

DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE
DOSIFICACIÓN Y AGITACIÓN EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES: CASO DE ESTUDIO LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE LA CIUDAD DE CALI (PTAR-C)



JOHN ERNESTO RAMÍREZ MUÑOZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
POPAYÁN
2010

DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE
DOSIFICACIÓN Y AGITACIÓN EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES: CASO DE ESTUDIO LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE LA CIUDAD DE CALI (PTAR-C)

JOHN ERNESTO RAMÍREZ MUÑOZ

Trabajo de grado presentado para optar el título de:
INGENIERO EN AUTOMÁTICA INDUSTRIAL

ING. VÍCTOR HUGO MOSQUERA LEYTON
Director del Trabajo de Grado

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
POPAYÁN
2010

NOTA DE ACEPTACIÓN

—

—

—

—

—

ING. VÍCTOR HUGO MOSQUERA
LEYTON
Director Trabajo de Grado

JURADO

JURADO

Popayán, Junio 3 de 2010.

Agradecimientos

Para alcanzar un sueño es indispensable creer en él, hoy al finalizar esta etapa de mi vida quiero manifestar mi más sentido agradecimiento a aquellos seres que me apoyaron incondicionalmente.

A Dios por iluminar mi camino y guiarme con sabiduría.

A mi Madre por su apoyo, confianza, amor y dedicación a lo largo de mi vida.

CONTENIDO

Pág.

RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 CONCEPTOS TEÓRICOS IMPORTANTES	3
1.1.1 PTAR	3
1.1.2 TPA	3
1.1.3 SST	4
1.1.4 DBO	4
1.1.5 DQO	4
1.1.6 BIOSÓLIDO	5
1.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	5
1.3 CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.3.1 Tratamiento Primario Avanzado	12
1.3.1.1 Etapas del proceso TPA	13
CAPITULO 2. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	25
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	25
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	26
2.3 JUSTIFICACIÓN	26
2.4 OBJETIVOS	27
2.4.1 Objetivo general	27
2.4.2 Objetivos específicos	27
2.5 METODOLOGÍA DEL TRABAJO	28
2.5.1 Tipo y diseño de la investigación	28
CAPITULO 3. DOSIFICACIÓN Y AGITACIÓN EN LAS PTAR	29
3.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN EN LAS PTAR	29
3.1.1 Sistema de dosificación en la PTAR-C	32

3.1.1.1	Sistema de dosificación de polímero en la PTAR-C	32
3.1.1.2	Sistema de dosificación de cloruro férrico en la PTAR-C	33
3.2	CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE AGITACIÓN EN LAS PTAR	53
3.2.1	Sistema de agitación en la PTAR-C	39
3.2.2	Sistema de agitación 2 en la PTAR-C	39
	CAPITULO 4. CASO DE ESTUDIO	41
4.1	DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	41
4.1.1	Objetivo de la empresa caso de estudio	42
4.1.2	Localización de la empresa	42
4.1.3	Descripción del proceso	45
	CAPITULO 5 DISEÑO EXPERIMENTAL	47
5.1	TOMA DE DATOS	47
5.2	CALIDAD DEL AGUAS RESIDUAL	47
5.2.1	Definición de rangos de calidad del agua	52
5.3	DOSIS OPTIMAS DE QUÍMICO	52
5.3.1	Pruebas de jarras	52
5.3.1.1	Determinación de la dosis óptima de coagulante	52
5.4	VELOCIDAD DE AGITACIÓN	61
5.4.1	Gradiente G de velocidad	62
5.5	VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO	66
5.5.1	Diseño del estudio	66
5.5.2	Diseño experimental completamente aleatorio	67
5.5.3	Análisis de datos	68
5.5.4	Sistema de variables	68
5.5.4.1	Variable respuesta	68
5.5.4.2	Variable covariable	68
5.6	SOFTWARE EMPLEADO	68
5.7	ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	70
5.7.1	Análisis de covarianza	70

CAPITULO 6. DEFINICIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN NECESARIA PARA AUTOMATIZAR LOS SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN Y AGITACIÓN DE LA PTAR-C	74
6.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE AUTOMATIZACIÓN	74
6.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	74
6.2.1 Requerimientos	74
6.3 PROPUESTA DE SOLUCIÓN	74
6.3.1 Descripción de equipos	76
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	90

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia PTAR.	6
Cuadro 2. Composición típica promedio de las A.R.D.	11
Cuadro 3. Comparación de Tasas de Remoción.	22
Cuadro 4. Fases de la investigación.	28
Cuadro 5. Parámetros experimentales en las pruebas de jarras.	53
Cuadro 6. Dosis sugeridas de químico	60
Cuadro 7. Dosis sugeridas de químicos en condiciones de lluvia	60
Cuadro 8. Velocidades y tiempos sugeridos de mezcla.	62
Cuadro 9. Gradientes y tiempos de mezcla sugeridos	63
Cuadro 10. Constante CD.	66
Cuadro 11. Pruebas de los efectos inter-sujetos	70
Cuadro 12. Cumplimiento de los supuestos.	71
Cuadro 13. Características del PLC Micrologix 1500	83

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Planta tratamiento de Aguas Residuales PTAR de Santiago de Cali (Sector de Cañaveralejo: Vista panorámica).	8
Figura 2. Polímero como coagulante.	17
Figura 3. Coagulante metálico.	17
Figura 4. Poli electrolito usado como ayudante de floculación.	20
Figura 5a. Esquema de un sistema de dosificación con control local	30
Figura 5b Esquema de un sistema de dosificación con control remoto.	30
Figura 6. Bomba de pistón	30
Figura 7. Bomba diafragma	31
Figura 8. Sistema de dosificación por gravedad	31
Figura 9. Tolva almacenadora de polímero	32
Figura 10. Bomba dosificadora de polímero	32
Figura 11. Tanque de almacenamiento de cloruro férrico	33
Figura 12. Bomba dosificadora de cloruro férrico	34
Figura 13. Diagrama vertedero sumergible	35
Figura 14. Agitador de hélice	36
Figura 15. Agitador de paleta	36
Figura.16. agitador de turbina	36
Figura 17. Agitador RUSHTON	37
Figura 18. Agitador de paletas para floculador	38
Figura 19. Esquema de sistema de agitación	39
Figura 20. Motorreductores	39
Figura 21. Sistema de agitación 1 de la PTAR-C	40
Figura 22. Sistema de agitación 2 de la PTAR-C	40
Figura 23. Planta general	42
Figura 24. Línea de agua de la PTAR-C	43
Figura 25. Esquema de línea de agua	43
Figura 26. Línea de lodo PTAR-C	44

Figura 27. Esquema línea de lodo	44
Figura 28. Edificio generación de energía	45
Figura 29. Diagrama de flujo PTAR-C	46
Figura 30. Curvas de relación Turbiedad y SST	48
Figura 31. Toma de muestra en cámara de integración PTAR-C.	49
Figura 32. Turbidímetro utilizado para la realización de las pruebas de laboratorio.	50
Figura33. Prueba de turbiedad	51
Figura 34. Prueba de turbiedad condición lluvia	51
Figura 35 Curvas de relación turbiedad y SST Prueba 2	51
Figura 35. Aparato Prueba de Jarras.	54
Figura 35b Panel aparato de prueba	54
Figura 36. Comparador para estimar el tamaño del floc	55
Figura 37. Reacción de químicos en el agua residual.	57
Figura 38. Panel aparato prueba de agua residual Jarras.	57
Figura 39. Remoción turbiedad	58
Figura 40. Remoción turbiedad con lluvia	69
Figura 41. Remoción de turbiedad variando velocidad	61
Figura 42. Curvas de calibración Velocidad Vs Gradiente	63
Figura 43. Cloruro férrico Vs remoción turbiedad	71
Figura 44. Residuos del experimento	72
Figura 45. Homogeneidad de varianza	73
Figura 46. Tecnologías cableadas y programadas	75
Figura 47. Transición lógica cableada a programada	75
Figura48. Modelo automatización integral NBS	76
Figura 49. Bombas dosificadora propuesta	78
Figura 50. Experimento con la sonda	80
Figura 51. Bomba centrífuga de dilución	82
Figura 52. Modelo de interfaz 1761 NET-AIC	84
Figura 53. Modulo interfaz 170 KF3	84
Figura 54. Esquema conexión de los sistemas de dosificación y agitación	87

Figura 55. Estaciones de bombeo al inicio de la planta	101
Figura 56. Medidores de caudal	102
Figura 57. SCADA.	102
Figura 58. Sistema de bombas de tornillo.	103
Figura 59. Sistema de bombas de tornillo parte inferior.	103
Figura 60. Rejillas Gruesas.	104
Figura 61. Rejillas Finas.	105
Figura 62. Sistema de dosificación de cloruro férrico.	106
Figura 63. Sistema de dosificación de Polímero.	106
Figura 64. Desarenadores.	107
Figura 65. Sedimentadores.	108
Figura 66. Sedimentadores.	109
Figura 67. Digestores.	111
Figura 68. Filtros Prensa.	112
Figura 69. Tanque de almacenamiento de Biogás.	113
Figura 70. Sistema de aireación.	114
Figura 71. Filtros Biológicos.	115
Figura 72. Disposición final y manejo de los Biosólidos en la PTAR-C	116
Figura 73. Salida de agua clarificada hacia el rio Cauca	116

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Tratamiento de subproductos del TPA.	95
Anexo B. Ventajas y limitaciones del TPA.	98
Anexo C. Descripción del proceso de al planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Cali PTAR-C.	101
Anexo D. Ficha técnica de diseño de la PTAR-C	117

RESUMEN

Investigación de carácter descriptivo, apoyada en información cualitativa y cuantitativa, denominada “Criterios para la optimización de los sistemas de dosificación y agitación en las plantas de tratamiento de aguas residuales”, la cual se llevó a cabo en la PTAR-C de la ciudad de Cali, con el apoyo de sus directivas y personal técnico que allí labora.

Los resultados permitieron establecer que esta planta de tratamiento opera aplicando el Tratamiento Primario Avanzado o TPA, al afluente estimado en $7.6\text{m}^3/\text{seg}$ generado en la ciudad, pero que tales operaciones hacen parte de un proyecto macro que hacia el año 2015 debe estar procesando un caudal de $14\text{m}^3/\text{seg}$, haciendo de ella la segunda en importancia en el país, comparable a la PTAR El Salitre de Bogotá. Por lo tanto, resulta imprescindible que esta empresa optimice sus esquemas operativos con base a los criterios técnico-científicos recomendados a nivel nacional e internacional.

Las recomendaciones realizadas a sus directivas como producto del trabajo de campo se concretaron en lo siguiente: primero ajustar los sistemas de dosificación del cloruro férrico de acuerdo a las variaciones que presenta el afluente a lo largo del día; segundo, mejorar el sistema de agitación con equipos similares a los sugeridos; tercero, sugerir un sistema de medición del afluente utilizando una sonda digital, para ajustar adecuadamente los sistemas de dosificación y agitación; cuarto, mejorar el sistema de disolución de los químicos empleados, mediante la implementación de equipos similares a los sugeridos; quinto, integrar y comunicar los instrumentos mediante la red y equipos sugeridos en este proyecto.

ABSTRACT

Investigation of descriptive character, supported in qualitative and quantitative, denominated information "Approaches for the optimization of the dosage systems and agitation in the plants of treatment of residual waters", which was carried out in the PTAR-C of the city of Cali, with the support of their directive ones and technical personnel that there works.

The results allowed to establish that this treatment plant operates applying the Advanced Primary Treatment or TPA, to the tributary estimated in 7.6m³/seg generated in the city, but that such operations make part of a macro project that toward the year 2015 should be processing a flow of 14m³/seg, making of her the second in importance in the country, comparable to the PTAR The Salitre of Bogotá. Therefore, it is indispensable that this company optimizes its operative outlines with base to the technician-scientific approaches recommended at national and international level.

The recommendations carried out to their directive ones as product of the field work were summed up in the following thing: first to adjust the systems of dosage of the ferric chloride according to the variations that it presents the tributary along the day; second, to improve the system of agitation with similar teams to those suggested; third, to implement the system of mensuration of the tributary with the digital probe, to adjust the dosage systems and agitation appropriately; room, to improve the system of the chemists' employees break-up, by means of the implementation of similar teams to those suggested. Fifth; integrate and communicate the instruments by the network and equipment suggested in this project.

INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales generadas por áreas residenciales, industriales, comerciales e institucionales, al ser eliminadas canalizándolas directamente hacia cuerpos naturales de agua afectan, a partir del lugar de desagüe, tanto las características físico-químicas de estos como al entorno biótico y abiótico cercano e incluso distante, es por ello que por razones de salud pública y por consideraciones económicas, recreacionales y estéticas no pueden ser desechadas vertiéndolas sin tratamiento apropiado en cursos o depósitos de aguas superficiales.

El tratamiento de estas aguas residuales (o agua doméstica e industrial), es un procedimiento que incorpora procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales tratan y remueven la mayor parte de las sustancias peligrosas, de donde el objetivo del tratamiento es producir agua ya limpia (o efluente tratado) o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango también apropiado para futuros propósitos o recursos. Es de anotar que las aguas residuales pueden ser tratadas dentro del sitio en el cual son generadas, como por ejemplo: tanques sépticos u otros medios de depuración, sin embargo, cuando se manejan grandes volúmenes de ellas son recogidas y llevadas mediante una red de tuberías y eventualmente bombas a una planta de tratamiento ya que requieren procesos de tratamiento especializado.

En general, el tratamiento de aguas residuales se realiza mediante la separación física inicial de sólidos de la corriente de aguas domésticas o industriales, seguida por la conversión progresiva de materia biológica disuelta en una masa biológica sólida usando diferentes sustancias químicas o biológicas. Una vez que la masa biológica es separada o removida, el agua tratada puede experimentar una desinfección adicional mediante procesos físicos o químicos. Este efluente final puede ser descargado o reintroducido a un cuerpo de agua natural o empleado en proyectos de ferti-irrigación. Por su parte, los sólidos extraídos de estas aguas residuales experimentan un tratamiento y neutralización adicional en las plantas de tratamiento antes de su descarga o reutilización apropiada.

Una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales o PTAR, como ocurre con la ubicada en el sector de Cañaveralejo en la ciudad de Cali, de donde deriva su nombre de PTAR-C, tiene como propósito eliminar toda contaminación química y bacteriológica del agua que pueda ser nociva para los seres humanos, la flora y la fauna de manera que el agua sea reintegrada al medioambiente en forma segura. El proceso, además, debe ser optimizado de manera que la planta no produzca olores ofensivos hacia la comunidad en la cual está inserta.

En consecuencia, esta investigación presenta los resultados del trabajo desarrollado en la PTAR-C, enfatizando en todo momento, con el apoyo de fuentes documentales y bibliográficas, cómo en esta planta al igual que en cualquiera de su tipo, es

indispensable llevar a cabo no solo trabajos de investigación tendientes a optimizar sus operaciones, sino a atender por parte de sus administraciones los resultados obtenidos, pues esta es la única manera de lograr recuperar para las generaciones futuras el medioambiente altamente impactado por las actividades antrópicas.

En cuanto a su parte formal, el documento está organizado de la siguiente forma:

CAPITULO 1. Se presenta la definición de algunos conceptos teóricos importantes para una mejor comprensión del documento.

CAPÍTULO 2. Se presenta la descripción y formulación del problema que dio origen a la presente investigación. A continuación, aparece la justificación de la investigación donde se destaca cómo una intervención del tipo aquí planteada, puede contribuir al mejoramiento de los sistemas operativos de esta empresa. Finalmente, están los objetivos que guiaron las diferentes actividades de la investigación.

CAPITULO 3. Aparece el marco teórico que abarca el contexto de la investigación y la metodología del presente trabajo.

CAPÍTULO 4. Se describen las características que presentan los sistemas de dosificación y agitación de las plantas de tratamiento de aguas residuales haciendo énfasis en el caso de estudio PTAR-C.

CAPÍTULO 5. Se describe el caso de estudio, con los distintos procesos realizados en la PTAR-C durante el tratamiento de las aguas residuales, enfatizando en las actuaciones del investigador durante el trabajo de campo.

CAPÍTULO 6. El investigador realiza un diseño experimental para determinar las dosis y los gradientes adecuados para el tratamiento de las aguas residuales.

CAPITULO 7. Se presenta una propuesta describiendo los instrumentos necesarios que requieren los sistemas de dosificación y agitación para ser automatizados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. Se ofrecen las conclusiones que resultan de verificar el cumplimiento de cada uno de los objetivos propuestos y se presenta a consideración de las directivas de la PTAR-C y de los compañeros del Programa de Ingeniería en Automática Industrial, algunas recomendaciones relacionadas con los resultados del trabajo de campo.

CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO

El presente capítulo tiene como propósito brindar al lector una visión global de los temas relacionados con el trabajo de grado presentando, dando a conocer en primera instancia algunos conceptos importantes para un mejor entendimiento por parte del lector del proyecto planteado.

1.1 CONCEPTOS TEÓRICOS IMPORTANTES

1.1.1 PTAR: PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

Los principales objetivos que se persiguen con el funcionamiento de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, se resumen en lo siguiente:

Interceptar y conducir las aguas residuales que anteriormente eran descargadas en los ríos hacia una planta para su posterior depuración, y así contar con cuerpos acuáticos libres de contaminación, en los cuales se vuelvan a dar las condiciones necesarias para el desarrollo de la flora y la fauna.

Tratar las aguas residuales generadas en áreas metropolitanas de las ciudades, con la finalidad de evitar que las mismas sean fuente de proliferación de enfermedades que pudieran afectar a la salud de la población donde se encuentre la PTAR y de las poblaciones que se encuentran localizadas aguas abajo de la misma.

Devolver al medio ambiente aguas libres de contaminación, recuperar la belleza escénica de los ríos, fortaleciendo actividades de esparcimiento y turismo. Reutilizar el efluente de la PTAR en actividades tales como riego, cultivo de peces, recreación, generación de energía hidroeléctrica, [1] etc.

1.1.2 TPA: TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO.

El TPA es una clase de tratamiento que consiste en precipitar simultáneamente las diversas clases de contaminantes de aguas residuales sanitarias, atrapados en flocos fáciles de eliminar del agua mediante la adición de ciertas sustancias químicas. Este proceso proporciona elevadas tasas de depuración en una sola etapa de tratamiento. A pesar de su uso en nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales, la versatilidad del proceso permite duplicar la capacidad y la eficiencia de las plantas pre existentes prácticamente sin la necesidad de obras civiles. Esta es una estrategia que combina la eficiencia de tratamiento requerida en el mundo entero con el presupuesto disponible en los países en vías de desarrollo [2].

1.1.3 SST: SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES.

Podemos distinguirlos en sólidos sedimentables, sólidos en suspensión y sólidos disueltos, siendo los sólidos totales la suma de todos ellos. Estos sólidos, además de poder suponer la presencia de cuerpos u sustancias extrañas que pudieran en algún caso no ser recomendables, aumentan la turbidez del agua y disminuyen la calidad de la misma.

Los Sólidos Suspendidos Totales SST o TDS (Sólidos Disueltos Totales), es la cantidad de Sólidos que el agua conserva en suspensión después de 10 minutos de asentamiento. Estos sólidos pueden ser tanto las sustancias orgánicas como inorgánicas, microorganismos o partículas más grandes como la arena y arcilla [3].

1.1.4 DBO: DEMANDA BIOLÓGICA DE OXIGENO.

Representa el requerimiento de oxígeno producido por la biodegradación de la materia orgánica contenida en el agua residual. Es una medida inexacta pero de gran importancia pues indica indirectamente la cantidad de materia orgánica biodegradable que contiene el agua. No puede utilizarse para balances de materia en los procesos de tratamiento biológico, por ello es conveniente realizarla en paralelo con otras medidas.

La DBO puede expresarse en diversas maneras. El ensayo estandarizado más conocido es el denominado DBO₅, que representa el consumo de oxígeno provocado por la bio-oxidación de una muestra de agua residual a 20 °C durante 5 días. Las medidas de DBO son lentas y poco recomendables de cara a cuantificar el contenido en materia orgánica del agua [4].

1.1.5 DQO: DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO.

Ciertas sustancias presentes en las aguas residuales, al vertirse en un curso o una masa de agua, captan parte del oxígeno existente debido a la presencia de sustancias químicas reductoras. Estas necesidades de oxígeno, al margen de todo proceso biológico, se denomina Demanda Química de Oxígeno o DQO.

La medida de la DQO es una estimación de las materias oxidables presentes en el agua, cualquiera que sea su origen orgánico o mineral (hierro ferroso, nitritos, amoníaco, sulfuros y cloruros). Es un test particularmente útil para apreciar el funcionamiento de las estaciones depuradoras y la actuación de muchos vertidos industriales [4].

1.1.6 BIOSÓLIDOS.

El tratamiento de aguas residuales urbanas en plantas de tratamiento es una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos que genera enormes volúmenes de lodos orgánicos altamente putrescibles. Para facilitar el manejo de éstos, se someten a procesos de espesamiento, digestión y deshidratación, adquiriendo así la categoría de biosólidos. Gracias a este proceso, el biosólido tiene aptitud para utilización agrícola y forestal, y para la recuperación de suelos degradados. El manejo que se da a estos biosólidos dependerá de la concentración de metales pesados, contaminantes tóxicos y organismos patógenos.

Un ejemplo de tales usos es la incorporación de biosólidos al terreno para abastecerlo de nutrientes y para renovar la materia orgánica del terreno. Esta actividad se conoce como aplicación al terreno. Los biosólidos se pueden utilizar en terrenos agrícolas, bosques, campos de pastoreo, o en terrenos alterados que necesitan recuperación.

El reciclaje de los biosólidos a través de la aplicación al terreno tiene varios propósitos. Estos mejoran las características del suelo, tales como la textura y la capacidad de absorción de agua, las cuales brindan condiciones más favorables para el crecimiento de las raíces e incrementan la tolerancia de la vegetación a la sequía. La aplicación de biosólidos también provee nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal, incluyendo el nitrógeno y el fósforo, así como algunos micronutrientes esenciales, tales como el níquel, el zinc y el cobre. Los biosólidos pueden servir también como una alternativa o sustituto de los costosos fertilizantes químicos [5].

1.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

En el contexto mundial [7], se ha puesto en evidencia que la gran mayoría de las aguas residuales no están siendo tratadas y son vertidas directamente a los cuerpos de agua cercanos a las zonas residenciales, comerciales e industriales, situación que es más significativa en los países en vías de desarrollo, donde usualmente no cuentan con los recursos para llevar a cabo estos procesos de tratamiento. En África y Asia se estima que 2.640 millones de personas padecen las consecuencias de la contaminación de sus cuerpos de agua por efectos de las actividades cotidianas. Por su parte, en los países desarrollados los avances han sido más notorios, teniendo en cuenta que los volúmenes de contaminación generados en ellos son mucho mayores que en el resto del planeta, esto en cierta medida los ha obligado a implementar estrictas normas de control de calidad del agua residual vertida en ríos, lagos y costas marinas, principalmente de origen industrial, lográndose en muchos casos resultados beneficiosos que han sido replicados en algunos países en vías de desarrollo alrededor del mundo [7].

Existen casos de países como la India [8], donde más del 70% de sus ríos son verdaderas alcantarillas descubiertas que descargan al mar toda la carga contaminante de las zonas urbanas, rurales e industriales, con graves riesgos para la salud humana y para la estabilidad del medioambiente. Para el caso de Latinoamérica, el Banco Mundial [9] estima que los 300 millones de habitantes de las áreas urbanas producen 225.000 toneladas de residuos sólidos diariamente, sin embargo, menos del 10% de las aguas residuales de esas mismas ciudades son tratadas apropiadamente, porque en su mayoría son vertidas en aguas superficiales, contribuyendo con ello a incrementar las problemáticas de salud pública y medioambientales que padecen casi todos estos países.

En el caso de Colombia [10], usualmente se hace referencia a los niveles de contaminación que presentan ríos principales como el Magdalena, Cauca o Bogotá, pero no se toma en cuenta que la mayoría de los otros afluentes e incluso muchos espejos de agua, están afectados por los vertimientos de aguas residuales procedentes de zonas urbanas y rurales, en todos los casos por la falta o insuficiencia de plantas de tratamiento de aguas residuales. Al respecto, el informe del Viceministerio de Agua y Saneamiento básico [10], señala que en el país se cuenta con la capacidad para tratar el 32% de las aguas residuales, pero que en la realidad solo se alcanza al 8% y máximo 10% del total. Como ejemplo se tiene que la PTAR Salitre de Bogotá, tiene capacidad para 6 m³/seg de efluente, pero solo está tratando en la actualidad 4 m³/seg y así sucesivamente.

Estadísticamente, en Colombia existen 200 PTAR de diferentes tamaños [11], pero teniendo en cuenta que cada municipio requiere contar con su propia PTAR, el déficit se sitúa en alrededor de 900 plantas. Entre las más importantes actualmente en operación se encuentran las descritas en el cuadro 1.

Cuadro 1. Plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia PTAR

Departamento	Ubicación	Caudal Tratado
Antioquia	PTAR San Fernando. Medellín.	1.8 m ³ /seg.
Atlántico	PTAR El Retiro.	22 l/seg.
	PTAR El Pueblo. Barranquilla.	250 l/seg.
Bogotá	PTAR El Salitre.	4 m ³ /seg.
Boyacá	PTAR Paipa.	30 l/seg.
Cesar	PTAR Salguer.	60 l/seg.
Cundinamarca	PTAR Guatavita	8 l/seg.
Magdalena	Emisario submarino de Santa Marta.	ND
Valle del Cauca	PTAR Cañaveralejo. Santiago de Cali.	7.6 m ³ /seg.
	PTAR Restrepo	8 l/seg.
	PTAR Ginebra	8 l/seg.

