12
10 x 54	16.7	2.2	16.32	154.57	2.5" - 8NPSM		Standard	54.72	10.39		10.12
12 x 48	23.4	3.1	18.52	224.62	2.5" - 8NPSM		Standard	48.54	12.24		12.13
12 x 52	25.6	3.4	19.74	233.62	2.5" - 8NPSM		Standard	52.83	12.24		12.13
13 x 44	22.9	3.1	16.87	208.04	2.5" - 8NPSM		Standard	44.96	11.81		13.15
13 x 54	27.6	3.7	22.16	255.01	2.5" - 8NPSM		Standard	55.12	11.81		13.15
14 x 65	39.7	5.3	29.88	360.08	2.5" - 8NPSM		Standard	65.79	12.60		14.17
					4" - 8UN		Standard	66.10	12.60		14.17
16 x 65	48.3	6.5	37.71	446.62	2.5" - 8NPSM		Standard	65.83	14.96		16.14
					4" - 8UN		Standard	66.06	14.96		16.14
18 x 65	62.4	8.3	79.16	599.76	4" - 8UN		Standard	67.76	18.03		18.94
			82.80	603.40	4" - 8UN	4" - 8UN	Tripod	79.92	21.69	15.91	18.90
21 x 62	82.4	11.0	90.63	778.59	4" - 8UN		Standard	68.03	20.55		21.38
			107.05	795.01	4" - 8UN	4" - 8UN	Tripod	81.22	21.69	15.35	21.42
24 x 72	118.9	15.9	114.44	1106.69	4" - 8UN		Standard	75.39	23.62		24.37
			121.28	1113.53	4" - 8UN	4" - 8UN	Tripod	84.96	23.82	14.96	24.49
30 x 72	187.1	25.0	188.97	1751.43	4" - 8UN		Standard	72.17	30.51		30.20
			199.00	1761.46	4" - 8UN	4" - 8UN	Tripod	84.33	30.31	12.99	30.39
36 x 72	263.9	31.7	254.68	2459.68	4" - 8UN		Standard	72.40	36.61		36.30
			271.22	2476.22	4" - 8UN	4" - 8UN	Tripod	84.68	36.69	12.99	36.50

Figura AIX. 1. Sección de catálogo de selección de tanques de GE Water process and Technologies

## ANEXO X

### EJEMPLO DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE LOS TANQUES DE INTERCAMBIO IÓNICO

Para diseñar los tanques de intercambio iónico, se realizaron análisis de los iones presentes en el agua a tratar como se detalla en la tabla X.1.

**Tabla X. 1.** Análisis de los iones presentes en el agua a tratar.

Aniones	Promedio	Desviación estándar	Conversión 1 a mg de radical/l	Conversión a mg/l CaCO <sub>3</sub>
Cloro libre	0,24	0,29	---	0,17
Cloro total	0,48	0,33	---	0,34
Cloruros	15,10	8,97	---	21,31
Fosfatos	0,35	0,18	---	0,56
Nitrógeno-Nitratos	1,75	0,83	7,75	6,25
Nitritos	0,001	0,003	0,004	0,005
Sulfatos	35,11	1,81	---	36,58
alcalinidad	1,82	0,07	77,88	77,89
			<b>TOTAL aniones</b>	<b>143,11</b>
<b>Cationes</b>				
Hierro total	0,66	0,37		0,59
Sílice	40,47	4,56		33,70
Dureza total	2,21	0,17	101,35	101,35
Hierro soluble	0,017	0,01		0,03
Nitrógeno Amoniacal	0,27	0,05	0,32	0,95
			<b>TOTAL cationes</b>	<b>136,63</b>

Para el diseño de la columna catiónica se tomó los cationes totales y para la aniónica los aniones totales. Para conocer el volumen de resina en cada filtro es necesario conocer la capacidad de intercambio de la misma. En este caso:

**Tabla X. 2.** Capacidad de intercambio de las resinas

Datos capacidad de resinas	Capacidad (kilogramos/pie <sup>3</sup> )
Aniónica	21,87
Catiónica	39,366

Se procedió convertir los iones totales en granos por galón de la siguiente manera:

**Tabla X. 3.** Iones totales expresados en granos por galón

<b>Total cationes</b>	8,77	granos por galón
<b>Total Aniones</b>	9,36	granos por galón

Para conocer los cationes removidos en 24 horas:

$$\text{Cationes removidos en 24 horas} = \frac{\text{cationes totales (granos por galon)} \times \text{caudal (gpm)} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}}}{\frac{1000 \text{ granos}}{1 \text{ kilogramo}}} \quad [\text{AX.16}]$$

Cationes removidos en 24 horas = 44,2 kilogramos

Aniones removidos en 24 horas = 47,2 Kilogramos

Para conocer el volumen que ocuparía estas resinas se realizó la siguiente operación:

$$\text{Volumen} = \frac{44,2 \text{ kilogramos}}{39,366 \frac{\text{kilogramos}}{\text{pie}^3}} = 1,12 \text{ pie}^3 \text{ de resina catiónica}$$

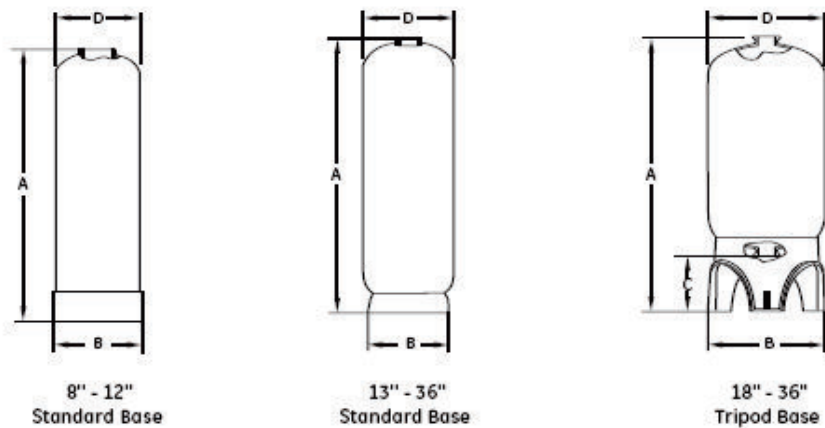
Volumen = 2,15 pie<sup>3</sup> de resina aniónica

La resina ocupará el 60% del volumen total del tanque por lo tanto los volúmenes de los tanques serán:

$$\text{Volumen tanque resina aniónica} = 3,6 \text{ pie}^3 = 0,085 \text{ m}^3$$

Volumen tanque resina catiónica =  $1,9 \text{ pie}^3 = 0,054 \text{ m}^3$

En este caso los tanques seleccionados se observan en el catálogo posterior. Para efectos de estética (Carrillo, 2007, p. 96), se decide mantener a los dos tanques de las mismas dimensiones por lo que el de resina catiónica se encontrará sobredimensionado.