Es de anotar que todas las PTAR en Colombia al igual que la mayor parte del mundo, operan siguiendo la tecnología de Tratamiento Primario Avanzado (TPA) [11], que consiste en el mejoramiento del proceso de sedimentación primaria por la aplicación de coagulantes químicos por medio de un sistema de dosificación, el cual debe estar acompañado por un sistema de agitación que garantice que el químico dosificado sea mezclado correctamente bajo ciertos parámetros previamente establecidos. Entre estos químicos se encuentran: metales pesados, ácidos minerales, bases, agentes activos en superficie, ozono, peróxidos y permanganato. Por sus características especiales estos químicos se utilizan casi exclusivamente para el tratamiento de aguas residuales; además, permiten tratar grandes volúmenes de agua de manera relativamente económica.

1.3 CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN

Las Empresas Municipales de Cali EMCALI E.I.C.E. E.S.P., es la empresa prestadora de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado en la ciudad de Cali. La administración municipal desde la década del 80 formuló el plan de descontaminación por vertimientos líquidos, con base en los estudios de pre y factibilidad para el tratamiento de las aguas residuales de la ciudad. Se definió entonces, que el servicio de alcantarillado sería complementado con tres plantas de tratamiento de aguas residuales así: [13]

- a) La planta de tratamiento de aguas residuales PTAR de Cañaveralejo (PTAR-C), captaría los colectores e interceptores principales del sistema de alcantarillado con cobertura aproximada de 85% de las aguas residuales locales.
- b) La PTAR – Río Cali, captaría el agua residual generada en la zona noroccidental de la ciudad, transportada por los colectores marginales al río Cali, con cobertura aproximada de 15%.
- c) La PTAR – Sur, captaría el agua residual generada por futuros desarrollos urbanísticos, debido a la tendencia de crecimiento de la ciudad hacia el sur.

El proyecto desde sus inicios fue muy ambicioso, porque reconoce que el Valle del Río Cauca cubre un área de 20 Km. de ancho por 200 Km. de largo e involucra una población de más de 3.000.000 de personas. Por su amplitud se puso como meta para la terminación de las obras y entrada en operación total de la PTAR-C el año 2015. En el 2001 ya estaba reduciendo el 25% de la carga orgánica que le llegaba y con la aplicación de un Proceso denominado TPA, debería incrementar su capacidad de remoción de la DBO hasta en un 40% en los años siguientes, lo cual hacia el año 2009 sigue siendo un gran desafío, por eso, las expectativas hasta el 2015 son llegar a tratar el 70% de las aguas residuales locales.

La puesta en operación de la PTAR-C [13], al ser planeada en dos etapas, ha permitido afrontar, a juicio de sus directivas, los múltiples ajustes propios de estos procesos técnico-científicos, por eso en la actualidad la primera etapa se encuentra en su última fase de construcción y montaje, lo cual incluye: tratamiento preliminar, tratamiento primario avanzado, tratamiento de lodo (espesamiento, digestión, almacenamiento, deshidratación), generación de energía y control de olores. La segunda etapa que debe finalizar en 2015, comprende el tratamiento secundario mediante el proceso de lodos activados estabilización por contacto y el tratamiento del lodo secundario.

En el departamento del Valle del Cauca, varios de sus municipios cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales, como es el caso de: Ginebra, Restrepo y Roldadillo, los cuales remueven alrededor del 80% de su carga orgánica, del mismo modo ya hay planes para que en los próximos 10 años, todas las poblaciones vallecaucanas cuenten con una eficiente PTAR propia. [13]

Una meta muy importante de la PTAR-C, consiste en cubrir un área a ferti-irrigar de 25.000 hectáreas, utilizando los 14 m³/seg de agua residual tratada hacia el año 2015 procedente de Cali, Palmira y Yumbo. De este modo se planea que grandes extensiones de cultivos de caña de azúcar u otros vegetales no dependan de las lluvias estacionales sino que cuenten con un suministro estable de agua que antes era vertida directamente al río Cauca sin ser aprovechada.



Figura 1. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR de Santiago de Cali.
(Sector de Cañaveralejo: Vista panorámica)

La PTAR-C está ubicada en un lote de 22 Hectáreas, localizado entre las comunas 6 y 7 de la Ciudad de Cali. Este es un sector densamente poblado del barrio Petecuy a orillas del Río Cauca. En el proceso de construcción y en su futuro funcionamiento no ha afectado ni afectará la comunidad vecina, pues se ha construido mitigando los posibles impactos ambientales tales como el control de olores, transporte de polvo, ruido, vibración, etc. La Figura 1 presenta una vista general de planta de tratamiento de aguas residuales PTAR-C

En estos momentos la administración de la PTAR-C [13], asegura que ya se observan los resultados positivos de su operación expresados en:

1. Solución parcial del tratamiento de las aguas residuales producidas por las industrias locales. Beneficiándose ante todo aquellos establecimientos con poca disponibilidad de área y los que fabrican alimentos con limitaciones para operar sistemas de tratamiento de sus aguas residuales.
2. Menores costos y vulnerabilidad en el tratamiento de agua para las comunidades situadas aguas abajo de la PTAR-C.
3. Impulso a los planes y programas de riego alimentados con aguas tratadas que favorecen proyectos agrícolas y pecuarios.
4. Reactivación de la industria piscícola en el río Cauca y sus afluentes por incremento del oxígeno disuelto en el agua.
5. Se ha facilitado el proceso de extracción de arena para el sector productivo que aprovecha esta explotación, es decir, disponen de arena mas limpia, menos contaminada con menores riesgos de salud pública.
6. Como un subproducto de la digestión del lodo se produce biogás, un combustible con alto contenido de metano, con el cual se genera energía eléctrica para el funcionamiento de la misma planta haciéndola autosuficiente, también, energía calórica para calentar el lodo que requiere 35° C de temperatura para iniciar el proceso de digestión que a su vez genera el biogás.
7. La comunidad habitante de las riberas del río Cauca aguas debajo de la zona de descarga de las aguas tratadas ha mejorado su calidad de vida por la reducción casi total de malos olores, el retorno de la fauna que les sirve de fuente de alimentación, el repoblamiento de especies vegetales nativas y la posibilidad de contar con un agua más limpia para regar sus cultivos de pancoger.

Lo anterior indica que una PTAR técnicamente diseñada y operada da como resultados múltiples beneficios para la comunidad y convierte un problema medioambiental en una fuente de desarrollo y progreso local y regional.

Las ventajas de una PTAR se revelan prácticamente de inmediato en su área de influencia urbana, pero especialmente aguas abajo del lugar de vertimiento de las aguas ya tratadas, pues son notables las mejoras en la calidad de vida de las poblaciones ribereñas, las cuales dependen de los cuerpos de agua para su subsistencia, de igual manera, surgen otros beneficios directos tanto económicos como sociales cuando se recupera la belleza escénica de ríos y espejos de agua, representados en el fortalecimiento de actividades de esparcimiento y turismo, pesca comercial y deportiva, apoyo e impulso de proyectos de ferti-irrigación, generación de energía eléctrica a partir del metano generado durante el proceso de depuración, para citar los casos más relevantes.

En una PTAR las aguas residuales o efluente, corresponden a una combinación de aguas residuales domésticas (ARD) provenientes de zonas residenciales o instalaciones comerciales, públicas y similares, así como también aguas residuales industriales (ARI) en las que predominan vertidos industriales de todo tipo. La composición de las aguas residuales de una comunidad depende del tipo de sistema utilizado para su recolección y transporte. De acuerdo con Metcalf y Eddy [14] además de A.R.D. y A.R.I., la composición del caudal de aguas residuales puede incluir la infiltración y aportaciones incontroladas incluso las aguas pluviales. Por tales razones, según plantea Romero [15] la cantidad y concentración de las aguas residuales es función de su origen y de sus componentes, por ello las cargas equivalentes o contribuciones per cápita por día varían de una ciudad a otra y de un país a otro, así, la cantidad de aguas residuales variará de acuerdo con la estación del año, las condiciones atmosféricas, el día de la semana y la hora del día. Por su parte Tsukamoto [16] afirma que las aguas residuales urbanas contienen seis clases principales de contaminantes: (a) organismos patógenos, (b) materia orgánica, (c) sólidos suspendidos, (d) nutrientes, (e) olor, y (f) metales pesados. Siendo los organismos patógenos la clase de contaminantes más importante para la salud humana. Aunque cada flujo específico de agua residual presenta características únicas, existen composiciones típicas de aguas residuales que permiten identificar los principales parámetros de referencia y su magnitud. Como ejemplo, en el Cuadro 2 aparece un comparativo de las magnitudes promedio más importantes halladas en aguas residuales domésticas en los entre los años de 1995 y 2001 [14, 17].

Cuadro 2 Composición típica promedio de las A.R.D.

Parámetro	Unidades	Magnitud(1995)	Magnitud(2001)
Sólidos Totales	mg/L	700	720
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	500	500
Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	200	200
Sólidos Suspendidos	mg/L	210	220
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	160	165
Sólidos Sedimentables	ml/L	10	10
DBO ₅ Demanda Biológica de oxígeno	mg/L	210	220
COT Carbono Orgánico Tota	mg/L	160	160
DQO Demanda Química de oxígeno	mg/L	500	500
Nitrógeno Total	mg/L	35	40
Nitrógeno Orgánico	mg/L	13	15
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	22	25
Nitritos	mg/L	0	0
Nitratos	mg/L	0	0
Fósforo Total	mg/L	7	8
Fósforo Orgánico	mg/L	2	3
Fósforo inorgánico	mg/L	5	5
Cloruros	mg/L	50	50
Sulfates	mg/L	30	30
Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg/L		100
Grasas	mg/L	90	100
Coliformes Totales	NMP/100ml	10' - 10	10' - 10

Fuente: Crites y Tchobanoglous [17] *; Metcalf y Eddy [14]**.

La remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales, se puede llevar a cabo por medio de tres clases principales de métodos de tratamiento [14]:

- **Operaciones físicas:** dependen esencialmente de las propiedades físicas de la impureza y permiten la eliminación de los sólidos flotantes de gran tamaño y los sedimentables que pueden llegar hasta la planta de tratamiento. Generalmente se les denomina tratamientos preliminar y primario.
- **Procesos biológicos:** que utilizan reacciones bioquímicas para remover impurezas solubles o coloidales, normalmente sustancias orgánicas.
- **Procesos químicos:** que dependen de las propiedades físicas y químicas de la impureza o que utilizan las propiedades químicas de los reactivos agregados. Algunos de estos tratamientos son: Coagulación, Precipitación, Intercambio iónico, etc. Estos tratamientos son conocidos generalmente como tratamientos terciarios cuando siguen a algún proceso de tipo biológico, y como tratamientos Primarios, cuando son colocados después de alguna separación física solamente.

En algunos casos [14], un solo proceso de tratamiento puede dar el cambio deseado en la composición del agua tratada, pero en la mayoría de los casos es necesario utilizar una combinación de varios procesos, entre los que se destaca el denominado

TPA. No obstante, la eficacia del tratamiento debe ser balanceada con el costo, la aplicación práctica y el cumplimiento de la normatividad vigente.

1.3.1 Tratamiento Primario Avanzado TPA.

En el pasado [14], la precipitación química se usaba para mejorar el grado de eliminación de los sólidos en suspensión y de la DBO, sin embargo, fue abandonada por algún tiempo a favor de los métodos biológicos, pero desde la década de los 70, la necesidad de mejorar y acelerar la eliminación de los compuestos orgánicos y de los nutrientes contenidos en el agua residual ha hecho renacer el interés e importancia de la precipitación química, en los siguientes casos:

- Cuando se producen variaciones estacionales en la concentración de agua residual.
- Cuando solamente es necesario llevar a cabo un tratamiento de alcance intermedio.
- Como ayuda en el proceso de sedimentación [14].

El tratamiento químico de aguas residuales no es una idea nueva [18]. El proceso fue conocido antes del desarrollo de métodos de tratamiento biológico pero perdió su popularidad con el perfeccionamiento de métodos de tratamiento biológico como los filtros percoladores y lodos activados. Cuando se volvió necesario remover fósforo en muchas plantas de tratamiento, el tratamiento químico terciario (siguiente al tratamiento biológico) recobró parte de su pasada popularidad [18]. Siguiendo el éxito de la precipitación química en la remoción de fósforo, la precipitación primaria asistida químicamente fue introducida también, para remover fósforo o simplemente para mejorar la remoción de sólidos suspendidos y DBO.

El TPA ha sido utilizado por más de 100 años y puede ser implementado en una planta de tratamiento primario convencional existente con una inversión mínima; pero como se dijo antes el proceso cayó en desuso hacia 1930 debido a los elevados niveles de sales de hierro (mayor a 100 mg/l de FeCl_3) y a los volúmenes de lodo producido. Sin embargo, con los desarrollos químicos en el ámbito de los polímeros, fue surgiendo de nuevo su aplicación, utilizando en este caso bajas dosis de FeCl_3 en combinación con un polímero, con lo cual se alcanzó excelentes remociones de DBO y SST con niveles de producción de lodos más manejables [19].

Por su parte Tsukamoto [16] afirma que el proceso de TPA consiste en la precipitación simultánea de diversas clases de contaminantes de las aguas residuales, atrapados en flocules fáciles de eliminar del agua, mediante un proceso de coagulación-floculación que utiliza pequeñas dosis de sales metálicas y/o polímeros para mejorar la remoción de sólidos suspendidos y otros contaminantes mediante sedimentación y/o precipitación de las partículas y coloides. Según Tsukamoto [16], el TPA permite una significativa depuración de todas las cargas de contaminantes de las aguas residuales en una única etapa de tratamiento. Además, su implementación permite separar las partículas mayores de 0,45 mm y remover el

70% de la DQO; en razón a que muchos de los contaminantes presentes en el agua residual están incorporados al material particulado o han sido absorbidos en el mismo, dichos contaminantes también son removidos cuando se realiza una buena separación de partículas. La implementación del TPA permite lograr que el proceso de tratamiento secundario reciba una menor carga contaminante, pudiéndose diseñar de una forma más compacta y eficiente en el consumo de energía. Este proceso físico-químico puede ser aplicado al comienzo, en medio o al final del tratamiento de las aguas residuales, pero la estrategia que brinda los mayores beneficios económicos y ambientales es su aplicación al comienzo, o como etapa única del tratamiento.

Harleman y Murcott [20] expresan que este proceso se utiliza en centenares de instalaciones en todo el mundo, tratando desde las aguas residuales de condominios, hoteles y hospitales, hasta las mega ciudades con más de 20 millones de habitantes. El uso del TPA ha venido en aumento en los siguientes casos:

- Cuando se ha copado la capacidad de plantas de tratamiento existentes y se requiere tratar mayor carga afluente, con el menor costo de inversión y de operación.
- Cuando se requiere aumentar el nivel de tratamiento a las aguas residuales para cumplir normas de vertimiento y/o aumentar la remoción de carga contaminante, sin realizar modificaciones sustanciales al proceso de tratamiento.
- En casos en los que la descarga del efluente de TPA, mediante un sistema de disposición final de las aguas residuales, no afecta significativamente las condiciones ambientales del mar.
- Cuando existen limitaciones de espacio para las instalaciones de tratamiento, pues la tecnología TPA requiere unidades más pequeñas, y de necesitarse tratamiento secundario, éste sería de menor tamaño y costos de operación y mantenimiento.

1.3.1.1 Etapas del proceso TPA.

Tsukamoto [16] afirma que los principios de coagulación y floculación universalmente adoptados en el tratamiento de agua potable fueron adaptados al proceso TPA. En el caso de aguas residuales, se desarrollaron conceptos avanzados de dichos principios para adecuar los parámetros de tratamiento a las características de las aguas residuales. Del mismo modo, la sedimentación convencional ha sido utilizada tradicionalmente para realizar la separación de partículas como un primer paso en el tratamiento de las aguas residuales; sin embargo, con las cargas superficiales normalmente utilizadas, sólo es posible obtener eficiencias que varían entre 40% y 70% para los SST, entre 25% y 40% para la DBO, entre 5% y 10% para el fósforo y entre el 50% y el 60% para la carga bacterial.

Si la eficiencia de la sedimentación se incrementa removiendo partículas de cerca de 0,1 mm, es posible obtener mejoras sustanciales en la calidad del agua tratada (ibíd.). El método comúnmente utilizado para lograr estas mejoras en la separación de partículas, consiste en la adición de coagulantes, con el objetivo de alcanzar [16]:

- La desestabilización de las partículas suspendidas, o sea la remoción de las fuerzas que las mantienen separadas.
- El transporte de ellas dentro del líquido para que hagan contacto, generalmente estableciendo puentes entre sí y formando una malla tridimensional de coágulos porosos.

Al primer aspecto, dice Arboleda [21], es usual definirlo como coagulación y al segundo como floculación y como consecuencia de estos dos aspectos se produce la sedimentación y un posterior tratamiento de subproductos.

a) Coagulación: La coagulación, del latín “coagulare”, que significa solidificar lo líquido, es por definición el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales, que se puede conseguir por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas negativas. Este proceso es producto de la adición de un reactivo químico llamado coagulante y su distribución homogénea en el agua [21].

Durante la fase de la llamada mezcla rápida o primera etapa del proceso de coagulación, los coagulantes químicos son mezclados con el agua residual cruda. En el punto de adición química, la mezcla intensa garantizará la dispersión uniforme del coagulante en toda el agua residual cruda.

La coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma [21]. Este proceso es usado para neutralizar las cargas eléctricas de una dispersión coloidal, causando una reducción en las fuerzas de repulsión existentes entre las partículas coloidales, anulando el potencial Zeta, que es la diferencia que existe en la carga eléctrica entre los coloides estables y el medio dispersante, para lograr así que los coloides tiendan a agregarse, para formar partículas de mayor tamaño que sedimenten más fácilmente [25]. La razón es que la adición de cationes de alta valencia disminuye la carga de las partículas al igual que el espesor de la doble capa eléctrica, dando por resultado el decrecimiento del potencial Zeta. A medida que el coagulante se disuelve, los cationes neutralizan la carga negativa de los coloides. Por ello, la agitación rápida favorece este proceso, que ocurre antes de que se observe la formación de flóculos. Una vez neutralizada la carga, se forman microflóculos con carga positiva que, a su vez, sirven para neutralizar y atrapar otros coloides. Hernández [23] afirma que:

La coagulación se obtiene añadiendo a la dispersión iones de signo contrario al del coloide y que la reacción química presenta tres fenómenos: la neutralización de las cargas negativas de las impurezas con el ion coagulante; la reacción del coagulante y la formación de flóculos de óxido hidratado coloidal con carga positiva, los cuales atraen las impurezas coloidales de carga negativa; y la adsorción superficial de impurezas por los flóculos. Posteriormente los coloides convertidos en flóculos aumentan su tamaño por simple contacto (coalescencia) favorecido por una serie de choques sucesivos.

La desestabilización del coloide también se puede efectuar por la adición de polímeros catiónicos, los cuales tienen la ventaja de llevar el sistema al punto isoeléctrico sin cambiar el pH y de ser de 10 a 15 veces más efectivos que los coagulantes convencionales. Sin embargo, el costo es mucho mayor [22].

La aplicación de la coagulación química a las aguas residuales suele tener como objetivo principal la precipitación del fosfato [16], de este modo los sólidos suspendidos, la materia coloidal y los organismos patógenos son precipitados en forma de micro-flóculos, es decir, el fosfato, los metales pesados y el gas sulfhídrico son insolubilizados en los micro-flóculos. En este proceso, la eliminación de sólidos suspendidos alcanza valores del 70 al 90% y la eliminación de DBO puede llegar hasta el 70 % en aguas residuales frescas, pero disminuye con el tiempo y el grado de septicidad.

Para lograr un proceso óptimo de coagulación según arboleda [21], deben tomarse en cuenta determinadas condiciones, como son: 1) Las características del agua residual a tratar; 2) El tipo y cantidad de coagulante, y 3) Las condiciones de operación del proceso.

1) Características del agua residual a tratar. Los coloides, de acuerdo con Tsukamoto [16] son partículas con tamaño entre 0,1 nm (10⁻¹⁰ cm) a 1 mm (10⁻⁹ cm) que no son removidas por sedimentación, ni por tratamientos físicos convencionales y los que se presentan en el agua residual pueden ser hidrológicos o hidrofílicos. Los hidrológicos (arcillas) no tienen afinidad por el agua y en consecuencia no tienen estabilidad en presencia de electrolitos y son muy sensibles al proceso de coagulación.

Los coloides hidrofílicos, como las proteínas, tienen una marcada afinidad por el agua, la cual al ser adsorbida retarda la floculación, por lo que se requieren procesos especiales para lograr una coagulación efectiva. Por lo tanto, es necesario considerar los factores que causan que las partículas queden en suspensión, estos términos son descritos como estabilidad o inestabilidad. La estabilidad se refiere a la propiedad inherente de la partícula coloidal a quedar dispersa y suspendida en solución después de algún tiempo, mientras que la inestabilidad describe la tendencia de la partícula a unirse con otras.

Al respecto, Tsukamoto [16] señala que dos teorías explican los mecanismos involucrados: la primera es la teoría química, que supone que los coloides adquieren cargas eléctricas en su superficie por ionización de grupos químicos, por lo que la coagulación, o desestabilización, es realizada por interacciones químicas entre las partículas de los coloides y los coagulantes. La segunda es la teoría física, basada en la doble capa eléctrica, en donde la desestabilización ocurre por la reducción de fuerzas, tal como la del potencial Zeta.

Los coloides poseen propiedades eléctricas que crean una fuerza de repulsión que evita su aglomeración y sedimentación. Las propiedades eléctricas de las partículas coloidales se basan en dos tipos de fuerzas de efectos contrarios: una fuerza atractiva de Van der Waals, tendiente a unir a las partículas, y una fuerza electrostática repulsiva, tendiente a separarlas. Los iones que los estabilizan son fuertemente adsorbidos en una capa interna fija, que los provee de una carga que es función de la valencia y del número de los mismos. Al mismo tiempo, iones con carga contraria forman una capa exterior difusa que permanece cerca de la partícula por acción de fuerzas electrostáticas.

Puesto que el objetivo de la coagulación es desestabilizar las partículas, Hernández [22] dice que es necesario conocer las fuerzas que causan la estabilidad de la suspensión. Para los sistemas de coloides hidrofílicos, la estabilidad es mantenida por el fenómeno de hidratación, en el que las moléculas del agua son atraídas a la superficie de las partículas y actúan como una barrera de contacto entre ellas.

Por eso, en cuanto al tamaño de las partículas, las materias suspendidas muy finas son más difíciles de coagular que las partículas más grandes, porque necesitan mayor cantidad de coagulante, y la capacidad de intercambio de cationes de las partículas de la turbiedad tiene una relación importante con el éxito de la coagulación. La temperatura es otro de los factores que influye el proceso de coagulación, "generalmente, cuanto más fría esté el agua más largo será el tiempo requerido para producir buenos flocules con una cantidad determinada de coagulante, añade Hernández [22].

2) Tipo y cantidad del coagulante. Para Arboleda [21] los coagulantes se pueden clasificar en dos grupos: los poli electrolitos o ayudantes de coagulación y los coagulantes metálicos. En los primeros, las cadenas poliméricas están ya formadas cuando se los agrega al agua. En los segundos, la polimerización se inicia cuando se pone el coagulante en el agua, después de lo cual viene la etapa de adsorción por los coloides presentes en la fase acuosa.

Los coagulantes metálicos [21] al entrar en contacto con el agua se hidrolizan formando iones hidratados que producen hidróxidos de aluminio o de hierro que al combinarse forman compuestos poliméricos que son rápidamente absorbidos por la superficie de los coloides, los coagulantes pueden afectar la estabilidad de los coloides de dos formas: extendiendo la capa difusa que rodea la partícula o a través de su efecto en el potencial eléctrico.

Un polímero puede definirse como una sustancia formada por una cantidad de unidades básicas, llamadas monómeros, unidos por enlaces covalentes que se repiten sucesivamente. Su grado de polimerización está dado por el número de

monómeros que conforman su cadena polimérica. Cuando la cadena polimérica tiene múltiples grupos funcionales activos se denominan poli-electrolitos.

Los poli-electrolitos de importancia en el tratamiento de agua pueden clasificarse según su origen en naturales y sintéticos [21]. Un polímero puede tener o no carga eléctrica, los que no la tienen se llaman no iónicos, los que la tienen pueden ser catiónicos (carga positiva) o aniónicos (carga negativa). Los polímeros pueden ser añadidos al agua de tres maneras distintas:

- Como coagulantes,
- Como ayudantes de coagulación,
- Como ayudantes de floculación.

En el primer caso, el polímero es agregado al agua como único coagulante en vez del coagulante metálico (ver Figura 2); a no ser que se use una cantidad masiva, el número de cadenas poliméricas que puede adherirse a las partículas en un tiempo económicamente aceptable y con los gradientes de velocidad usuales no es suficiente y la coagulación no se realiza o se realiza pobremente.

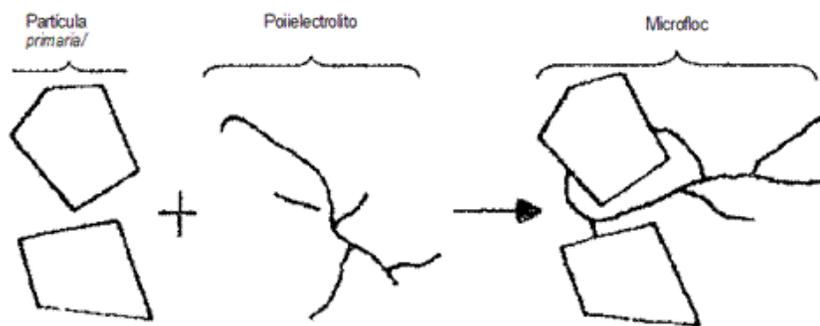


Figura 2. Polímero como coagulante. Fuente: [21].

Según Arboleda [21], en el segundo caso el polímero es agregado como ayudante de coagulación. En este caso el polímero se adhiere a las partículas coaguladas fortaleciendo los enlaces existentes entre estas (ver Figura 3).

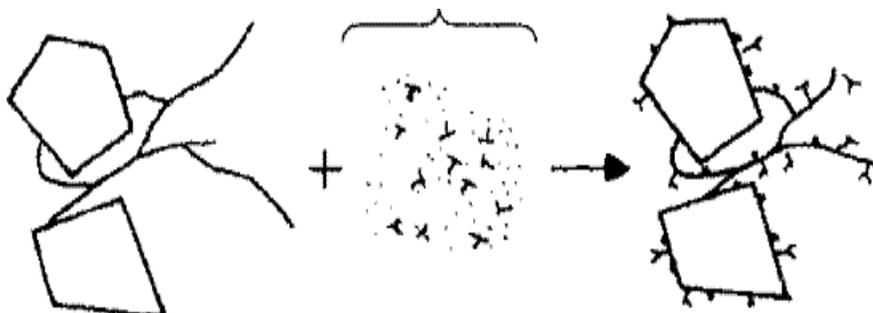


Figura 3. Coagulante metálico. Fuente: [21].

A lo largo de los años se han empleado muchas sustancias de diversa naturaleza como agentes de precipitación, de las cuales las más comunes son el sulfato de aluminio, cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso y cal. Las sales de hierro han sido típicamente el más común de los coagulantes usados para tratamiento primario. Sólo pocas plantas usan cal como coagulante para tratamiento primario, puesto que la adición de cal produce más lodo primario que los sólidos químicos que hacen las sales metálicas y que la cal es más difícil de almacenar, manipular y alimentar.

Parte de los productos de las hidrólisis de Al (III) o Fe (III), dice Arboleda [21] pueden ser absorbidos también por los sitios vacantes en las macromoléculas poliméricas (especialmente si son aniónicos o no iónicos) restándole eficiencia al proceso de coagulación. Pocos poli-electrolitos resultan efectivos cuando se usan en esta forma. Del mismo modo, las sales de hierro tienen su ventaja sobre las sales de aluminio en algunos casos, porque forman un floculo más pesado y de mayor velocidad de asentamiento y porque pueden trabajar en un rango de pH mucho más amplio.

La hidrólisis de las sales de hierro es algo distinta de la del aluminio, aunque da lugar a la formación de formas poliméricas similares. El efecto neto de la adición de un coagulante metálico es la formación de partículas de gran tamaño, insolubles y de carga positiva y la producción de ion hidrógeno libre a partir del agua que interviene en la hidrólisis. La coagulación se logra agregando metales catiónicos multivalentes, preferiblemente en la forma de sales, como $Al_2(SO_4)_3$ y $FeCl_3$ o adicionando polímeros catiónicos de bajo peso molecular.

La selección de coagulante debe basarse en el rendimiento y costo [16]. La evaluación del rendimiento debe usar pruebas de jarras del agua residual real para determinar dosis y efectividad. Para ello deben tomarse en cuenta diversos factores: naturaleza y calidad del agua bruta; variación de la calidad del agua bruta (variaciones diarias o según las estaciones, en especial, influencia de la temperatura); criterios de calidad y destino final del agua tratada; tratamiento previsto después de la coagulación y grado de pureza del reactivo. La experiencia de operación, costo y otra información relevante deducida de otras plantas debe ser considerada durante la selección. La combinación exacta de sales y polímeros es diferente para cada corriente de agua residual, requiriéndose un detallado estudio de campo para determinar la dosificación apropiada en cada caso. Para Hernández [22] “Aunque existe cierta relación entre la turbiedad del agua bruta y la dosis del coagulante apropiado, la cantidad exacta sólo puede ser determinada mediante ensayos”.

3) Condiciones de operación del proceso.

Para optimizar el proceso de coagulación, se requiere que en el punto de adición del coagulante se efectúe una mezcla intensa, que favorezca la dispersión uniforme del

coagulante en el agua residual a tratar. La intensidad y duración de la mezcla debe ser controlada, no obstante, para evitar sobre mezcla o submezcla. La sobre mezcla puede reducir la eficiencia de remoción por disolución de sólidos existentes en el agua y los flóculos recientemente formados. La submezcla dispersa inadecuadamente el químico, aumenta el uso de químicos y reduce la eficiencia de remoción. El gradiente de velocidad (G), de acuerdo con WEF/ASCE [23] es una medida de la intensidad de mezcla.

La dispersión del coagulante en toda el agua residual es esencial para minimizar la dosis de coagulante y la corrosión de concreto y metal asociada con la adición de coagulante [23] y para promover la dispersión, pueden usarse puntos de inyección múltiple, también es necesario instalar dispositivos medidores de flujo sobre las líneas de alimentación química, para el control de la dosis. La WEF/ASCE [23] indica que en plantas de tratamiento de aguas residuales la mezcla rápida puede lograrse utilizando mezcladores mecánicos, agitadores en línea, bombas, compartimientos deflectados, tuberías deflectadas o mezcladores de aire. De igual modo, se debe considerar que la intensidad de mezcla de los mezcladores mecánicos y batidores en línea es independiente de la velocidad de flujo, pero estos mezcladores cuestan considerablemente más que otros tipos y podrían estorbar o enredarse con escombros. Los mezcladores de aire eliminan el problema de los escombros y pueden ofrecer ventajas para la sedimentación primaria, especialmente si los canales aireados o desarenadores ya existen. Bombas, canaletas Parshall, estructuras de distribución de flujo, compartimientos deflectados o tuberías deflectadas - métodos usados frecuentemente para el mejoramiento de instalaciones existentes - ofrecen menor costo.

b) Floculación [14]. El término floculación, del latín *floculare*, que significa formador de flocules, corresponde al siguiente estado de formación después de la desestabilización y consiste en agrupar las partículas descargadas para aglomerarlas. En contraste con la coagulación, donde la fuerza primaria es electrostática, o ínter-iónica, la floculación ocurre por la formación de un puente químico o por la creación de una red física. Arboleda [21] define la floculación como el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores, es decir, durante la etapa de floculación las partículas desestabilizadas crecen y se aglomeran para formar flocules grandes y sedimentables, gracias a que por medio de una suave mezcla prolongada, ocurre el puente químico y/o el enmallamiento de partículas.

La floculación tiene lugar después de agregar los polímeros aniónicos de alto peso molecular, que, de nuevo por las fuerzas electrostáticas, agrupan las partículas coaguladas en estructuras más grandes. Los flocs, siendo partículas mucho más grandes, sedimentan más rápidamente por gravedad que los sólidos suspendidos solos, gobernados por la Ley de Stokes. Esta ley declara que las partículas sedimentarán a través de cualquier fluido debido a la fuerza de gravedad, con una

velocidad que es directamente proporcional al cuadrado de su tamaño. La mezcla lenta es típicamente usada para ayudar en el proceso de floculación.

Arboleda [21] complementa diciendo que debe distinguirse entre floculación ortocinética y pericinética, la primera es la inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas (paletas giratorias, por ejemplo). La segunda es la promovida internamente dentro del líquido, por el movimiento de agitación que las partículas tienen dentro de aquél (movimiento browniano). La floculación es más lenta y dependiente del tiempo y de la agitación que la etapa de mezcla rápida. El tiempo típico de retención para floculación oscila entre 20 y 30 minutos. Aumentando el tiempo de retención más allá de este rango presenta sólo beneficios marginales [23]. Se han reportado tiempos de retención tan cortos como 5 minutos.

Tal como la mezcla rápida, el gradiente de velocidad (G) alcanzado con cada configuración debe ser verificado. Los gradientes de velocidad recomendados por WEF-ASCE [23], para la mezcla lenta varían entre 30 y 80 s^{-1} mientras que la EPA (1987), citada por WEF/ASCE [23] reporta que deben ser mantenidos desde 50 a 80 s^{-1} .

Para Arboleda [21] los polímeros son adicionados algunas veces durante la etapa de floculación para promover la formación de floc, es decir, como ayudantes de floculación. En este caso, el polímero es agregado de 15 a 60 segundos después que los coagulantes metálicos, antes que estos hayan ocupado todos los sitios de adsorción y formado completamente el floculo. Cuando esto ocurre, los microflocs tienen oportunidad de formarse primero y los poli electrolitos intervienen después sólo para reforzar las uniones y aumentar el número de núcleos que integran cada floc (ver Figura 4). La mayoría de los poli electrolitos dan mucho mejor resultado utilizándolos de esta manera.

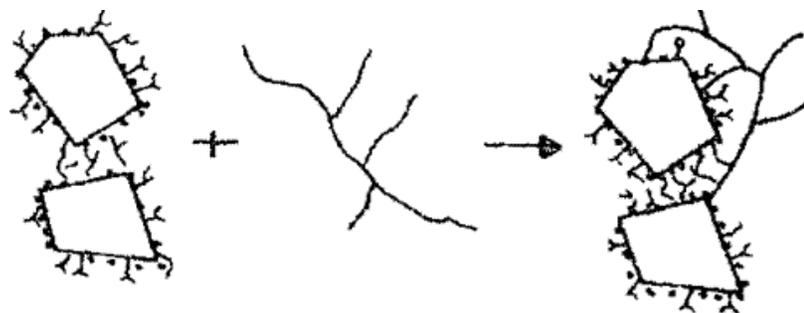


Figura 4. Poli electrolito usado como ayudante de floculación. Fuente: [21].

Los polímeros de acuerdo con la WEF-ASCE [23] deben introducirse como una solución diluida para garantizar la dispersión completa de los polímeros en toda el agua residual. Los polímeros pueden proporcionar un buen floc con sólo turbulencia y retención en la distribución de entrada al tanque de sedimentación. Para Tsukamoto [16], la adición de 0,1 a 0,5 mg/L de un compuesto orgánico de tipo poli electrolito

aniónico, genera una red de micro filamentos adhesivos dispersos en el agua residual. Esos micros filamentos forman una red que captura los micro-flóculos y causa su agregación progresiva, generando flóculos de mayor tamaño que son eliminados más fácilmente. El objetivo específico del proceso TPA es generar flóculos que tengan una mayor capacidad de capturar contaminantes y que al mismo tiempo sean estructuralmente resistentes y densos para facilitar su separación del agua.

La floculación puede ocurrir en estructuras separadas o en áreas deflectadas de canales, tanques, o estructuras existentes sirviendo otros propósitos. Los desarenadores mecánicos y aireados, estructuras de distribución de flujo y pozos de influente son áreas que promueven la floculación antes de que la mezcla llegue a la sedimentación primaria [23]. Los flóculos formados pueden ser removidos del agua en uno de tres niveles: en el fondo (por sedimentación), en la superficie (por flotación), o en la columna de agua (por micro tamizado) como dice Tsukamoto [16].

c) Sedimentación. Para Arboleda [21] se entienden por sedimentación aquellos fenómenos mediante los cuales los sólidos en suspensión en un fluido son separados del mismo, debido al efecto de la gravedad. La sedimentación realiza la separación de los sólidos más densos que el agua y que tienen una velocidad de caída tal que puede llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable. La sedimentación es un proceso adoptado en la mayoría de los proyectos, por utilizar la fuerza de gravedad, mientras otros procesos dependen de energía eléctrica y equipos más complejos. La velocidad de sedimentación de los flóculos depende fundamentalmente de la calidad del agua bruta, de las características químicas de la coagulación y de los parámetros físicos de la floculación. Experimentalmente se ha demostrado que el floc viejo tiene velocidades de asentamiento varias veces mayores que el recientemente formado.

d) Tratamiento de subproductos. Según Arboleda [21] es necesario considerar la necesidad de disponer adecuadamente el efluente final y los lodos generados durante la aplicación del TPA. El efluente del tratamiento TPA puede ser eliminado directamente en el medio ambiente. Eso ocurre tanto en ciudades pequeñas como en grandes metrópolis del mundo, como en Los Ángeles, San Diego, Montreal, Hong Kong, Río de Janeiro y otras ciudades.

Tsukamoto [16] aclara que de necesitarse una mayor remoción de DBO antes de desecharlo, se puede usar cualquier tipo de tratamiento secundario para pulir el efluente de TPA. El desecho líquido en el medio ambiente es por lo general precedido por una desinfección final mediante la aplicación de cloro o rayos ultravioleta. El efluente del TPA generalmente presenta menos de la mitad de la concentración de SST de un sistema de tratamiento primario convencional, reduciendo las necesidades de tratamiento secundario en forma proporcional a su efectividad [13].

Para Tsukamoto [16] la considerable remoción de fósforo, alcanzada con el proceso TPA, minimiza la eutrofización (fenómeno que consiste en el progresivo enriquecimiento de las agua con nutrientes, nitritos y fosfatos) del ambiente y la propagación de algas tóxicas, especialmente en cuerpos de agua donde se capta agua para consumo humano, propiciando un beneficio ambiental inexistente en el tratamiento secundario.

Efectividad del TPA. Como este proceso consta de tres etapas: 1) desestabilización de las partículas; 2) formación de floculos y 3) sedimentación y separación de los floculos del agua, Tsukamoto [16] dice que cada una de estas etapas puede realizarse en tanques separados o en uno solo, pero debe tenerse en cuenta que las condiciones óptimas de operación son diferentes en cada caso y que la eficiencia global del proceso depende de la eficiencia en cada etapa. Para lograr una implementación efectiva del TPA se recomienda realizar estudios a nivel de laboratorio o de planta piloto para confirmar los parámetros de diseño adoptados, determinar los productos más efectivos y su dosis óptima, basados en criterios de desempeño para la condición particular, además, se deben realizar estudios a nivel de campo para definir el punto de aplicación de químicos más adecuado.

Dependiendo de las dosis aplicadas y de la calidad del agua a tratar, varios estudios consideran que el TPA remueve entre 60% y 90% de los SST, entre 40% y 70% de la DBO, entre 30% y 60% de la DQO, entre 60% y 90% de fósforo y entre 80% y 90% de la carga bacteriana. Pero según Tsukamoto [16], el proceso de TPA remueve 65% de la DBO y el 85% de los SST, incluso utilizando bajas concentraciones de coagulante metálico, se remueve el 75% del fósforo de las aguas residuales, pero de ser necesario esta remoción puede ser elevada aumentando la dosis de coagulante. En contraste con el tratamiento secundario, añade Tsukamoto [16] el rendimiento del TPA es comparable en los porcentajes de remoción de los SST. La remoción de la DBO es más baja, pero eficiente en términos de costo. Las tasas de remoción de fósforo son notablemente más altas al usar $FeCl_3$ debido a su precipitación como $Fe_2(PO_4)_3$. En el cuadro 3 se muestran resultados que comparan las eficiencias de remoción de SST, DBO y P y para el tratamiento primario y para el tratamiento secundario.

Cuadro 3. Comparación de Tasas de Remoción.

Tipo de tratamiento	% Remoción		
	SST	DBO	P
Primario	60	35	20
TPA ($FeCl_3$ + Polímero)	80	57	85
Primario + Biológico Secundario	85	85	30

Fuente. MWRA – Hyperion. [15].

Son muchas las ventajas que presenta el TPA sobre el tratamiento primario convencional, el tratamiento primario convencional no consiste en nada más complicado que poner el agua contaminada en “cubos”, dejar que el material se asiente y verter el líquido. Sin embargo separa las partículas orgánicas. El problema que tiene este tratamiento es el uso de infraestructuras muy grandes y costosas para que se produzca la decantación del lodo únicamente por efecto de la gravedad. Los tiempos de espera mientras se produce la sedimentación también son considerables [26]. El tratamiento primario también se puede llevar a cabo disminuyendo la velocidad del agua residual hasta 1 o 2 cm/S de forma que sedimenten la mayoría de los sólidos presentes (orgánicos principalmente) y puedan ser así separados del líquido tratado [27].

Adicionalmente, la principal ventaja de usar TPA en lugar de tratamiento primario convencional es que los tanques de sedimentación requeridos por el primero son aproximadamente la mitad en tamaño de aquellos requeridos por el segundo. Ya que las tasas de flujo superficial para TPA pueden doblar aquellas usadas por el tratamiento primario convencional, para el mismo flujo volumétrico de agua residual, el área superficial requerida por el TPA será aproximadamente la mitad que la del tratamiento primario convencional, esto se traduce en economías de costo de capital significativas. También, La rápida velocidad de sedimentación alcanzada por el TPA permite incrementar la carga hidráulica recomendada para el diseño de los sedimentadores primarios convencionales en aproximadamente un 15%. Las altas cargas superficiales que soportan los sedimentadores primarios cuando se utiliza TPA, han permitido construir plantas más compactas, con menor inversión en infraestructura y menores necesidades de terreno.

Tsukamoto [16] afirma que a pesar del uso del TPA en nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales, la versatilidad del proceso permite duplicar la capacidad y la eficiencia de las plantas preexistentes, prácticamente sin la necesidad de obras civiles. Es por ello que una planta de TPA también puede extenderse fácilmente para procesar volúmenes de flujo más grandes, si es necesario, aumentando la dosificación de químicos y agregando tanques adicionales, puesto que ellos tienden a ser pequeños y fáciles de acomodar.

Hay que tener en cuenta añade Tsukamoto [16] que muchos tratamientos convencionales de aguas residuales liberan a la atmósfera olores indeseables, aerosoles que contienen organismos patogénicos y pueden ocupar grandes áreas, por eso, las estaciones de tratamiento convencionales son generalmente construidas lejos de lugares habitados. El transporte de aguas residuales hasta esas estaciones requiere infraestructura y equipos específicos, resultando en un costo adicional para la implementación, mantenimiento y operación de ese transporte. En este caso la infraestructura necesaria para alejar el tratamiento de aguas residuales de una comunidad urbana puede tener un costo de implementación igual o mayor al de la propia estación de tratamiento.

Por esa razón y en contraste con los tratamientos convencionales, el TPA permite controlar la producción de H_2S en los digestores y en todas las etapas de manejo de lodos, no genera aerosoles, ocupa un área muy pequeña y trata rápidamente las aguas residuales. Por eso; el tratamiento puede ser efectuado dentro de la ciudad. Simplemente por eliminar el transporte a largas distancias, puede propiciar un ahorro considerable, sin tomar en cuenta los ahorros adicionales del tratamiento en sí.

A pesar de sus muchas ventajas, dice Tsukamoto [16], la aplicación del TPA no se ha generalizado en todo el mundo a causa de sus limitaciones, que son las siguientes: remoción prácticamente nula de materia orgánica soluble, incompatible con condiciones de descarga medianamente estrictas en este aspecto; dependencia de reactivos químicos en cantidades significativas y, sobre todo, su alta producción de lodos con materia orgánica altamente putrescible, propia de un lodo primario.

Esto último tendrá fuertes implicaciones al momento de considerar los costos de inversión y operación de la línea de lodos, incluida su disposición final. En los costos de operación, el transporte de los lodos estabilizados hacia su sitio de disposición final puede incidir fuertemente en los costos totales y, por ende en la tarifa del metro cúbico tratado.

CAPITULO 2. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Es el consenso general entre los habitantes y las autoridades del departamento del Valle del Cauca que [6]: “El río Cauca está enfermo. Su agua es tan negra que ya parece una gran mancha de petróleo que se extiende por el Valle...”. Esta corriente natural nacida en la Laguna del Buey, ubicada en el Macizo Colombiano o Estrella Fluvial de Colombia, inicia su degradación en el vertedero de aguas residuales generadas en la ciudad de Popayán, capital del departamento del Cauca e “igual ocurre a su paso por los 180 municipios que atraviesa en nueve departamentos hasta su desembocadura en el río Magdalena [6]”.

Frente a esta grave problemática, en el caso de la ciudad de Santiago de Cali, se están haciendo ingentes esfuerzos para reducir los impactos medioambientales asociados con la producción de aguas residuales residenciales, industriales, comerciales e institucionales, producto de las actividades cotidianas de cerca de 2'500.000 de habitantes del casco urbano y áreas circunvecinas, para ello las autoridades municipales han promovido la instalación y funcionamiento desde la década de los 80's, de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en la zona de Cañaveralejo o PTAR-C, la cual se afirma por parte de sus administradores, opera actualmente aplicando los avances obtenidos respecto a los procesos de depuración de aguas servidas, tratando que su implementación responda a criterios técnicos y científicos eficientes y flexibles.

En dicho sentido, es necesario considerar que este tipo de plantas implican el conocimiento y desarrollo de complejas operaciones las cuales involucran gran variedad de mecanismos, un amplio rango de tiempos de respuesta, elevado número de variables manipulables a los cuales se suman las grandes variaciones que puede presentar el caudal recepcionado.

Ante tal diversidad de situaciones y fenómenos no es de extrañar que algunas plantas de tratamiento de aguas residuales lleguen a presentar un funcionamiento ineficiente y a tener que asumir penalizaciones económicas asociadas al incumplimiento de los requerimientos de calidad de los efluentes o a veces para cumplir con esta exigencia, incurran en sobrecostos operativos que pasan a engrosar los precios del servicio a cargo de los beneficiarios del sistema.

En términos generales, en las PTAR se deben aplicar determinados criterios para el tratamiento de aguas residuales relacionados con los procesos de dosificación de los químicos destinados a intervenir las condiciones físico-químicas previas del efluente y dar inicio a su tratamiento, entonces, para alcanzar un gradiente de mezcla apropiado es necesario contar con un mecanismo que permita la agitación de los

químicos y el efluente en un punto estratégico donde se encuentre reunido su caudal total, de tal modo que resulta de gran importancia operativa y económica que tanto la agitación como la dosificación se lleven a cabo de manera pertinente.

Ante estas exigencias, en la visita efectuada a las instalaciones de la PTAR-C por el investigador, se encontró que estos dos procesos solo se están cumpliendo parcialmente porque la dosificación no se ajusta a las variaciones del caudal total del efluente y se limita a un suministro constante de químicos que en un momento determinado puede resultar insuficiente, pero después adecuado o excesivo, razón por la cual se hace necesario brindar a esta PTAR-C una herramienta orientada a la identificación de las variables y equipos necesarios que permitan el mejoramiento de los procesos de dosificación y agitación, contribuyendo con ello a que resulten más efectivos los proyectos de consolidación y ampliación en los que se encuentran empeñadas sus directivas.

2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La situación encontrada permitió identificar el siguiente objeto de conocimiento:

Desarrollar un diseño experimental y a partir de los resultados obtenidos brindar una herramienta que permita realizar de una manera adecuada los procesos de dosificación y agitación en las PTAR, considerando como caso de estudio la PTAR-C.

2.3 JUSTIFICACIÓN

Actualmente y aunque han sido muchas las pruebas y estudios realizados para determinar la dosis óptima de químicos, el gradiente adecuado para el sistema de agitación y los tiempos de mezcla correctos, no existe una guía o un protocolo que las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales puedan utilizar para determinar estos aspectos. Lo que se hace regularmente es tomar muestras del agua afluente a las plantas, determinar sus características, realizar las pruebas correspondientes y determinar las dosis óptimas que se creen son las mejores en un momento determinado o simplemente se adiciona una cantidad constante de químicos, asumiendo que con su presencia constante en la corriente de agua se está induciendo de todas maneras la formación de flóculos, indicando con ello que no se tienen en cuenta las variaciones en el caudal del efluente y mucho menos al sistema de agitación que permite la mezcla correcta de la dosis de químico con el efluente.

De allí que la importancia de la presente investigación radica en proporcionar una ayuda técnica para que las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) con el fin que puedan establecer sus propios parámetros respecto a las dosis, los tiempos de mezcla y los gradientes de mezcla adecuados para cada caso, puesto

que las características de las aguas residuales de origen doméstico, comercial, industrial e institucional tienden a presentar similares características en el mundo entero. Con esta ayuda técnica es factible obtener reducciones en los costos de operación y del volumen de los insumos, todo lo cual representa una economía tanto para la planta como para los usuarios del sistema.

En cuanto a los aspectos sociales y ecológicos, una correcta dosificación y agitación de los químicos y el afluente, representa no solo una mejor calidad del agua que será vertida en algún cuerpo de agua o destinada a proyectos de ferti-irrigación, sino especialmente, esta calidad será constante y contribuirá a optimizar los aportes de una PTAR a la conservación del medio ambiente, a la salud pública y a la calidad de vida de quienes se encuentren en su zona de influencia.

Desde el punto de vista personal, esta investigación ha significado la puesta en ejercicio de los conocimientos adquiridos en la Universidad y la oportunidad para convertir planteamientos teóricos en procedimientos de aplicación práctica, porque están destinados a optimizar procesos y operaciones, en este caso de tratamiento de aguas residuales, con repercusiones positivas en los órdenes técnico-científico, económico, de salud pública y medioambiental. En otras palabras, con esta investigación, se percibe como desde el ámbito profesional se pueden hacer aportes significativos destinados a incrementar la calidad de vida de las comunidades.