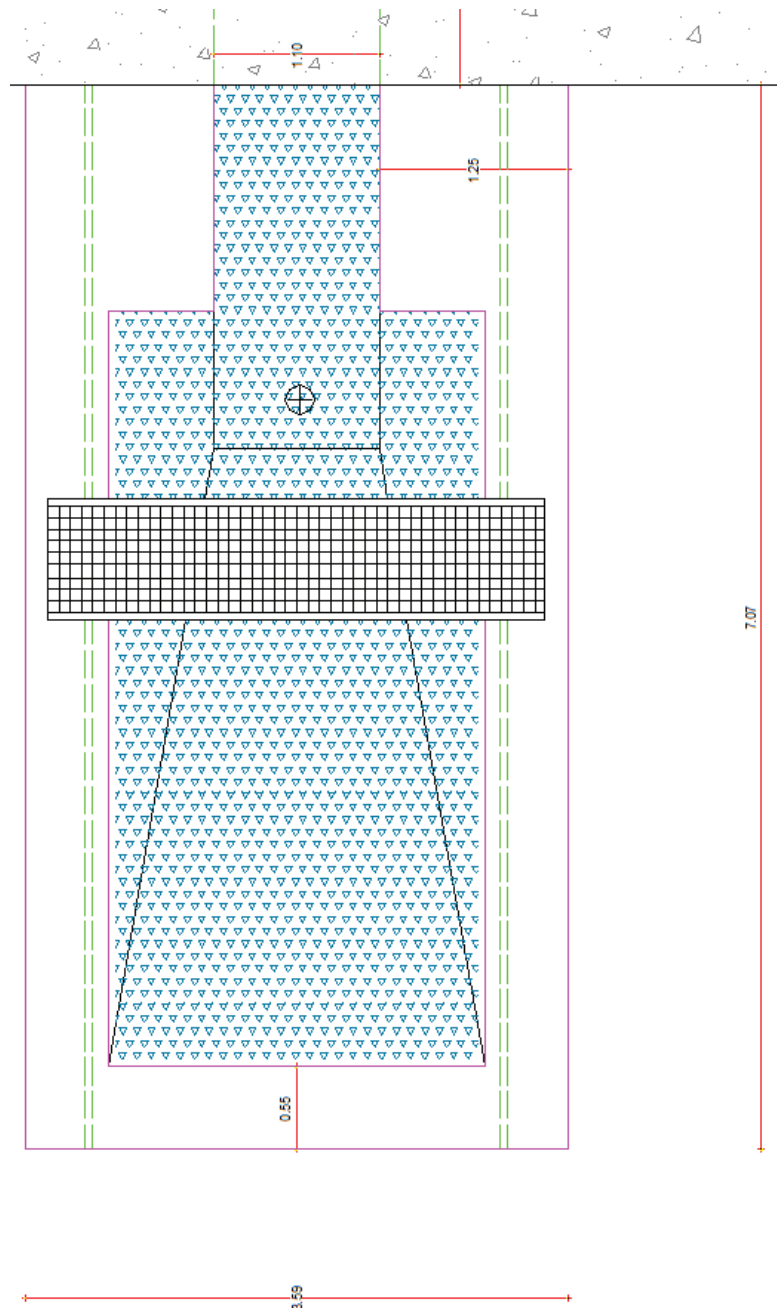


Available in natural, blue, almond, and black colors

Size	Volume		Weight (lbs.)		Top Opening	Bottom Opening	Base	A	B	C	D
	Gallon	Cubic Foot	Empty	Full							
7 x 13	2.0	0.2	3.09	19.85	2.5" - 8NPSM		Standard	13.15	7.44		7.13
7 x 17	2.6	0.3	4.30	25.91	2.5" - 8NPSM		Standard	16.85	7.44		7.13
7 x 35	5.7	0.7	7.50	55.57	2.5" - 8NPSM		Standard	35.59	7.44		7.13
7 x 44	7.1	0.9	8.93	68.02	2.5" - 8NPSM		Standard	44.57	7.44		7.13
8 x 13	2.2	0.3	3.64	22.38	2.5" - 8NPSM		Standard	13.19	8.43		8.11
8 x 17	3.1	0.4	4.41	30.43	2.5" - 8NPSM		Standard	17.56	8.43		8.11
8 x 35	7.1	0.9	9.15	69.15	2.5" - 8NPSM		Standard	35.63	8.43		8.11
8 x 44	9.1	1.2	10.58	86.33	2.5" - 8NPSM		Standard	44.53	8.43		8.11
9 x 17	3.8	0.5	4.96	36.94	2.5" - 8NPSM		Standard	16.81	9.45		9.13
9 x 35	7.1	0.9	9.26	68.13	2.5" - 8NPSM		Standard	35.63	9.45		9.13
9 x 42	8.5	1.1	11.14	82.36	2.5" - 8NPSM		Standard	48.50	9.45		9.13
9 x 48	11.8	1.6	13.34	112.12	2.5" - 8NPSM		Standard	48.50	9.45		9.13
10 x 17	4.8	0.6	5.51	42.78	2.5" x 8NPSM		Standard	18.39	10.39		10.12
10 x 35	10.4	1.4	10.14	96.95	2.5" - 8NPSM		Standard	35.55	10.39		10.12
10 x 44	13.5	1.8	13.34	126.68	2.5" - 8NPSM		Standard	44.49	10.39		10.12
10 x 54	16.7	2.2	16.32	154.57	2.5" - 8NPSM		Standard	54.72	10.39		10.12
12 x 48	23.4	3.1	18.52	224.62	2.5" - 8NPSM		Standard	48.54	12.24		12.13
12 x 52	25.6	3.4	19.74	233.62	2.5" - 8NPSM		Standard	52.83	12.24		12.13
13 x 44	22.9	3.1	16.87	208.04	2.5" - 8NPSM		Standard	44.96	11.81		13.15
13 x 54	27.6	3.7	22.16	255.01	2.5" - 8NPSM		Standard	55.12	11.81		13.15
14 x 65	39.7	5.3	29.88	360.08	2.5" - 8NPSM		Standard	65.79	12.60		14.17
					4" - 8UN		Standard	66.10	12.60		14.17
16 x 65	48.3	6.5	37.71	446.62	2.5" - 8NPSM		Standard	65.83	14.96		16.14
					4" - 8UN		Standard	66.06	14.96		16.14
18 x 65	62.4	8.3	79.16	599.76	4" - 8UN		Standard	67.76	18.03		18.94
			82.80	603.40	4" - 8UN	4" - 8UN	Tripod	79.92	21.69	15.91	18.90
21 x 62	82.4	11.0	90.63	778.59	4" - 8UN		Standard	68.03	20.55		21.38
			107.05	795.01	4" - 8UN	4" - 8UN	Tripod	81.22	21.69	15.35	21.42
			114.44	1106.69	4" - 8UN		Standard	75.39	23.62		24.37
24 x 72	118.9	15.9	121.28	1113.53	4" - 8UN	4" - 8UN	Tripod	84.96	23.82	14.96	24.49
			188.97	1751.43	4" - 8UN		Standard	72.17	30.51		30.20
30 x 72	187.1	25.0	199.00	1761.46	4" - 8UN	4" - 8UN	Tripod	84.33	30.31	12.99	30.39
			254.68	2459.68	4" - 8UN		Standard	72.40	36.61		36.30
36 x 72	263.9	31.7	271.22	2476.22	4" - 8UN	4" - 8UN	Tripod	84.68	36.69	12.99	36.50

Figura AX. 1. Sección del catálogo de GE para seleccionar los filtros de intercambio iónico

**ANEXO XI**  
**PLANO DE LA VISTA SUPERIOR DE LA PISCINA DE**  
**ALMACENAMIENTO CON SUS RESPECTIVAS DIMENSIONES**



**Figura XI.1.** Plano de la vista superior de la piscina de almacenamiento con sus respectivas dimensiones

## ANEXO XII

### CÓDIGO DE SIMULACIÓN

#### AXII.1. CONTROL On-Off

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