2.4 OBJETIVOS

2.4.1 Objetivo general.

Definir criterios para la optimización de los sistemas de dosificación y agitación en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

2.4.2 Objetivos específicos.

- Determinar las principales características presentadas por los sistemas de dosificación y agitación en las plantas de aguas residuales.
- Definir criterios para la optimización en los sistemas de dosificación y agitación para las plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Determinar la instrumentación necesaria para la automatización de los sistemas de dosificación y agitación en la PTAR de Cali, considerada como la planta de tratamiento de aguas residuales objeto de estudio.

2.5 METODOLOGÍA DEL TRABAJO

2.5.1 Tipo y diseño de la investigación. El tipo de investigación aplicado está basado en los criterios del método “Estudio de Caso”, el cual permite acceder a datos procedentes de una gran variedad de fuentes, tanto cualitativas como cuantitativas; esto es, documentos, registros de archivos, conversatorios con informantes claves, observación directa de las actividades llevadas a cabo en la PTAR-C, observación de los participantes e instalaciones y objetos físicos durante las operaciones diarias [24]. Del mismo modo, el estudio de caso por su sencillez es muy versátil y aplicable a la investigación de problemas relacionados con el desarrollo tecnológico y científico respecto a temas sociales y medioambientales [24]. En cuanto a su diseño, el presente trabajo se realizó desde el enfoque de trabajo de campo.

En el cuadro 4. Se describen las actividades correspondientes a cada fase que se llevo a cabo para la realización de este proyecto.

Cuadro 4. Fases de la investigación.

Fase	Actividades
Recolección de información	<ul style="list-style-type: none">• Consulta con docentes conocedores.• Consulta en bibliotecas (libros, revistas).• Consulta en Internet.
Análisis de información	<ul style="list-style-type: none">• Verificación de la validez de la información.• Consolidación de conceptos.• Selección de información.• Documentación.
Definición de criterios	<ul style="list-style-type: none">• Desarrollo de pruebas de laboratorio.• Análisis de resultados.• Consulta con operarios.• Documentación.
Descripción de instrumentación para la automatización de los sistemas	<ul style="list-style-type: none">• Estudio de la información existente en el mercado.• Análisis del estado actual del caso de estudio.• Documentación.
Proponer resultados al caso de estudio.	<ul style="list-style-type: none">• Selección de la información relevante para el desarrollo de la propuesta.• Sugerir los beneficios de la implementación de la propuesta para el mejoramiento de los procesos técnicos y científicos en la PTAR-C.• Documentación.

Para la toma de muestras y pruebas de laboratorio, se contó con la colaboración del equipo interdisciplinario de la PTAR-C, quienes realizaron con su experiencia y conocimientos importantes aportes a esta investigación.

CAPITULO 3. DOSIFICACIÓN Y AGITACIÓN EN LAS PTAR.

En la actualidad, en el mundo entero la mayor parte de las plantas de tratamiento de aguas residuales buscan realizar sus procesos utilizando el TPA. Este, consiste en el mejoramiento del proceso de sedimentación primaria, debido a la aplicación de coagulantes químicos por medio de sistemas de dosificación. Este sistema de dosificación debe estar acompañado por un sistema de agitación el cual garantice que el químico dosificado sea mezclado correctamente bajo ciertos parámetros establecidos.

La posibilidad de tratar económicamente grandes volúmenes con reactivos químicos, hace que estos compuestos se utilicen casi exclusivamente para desinfectar los suministros de aguas residuales públicas.

Existen algunos factores que permiten definir las características que deben tener estos sistemas de dosificación y agitación. Algunos de estos podrían ser; caudal tratado, presupuesto, nivel de automatización, diseño de la planta, convenios con fabricantes, etc. Sin lugar a dudas el tener un conocimiento sobre las características del agua residual, las dosis de químicos, agitaciones y tiempos de mezcla óptimas requeridas por el proceso, podrían determinar una gran eficiencia en el tratamiento.

La importancia que estos sistemas de dosificación y agitación tiene en el TPA es que si trabajan conjuntamente de una manera adecuada, garantizan que el proceso de clarificación primaria, es decir que el agua ya clarificada y el lodo residual se separen correctamente, aumentando la eficiencia del proceso.

3.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN EN LAS PTAR.

La dosificación o aplicación de sustancias químicas, se efectúan mediante dosificadores o dispositivos capaces de liberar cantidades prefijadas de productos químicos en una unidad de tiempo. Existe una gran variedad de sistemas de dosificación utilizados por la PTAR, pero todos con un mismo propósito; Dosificar de manera controlada la cantidad de químicos que requiere el proceso [28].

En la Figura 5(a), se pueda apreciar el esquema básico de un sistema de dosificación, donde la dosificación se puede controlar desde el propio proceso o desde un sitio remoto como lo muestra la Figura 5(b).

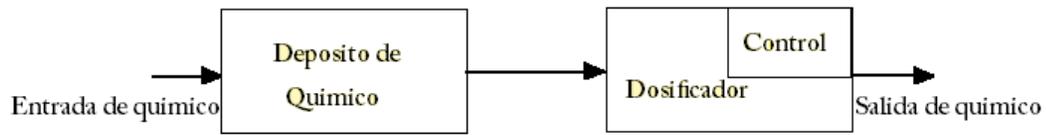


Figura 5(a). Esquema sistema de dosificación con control en el proceso

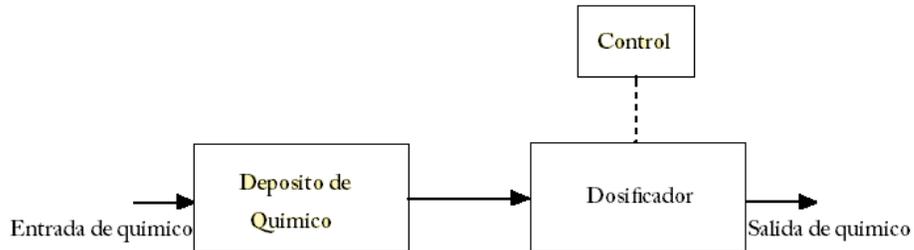
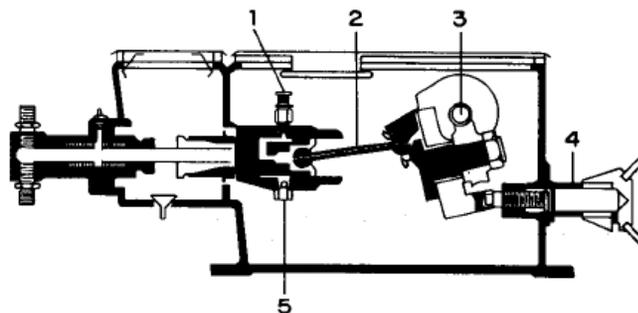


Figura 5(b). Esquema de sistema de dosificación a control remoto

Los químicos a dosificar por medio de estos sistemas se puede presentar en los siguientes estados; en seco, en solución o en gas. En la mayoría de los casos estos químicos suministrados al agua residual son en estado de solución. Esta solución puede ser aplicada por medio de dos métodos. Por bombeo y por gravedad. En los sistemas de bombeo los más usuales son los de bomba de pistón y de diafragma.

La bomba dosificadora de pistón es muy precisa, pero debe emplearse con precaución en el caso de productos abrasivos o muy corrosivos (silicato sódico, cloruro férrico).

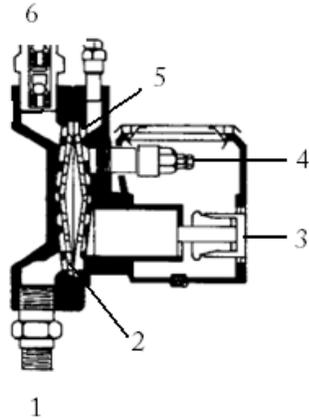
Según el tipo de bomba (diámetro de pistón, curva característica y cadencia de funcionamiento), el caudal puede oscilar entre varias decenas de mililitros y algunos miles de L/h. La Figura 6 muestra el esquema de una bomba de pistón.



- | | |
|--|--|
| 1. Válvula de seguridad del circuito de lubricación. | 4. Regulación micrométrica de carrera. |
| 2. Sistema de arrastre lubricado a presión. | 5. Alcachofa magnética. |
| 3. Eje de accionamiento con tornillo sin fin. | |

Figura 6. Bomba de pistón. Fuente [28]

La bomba dosificadora de diafragma accionada hidráulicamente, es de gran precisión, ligeramente inferior a la bomba de pistón. Se utiliza para líquidos corrosivos, tóxicos, abrasivos, cargados o viscosos, pudiendo ir provista de membrana simple o doble. El caudal de estas bombas dosificadoras de diafragma puede llegar hasta 2500 L/h a fuertes presiones. Ver Figura 7.



- | | |
|------------------------|----------------------|
| 1. Entrada | 4. Regulador |
| 2. Válvula de admisión | 5. Válvula de salida |
| 3. Accionador | 6. Salida |

Figura 7. Bomba de diafragma. Fuente [28]

La dosificación por gravedad se emplea especialmente en plantas pequeñas y medianas. Los más comunes son los de carga constante y los de carga regulable. El principio en el que se fundamenta es muy sencillo; consiste en mantener una carga constante de agua sobre un orificio para mantener un caudal de dosificación constante, el caudal se calibra a la salida mediante una válvula o se varía la dosificación variando la carga sobre el orificio. Estos dosificadores tienen la ventaja que pueden ser fabricados localmente [28]. En la Figura 8 se muestra un sistema que utiliza dosificación por gravedad.

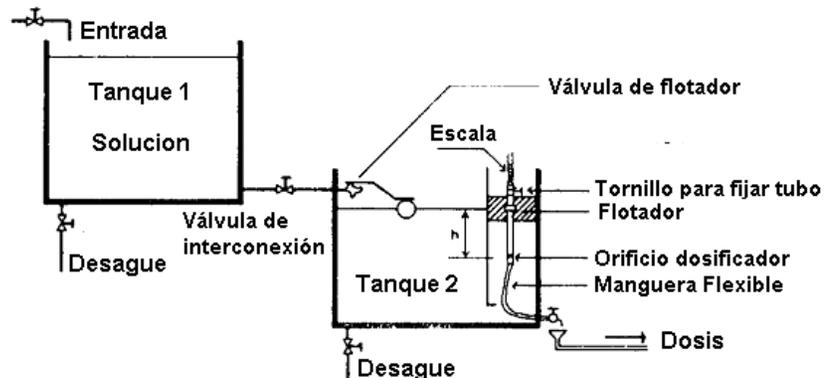


Figura 8. Sistema de dosificación por gravedad. Fuente [28]

3.1.1 Sistema de Dosificación en la PTAR-C.

El sistema de dosificación implementado en la PTAR-C está conformado por los sistemas de dosificación de cloruro férrico y polímero.

3.1.1.1 Sistema de dosificación de polímero en la PTAR-C.

Este sistema en la PTAR-C es automático y es monitoreado a través del centro de supervisión y control; el caudal y la velocidad de las bombas está relacionado con el caudal tratado en la planta y el número de bombas en servicio.

Como se muestra en las Figuras 9 y 10 este sistema se encuentra conformado básicamente por: dos tolvas, dos tanques dosificadores y siete bombas dosificadoras de las cuales seis trabajan constantemente y una es de respaldo.

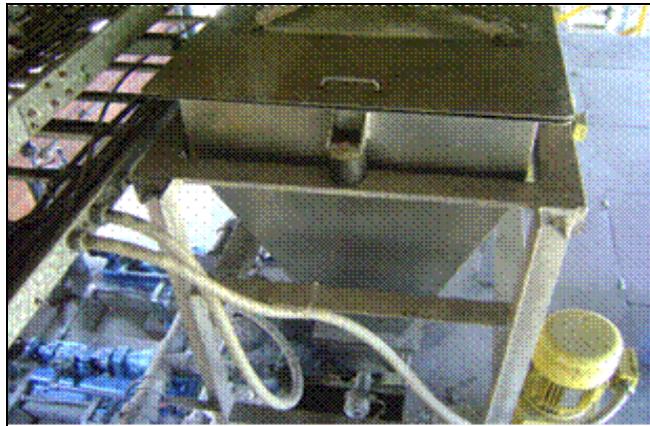


Figura 9. Tolva almacenadora de Polímero



Figura 10. Bombas dosificadoras de polímero.

Las características técnicas más importantes de estos equipos se describen a continuación.

Tolva.

Tipo: Rectangular
Capacidad: 500 Lt
Base: 500 x 450 mm
Altura: 1100 mm

Tanque dosificador.

Tipo: Cilíndrico vertical.
Volumen: 20 m³.
Diámetro: 2.8 m.
Altura: 3.65 m.

Bombas dosificadoras.

Tipo: Pistón
Marca: Dosapro Milton Roy
Capacidad de bombeo: 217 L/h

3.1.1.2 Sistema de dosificación de cloruro férrico en la PTAR-C

Este sistema en la PTAR-C al igual que el sistema de dosificación de polímero es automático y es monitoreado a través del centro de supervisión y control; el caudal y la velocidad de las bombas depende del caudal tratado en la planta y el número de bombas en servicio. Este sistema está conformado por dos tanques almacenadores y siete bombas dosificadoras de las cuales una es de respaldo. Este sistema se puede observar en las Figuras 11 y 12.



Figura11. Tanques almacenadores de cloruro férrico.



Figura 12. Bomba dosificadora de cloruro férrico.

Los tanques son cubiertos, se encuentran provistos de indicadores de nivel local, con interruptores por bajo y alto nivel, tapas de inspección y acoples para ser cargados desde un camión-tanque que los abastece periódicamente.

Las características técnicas más importantes de este sistema se describen a continuación.

Tanque cloruro férrico.

Marca: Fibratore

Tipo: Cilíndrico vertical

Altura: 6250 mm

Diámetro interno: 3200 mm

Volumen: 50 m³

Material fibra de vidrio

Medidor de Nivel

Marca: Endress &Hausser

Modelo del transmisor: FMV 862

Modelo del sensor: FDV 81

Bomba Dosificadora

Tipo: pistón

Marca: Milton Roy

Capacidad de bombeo: 297 L/h

3.2 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE AGITACIÓN EN LAS PTAR.

La agitación es el proceso según el cual varios ingredientes se ponen en contacto, de tal forma que al final de la operación se obtenga una mezcla homogénea a cierta escala [29].

En términos generales, esta operación puede efectuarse mediante turbulencia, provocada por medios hidráulicos o mecánicos, tales como: resaltos hidráulicos en canales, canaletas Parshall, vertederos rectangulares, tuberías de succión de bombas, mezcladores mecánicos en línea, rejillas difusoras, chorros químicos y tanques con equipo de mezcla rápida.

En los mezcladores hidráulicos la mezcla es ejecutada como resultado de la turbulencia que existe en el régimen de flujo; como se puede observar en la figura 13. En los mecánicos la mezcla es inducida a través de impulsores rotatorios.

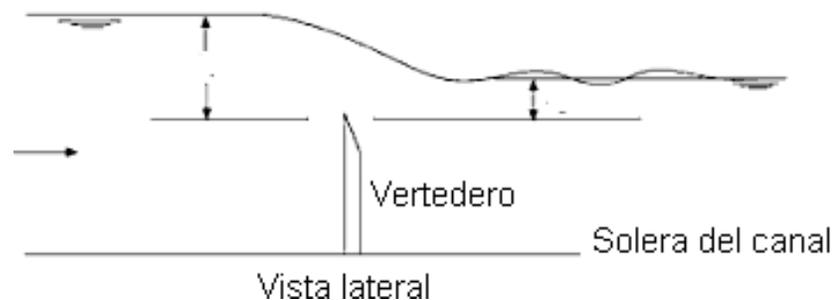


Figura 13. Diagrama esquemático de un vertedero sumergido

En los sistemas de agitación de las PTAR se requiere tener un nivel de control sobre los sistemas de agitación ya que se tienen que mezclar los químicos con el agua residual de una manera adecuada, por lo tanto se utilizan preferiblemente los mezcladores mecánicos ya que son mucho más flexibles a la hora de variar sus parámetros. Estos mezcladores mecánicos se dividen en dos clases: los que generan corrientes paralelas al eje del agitador y los que dan origen a corrientes en dirección tangencial o radial. Los primeros se llaman agitadores de flujo axial y los segundos agitadores de flujo radial.

Los tres tipos principales de agitadores mecánicos son: de hélice, paletas o turbina. En la Figuras 14, 15 y 16, se muestran algunos de estos agitadores.

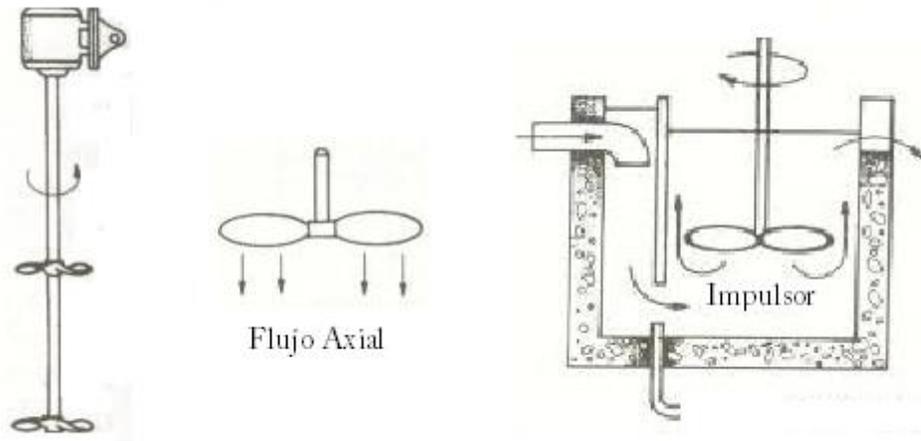


Figura 14. Agitadores de hélice

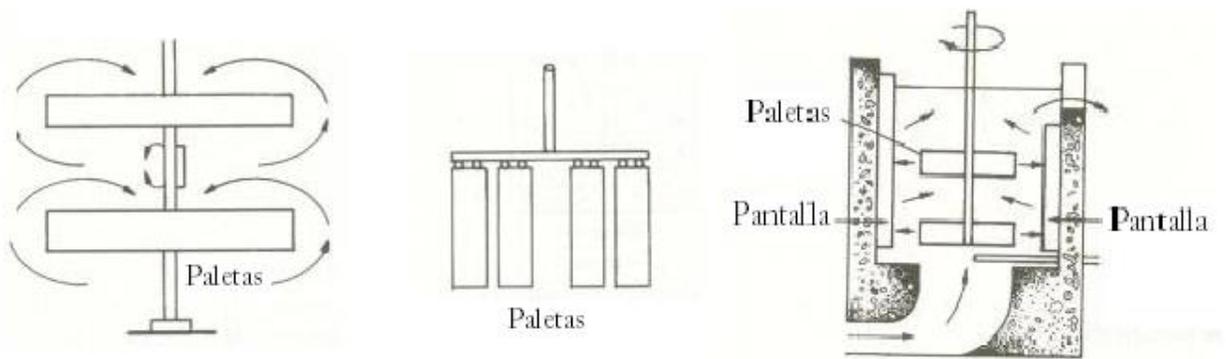


Figura 15. Agitadores de paleta

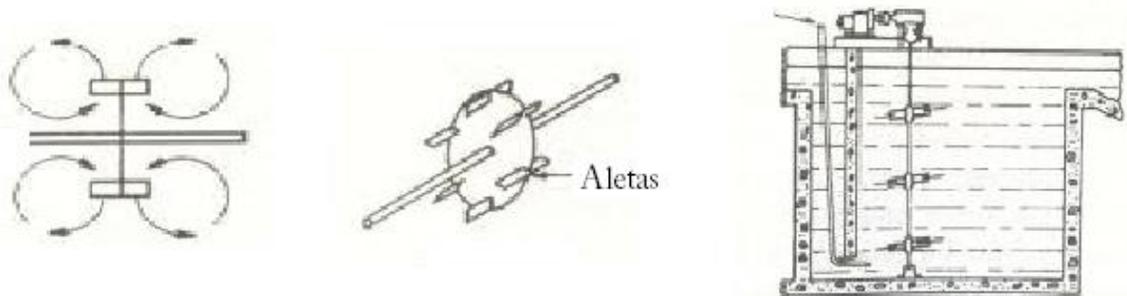


Figura 16. Agitadores de turbina.

Mezcla rápida.

Durante la mezcla rápida se genera el proceso de coagulación por efecto del químico adicionado. El sistema de agitación más usado y recomendado por las PTAR para realizar la mezcla rápida es el agitador de paletas RUSHTON. Este sistema fue patentado y genera muy buenos resultados, cuando las paletas giran a velocidades moderadas en el centro del tanque, impulsan al líquido radial y tangencialmente, sin que exista movimiento vertical respecto del agitador. Las corrientes de líquido que se originan se dirigen hacia la pared del tanque y después siguen hacia arriba o hacia abajo, de esta manera la turbulencia que genera este equipo permite esparcir el químico dosificado en el agua de una manera homogénea evitando en gran medida que se generen zonas muertas donde no se mezclan correctamente el químico y el agua residual [30]. En la Figura 17, se observa un agitador RUSHTON.

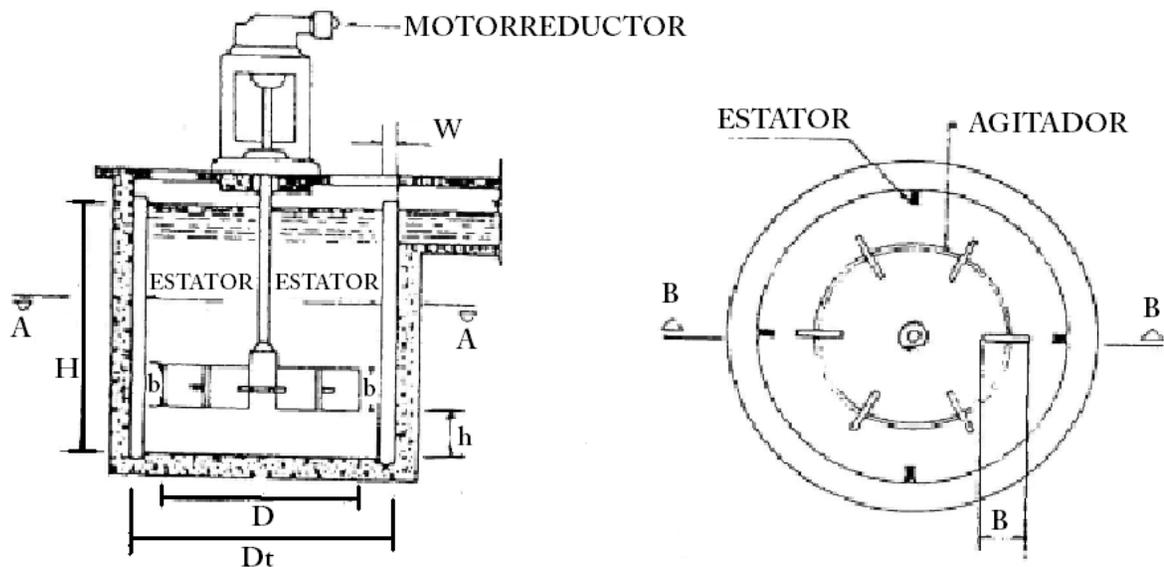


Figura 17. Agitador RUSHTON. Fuente [30]

Para garantizar una mezcla homogénea utilizando el agitador RUSTHON, se deben cumplir las siguientes condiciones de diseño, donde las variables de las ecuaciones tratadas a continuación corresponden a las de la Figura 17.

a) $\frac{D_t}{D} = 3$

b) $B = \frac{D}{4}$

c) $\frac{W}{D} = 0.10$

d) $2.7 \leq \frac{H}{D} \leq 3.9$

e) $b = \frac{D}{5}$

f) $0.75 \leq \frac{h}{D} \leq 1.3$

Mezcla lenta.

Durante la mezcla lenta se genera el proceso de floculación por efecto del químico. Dentro del grupo de floculadores mecánicos se considera que los de paletas de eje vertical ofrecen las mayores garantías y serían una buena solución [30].

Este sistema es el más usado por las PTAR para realizar la mezcla lenta. El sistema al igual que el RUSHTON genera muy buenos resultados, cuando las paletas giran a velocidades bajas en el centro del tanque impulsando el líquido radial y tangencialmente, de esta manera se evitan las zonas muertas agitando la mezcla uniformemente y permitiendo que los flóculos se formen de la mejor manera [30]. En la Figura 18 se observa un agitador de paletas para floculación.

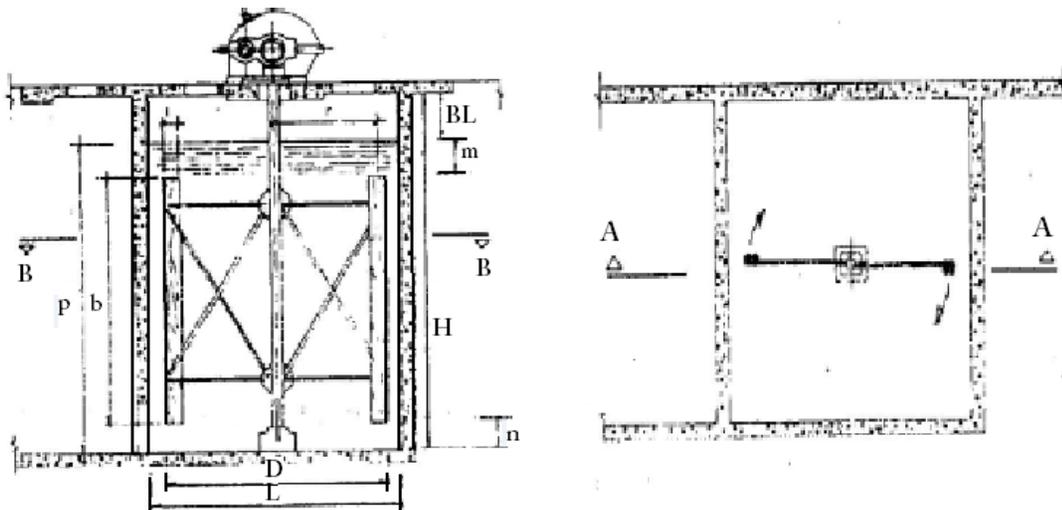


Figura 18. Agitador de paletas para floculación. Fuente [30]

Para que este sistema floculador funcione correctamente se recomiendan las siguientes razones y relaciones [30].

V_p = Velocidad de las paletas.

$0.20 \text{ m/s} \leq V_p \leq 0.60 \text{ m/s}$, para que no se rompa el floc

$$0.80 \leq \frac{D}{L} \leq 0.95$$

El extremo superior de la paleta m , debe quedar entre 0.15 m y 0.40 m por debajo de la superficie del agua.

El extremo inferior de la paleta n , debe quedar entre 0.15 m y 0.40 m por encima del fondo del tanque.

Motorreductores para el sistema de agitación.

Una de las razones por la que estos equipos son utilizados por las PTAR para su sistema de agitación es porque se requieren mezclar grandes volúmenes de masa residual, con determinadas velocidades y viscosidades. Estas condiciones, demandan la necesidad de tener un reductor mecánico que reduce la velocidad que le llega a la entrada por efecto de un motor, en la misma proporción que aumenta el par; esto es una ventaja muy importante. Sobre todo en el arranque del sistema [31]. En la Figura 19 se observa un sistema básico de agitación.

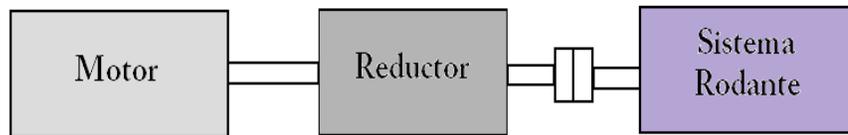


Figura 19. Sistema de agitación.

El motor utilizado generalmente para esta aplicación es un motor de inducción trifásico. Este es el más utilizado en la industria debido a su sencillez constructiva, se podría decir que es el motor industrial por excelencia, de tal manera que aproximadamente un 99 % de los motores instalados en la industria son motores asíncronos trifásicos [31]. En la Figura 20. Se muestran algunos motorreductores que se encuentran en el mercado.



Figura 20. Motorreductores.

3.2.1 Sistema de Agitación en la PTAR-C.

El sistema de agitación de la PTAR-C se encuentra conformado por dos subsistemas los cuales contienen cada uno un motor, una caja reductora de relación 3 a 1, y un sistema de paletas encargadas de agitar el agua residual afluyente a la planta. Como se puede observar en las Figuras 21 y 22.



Figura 21. Sistema de agitación 1 de la PTAR-C.



Figura 22. Sistema de agitación 2 de la PTAR-C

Este sistema fue montado de manera provisional en la PTAR-C sin tener conocimiento si estaba en la capacidad de cumplir con los requerimientos del proceso. Las especificaciones técnicas de este sistema no se tienen debido al mal estado de sus componentes.

CAPITULO 4. CASO DE ESTUDIO

El objetivo de este capítulo es facilitar la comprensión al lector sobre los procesos llevados a cabo en la empresa caso de estudio para el tratamiento de las aguas residuales.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.

Las aguas residuales de la ciudad de Santiago de Cali se recogen por medio de caños colectores que las llevan a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo o PTAR-C. Anteriormente se vertía al río Cauca alcanzando un volumen de aguas residuales estimado en 555.494 m³/d, con un contenido de carga de DBO de 83.766 kg/d y una carga de SST de 88.095 kg/d. Tales vertimientos contribuían de manera significativa a la contaminación generada por otros usuarios del río ocasionando que los peces murieran en época de estiaje, porque los valores de oxígeno disuelto no eran aptos para garantizar la vida acuática; extraer arena o nadar en el río resultaban muy peligrosos para la salud; los malos olores en su tramo anaeróbico se extendían por varios kilómetros. En suma, el río Cauca presentaba un valor paisajístico y turístico deteriorado por el vertimiento de sólidos flotantes, grasas y/o aceites y detergentes. Estos problemas no eran tenidos en cuenta antes de la década de los 80 en las evaluaciones económicas. Pero cuando se planeó la PTAR-C, se empezaron a considerar los estudios llevados a cabo en otros países porque mostraban que los “beneficios intangibles” constituían una parte importante de los beneficios sociales de proyectos de este tipo.

Adicionalmente, la operación de la PTAR-C desde sus inicios generó una serie de beneficios directos a los usuarios del agua del río Cauca, en términos de aumento de actividad pesquera y ahorro en los costos de utilización del agua para acueductos municipales, industrias y otras actividades agropecuarias, aguas abajo del vertimiento de las aguas ya tratadas [17]; estos beneficios fueron cuantificados comparando el caudal futuro de producción de aguas residuales, con el nivel de deterioro que hubiese producido en el río Cauca sin la planta de la PTAR-C y los costos de recuperación del agua, considerando el uso dado por los otros usuarios localizados aguas abajo del vertimiento de la ciudad de Cali [17].

En la PTAR-C, como se dijo con anterioridad, los principios de coagulación y floculación se llevan a cabo aplicando para intervenir el efluente proveniente de la ciudad de Cali y sus alrededores los principios del TPA, los cuales hacen parte del sistema de dosificación y agitación que motivaron la realización de la presente investigación.

4.1.1 Objetivo de la empresa caso de estudio

El objetivo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Cali es tratar el agua residual antes de devolverlas al Río Cauca. La PTAR-C tiene la capacidad de manejar un caudal promedio de 7,6 m³/s, convirtiéndose en una de las plantas de tratamiento de aguas residuales más grandes de sur América, lo que permite tratar un 70% de las aguas residuales de Cali.

4.1.2 Localización de la empresa caso de estudio

La planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralejo (PTAR-C) está ubicada en un lote de 22 Hectáreas, localizado entre las comunas 6 y 7 de la Ciudad de Cali.

Es un sector densamente poblado del barrio Petecuy a orilla del Río Cauca. En el proceso de construcción y en su futuro funcionamiento no ha afectado ni afectará la comunidad vecina, pues se ha construido mitigando los posibles impactos ambientales tales como el control de olores, transporte de polvo, ruido, vibración, etc. [17] La Figura 23 presenta una vista general de planta

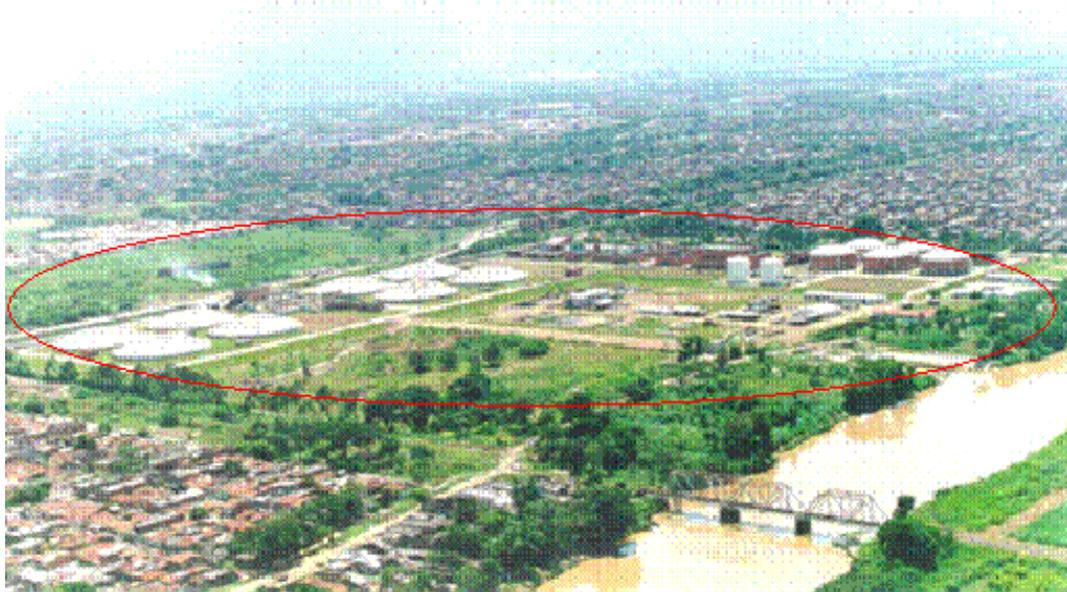


Figura 23. Planta general. Fuente. PTAR-C

La línea de agua como lo muestran las Figuras 24 y 25 son los procesos que se llevan a cabo desde que el agua residual entra a la planta por medio del colector central y por bombeo hasta la etapa de sedimentación primaria que es donde el agua clarificada por efecto de químico agregado se separa del lodo residual en los sedimentadores.

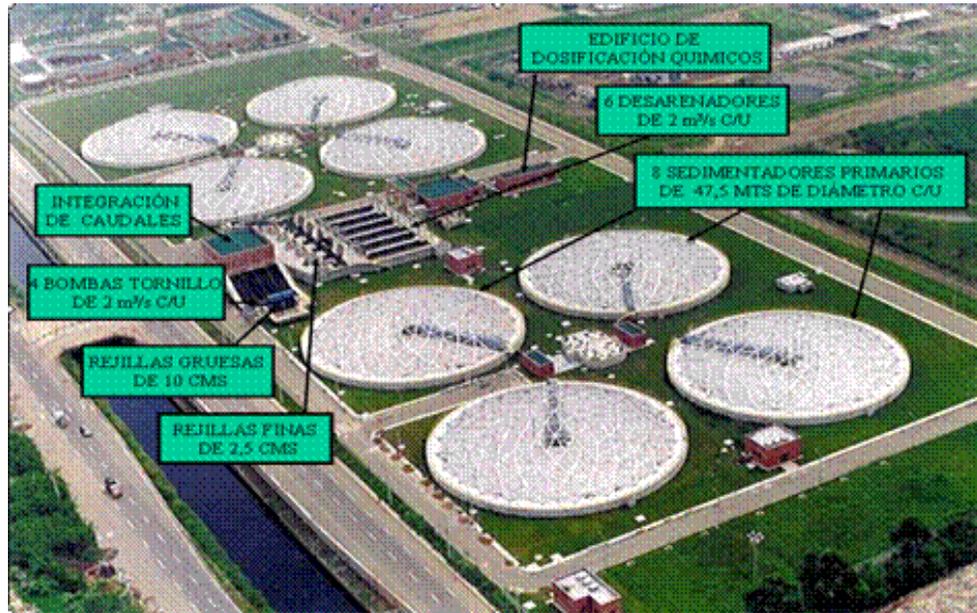


Figura 24. Línea de Agua de la PTAR-C. Fuente. PTAR-C

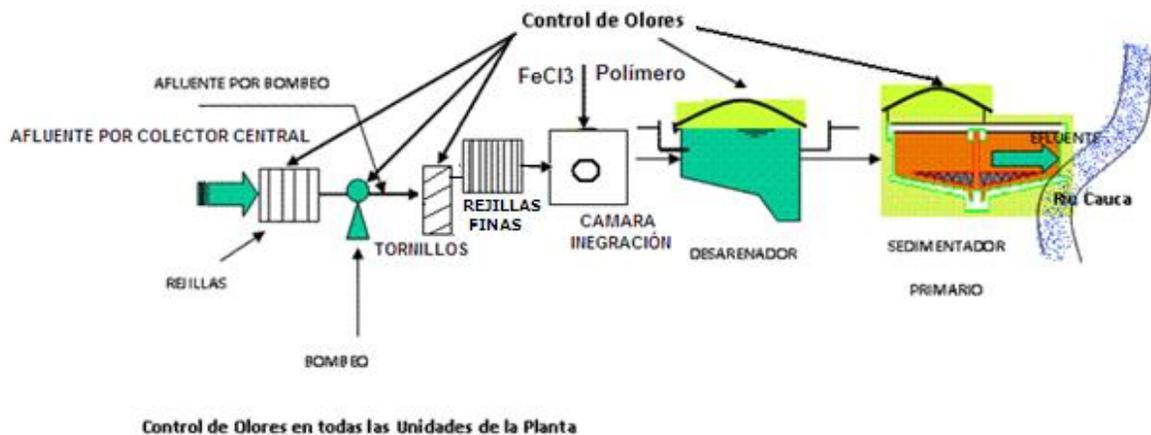


Figura 25. Esquema del Procesos de la Línea de Agua. Fuente. PTAR-C

En la etapa de sedimentación primaria, comienza el tratamiento de la línea de lodo que se muestra en las Figuras 26 y 27 y son los procesos donde el lodo residual recibe tratamiento para obtener un biosólido final el cual es depositado en el medio ambiente reduciendo el impacto ambiental. También durante la etapa de tratamiento del lodo residual se obtiene gas metano gracias a la digestión anaerobia producida por bacterias adicionadas al lodo residual en los digestores. El metano obtenido sirve como combustible de los generadores de la planta para dotar a esta de energía. En la Figura 28 se observa el edificio donde se genera este proceso.

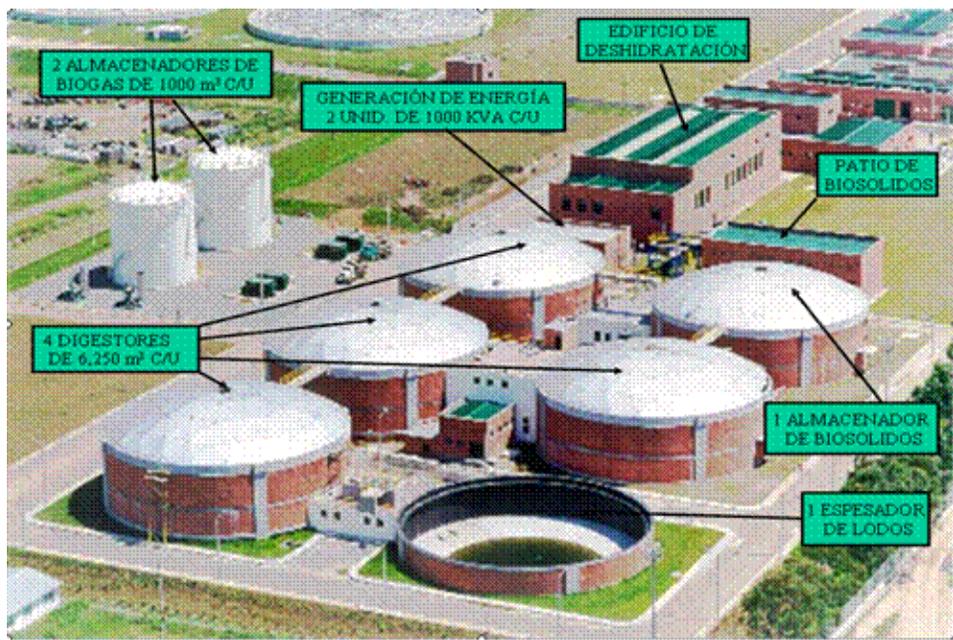
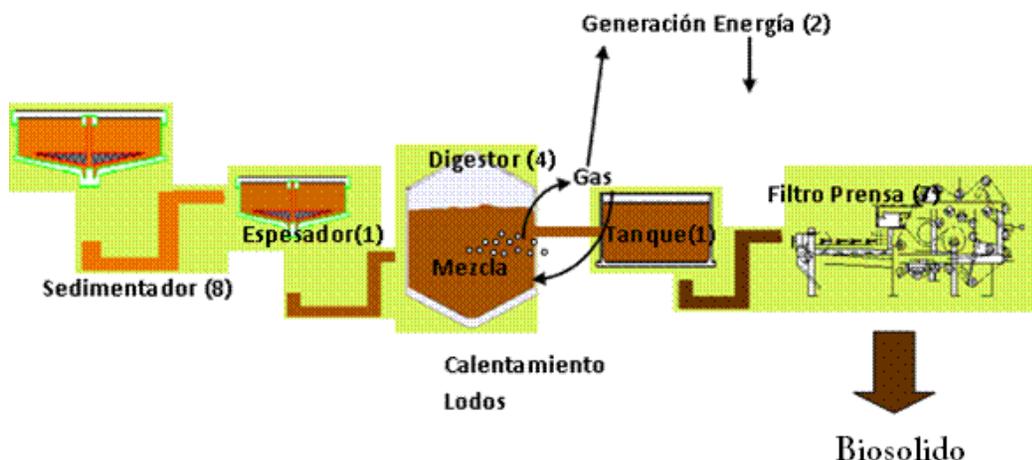


Figura 26. Línea del lodo. Fuente. PTAR-C



Control de Olores en Todas las Unidades la Planta

Figura 27. Esquema del proceso de la línea de lodos. Fuente. PTAR-C



Foto 28. Edificios, Generación de Energía y Línea de Lodos. Fuente. PTAR-C

4.1.3 Descripción del proceso

Para tener una visión global del proceso que se lleva a cabo en la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR-C se presenta el diagrama de flujo de sus operaciones en la Figura 29. La descripción del proceso de forma textual tratando de enseñar detalles del mismo está disponible para el lector en el anexo C.

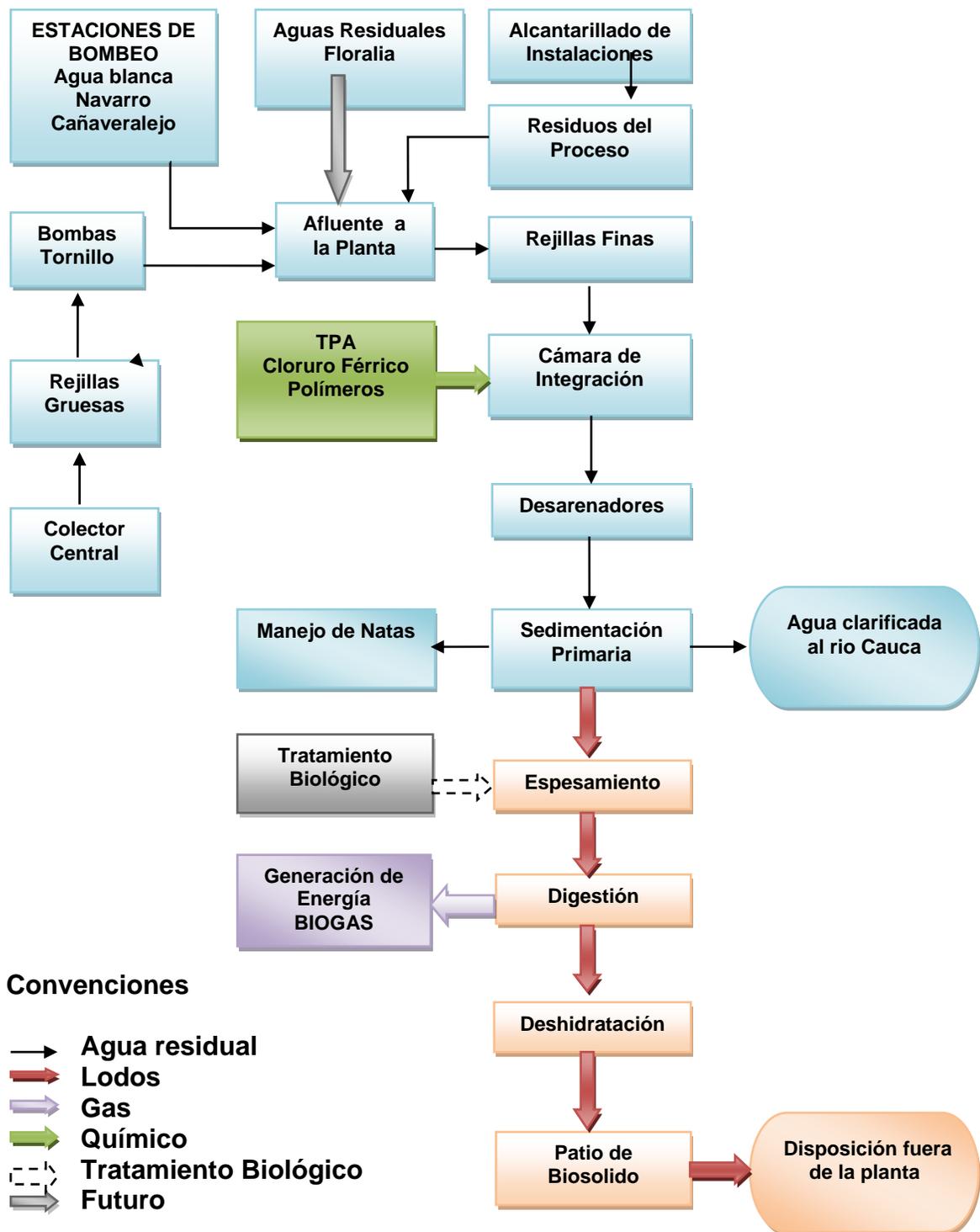


Figura 29. Diagrama de flujo PTAR – C. Fuente. Presente investigación

CAPITULO 5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Como un aporte de este trabajo de grado se propone llevar a cabo un diseño experimental realizado en los laboratorios de la PTAR-C bajo la supervisión del personal encargado para definir las dosis óptimas de químico y definir gradientes de velocidades para la mezcla rápida y lenta.

Se propone un diseño experimental ya que en él se selecciona de forma aleatoria las unidades de prueba como se llevaran a cabo en desarrollo de este proyecto

En este proyecto se tratan temas de dos procesos fundamentales en el tratamiento de las aguas residuales como lo son; la dosificación de químicos y el gradiente de agitación. Por lo tanto el diseño experimental propuesto en este proyecto consiste en definir rangos de dosificación de los químicos utilizados en la PTAR-C en los procesos de coagulación y floculación y también definir rangos con los gradientes de velocidad para el proceso de agitación. Los rangos definidos, deberán garantizar remociones de turbiedad con porcentajes que se definirán más adelante en este capítulo.

Para la realización del diseño experimental se proponen el siguiente orden:

1. Toma de datos.
2. Determinar la calidad del agua residual.
3. Definir dosis óptima de cloruro férrico y polímero.
4. Gradiente de velocidad para la mezcla.
5. Validación estadística del experimento.

5.1 TOMA DE DATOS.

Aquí se hace referencia a las actividades llevadas a cabo en la PTAR-C para la recolección de información con la cual evaluar los procesos aplicados en el tratamiento de las aguas residuales.

5.2 CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL AFLUENTE A LA PTAR-C.

Pruebas de turbiedad.

Son múltiples las pruebas de laboratorio que se pueden realizar a una muestra de agua residual, pero ¿Cuál es la importancia de las pruebas de turbiedad?

La turbiedad es un parámetro muy importante para determinar las características del agua residual. Si se hace una relación entre remociones de turbiedad y Sólidos Suspendidos Totales (SST), como lo muestran la Figura 34, se observa que hay una gran equivalencia entre estas dos pruebas.

Los SST están compuestos por materia orgánica e inorgánica y es precisamente en esta materia donde se encuentra la mayoría de contaminantes del agua residual. Por esta razón la importancia que tienen las pruebas de turbiedad y la remoción de esta para determinar los niveles de contaminación del agua residual[30]. Además las pruebas realizadas para determinar la turbiedad del agua tienen la ventaja de demorar pocos minutos mientras que una prueba para determinar los SST demora entre 4 y 5 horas en laboratorio.

Para determinar la relación existente entre la remoción de turbiedad y la remoción de SST se realizó la siguiente planeación:

Por medio del desarrollo de este proyecto se tomaron muestras en la cámara de integración de la PTAR-C. A cada muestra tomada, se le determino la turbiedad inicial y la final luego de realizar las pruebas de jarras correspondientes. También para las mismas muestras tomadas de agua residual, se determinó la remoción de los SST en el laboratorio de la PTAR-C con el personal indicado. Los datos obtenidos de las dos pruebas se muestran en la Figura 30.