'Ingreso de datos
```

```
l = Worksheets("hoja1").Cells(3, 3)
```

```
A = Worksheets("hoja1").Cells(4, 3)
```

```
f1 = Worksheets("hoja1").Cells(5, 3)
```

```
f2 = Worksheets("hoja1").Cells(6, 3)
```

```
kv1 = Worksheets("hoja1").Cells(7, 3)
```

```
kv2 = Worksheets("hoja1").Cells(8, 3)
```

```
N1 = Worksheets("hoja1").Cells(9, 3)
```

```
N2 = Worksheets("hoja1").Cells(10, 3)
```

```
w = Worksheets("hoja1").Cells(11, 3)
```

```
hi = Worksheets("hoja1").Cells(12, 3)
```

```
p = Worksheets("hoja1").Cells(13, 3)
```

```
hmin = Worksheets("hoja1").Cells(14, 3)
```

```
'Parámetros de la integración
```

```
Tmax = Worksheets("hoja1").Cells(16, 3)
```

```
Deltat = Worksheets("hoja1").Cells(17, 3)
```

```
Call Integration(hmin, l, A, f1, f2, kv1, kv2, N1, N2, w, hi, p, Tmax, T, Deltat)
```

```
End Sub
```

```
Sub Integration(hmin, l, A, f1, f2, kv1, kv2, N1, N2, w, hi, p, Tmax, T, Deltat)
```

```
BigK = l * A
```

```
'Inicialización de los valores de las variables
```

```
h = hi: fila = 2: deltap = Tmax / 300
```

```
hset = 4.85
```

```
HBM = 0.15
```

```
Factor = 1
```

```
Q1 = 6
```

```

For T = 0 To Tmax Step Deltat
f1 = Factor * kv1 * (hset * w * 9.8 / 101235) ^ 0.5
Deltah = (-Q1 + f1) / (BigK) * Deltat
h = h + Deltah

If h > (hset + HBM) Then
Factor = 0
Elseif h < (hset - HBM) Then
Factor = 1
End If

If T = 0 Then
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 2) = T
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 3) = hi
'Worksheets("hoja2").Cells(fila, 4) = kv1 * f1 * N1 * Sqr(p)
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 4) = f1
deltap = Tmax / 300
fila = fila + 1
Elseif T >= deltap Then
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 2) = T
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 3) = h
'Worksheets("hoja2").Cells(fila, 4) = kv1 * f1 * N1 * Sqr(p)
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 4) = f1
deltap = Tmax / 300 + deltap
fila = fila + 1
Tlast = T
End If
Next T
If Tlast < Tmax Then
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 2) = T
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 3) = h
'Worksheets("hoja2").Cells(fila, 4) = kv1 * f1 * N1 * Sqr(p)
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 4) = f1
End If

```



## AXII.2. CONTROL PI

```

Sub redundante()
'Ingreso de datos
I = Worksheets("hoja1").Cells(3, 3)
A = Worksheets("hoja1").Cells(4, 3)
f1 = Worksheets("hoja1").Cells(5, 3)
kv1 = Worksheets("hoja1").Cells(7, 3)
w = Worksheets("hoja1").Cells(11, 3)
hi = Worksheets("hoja1").Cells(12, 3)
hmin = Worksheets("hoja1").Cells(14, 3)