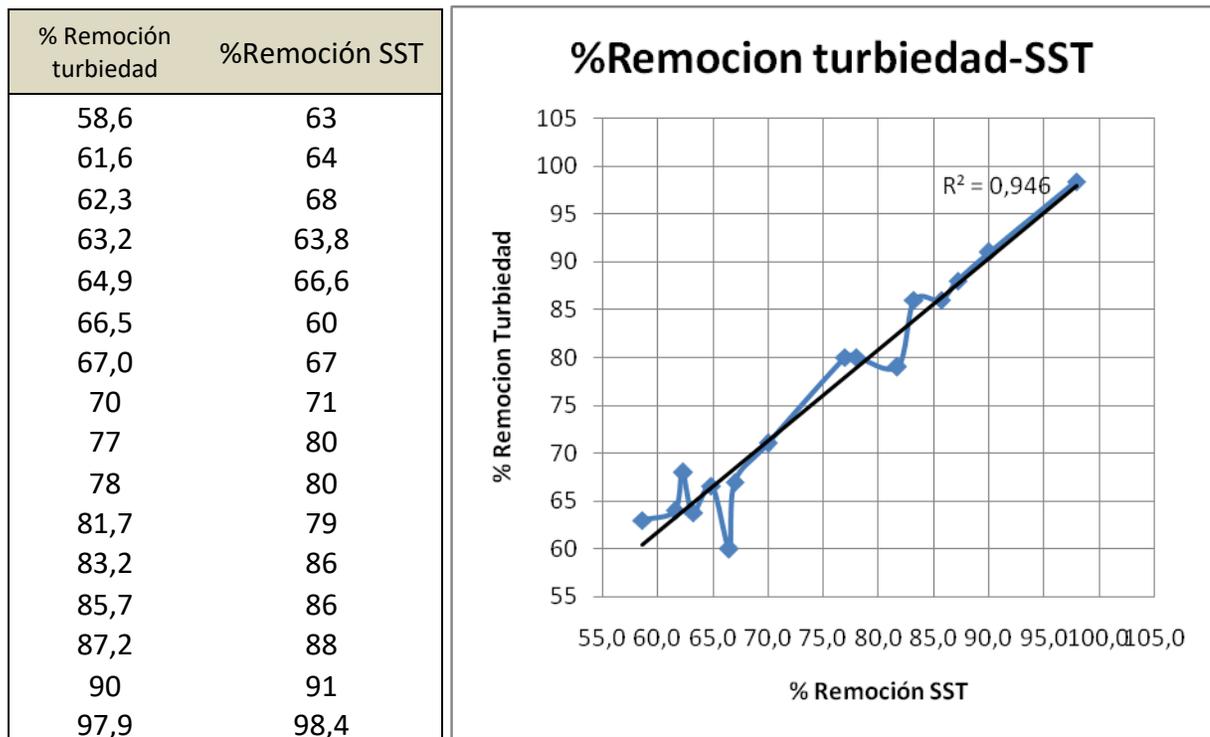


Figura 30. Curvas de relación turbiedad y SST

La figura 30, muestra la relación que existe entre los parámetros de turbiedad y SST. La recta R^2 es la línea de tendencia que determina la relación existente entre estos dos parámetros. Como se puede observar en las figura 30, $R^2 = 0.946$, por lo tanto se puede concluir que la turbiedad y los SST tienen una relación casi de 1 a 1 haciendo proporcionales estos dos parámetros.

En este primer paso se tomaron muestras de las aguas residuales en la cámara de integración o lugar donde se reúnen los efluentes llegados a la planta por bombeo o gravedad. La finalidad es definir las características del agua residual afluente a la planta de tratamiento, tanto recién llegada como una vez ha sido sometida a tratamiento (Ver Figura 31).

A la muestra de agua se le mide su turbiedad por medio del “Método Nefelométrico” que se basa en la comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra en condiciones definidas y la dispersada por una solución patrón de referencia en idénticas condiciones. Cuanto mayor es la intensidad de la luz dispersada, más intensa es la turbidez [21]. La turbiedad es expresada en Unidades Nefelométricas.



Figura 31. Toma de muestra, cámara de integración PTAR-C.

Existen dos mediciones de la turbiedad del agua, la primera como se describió anteriormente, es cuando se recoge el agua directamente del efluente en la cámara de integración, Figura 30 y la segunda se realiza después de floculada y sedimentada, la cual recibe el nombre de “turbiedad residual” y suele considerarse como el parámetro más importante para caracterizar el proceso. En ambos casos puede hacerse con un turbidímetro de transmisión como el Hellige o con uno de diseminación como el Hech o el Fisher [21].

Cuando se trata de evaluar pequeños valores de turbiedad es preferible el uso de turbidímetros de diseminación, por ser más precisos y no depender del criterio del

observador. Por tales razones para esta investigación se recurrió al turbidímetro disponible en el laboratorio de la PTAR-C (Ver Figura 32).



Figura 32. Turbidímetro utilizado para la realización de las pruebas de laboratorio.

Un aporte de este proyecto para definir la calidad del agua residual afluyente a la planta fue tomar muestras aleatorias a lo largo del día durante los meses de julio, agosto y septiembre en la cámara de integración donde se encuentra el total afluyente y por medio del turbidímetro del laboratorio de la PTAR-C definir la turbiedad de cada muestra tomada.

Las muestras se tomaron aleatoriamente con el fin de obtener el mayor número de muestras posibles con diferentes características.

El aporte del investigador de este proyecto en esta etapa fue el acompañamiento constante al personal encargado de tomar las pruebas y posteriormente tomar nota de los valores arrojados por cada prueba de turbiedad y colaborar con el personal de laboratorio con la realización de las pruebas, ya que para realizar dichas pruebas no se necesita de un conocimiento especializado, simplemente tener en cuenta algunas precauciones a la hora de introducir las muestras en el turbidímetro para que la lectura de este sea la más acertada posible.

Los datos recolectados, con las turbiedades de cada prueba en tiempo seco se pueden observar en la Figura 33, y los datos de las turbiedades recolectados en condiciones de lluvia se describen en la figura 34.

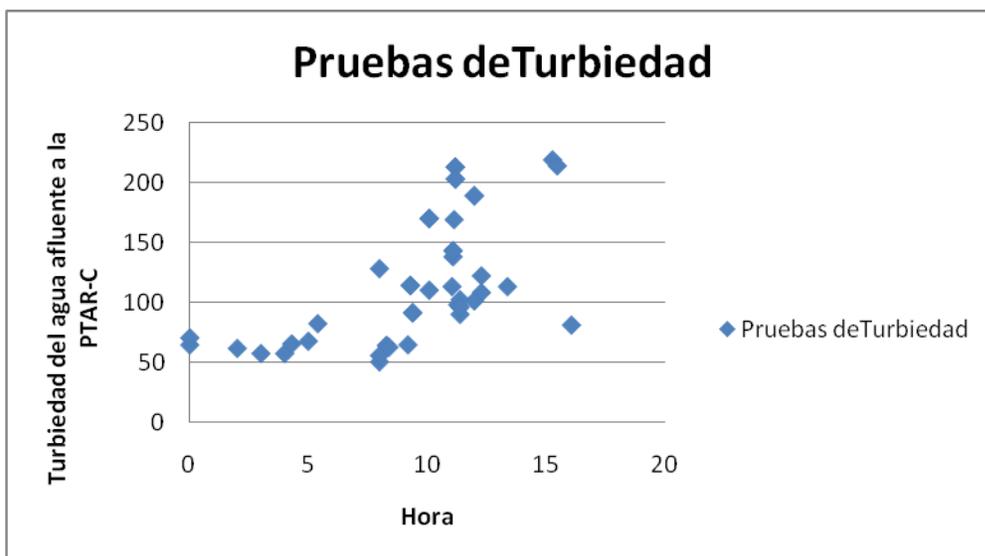


Figura 33. Turbiedades en condiciones de verano

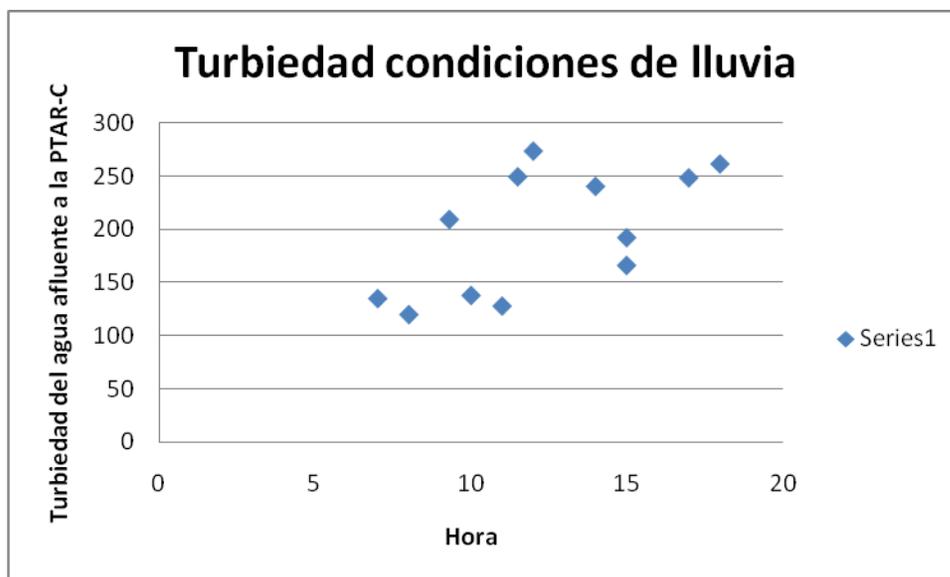


Figura 34. Turbiedades en condiciones de lluvia

En la Figura 33 se puede observar que en tiempo de verano existe un apreciable aumento de la turbiedad en horas de medio día, el resto del día el agua residual presenta turbiedades relativamente constantes y en horas de la noche la turbiedad del agua baja considerablemente. En la Figura 34 se aprecia que en condiciones de lluvia la turbiedad del agua presenta niveles muy elevados.

5.2.1 Definición de rangos de calidad del agua.

La definición de los rangos de la calidad del agua se da de acuerdo a los resultados arrojados por las muestras de laboratorio que se llevaron a cabo durante la ejecución de este proyecto en las instalaciones de la PTAR-C, bajo la supervisión y colaboración del personal adecuado para tales propósitos. Las variaciones de los datos obtenidos de las pruebas realizadas permiten establecer rangos de calidad del agua y los valores correspondientes a cada rango. Los estudios realizados por la propia PTAR-C y los correspondientes a esta investigación señalan que las características del agua afluente a la planta de tratamiento varían durante el día y que en la noche permanecen relativamente constantes.

Teniendo en cuenta que el tipo de estudio realizado en este proyecto es un diseño experimental, el investigador de este proyecto plantea teniendo en cuenta los datos obtenidos de turbiedad tres rangos los cuales abarcan la totalidad de las turbiedades que puede traer el agua residual afluente a la planta.

Los rangos propuestos para condiciones de verano son:

1. Turbiedades menores a 60 UNT
2. Turbiedades entre 61 – 200 UNT
3. Turbiedades mayores a 201 UNT

El rango propuesto bajo condiciones de lluvia es:

120 – 273 UNT

Más adelante con la utilización de un paquete estadístico se podrá establecer si las dosis de químicos utilizadas para cada rango son las indicadas o no.

.

5.3 DOSIS ÓPTIMA DE QUÍMICOS

Para determinar las dosis de químico y gradientes de velocidad, el investigador de este proyecto realizará con la ayuda del personal técnico las pruebas de laboratorio denominadas “Pruebas de Jarras”. Esta prueba es la más utilizada para establecer los requerimientos del proceso a baja escala. A continuación se describe de forma detallada en qué consiste esta prueba.

5.3.1 Prueba de jarras

Este proceso experimental consiste en simular en unos vasos de precipitación o jarras el proceso de coagulación que se produce en la planta de tratamiento y

evaluar distintos parámetros durante o al final de los ensayos para caracterizar su funcionamiento.

Las Pruebas de Jarras pueden utilizarse tanto para controlar la coagulación-floculación de una planta existente como para obtener los datos de diseño para el proyecto de nuevas unidades. Con este sistema de simulación se pueden determinar los siguientes parámetros:

Cuadro 5. Parámetros experimentales en las Pruebas de Jarras.

Parámetros	Actividades y resultados experimentales
Determinación de dosis óptimas mediante evaluaciones:	<p>Cualitativas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tamaño del floc producido. • Tiempo inicial de formación del floc. <p>Cuantitativas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinaciones físicas: turbiedad y/o color residuales. • Determinaciones químicas: pH, alcalinidad, hierro y/o manganeso.
Determinación de la velocidad de sedimentación en las jarras.	<ul style="list-style-type: none"> • Influencia del pH en la coagulación. • Eficiencia de la mezcla mediante ensayos de segregación. • Influencia que la concentración de los coagulantes tiene en la coagulación. • Tiempo y gradientes óptimos de floculación. • Comparación entre las pruebas de jarras y el comportamiento de los floculadores. • Eficiencia de los ayudantes de floculación.

Fuente. Presente investigación.

La metodología utilizada propuesta por este proyecto para la definición de la dosis óptima de químicos fue la siguiente.

La realización de las pruebas de jarras se ha llevado a cabo desde el 1 de julio de 2009 hasta el mes de septiembre del mismo año, durante 2 o 3 días cada semana, con jornadas de aproximadamente 12 horas comenzando a las 8 a.m. El estudio se realiza utilizando el agua afluyente que llega a la PTAR-C, tomando como punto de muestreo la cámara de integración de caudales, donde se encuentra el total de caudales.

5.3.1.1 Determinación de la dosis óptima de coagulante.

Uno de los objetivos básicos de la Prueba de Jarras es poder determinar la dosis de coagulante capaz de generar la más rápida desestabilización de las partículas coloidales en la planta y promover la formación de un floc pesado y compacto que quede fácilmente retenido en los sedimentadores y no se rompa al pasar por el filtro. Debe observarse que no necesariamente el floc que sedimenta rápidamente es el que queda retenido en el filtro con más facilidad. El floc que se busca, por lo tanto, es

aquel que da el mayor rendimiento en el conjunto de los procesos de clarificación. Para determinar estos resultados, las pruebas de jarras deben realizarse de la siguiente manera:

El aparato de prueba de jarras fue desarrollado entre 1918 y 1921 por Langelier y Baylis, separadamente. Consta básicamente de un agitador múltiple de velocidad variable que puede crear turbulencia simultáneamente en 6 vasos de precipitado. En el mismo se trata de reproducir las condiciones en las cuales se produce la floculación en la planta de tratamiento. Hay que tener en cuenta, sin embargo que el hecho de que la prueba de jarras sea un ensayo rutinario en la operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales, no significa que pueda ejecutarse descuidadamente, situación que suele ser bastante común.

En la Figura 35 se muestra el equipo de laboratorio para llevar a cabo las pruebas de jarras en la PTAR-C



Figura 35. Aparato para la ejecución de la Prueba de Jarras

El procedimiento a seguir para la Prueba de Jarras es el siguiente:

- En primer lugar se determina la temperatura del agua cruda, el color, la turbiedad, el pH y la alcalinidad. También el hierro y el manganeso si son significativos.
- A continuación se añaden los coagulantes al agua en dosis progresivas en cada vaso de precipitado en cualquiera de las tres formas siguientes: se coloca el agua de la muestra en las 6 jarras, las cuales se introducen debajo de los agitadores, los cuales se ponen a funcionar a 100 rpm. Luego, se inyecta el coagulante con una pipeta de 2 a 10 ml, profundamente dentro del líquido junto a la paleta. No debe dejarse caer la solución del coagulante en la superficie del agua, pues esto desmejora la eficiencia de la mezcla rápida. El tiempo de mezclado suele ser entre 30 y 60 segundos.

Una vez hecha la mezcla rápida se disminuye la velocidad de rotación de las paletas a 30-60 rpm (promedio de 40 rpm) y se deja flocular el agua durante 15-30 min, o durante el tiempo teórico de detención que exista en la planta de tratamiento. Luego se suspende la agitación, se extraen las paletas y se deja sedimentar el agua. Una vez mezclados los coagulantes con el agua se pueden hacer las determinaciones de tipo cualitativo tales como: evaluación del tamaño del floc producido o tiempo inicial de formación del floc; y determinaciones cuantitativas como: determinaciones físicas y determinaciones químicas.

Determinaciones Cualitativas. Se observa el tamaño del floc producido y se le evalúa cualitativamente según sus características. Puede expresarse su tamaño en mm de acuerdo con el comparador desarrollado por el Water Research Institute (WRI) de Inglaterra, como se muestra en la Figura 36. De acuerdo con esta comparación entre la figura y el floc producido se escoge como dosis óptima la de la jarra que produce una partícula más grande, de mayor velocidad de asentamiento aparente y que deje ver el agua más cristalina entre los flóculos. Esta determinación es bastante subjetiva y depende del criterio del observador.

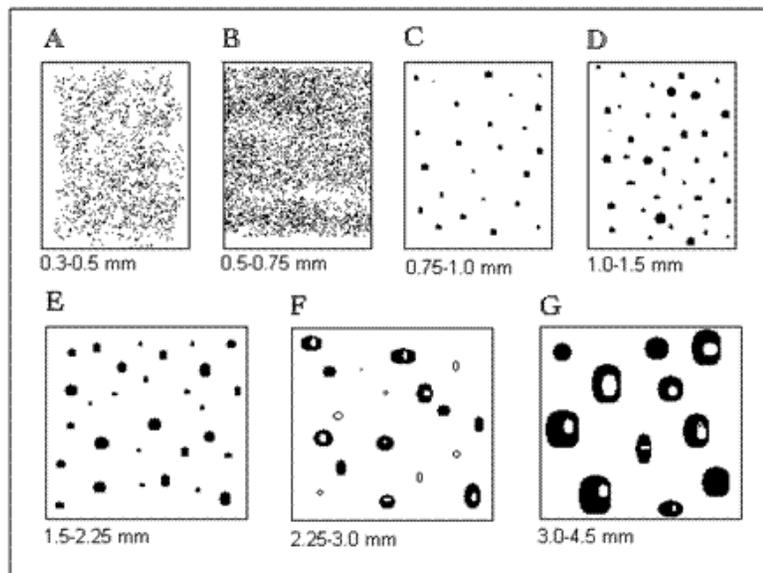


Figura36. Comparador para estimar el tamaño del floc producido en la flocualción.
Fuente. Modelo según el: Water Research Institute (WRI).

También se determina en segundos el tiempo que tarda en aparecer el primer inicio de la formación del floc, este es uno de los sistemas para calificar la velocidad de la reacción. La iluminación de la base del agitador ayuda en esta determinación. Pero ni aun así suele ser fácil, pues el floc recién formado usualmente es incoloro. Por otra parte, el floc que se forma más rápidamente no necesariamente es el mejor.

Determinaciones Cuantitativas o Físico-Químicas. En este punto se deben extraer muestras del sobrenadante después de un periodo de decantación no inferior a 10 minutos para medir la turbiedad residual con un turbidímetro nefelométrico tipo Hach o Fischer, a fin de hacer una exacta evaluación de la remoción de partículas que se obtuvo durante la sedimentación, la cual se puede considerar que esta en función directa de la eficiencia de la aglutinación. La muestra extraída puede usarse también para hacer otras determinaciones tales como color, alcalinidad y pH.

Temperatura. La prueba de jarras debe realizarse, en lo posible, a la misma temperatura que la que tiene el agua en la planta de tratamiento. Dejar los vasos sobre el iluminador de la base prendido o sobre un objeto caliente afecta la temperatura y produce resultados variables e inconsistentes. Por eso, es conveniente tener un termómetro para medir la temperatura del agua antes de iniciar los ensayos y en la planta de tratamiento.

ESTIMACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE QUÍMICOS EN LA PTAR-C.

La realización de las pruebas de jarras las realizó el investigador de este proyecto para determinar las dosis óptimas de coagulante (cloruro férrico) y ayudante de coagulación – floculación (polímero) para la remoción del parámetro de contaminación: Turbiedad que es proporcional a los SST.

El estudio presenta la siguiente planeación:

Para determinar las dosis óptimas:

- Dosificación del cloruro férrico en el rango de 10 – 25 mg/L
- Dosificación de polímero en el rango de 0.1 – 0.5 mg/L
- Determinación de remociones de turbiedad al variar los rangos de dosificación de cloruro férrico y polímero.

Para plantear los rangos de dosificación de cloruro férrico y polímero el investigador tomo en cuenta el concepto del personal de la PTAR-C, acerca de este tema.

Condiciones del experimento

Velocidad mezcla rápida en RPM: 120 R.P.M.

Velocidad de mezcla lenta en RPM: 40 R.P.M.

TMR (Tiempo de mezcla rápida) 60 Seg.

TML (Tiempo de mezcla lenta) 30 min.

Los químicos utilizados fueron:

Cloruro férrico comercial.
Polímero comercial.

Los equipos utilizados para la realización de las pruebas fueron:

Jar Test (aparato de prueba de jarras).
Turbidímetro.

Durante el proceso de pruebas de jarras, el investigador se encargó de medir las dosis de cloruro férrico y polímero en pequeñas jeringas para ser adicionado a las muestras. Posteriormente selecciona los parámetros como tiempo de agitación y revoluciones para introducirlos al panel de control del aparato de pruebas como se muestra en la Figura 38.

Una vez realizada cada prueba y durante todo el periodo de pruebas, el investigador tomó nota de todos los resultados arrojados por las pruebas para realizar el análisis de estas y determinar los rangos de dosificación.

La Figura 37 muestra en el fondo de las jarras el floc sedimentado por efecto del cloruro férrico y polímero adicionado al agua residual.



Figura37.

Reacción de químicos en el agua residual.

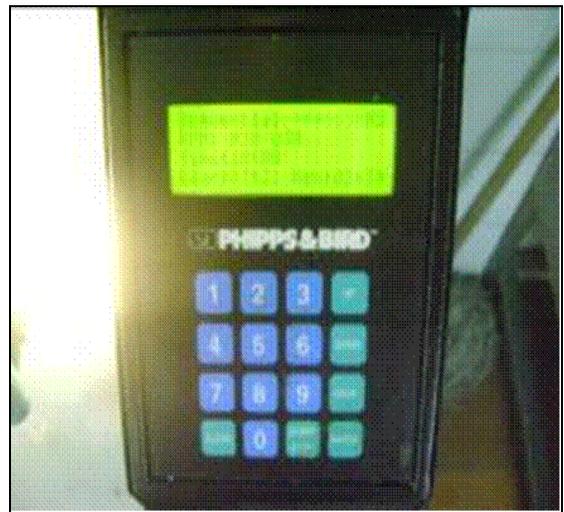


Figura 38

Panel aparato prueba de jarras

Una vez realizadas las pruebas de jarras, se vuelve a determinar la turbiedad del agua residual bajo las mismas condiciones de las pruebas tomadas de la cámara de integración. Esto con el fin de determinar el porcentaje de remoción de la turbiedad para determinar a eficiencia del tratamiento.

El porcentaje de eficiencia de remoción de la turbiedad se determina utilizando la fórmula 1.

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{\text{TurbiedadInicial} - \text{TurbiedadFinal}}{\text{TurbiedadInicial}} \quad (1)$$

Los datos obtenidos fueron anotados por el investigador para el análisis de las pruebas realizadas.

En la Figura 39, se observa cual fue la remoción de la turbiedad con respecto a la turbiedad inicial mostrada en la Figura 33 en condiciones de verano.

Del mismo modo en la figura 40, Se muestra la remoción de turbiedad con respecto a la turbiedad inicial mostrada en la Figura 34 bajo condiciones de lluvia.

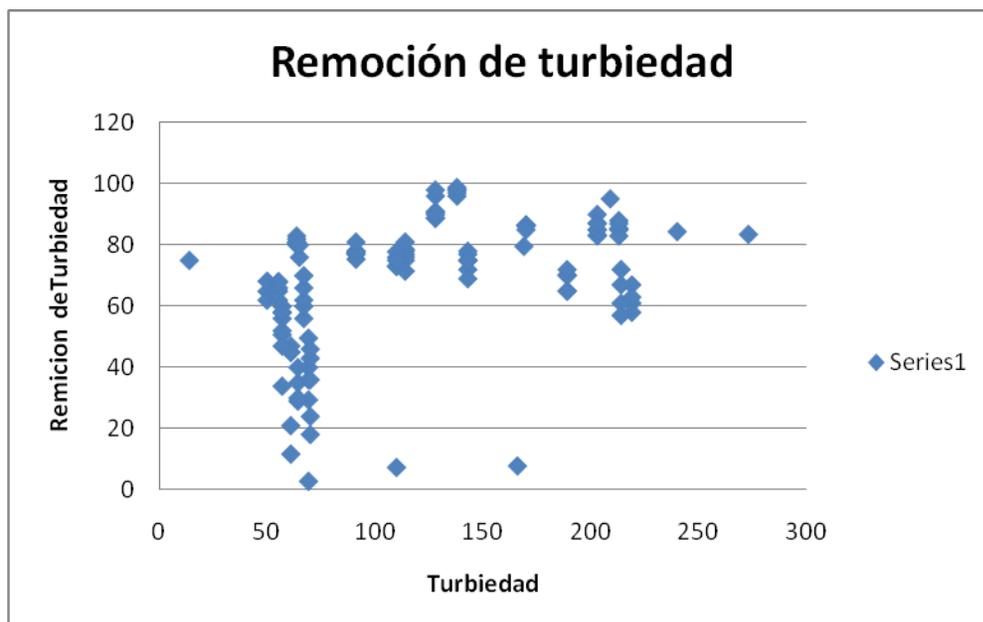


Figura 39. Remoción de turbiedad condiciones de verano

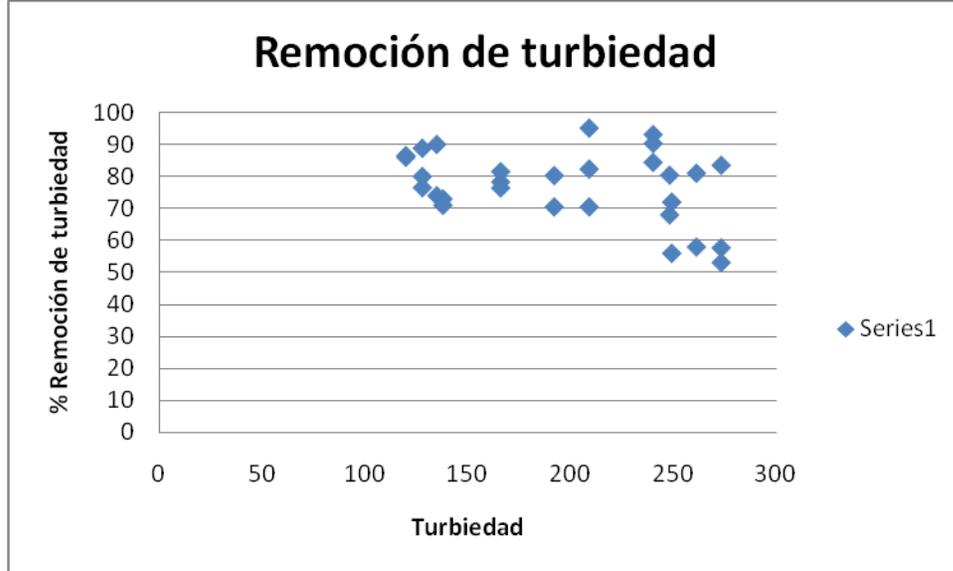


Figura 40. Remociones de turbiedad bajo condiciones de lluvia

Para definir las dosis óptimas, el análisis de este proyecto se basa en datos de diseño de la PTAR-C que se encuentran en el anexo D. Donde se especifica que por diseño la PTAR-C estaría en capacidad de remover hasta un 68 % de los SST de las aguas residuales afluentes a esta planta.