'Parámetros de la integración
Tmax = Worksheets("hoja1").Cells(16, 3)
Deltat = Worksheets("hoja1").Cells(17, 3)
Kc = Worksheets("hoja1").Cells(18, 3)
Ti = Worksheets("hoja1").Cells(19, 3)
Hset = Worksheets("hoja1").Cells(20, 3)
Call Integration(hmin, I, A, f1, kv1, w, hi, Tmax, T, Deltat, Kc, Ti, Hset)
End Sub

Sub Integration(hmin, I, A, f1, kv1, w, hi, Tmax, T, Deltat, Kc, Ti, Hset)
BigK = I * A
'Inicialización de los valores de las variables
H = hi: fila = 2: deltap = Tmax / 300
'Hset = 4.85
'HBM = 0.15
factor = 1
Q1 = 6

For T = 0 To Tmax Step Deltat
f1 = factor * kv1 * (Hset * w * 9.8 / 101235) ^ 0.5
Deltah = (-Q1 + f1 - Q2) / (BigK) * Deltat
H = H + Deltah

'Control proporcional PI
Corr = (Hset - H) * Deltat

```

```

SumCorr = SumCorr + Corr
factor = Kc * (Hset - H) + (60 * (Kc / Ti)) * SumCorr
If factor < 0 Then factor = 0

'If h > (Hset + HBM) Then
'Factor = 0
'Elseif h < (Hset - HBM) Then
'Factor = 1

  If T = 0 Then
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 2) = T
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 3) = H
'Worksheets("hoja2").Cells(fila, 4) = kv1 * f1 * N1 * Sqr(p)
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 4) = f1
deltap = Tmax / 300
fila = fila + 1
Elseif T >= deltap Then
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 2) = T
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 3) = H
'Worksheets("hoja2").Cells(fila, 4) = kv1 * f1 * N1 * Sqr(p)
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 4) = f1
deltap = Tmax / 300 + deltap
fila = fila + 1
Tlast = T
End If
Next T
If Tlast < Tmax Then
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 2) = T
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 3) = H
'Worksheets("hoja2").Cells(fila, 4) = kv1 * f1 * N1 * Sqr(p)
Worksheets("hoja2").Cells(fila, 4) = f1
End If

End Sub

```

## ANEXO XIII

GRÁFICOS DE RESPUESTA A DIFERENTES VALORES DE  $K_c$  Y  $T_i$ 

A continuación se observan las figuras desde la AXIII.1 a la AXIII.12, las cuáles muestran la variación de flujo y altura de la piscina al variar los valores de  $K_c$  y  $T_i$ .

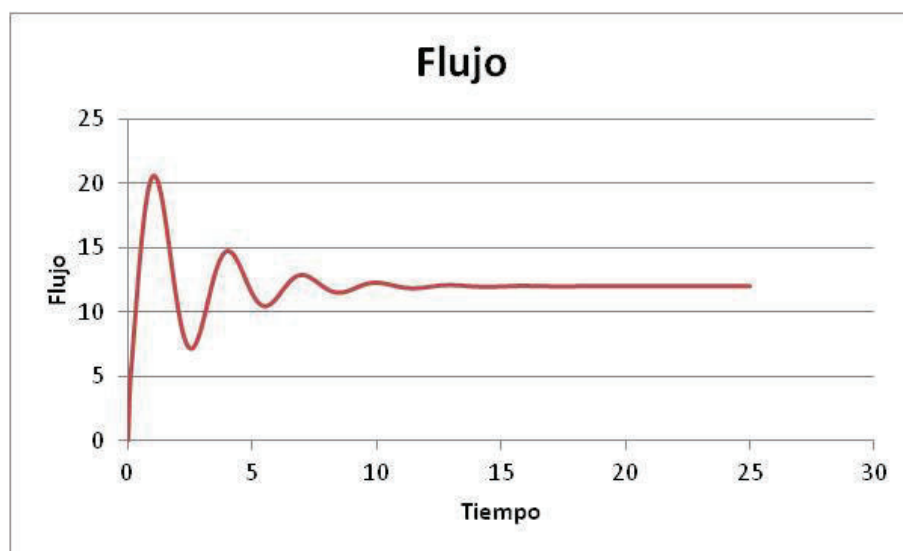


Figura AXIII. 1. Variación del flujo con respecto al tiempo a un  $K_c$  de 3 y un  $T_i$  de 10

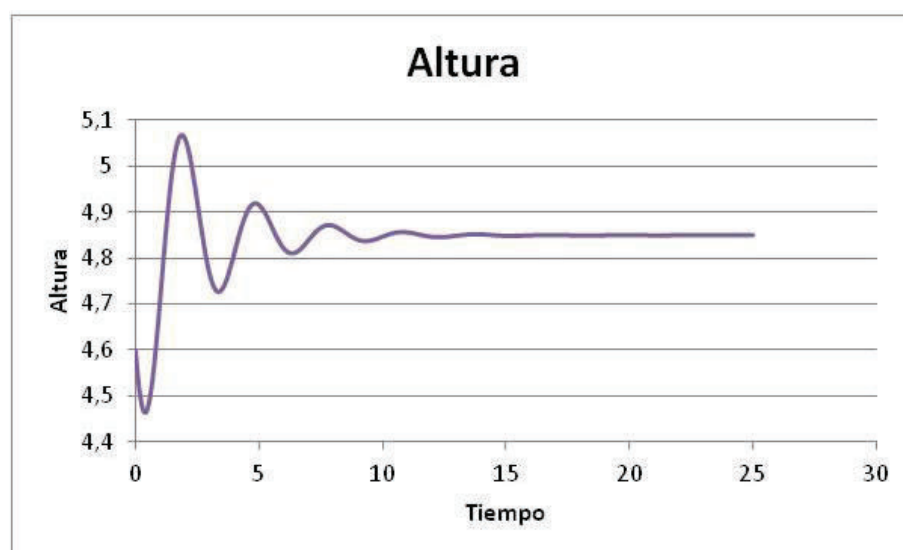


Figura AXIII. 2. Variación de la altura con respecto al tiempo a un  $K_c$  de 3 y un  $T_i$  de 10

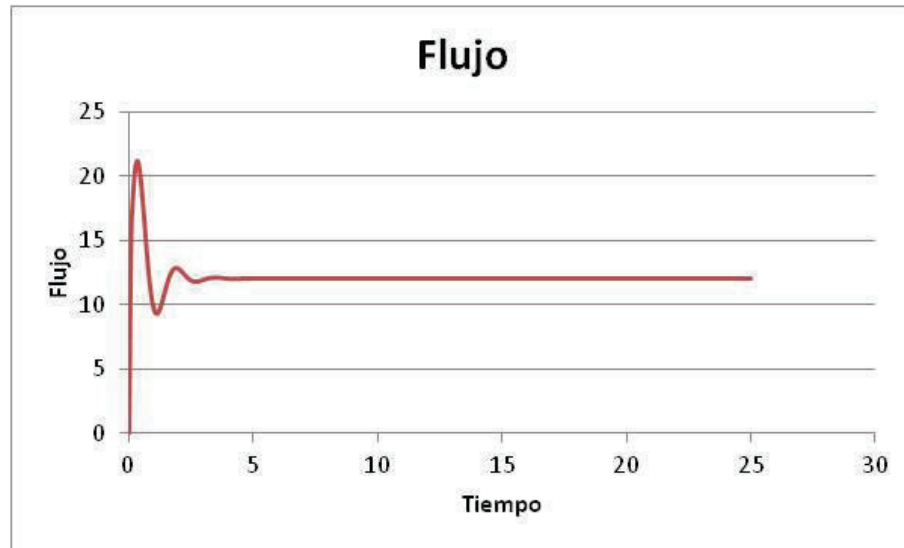


Figura AXIII. 3. Variación del flujo con respecto al tiempo a un  $K_c$  de 12 y un  $T_i$  de 10

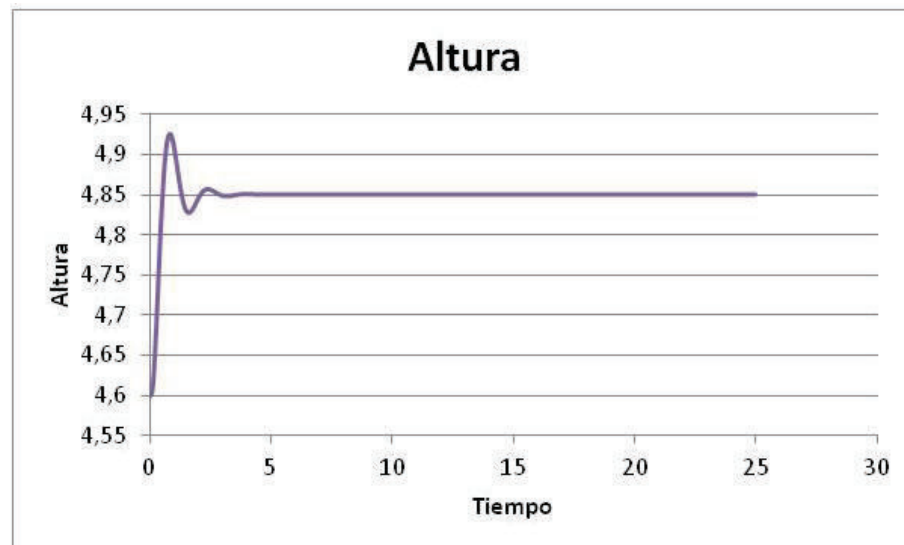


Figura AXIII. 4. Variación de la altura con respecto al tiempo a un  $K_c$  de 12 y un  $T_i$  de 10

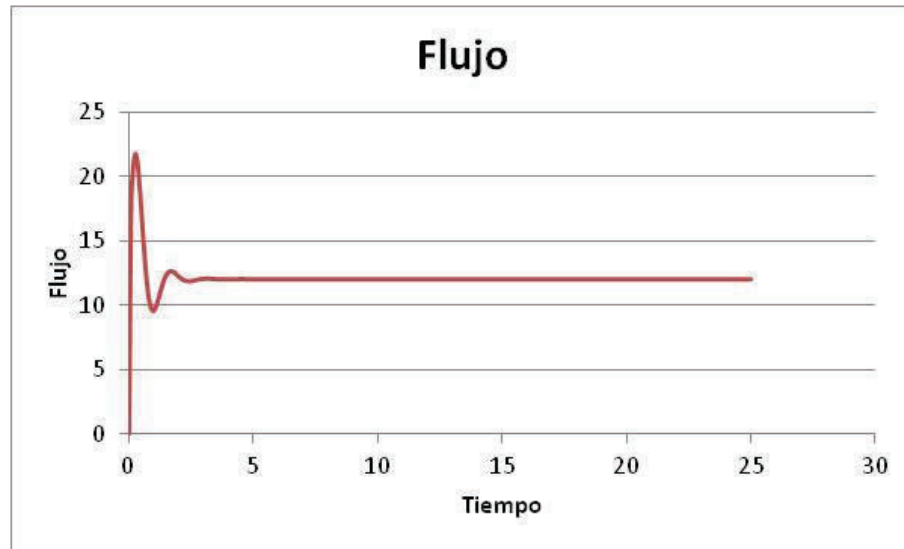


Figura AXIII. 5. Variación del flujo con respecto al tiempo a un  $K_c$  de 15 y un  $T_i$  de 10

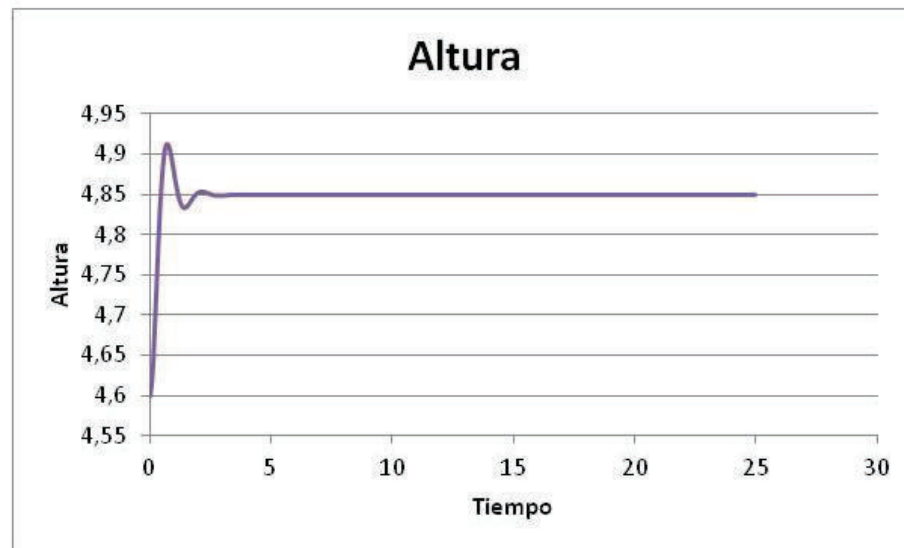


Figura AXIII. 6. Variación de la altura con respecto al tiempo a un  $K_c$  de 15 y un  $T_i$  de 10

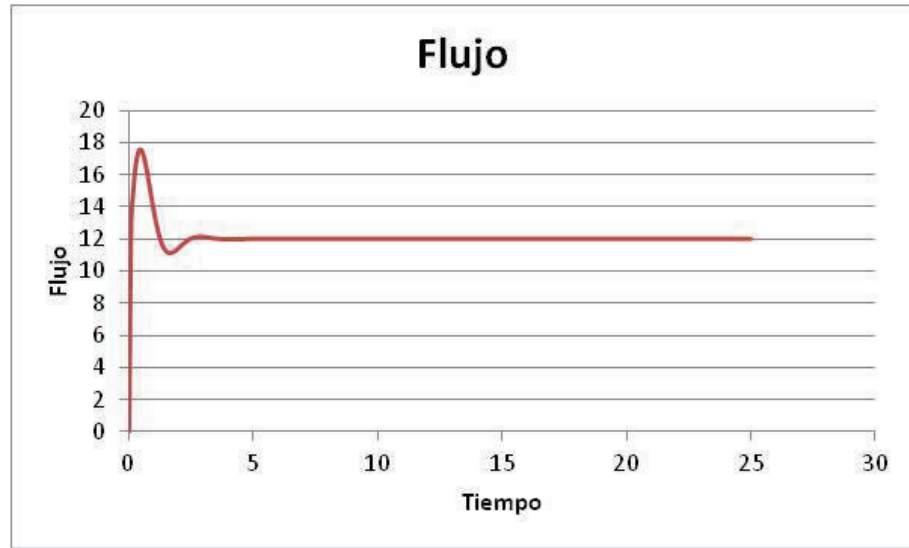


Figura AXIII. 7. Variación del flujo con respecto al tiempo a un  $K_c$  de 12 y un  $T_i$  de 20

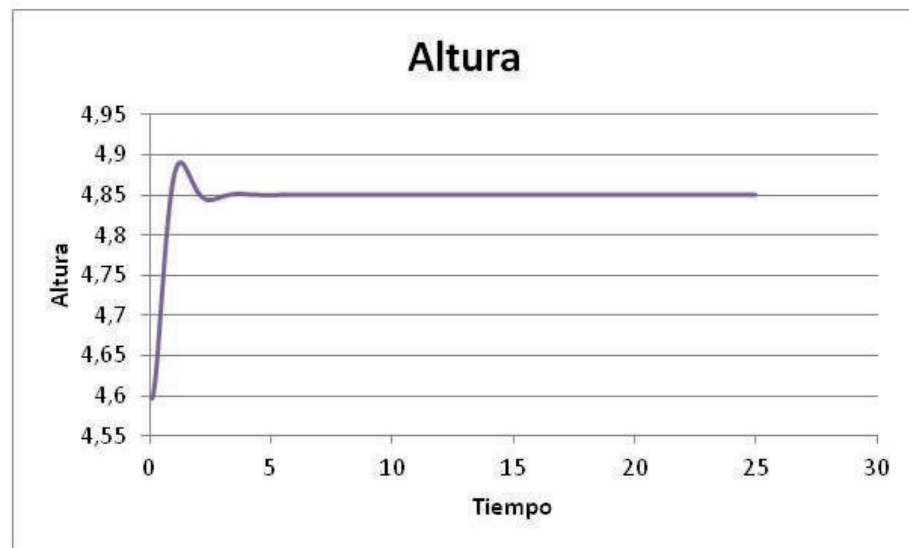


Figura AXIII. 8. Variación del flujo con respecto al tiempo a un  $K_c$  de 12 y un  $T_i$  de 20

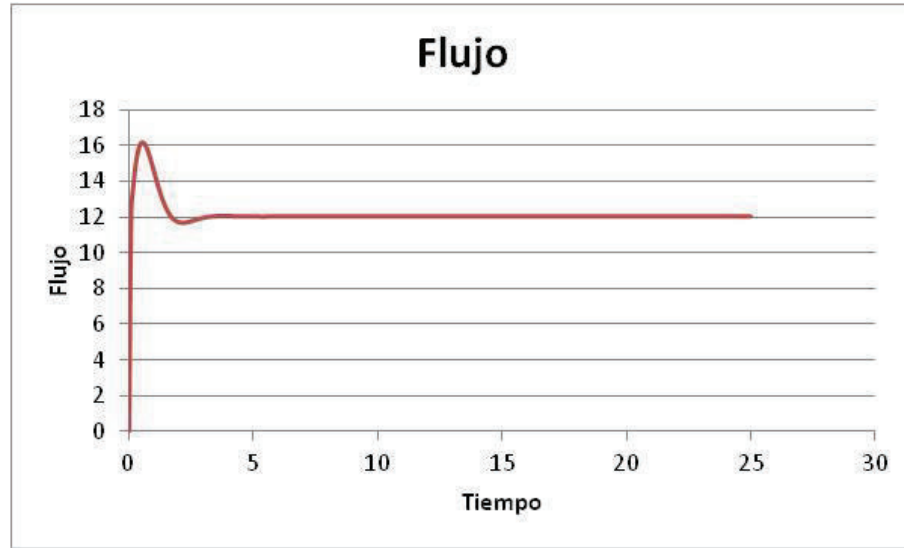


Figura AXIII. 9. Variación del flujo con respecto al tiempo a un  $K_c$  de 12 y un  $T_i$  de 30

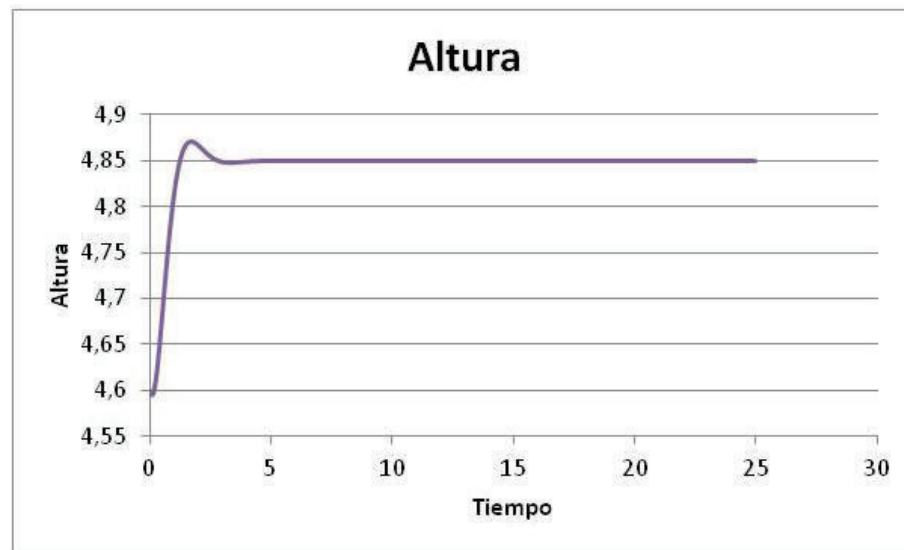


Figura AXIII. 10. Variación de la altura con respecto al tiempo a un  $K_c$  de 12 y un  $T_i$  de

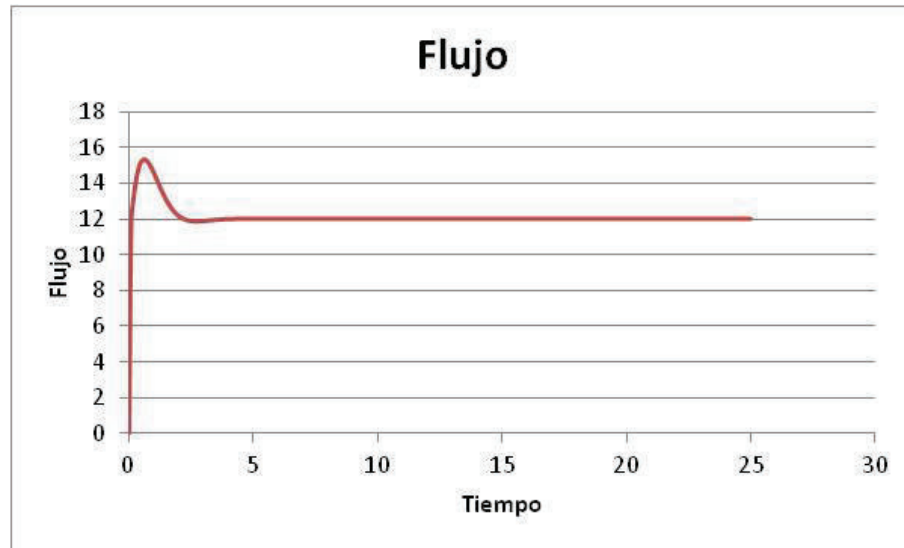


Figura AXIII. 11. Variación del flujo con respecto al tiempo a un  $K_c$  de 12 y un  $T_i$  de 40

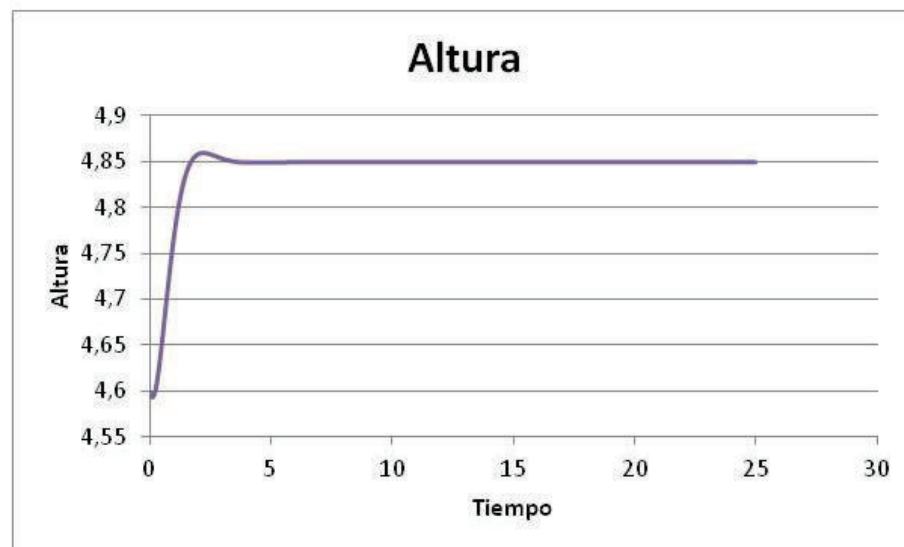


Figura AXIII. 12. Variación de la altura con respecto al tiempo a un  $K_c$  de 12 y un  $T_i$  de 40