Por tratarse este estudio de un diseño experimental los valores de las dosis recomendadas se darán en rangos, lo que permite tener un porcentaje para el error.

En la Figura 40 se observa que las pruebas de jarras evaluando turbiedad arrojan resultados que en su mayoría se encuentran por encima 60 % de remoción que de acuerdo al valor de diseño de la planta son muy buenos. También en la gráfica se observa que hay datos que superan el 90 % de remoción de turbiedad lo que quiere decir que para esos valores de turbiedad inicial la dosis de químico agregado fue demasiado. Del mismo modo si se analizan los datos que presentan valores por debajo de 60 %, quiere decir que para esos valores de turbiedad inicial la dosis de químico adicionada no fue la suficiente.

De este modo y como aporte de este proyecto, se propone que no se tengan en cuenta los valores con las dosis de químico que superen el 90 % de remoción de turbiedad ni tampoco los que estén por debajo del 60 % de remoción de turbiedad. De este modo se está garantizando que con las dosis dosificadas para los diferentes rangos de turbiedad se estará removiendo entre el 60 % y el 90 % de turbiedad, haciendo este proceso muy eficiente, teniendo en cuenta que por diseño, la PTAR-C estaría en capacidad de remover hasta un 68% de los SST.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, los datos de las pruebas realizadas y los parámetros de diseño de la planta, se propone en este proyecto los siguientes rangos de dosificación: (ver Cuadro 6)

Cuadro 6. Dosis sugeridas de cloruro férrico y polímero en condiciones de verano

TIEMPO: VERANO	
Turbiedad UNT (Agua Residual)	DOSIS SUGERIDAS (mg/l) Cloruro Férrico Polímero
<60	10 0,2
61 – 200	10 - 15 0,2
> 201	15 - 25 0,2

En el Cuadro 7, se describen las dosis sugeridas de cloruro férrico y polímero en condiciones de lluvia.

Cuadro 7. Dosis sugeridas de cloruro férrico y polímero en condiciones de lluvia

TIEMPO: INVIERNO	
Turbiedad UNT (Agua Residual)	DOSIS SUGERIDAS (mg/l) Cloruro Férrico Polímero
120 – 273	11 - 15 0,2

La importancia de realizar este trabajo y obtener estos rangos fue que por medio de ellos se obtuvo una guía que sugiere las dosis de cloruro férrico y polímero a dosificar según sean las características del agua residual.

Actualmente el sistema de dosificación de cloruro férrico de la PTAR-C aunque cuenta con casi todas las capacidades para funcionar correctamente, no lo hace, ya que en el momento este sistema trabaja con una dosis constante de 15 mg/l sin importar las características que presenta el agua residual. Esta situación hace que en algunos rangos esta dosis constante pueda resultar insuficiente y en otros rangos se esté adicionando mayor cantidad de químico, sobre todo en la noche donde no es necesaria tal dosis, afectando directamente los costos de operación de la PTAR-C.

5.4 VELOCIDAD DE AGITACIÓN.

Para determinar la velocidad de la mezcla se realizaron pruebas donde se dejaron estables las dosis de químico en 12 y en 15 mg / L de cloruro férrico y 0.2 mg / L de polímero y se variaron las velocidades de los agitadores y el tiempo de agitación, con el fin de determinar los gradientes y los tiempos de mezcla.

- TMR (tiempo de mezcla rápida) entre 15 - 180 Seg.
- Velocidad mezcla rápida en R.P.M. entre 80 – 150 R.P.M.
- Velocidad mezcla lenta: 30 - 60 R.P.M.
- TML (tiempo mezcla lenta) 30 - 50 min.

Sin lugar a dudas el parámetro más importante para tener en cuenta en el proceso de agitación es la velocidad para mezcla rápida y el tiempo de agitación ya que es en esta donde en cuestión de segundo se produce el efecto de coagulación. Por tal razón se debe garantizar que el químico adicionado se mezcle de manera adecuada con el agua residual.

En la Figura 41, se muestran los datos obtenidos variando los parámetros de velocidad y tiempos de mezcla.

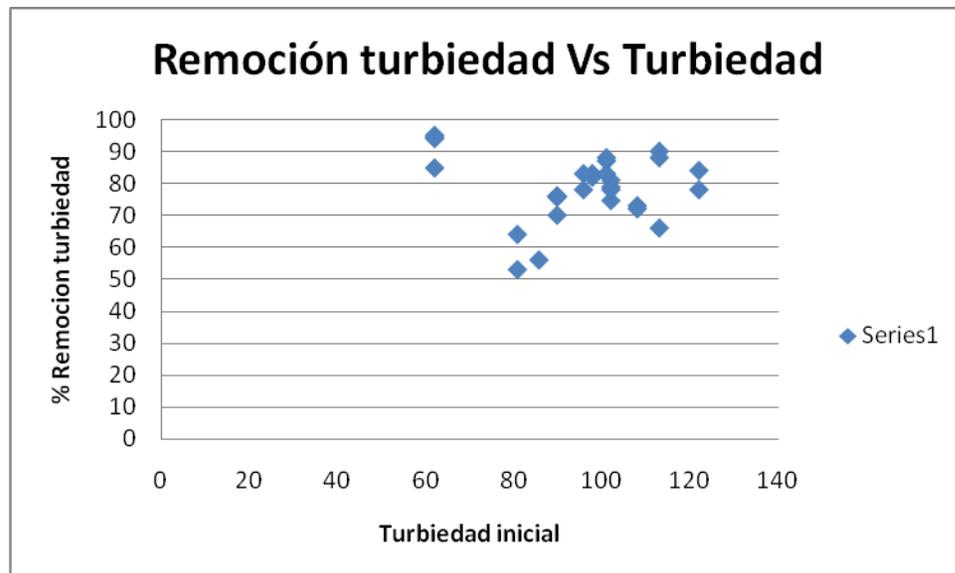


Figura 41. Remociones de turbiedad variando velocidad y tiempos de mezcla

El análisis que el investigador realizó para determinar los valores de velocidad de agitación y tiempo de mezcla fue el mismo que se tuvo en cuenta para determinar los rangos de las dosis de químico. Los valores de remoción de turbiedad deben estar entre un 60 % y un 90 %, de esta manera se excluyen los datos que contienen

valores que hacen que la turbiedad no se encuentre en este rango. Los resultados de este análisis se muestran en la Cuadro 8.

Cuadro 8. Velocidades y tiempos sugeridos de mezcla

Parámetros	Unidades
VELOCIDAD PARA MEZCLA RÁPIDA	117 – 170 R.P.M.
VELOCIDAD PARA MEZCLA LENTA	40 - 55 R.P.M.
TMR: TIEMPO DE MEZCLA RÁPIDA	1 MIN
TML: TIEMPO DE MEZCLA LENTA	20 - 30 MIN

5.4.1 Gradiente G de velocidad.

El gradiente de velocidad utilizado para los procesos de coagulación y floculación en un sistema de agitación está dado de acuerdo con la velocidad de los agitadores y otros parámetros del sistema como volumen tratado, área de las paletas, densidad del agua, etc. Estos factores en conjunto permiten obtener un gradiente determinado de velocidad, por ejemplo, mediante el diseño planteado para este proyecto el investigador propone un gradiente de acuerdo a la velocidad del agitador y a las características del equipo donde se efectuaron las pruebas, que en este caso fue el equipo de jarras del laboratorio de la PTAR-C. Es decir, que este gradiente sugerido puede ser acogido por cualquier sistema de agitación de cualquier planta y ser implementado de acuerdo a las características que cada una de estas posea en sus sistemas de agitación y el volumen de agua tratado.

El equipo de jarras de la PTAR-C posee una curva de calibración que relaciona la velocidad en R.P.M. con el gradiente G, de acuerdo con las características del equipo y el volumen tratado en las pruebas. Esta curva de calibración se muestra en la Figura 42.

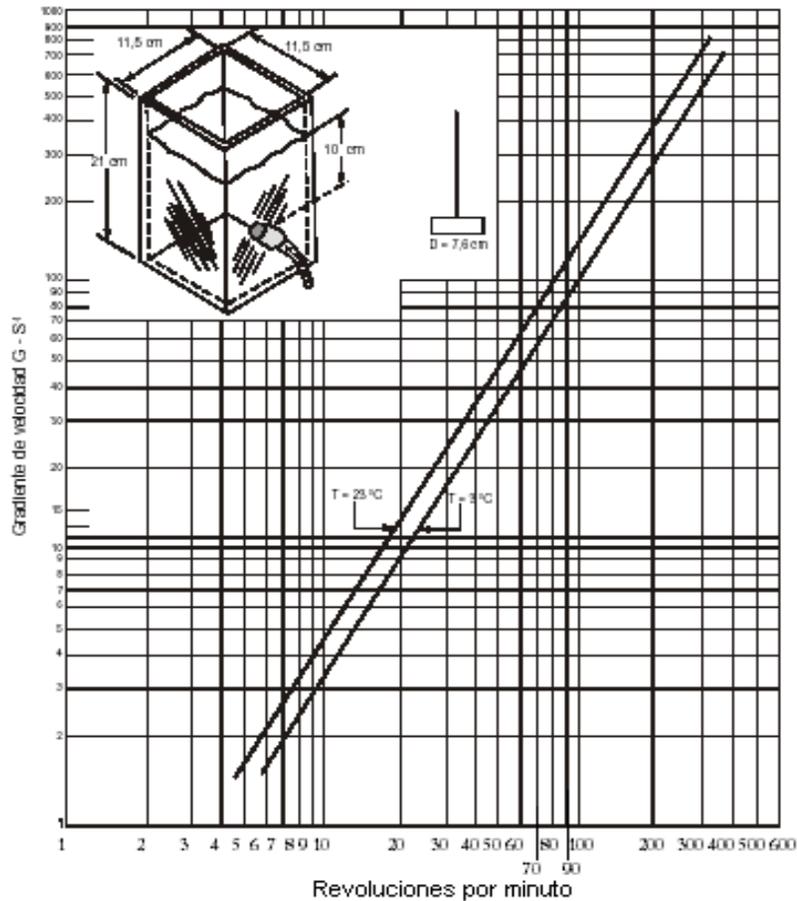


Figura 42. Curva de calibración de velocidad en R.P.M. y gradiente G

Como aporte de este proyecto, para realizar de manera adecuada el proceso de agitación, se proponen los gradientes descritos en el Cuadro 9, teniendo en cuenta las velocidades sugeridas en el Cuadro 8 y la curva de calibración del equipo de prueba de jarras, para que las plantas de tratamiento de aguas residuales y en especial la planta caso de estudio PTAR-C, los tengan en cuenta y ajusten los sistemas de agitación de acuerdo a las características presentadas.

Cuadro 9. Gradientes y tiempos de mezcla sugeridos

Parámetros	Unidades
GMR GRADIENTE MEZCLA RÀPIDA	160 – 280 S ⁻¹
GML GRADIENTE MEZCLA LENTA	34 - 50 S ⁻¹
TMR: TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA	1 MIN
TML: TIEMPO DE MEZCLA LENTA	20 - 30 MIN

Es importante anotar que la dosis de químico utilizada en cada planta de tratamiento y el gradiente de velocidad, depende del flujo presente y de las características que presente el agua residual, es decir, cada Planta de Tratamiento de Aguas Residuales maneja diferente capacidad de tratamiento, pero este diseño sugiere dosis por litro y gradientes que relacionan volumen de agua y características del sistema de agitación, por tal razón los resultados de este modelo experimental permite ser ajustado a cualquier caudal tratado con diferentes características del sistema de agitación.

Determinación del gradiente de mezcla

Cualquier sistema de agitación puede trabajar con los gradientes sugeridos en el Cuadro 11. Lo importante es tener en cuenta que los gradientes sugeridos en este proyecto como los gradientes de los sistemas reales de las plantas de tratamiento deben ser iguales, lo que no significa que las velocidades de los agitadores deban ser iguales también ya que el volumen tratado y las características físicas del sistema de agitación pueden ser diferentes.

Para determinar el gradiente de velocidad de un sistema de agitación en una planta de tratamiento como el descrito en la Figura 18, se utiliza la ecuación 2 descrita a continuación.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (2)$$

μ = Peso específico del agua.

V = Volumen tratado

P es la potencia y está dada por:

$$P = F_a \cdot V_r \quad (3)$$

$$F_a = \frac{1}{2g} C_d \cdot A \cdot \gamma \cdot V_r^2 \quad (4)$$

Donde:

F_a = Fuerza de arrastre

C_d = Coeficiente de arrastre

A = Área paleta

Remplazado 3 en 4

$$P = \frac{1}{2g} Cd. A. \gamma. Vr^3 \quad (5)$$

Ahora:

$$Va = K.Vp, \text{ donde } K < 1$$

$$Vr = Vp - Va$$

$$Vr = Vp - K. Vp$$

$$Vr = Vp (1-k) \quad (6)$$

$$Vp = \frac{2\pi rn}{60} \quad (7)$$

Va = Velocidad del agua.

Vp = Velocidad de la paleta.

Vr = Velocidad relativa paleta agua.

n = Velocidad de rotación del eje.

Reemplazando 7 en 6

$$Vr = \frac{2\pi rn}{60} (1 - K) \quad (8)$$

K para un tipo de mezclador mecánico de paletas se recomienda tomarlo como 0.25

Reemplazando 8 en 5

$$P = \frac{1}{2g} Cd. A \left[\frac{2\pi rn}{60} (1 - K) \right]^3 \gamma \quad (9)$$

$$P = 5.85 \times 10^{-5} . Cd. \gamma [(1 - K)n]^3 r^3 A \quad (10)$$

$$r^3 A = \frac{b}{4} (r) \quad (11)$$

$$P = 1.46 \times 10^{-5} . Cd. \gamma [(1 - K)n]^3 . b r \quad (12)$$

La relación del coeficiente de arrastre Cd puede determinarse por medio del Cuadro 10, teniendo en cuenta el diseño del agitador floculador descrito en el capítulo 4.

Cuadro 10. Constante Cd

b / L	Cd
1	1.10
2	1.15
4	1.19
10	1.29
18	1.40
>18	2.01

5.5 VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO

Muy importante tener en cuenta que actualmente en la PTAR-C se está dosificando el químico de una manera constante, con una dosis que puede ser excesiva en algunos momentos o insuficiente en otros. Las dosis seleccionadas por el personal de la planta, se determinan dándole gran importancia al aspecto visual que presentan las jarras. De esta manera se determina a simple vista si la dosis de químico adicionado al agua residual da como resultado jarras claras, turbias, medianamente claras o turbias.

Uno de los aportes de este proyecto es determinar rangos de dosificación de químico de acuerdo a las características que presenta el agua residual afluyente a la planta, basándose no únicamente en el concepto visual que proporcionan las jarras sino también en que la dosis de químico garantice la remoción de turbiedad entre un 60% y 90%.

En la PTAR-C actualmente no se utiliza ningún tipo de método estadístico para determinar si la dosis de químico es la indicada o no. Por esta razón los datos obtenidos del diseño experimental desarrollado en este proyecto fueron validados por medio de un paquete estadístico, el cual determina el nivel de confianza de las dosis seleccionados para la remoción de la turbiedad del agua residual.

5.5.1 Diseño de Estudio

El experimento es el método de investigación más refinado con que se verifican las hipótesis. Se inicia con un interrogante sobre la relación que guardan dos o más variables, por otra parte el investigador formula una o más hipótesis que delimitan la naturaleza de la relación esperada. El experimento es el evento que se planea y realiza para recabar datos conexos con la hipótesis.

El experimentador introduce cambios de manera deliberada y sistemática dentro de fenómenos naturales y después observa las consecuencias de tales alteraciones al

efectuar un experimento, se dedica gran atención a la manipulación y control de las variables, lo mismo que la observación y medición de los resultados, para obtener mediante este método pruebas más convincentes sobre el efecto que una variable tiene en otra [32].

De acuerdo a las características del diseño experimental realizado en este proyecto, este se define como un diseño experimental completamente aleatorio.

5.5.2 Diseño Experimental completamente aleatorio.

Este modelo se denomina clasificación en un sentido porque solo se investiga un factor. Además se requiere que el experimento se realice en orden aleatorio, de manera que el medio ambiente en el que se usan los tratamientos (unidades experimentales) sea lo más uniforme posible. Por tanto este diseño experimental es un diseño experimental completamente aleatorio.

Se describen dos situaciones en este modelo estadístico respecto al efecto de los tratamientos, Primero, los tratamientos podían haber sido seleccionados, específicamente por el experimentador. En esta situación se desea probar que las hipótesis sobre las medias de los tratamientos y las conclusiones se aplican solo a los niveles del factor considerado en el análisis. Las conclusiones no se pueden hacer extensivas a tratamientos similares que no hayan sido considerados específicamente.

En esta clase de modelo el interés no es tratar de predecir el valor de un factor utilizando valores de factores relacionados con él, sino que la atención se centra en comparar los efectos de dos o más factores.

La importancia de realizar procedimientos conducentes a validar supuestos, radica en que ellos inciden en las cualidades de los estimadores de mínimos cuadrados que son los más comúnmente usados y difundidos. Cuando se cumplen los supuestos, los estimadores de mínimos cuadrados ordinarios son los mejores estimadores lineales insesgados y eficientes, proporcionando propiedades que garantizan la disponibilidad de una gran gama de potentes pruebas para validar hipótesis sobre sus parámetros. Si alguno de estos supuestos no se satisfacen se pierden importantes características de los estimadores. [32]

Por lo tanto el cumplimiento de los supuestos ayuda a sustentar de manera teórica las decisiones que se toman respecto al manejo de las suertes y cuáles son las condiciones más adecuadas para los rangos óptimos. [32]

5.5.3 Análisis De Datos

La realización de las pruebas de jarras se ha llevado a cabo a partir del 1 de julio de 2009 hasta el mes de septiembre del mismo año. El estudio se realiza utilizando el agua afluyente que llega a la PTAR-C, tomando como punto de muestreo la cámara de integración de caudales, donde se encuentra el total de caudales.

5.5.4 Sistema De Variables

La realización de las pruebas de jarras busca determinar las dosis óptimas de coagulante (cloruro férrico) y ayudante de coagulación – floculación (polímero) para la remoción de paramentos de contaminación: Turbiedad

El estudio presenta la siguiente planeación:

- Dosificación del cloruro férrico en el rango de 10 – 25 mg/L
- Dosificación de polímero en el rango de 0.1 – 0.5 mg/L
- Determinación de remociones de turbiedad al variar los rangos de dosificación de cloruro férrico y polímero

5.5.4.1 Variables Respuesta

La variable Remoción turbiedad: Se estudia la remoción de turbiedad del agua residual debido a la importancia que tiene esta prueba para determinar la eficiencia del tratamiento en el agua residual.

5.5.4.2 Variables Covariables

1. Cantidad cloruro férrico
2. Cantidad de polímero

5.6 Software empleado

Para la validación del diseño experimental desarrollado en este proyecto, se utilizó el paquete estadístico spss versión 15.

En este paquete estadístico se introdujeron los datos con los valores determinados como posibles dosis de cloruro férrico y polímero para establecer si el experimento de acuerdo a los valores seleccionados permite remover la turbiedad del agua residual con determinados niveles de confianza.

Para la validación del experimento se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

Formulación del Modelo de Análisis de Covarianza

Se plantea un modelo lineal de covarianza, que se considera como una alternativa óptima, eficiente y la herramienta más adecuada para encontrar relaciones funcionales de tipo lineal entre la variable que afecta la remoción de la turbiedad

Planteamiento de Hipótesis

Las inferencias estadísticas que nos interesan en el análisis de covarianza son las mismas que para los modelos de análisis de varianza. En el análisis de varianza se prueba el efecto de los tratamientos sobre la variable respuesta.

Validación de los Supuestos del Análisis de Covarianza

El análisis de covarianza requiere el cumplimiento de una serie de supuestos necesarios e importantes, para evitar conclusiones que puedan ser erradas.

Normalidad de los Errores

Para evaluar este supuesto se analiza el siguiente sistema de hipótesis:

H_0 : Los datos provienen de una distribución normal.

H_a : Los datos no provienen de una distribución normal.

Homogeneidad de la varianza de los errores

La herramienta estadística empleada para comprobar el cumplimiento de este supuesto es la prueba de Bartlett, donde α debe ser mayor que 0.05 y k es el número de niveles con que cuenta el efecto que estamos probando, esta prueba es la más apropiada ya que los tamaños de los efectos o 'tratamientos' no son iguales.

Independencia de los errores

Es un estadístico con el cual comúnmente se contrasta la hipótesis nula de la ausencia de autocorrelación frente a la alternativa que plantea la correlación entre los errores; en este caso la problemática abordada, dentro del conjunto de datos que cuentan con historial, aunque dentro del modelo se incluyen componentes de tipo temporal y elementos de control para contrarrestar los factores de tipo aditivo que pudieren influir dentro de los errores. La prueba de rachas nos ayudara también a confrontar la aleatoriedad de los datos para así tener evidencia suficiente sobre la no-existencia de errores sistemáticos dentro de los datos relacionados con el problema estudiado.

5.7 Análisis y presentación de resultados

5.7.1 Análisis de Covarianza

En el presente análisis se realizan diferentes modelos con el fin de obtener información acerca de la eficiencia que tienen la dosificación de cloruro férrico y polímero en los rangos establecidos por parte de este proyecto en la remoción de turbiedad en el agua residual, esto se hace debido a que si algunas de las covariables no ejercen efecto sobre la variable dependiente, se plantea un nuevo modelo sin ellas.

A continuación se muestran los resultados generales de los modelos lineales de covarianza.

Diseño del Modelo 1

Se presenta de manera general la ecuación del modelo lineal de covarianza para el primer modelo planteado, en el cual se consideran todas las variables en el modelo y sus posibles interacciones con el factor estado de concepción.

Cuadro 11 Prueba de los efecto inter-sujetos

Variable dependiente: remocion de turbiedad

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	2439,694 ^a	17	143,511	1,683	,137
Intersección	179134,700	1	179134,700	2100,984	,000
ferrico	2439,694	17	143,511	1,683	,137
Error	1619,984	19	85,262		
Total	259384,460	37			
Total corregida	4059,677	36			

a. R cuadrado = ,601 (R cuadrado corregida = ,244)

El cloruro Férrico comercial totalmente controlado aporta el 60.1% al azar, la suma de cuadrados del investigador presenta un mayor control que se atribuye a la aleatoriedad del modelo encontrando, menor la suma de cuadrados del error, con un nivel de significancia del 13.7, las dosis de Cloruro férrico son muy bien controladas, para un nivel de confianza del 95% se acepta la significancia del 13.7 teniendo en cuenta que los componentes de las aguas residuales son muy difícil de controlarlas y depende de muchas variables externas al modelo.

El ajuste R^2 del modelo 2 fue muy bajo y no fue representativo para el sistema. La variable independiente no explica la variable respuesta.

En la Figura 43. Se observa que hay una correlación ascendente entre la variable cloruro férrico comercial y la remoción de turbiedad ya que cuando aumenta la cantidad de férrico comercial se incrementa el porcentaje de remoción de turbiedad.

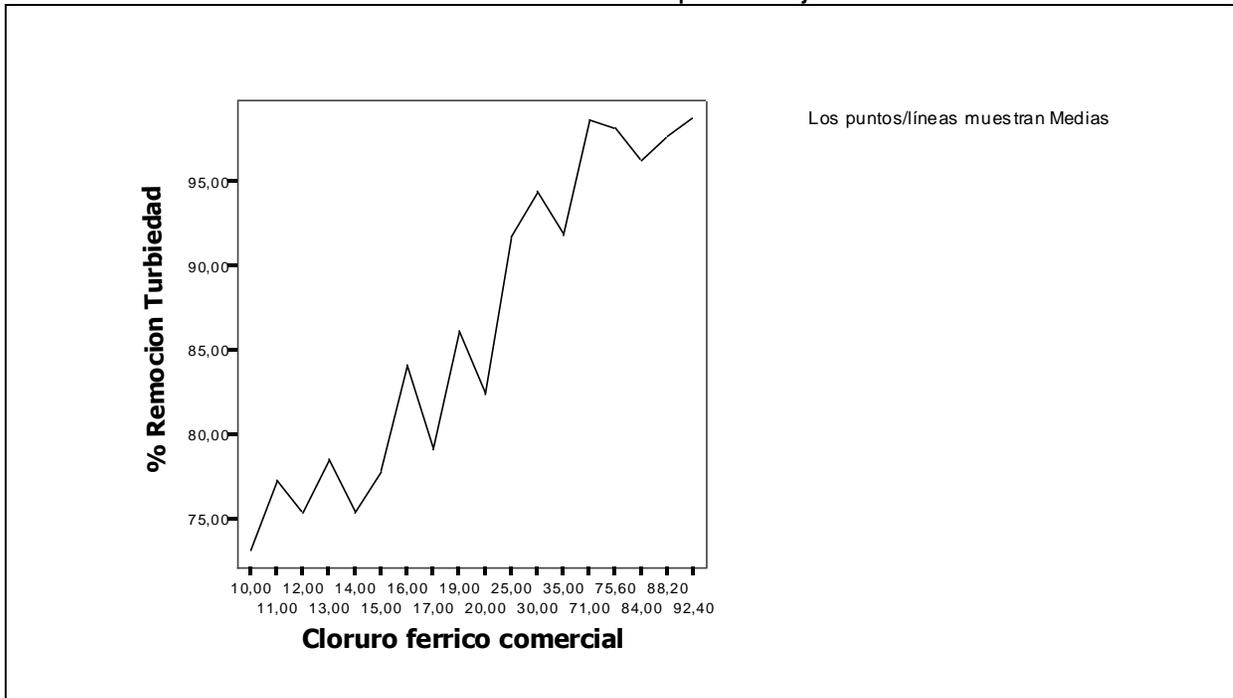


Figura 43. Cloruro férrico Vs remoción de turbiedad

Validez de los Supuestos del Modelo.