## ANEXO XIV

### COTIZACIÓN EMPRESA AAI NAGANT PARA SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA LTR



Agua y Automatismo Industrial  
Nagant Cía. Ltda.  
Tratamiento de Aguas  
Instrumentación  
Automatización de Procesos

Teléfono: 6005644  
Celular: 0995 641385  
info@aaingant.com  
[www.aaingant.com](http://www.aaingant.com)

**Ref: EPN02**

Jueves, 21 de noviembre del 2013

**Para:**  
**María del Carmen Vega**  
**EPN**

**Objeto:** Cotización para la provisión de tratamiento de agua para el Laboratorio de Tecnología de Radiaciones de la EPN.

Estimada María del Carmen,

AAI Nagant Cía. Ltda. se complace en ofrecerle nuestra oferta para el tratamiento de agua del Laboratorio de Tecnología de Radiaciones de la Escuela Politécnica Nacional.

La situación actual es la siguiente:

El sistema consta de un filtro de arena, un filtro de carbón activado, un lecho de resina de intercambio aniónico y un lecho de resina de intercambio catiónico. Adicionalmente 2 tanques de Sosa y HCl para regeneración.

La sección de filtración y desmineralización no está en funcionamiento desde hace muchos años.

Lo que se necesita es un rediseño del sistema, para que sea más pequeño y automatizado.

Hace falta tener conductímetros a la entrada y salida de los lechos de resinas para empezar regeneraciones o saber si hay algún problema con la conductividad.

El agua que se trata es agua potable.

El objetivo es mantener una conductividad del agua menor a 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

El agua desmineralizada se utiliza en la piscina que almacena una fuente radioactiva de Cobalto 60.

Actualmente, el agua de la piscina alcanza una conductividad de 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Las dimensiones de la piscina son las siguientes:

- Profundidad: 4.253 m,
- Largo: 5 m
- Ancho: 2.68 metros.
- Volumen: 57m<sup>3</sup>.

Hace falta un sistema que permita el ingreso de agua potable de un tanque o de la tubería de agua potable a la piscina mediante control automático, cuando se detecte nivel bajo.

Por ningún motivo puede vaciarse la piscina porque el agua es el blindaje hacia el medio ambiente y las personas.

El sistema lo prendían cada 6 meses para disminuir la conductividad. Para limpiar el fondo de la piscina se usaba una bomba y un tubo de PVC manualmente.

**Figura AIV. 1.** Escaneo de la cotización por la empresa AAI Nagant para rediseñar el sistema de tratamiento de agua del LTR (1/3)

### PROPUESTA DE SOLUCIONES

Se implementará el Sistema de Tratamiento de Agua que consiste en la siguiente secuencia, controlada por el PLC del Tablero de Control del Sistema. El Proceso se podrá visualizar y controlar en una pantalla HMI.

- un FDA (desgasificador),
- un filtro de arena con sistema automático de regeneración,
- un filtro de carbón activado con sistema automático de regeneración,
- un lecho de resinas catiónicas con sistema automático de regeneración,
- un lecho de resinas aniónicas con sistema automático de regeneración,
- un lecho mixto catiónico-aniónico para desmineralizar el agua, con sistema automático de regeneración.

El agua de la llave a utilizar se debe acumular en un tanque de 500 litros, para separar la red de agua potable del circuito de tratamiento de agua de la piscina.

Al detectarse nivel bajo en la piscina, una bomba acoplada al tanque de 500 litros de agua potable se prende y permite que el agua potable pase por el Sistema de Tratamiento de Agua.

El Sistema de Tratamiento de Agua se prenderá por lo menos una vez al día, por lo menos por media hora.

Habrá un conductímetro a la entrada y a la salida del Sistema de Tratamiento de Agua. El Sistema operará hasta obtener una conductividad de entrada de 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

También habrá un sensor de pH a la entrada del Sistema, para controlar este parámetro.

### COSTOS

Item	Descripción	Un.	Cant.	Costo Unit.	Costo Total
1	Sistema de ingreso de agua de la llave	gl	1	\$1.287,00	\$1.287,00
2	Desgasificador FDA	gl	1	\$10.454,00	\$10.454,00
3	Filtro de arena automático	gl	1	\$3.386,00	\$3.386,00
4	Filtro de carbón activado automático	gl	1	\$3.573,00	\$3.573,00
5	Desmineralizador catiónico automático	gl	1	\$9.962,00	\$9.962,00
6	Desmineralizador aniónico automático	gl	1	\$10.420,00	\$10.420,00
7	Desmineralizador por lecho mixto automático	gl	1	\$11.783,00	\$11.783,00
8	Tablero de control del Sistema con PLC y HMI	gl	1	\$2.854,00	\$2.854,00
9	Sensores de conductividad en línea	gl	2	\$3.730,00	\$7.460,00
10	Sensor de pH en línea	gl	1	\$2.688,00	\$2.688,00
<b>Subtotal (USD)</b>					<b>\$63.867,00</b>
<b>IVA (12%)</b>					<b>\$7.664,04</b>
<b>Total (USD)</b>					<b>\$71.531,04</b>

Figura AIV. 2. Escaneo de la cotización por la empresa AAI Nagant para rediseñar el sistema de tratamiento de agua del LTR (2/3)

**CONDICIONES DE VENTA**

Forma de pago:	50% de anticipo, 25% contra entrega electromecánica, 25% al finalizar la puesta en marcha.
Tiempo de entrega:	2 meses a partir de la firma del contrato y la entrega del anticipo.
Validez de la oferta:	30 días.

- El cliente proveerá las conexiones eléctricas al tablero del equipo (220VAC trifásico, neutro y tierra, 6HP), y la conexión de agua de la llave.
- El cliente proveerá un área bajo techo para la instalación de equipos (6m x 6m).
- El cliente proveerá la cisterna o el tanque de neutralización de efluentes de regeneración de resinas (500 litros de volumen útil), y los químicos de regeneración.
- Los equipos tienen una garantía contra defectos de fabricación por 12 meses desde la puesta en marcha, o por 14 meses de entregados los equipos, lo que suceda primero.

Esperando que esta cotización este de acuerdo a sus requerimientos y gustosos de ampliar cualquier información adicional, me suscribo.

Atentamente,

**Ing. Xavier Nagant**  
**AAI Nagant Cía. Ltda.**  
**Gerente General**

**Figura AIV. 3.** Escaneo de la cotización por la empresa AAI Nagant para rediseñar el sistema de tratamiento de agua del LTR (3/3)