Cumplimiento de los supuestos de los modelos lineales de covarianza para cada modelo.

Cuadro 12. Cumplimiento de los supuestos.

Supuestos	Normalidad	Independencia	Media Cero	Homogeneidad
Modelo 1	√	√	√	√
Modelo 2	X	X	X	X

√ Cumplió X No cumplió

En el Cuadro 12, se observa que de los modelos planteados, solo el primero cumple satisfactoriamente con los supuestos del modelo lineal de covarianza, el segundo modelo no cumple. Lo que verifica que el modelo 1 es excelente y confiable pero no lo es el modelo 2.

A continuación se realizan la validación de cada supuesto para el primer modelo planteado.

Normalidad

$H_0 = F(x) = F_o(x) = F(x)$ se distribuye normal

$H_a = F(x) \neq F_o(x) = F(x)$ no se distribuye normal

Los residuos obtenidos en el modelo, mostrados en la figura 44. Permiten verificar el cumplimiento del supuesto sobre normalidad de los mismos, debido a la clara tendencia y al alto ajuste a una línea recta, por lo tanto se concluye que no hay suficiente evidencia para rechazar H_0 .

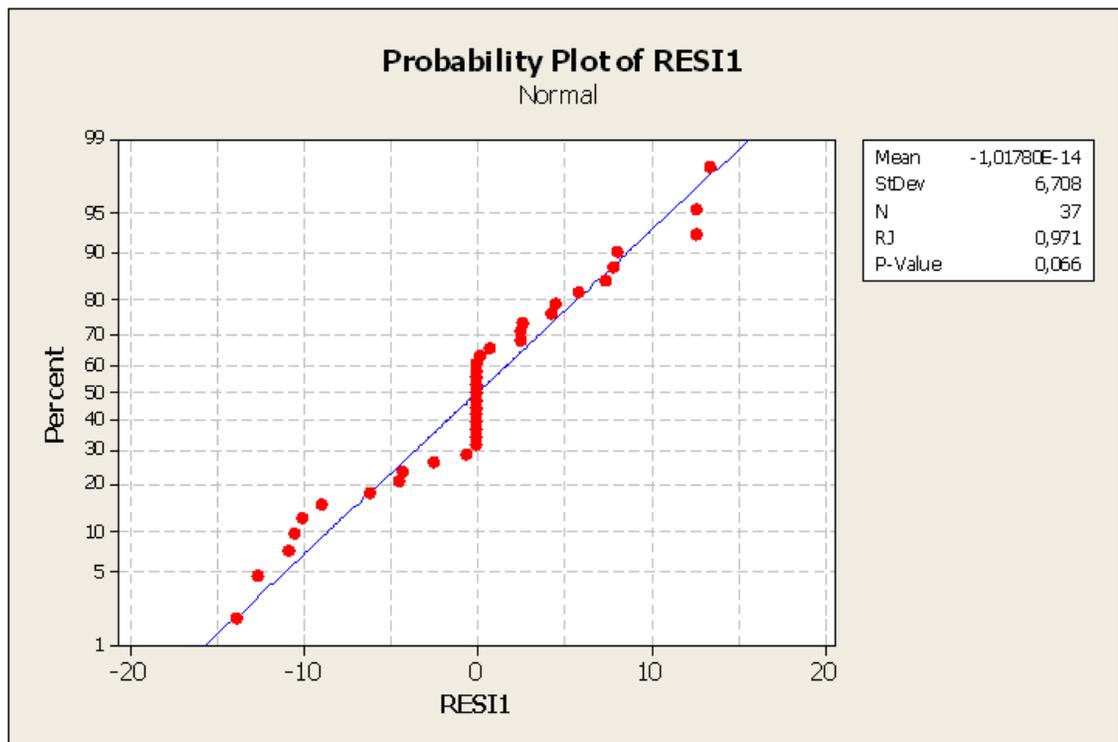


Figura 44. Residuos del experimento

Homogeneidad de Varianza.

Al emplear el estadístico de la prueba de manera gráfica, se concluye que no hay suficiente evidencia para considerar que los datos no presentan heterocedasticidad en el modelo ya que presentan un valor de $p = 0.3$, mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$ establecido. Por tanto, no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula y considerar varianzas desiguales.

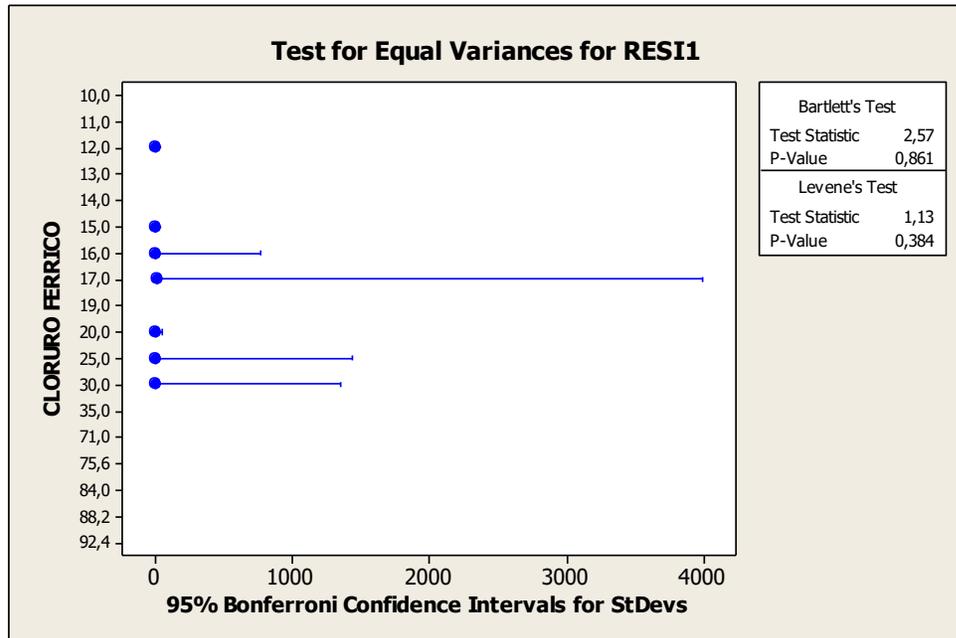


Figura 45. Homogeneidad de varianza

Los resultados obtenidos indican que hay una relación muy fuerte entre la variable cloruro férrico y turbiedad, existió un control bueno por parte del experimentador en las dosis suministradas y además es simétrica la distribución de turbiedad.

El estudio realizado también permite concluir que el supuesto de dosis de polímero no presenta significancia y que no fue representativo. También se puede concluir que entre el cloruro férrico y el polímero, es el primero quien aporta en un alto porcentaje en la desestabilización de las partículas para que se produzca una remoción de turbiedad en un alto porcentaje. El polímero como se describe en el capítulo 3, es un ayudante de coagulación, por esta razón no existe una relación fuerte entre polímero y remoción de turbiedad como si la hay con el cloruro férrico.

CAPITULO 6. DEFINICIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN NECESARIA PARA AUTOMATIZAR LOS SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN Y AGITACIÓN EN LA PTAR-C

6.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE AUTOMATIZACIÓN.

El presente proyecto pretende describir la instrumentación que permita aumentar de manera significativa el nivel de automatización que tiene actualmente la PTAR-C con el manejo de los quipos correspondientes, que no solo aumenten el desempeño de los sistemas de dosificación y agitación de la planta, sino que también sirvan como un medio de integración de los niveles de automatización que posee la empresa.

6.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Hacer un análisis del estado en el que se encuentran actualmente los sistemas de dosificación y agitación en la empresa caso de estudio y con base en este, realizar aportes para llevar a cabo la descripción de la instrumentación necesaria para la automatización de los sistemas, teniendo en cuenta los resultados arrojados por los experimentos realizados durante la ejecución de este proyecto, y la manera como estos se integran para sistematizar los procesos.

6.2.1 Requerimientos.

1. Los instrumentos propuestos deben permitir que los procesos de dosificación y agitación en la PTAR-C funcionen correctamente, teniendo en cuenta los resultados arrojados por el diseño experimental desarrollado en este proyecto.
2. Los instrumentos propuestos deben servir para automatizar los sistemas de dosificación y agitación en la PTAR-C, además de poseer características técnicas que les permitan trabajar bajo condiciones difíciles como las que se presentan en ambientes industriales.

6.3 PROPUESTA DE SOLUCIÓN

A continuación se describen algunas tecnologías utilizadas para la automatización de procesos industriales, niveles de automatización de las empresas y los equipos empleados en la automatización industrial de los sistemas de dosificación y agitación de la empresa caso de estudio.

Tecnología empleada en la automatización de procesos industriales.

Hoy en día se cuenta con diferentes tecnologías que pueden ser empleadas para la automatización de los procesos industriales. Algunas de ellas son las técnicas cableadas y las técnicas programadas. Las técnicas cableadas agrupa a aquellos sistemas diseñados a medidas que utilizan diferentes componentes conectados entre sí para realizar determinadas operaciones, mientras que las técnicas programadas componen el uso de sistemas más complejos y genéricos de procesado de información. Esta técnica utiliza algunos elementos como: microprocesadores, PC industriales, Automatas programables, control numérico y Buses de control. En la figura 46 se encuentran las tecnologías anteriormente nombradas empleadas en la automatización [33].

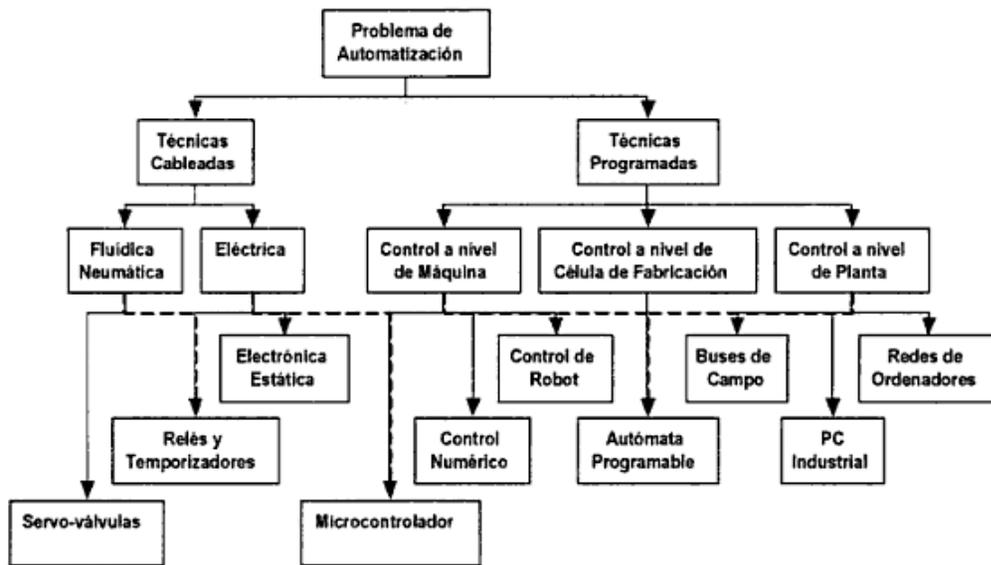


Figura 46. Tecnologías cableadas y programadas. Fuente [33]

Actualmente son más habituales las soluciones programadas basadas en un tratamiento secuencial de problemas para la automatización de procesos. Figura 47

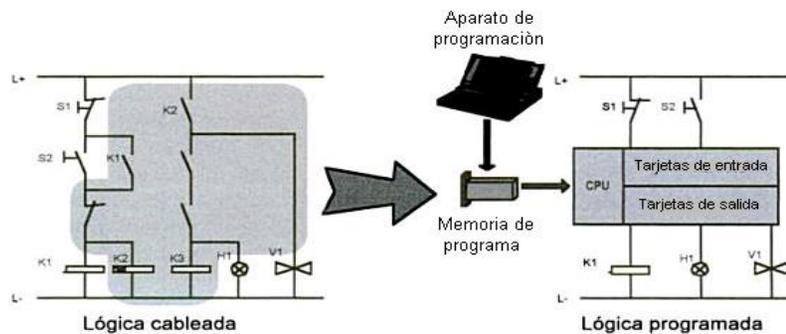


Figura 47. Transición lógica cableada hasta la solución programada. Fuente [33]

Niveles de automatización integral de una empresa.

Dentro de la estructura de una empresa, independientemente de su naturaleza, los procesos a automatizar son múltiples y variados; sin embargo, el National Bureau of Standards (NBS), con el objetivo de aclarar conceptos, ha definido el modelo de automatización integral de una empresa identificando los diferentes niveles que se pueden encontrar, a fin de estructurar e integrar sus fases de producción, diseño y gestión [34]. El modelo propuesto por la NBS corresponde a los cinco niveles de automatización de la figura 48.

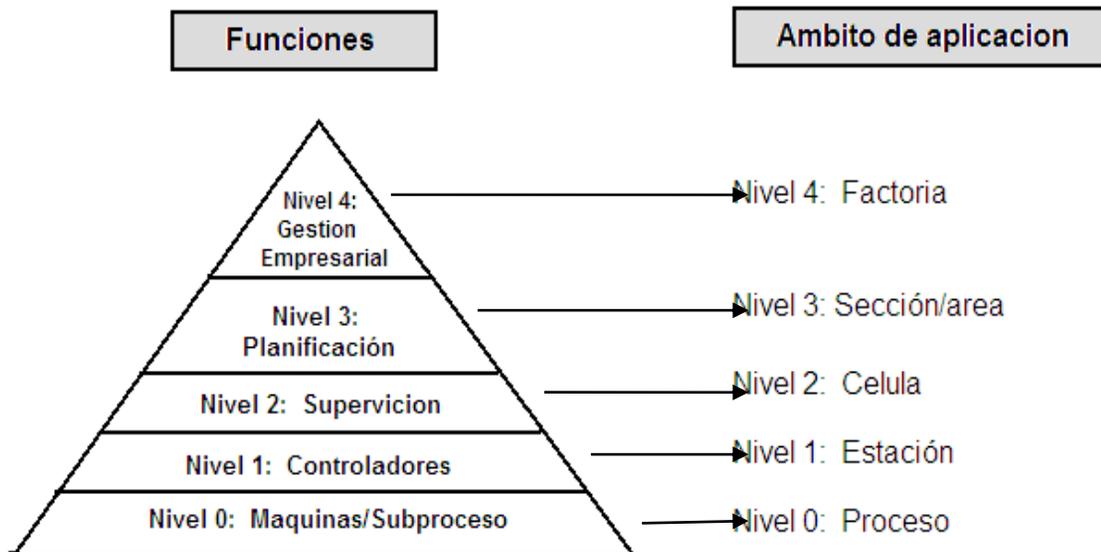


Figura 48. Modelo de automatización integral de cinco niveles propuesto por la NBS
Fuente. [33]

Propuesta de solución

La instrumentación necesaria para automatizar los sistemas de dosificación y agitación en la PTAR-C se describe teniendo en cuenta los requerimientos de los sistemas mencionados y determinando los medios que permitan establecer un vínculo entre los instrumentos descritos para generar comunicación e integración de los niveles que conforman la estructura piramidal de automatización.

6.3.1 Descripción de equipos

Para describir los equipos que permitirán automatizar los sistemas de dosificación y agitación en la PTAR-C, se tendrá en cuenta primero el estado actual de los sistemas y la instrumentación que los componen.

Nivel 0: Maquina / Subproceso

SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN

Funcionamiento de las bombas dosificadoras de polímero. Este sistema en la PTAR-C es automático y es monitoreado a través del centro de supervisión y control; el caudal y la velocidad de las bombas afirman los encargados está relacionado con el caudal tratado en la planta y el número de bombas en servicio. Se puede decir que la planta está en capacidad de cumplir con los requerimientos de su diseño actual y con los estimados del 2015.

En las figuras 9 y 10 del presente proyecto se pueden observar la tolva almacenadora de polímero y la bomba dosificadora.

Sistema de dosificación de Cloruro Férrico (Cl_3Fe). Este químico se adquiere en solución (39% al 41%), con una concentración aproximada de 596 g/L) y se almacena en dos tanques cilíndricos de 50 m³ de capacidad cada uno (6,25 m de altura y 3.2 m de diámetro), construidos en poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Los tanques son cubiertos, se encuentran provistos de indicadores de nivel local, con interruptores por bajo y alto nivel, tapas de inspección y acoples para ser cargados desde un camión-tanque que los abastece periódicamente. En la Figura 11 se puede observar uno de los tanques de almacenamiento de cloruro férrico y en la Figura 12 una de las 6 bombas dosificadoras para este químico utilizadas en la PTAR-C.

En la PTAR-C existen 6 Bombas dosificadoras marca Milton Roy, cada una con capacidad de bombeo de 297 L/h, para un total de 1782 L/h. esta capacidad de bombeo resulta suficiente para el caudal pico actual de aguas residuales (8 m³/s), condición en la que se requiere un bombeo de solución de cloruro férrico de 1418,7 L/h. Sin embargo, para el caudal máximo de diseño (12,24 m³/s), la capacidad de bombeo resulta insuficiente. En tal caso se requeriría contar con una bomba de apoyo con una capacidad entre 380 L/h y 400 L/h

En consecuencia y teniendo en cuenta que en el mercado se encuentran diferentes ofertas de productores de bombas especiales para manejar este tipo de químicos, se encontró una unidad de rotor helicoidal tipo tornillo, con flujo nominal de 1 m³/h, esta capacidad de bombeo resulta suficiente para suplir el caudal faltante condiciones máximas de diseño o para remplazar tres de las unidades existentes en caso de daño, por eso se ofrece como sugerencia a las directivas de la PTAR-C.

Las características de esta unidad son:

- Tipo de Bomba: Bomba de tornillo de rotor Helicoidal
- Marca: Seepex
- Presión de descarga: 10 bar
- Bombeo mínimo: 0,25 m³ /h a 4 rpm
- Bombeo promedio: 1,0 m³ /h a 200 rpm
- Bombeo máximo: 1,5 m³/h a 270rpm

Esta bomba está dotada de variador de velocidad para regular el flujo de acuerdo a la demanda de coagulante. Igualmente, deberán incluirse otros accesorios tales como: Columna de calibración, válvula de alivio, válvula de contrapresión y amortiguador de pulsaciones



Figura 49. Modelo estándar de bombas de la serie **N**.

SISTEMA DE AGITACIÓN

El sistema de agitación de la PTAR-C se encuentra conformado por dos subsistemas los cuales contienen cada uno un motor, una caja reductora de relación 3 a 1, y un sistema de paletas encargadas de agitar el agua residual afluyente a la planta. Como se puede observar en las Figuras 21 y 22, estos sistemas no cumplen con los requerimientos actuales de la PTAR-C, ya que se realizó de manera provisional hace ya varios años y mucho menos en un futuro donde se debe incrementar el caudal tratado a más de 12 m³/s.

Sus deficiencias son identificables a simple vista; por ejemplo, el sistema presenta vibraciones muy fuertes cuando se incrementa un poco la potencia de los motores. Es evidente la falta de un sistema que arroje mejores resultados. La situación encontrada por la presente investigación, con relación al sistema de agitación indica que la velocidad con la que se agita la mezcla no responde a las condiciones adecuadas para permitir que los químicos se mezclen con el agua residual de manera adecuada y así se obtengan resultados más eficientes.

Para garantizar una mezcla homogénea bajo los requerimientos establecidos por la PTAR-C se propone el siguiente sistema, teniendo en cuenta que no es el único que se encuentra en el mercado.

Características:

- Tipo de agitador: Mecánico
- Marca: Novatec
- Modelo: NRE-3040, serie 3000
- Montaje de agitador: Vertical – Central
- Intensidad de agitación: 3
- Caudal generado: 2298 m³/h
- Elemento motriz: motor reductor SEW, 103 rpm, Equipado con motor eléctrico trifásico de 1,5 Hp 1750 rpm, 220/440 V, 60 Hz
- Diámetro de eje: 4 pulgadas
- Tipo de propela: Recto triplano, Diámetro 1000 mm. Desmontable con abrazadera, desplazable a lo largo del eje.
- Material de todas las partes húmedas en acero inoxidable tipo 304 con recubrimiento en fibra de vidrio.

SISTEMA DE MEDICIÓN DEL AFLUENTE

Hasta hace poco, los turbidímetros eran casi el único tipo de sensor usado más o menos regularmente en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, en los últimos años han aparecido sensores en forma de sondas sumergibles, las cuales están siendo muy utilizadas por sus grandes ventajas en lo que tiene que ver con la vigilancia integrada de la calidad del agua.

Estos instrumentos no utilizan productos químicos, operan sin membrana, bombas, filtros o limpiaparabrisas, únicamente requieren energía de baja potencia. No demandan toma de muestras y pueden ser instalados directamente en el proceso. No tienen partes móviles y están programados para ejecutarse sin tener que abandonar el agua, con casi cero costos de operación.

Estas sondas también hacen parte de un sistema digital integrado en línea, por lo tanto, están siendo preferidos para el control y operación de depuradoras de aguas residuales. Una de sus ventajas sobre los analizadores de gabinete son los tiempos y costos operativos. En general una sonda sumergible es un instrumento que permite a la medición simultánea de nitrato, nitrito, COD, DBO, SAC, DIN, la turbidez, sólidos totales (SST) entre otros, mediante la realización de tareas altamente sistematizadas.

El instrumento proporciona casi todos los parámetros en línea necesarios para el seguimiento y el control del sistema de aguas residuales. La sonda en sí, posee un panel que permite mirar el menú y proporciona una comunicación amistosa con el usuario.

Debido a la información multidimensional proporcionada, la espectrometría, que es la base del funcionamiento de estos instrumentos, ofrece una mayor información sobre la línea de base "normal" que las señales individuales, como la turbidez o DOC. Con la utilización de la sonda sumergible, la calidad del agua se mide en tiempo real y es enviado a la estación central, donde los datos (espectros) se comparan en tiempo real, con el fin de detectar cualquier cambio o desviación entre el punto de muestreo con la resolución más alta posible.

Ventajas de la Sonda Sumergible.

- Respuesta rápida a los cambios de calidad sospechoso
- Medición en tiempo real
- Alta sensibilidad, al mismo tiempo que baja la probabilidad de falsa alarma
- Solidez y estabilidad a largo plazo de los sensores y estaciones en condiciones de difícil acceso y a distancia.
- Bajos costos de operatividad y mantenimiento.
- Alta seguridad en el intercambio de datos



Figura50. Operación experimental de la sonda sumergible.

Este equipo aporta en un alto grado al nivel de automatización de la planta ya que por medio de este, se obtienen datos en línea y en tiempo real sobre la características presentes en el agua (SST, DBO, nitrito fosforo, etc), lo que permite que el sistema SCADA de la planta tome decisiones y se generen acciones correctivas sobre el proceso si así lo requiere, cambiando las dosis de químico y los gradientes de velocidad según el caudal tratado y la características del agua residual.

La sonda sumergible recomendada por este proyecto tiene las siguientes características:

Equipo: Sonda sumergible
Marca: S::can
G..serie
Rango de Temperatura: -10 – 50 °C
Voltaje: 85 – 230 VAC
Frecuencia: 47 – 63 Hz
Comunicación: DH 485, MODBUS

Se propone que los datos obtenidos por la sonda, sean transmitidos por medio de una red DH 485 hacia el sistema SCADA, ya que es uno de los medios de comunicación de la sonda y está físicamente implementada en la planta.

SISTEMA DE DISOLUCIÓN

Otro resultado del trabajo de campo, fue haber identificado la necesidad de cambiar las bombas centrífugas utilizadas para diluir con agua el cloruro férrico llegado a la planta con una concentración de 42%, dadas las condiciones en las que se encuentra el sistema actual. Esta disolución que se adiciona al agua residual debe llegar rebajada entre el 5% al 10%.

Para el bombeo de agua de dilución desde el tanque de almacenamiento, se propone la instalación de dos bombas centrífugas, una para operación continua y otra de respaldo, cuyas características se describen a continuación.

- Tipo de bomba: Centrífuga
- Marca sugerida, pero no la única del mercado: Liquiflo
- Modelo sugerido : 621
- Máximo flujo: 85 gpm
- Tamaño(pulgadas): Diámetro succión: Diámetro impulsión: Diámetro Impeler; 1^{1/4} x 1 x 5



Figura 51. Bomba centrífuga para agua de dilución.

Comunicación.

La Bomba de tornillo de rotor helicoidal para la dosificación de Cl_3Fe , los motores del sistema de agitación y la bomba Centrífuga para el sistema de dilución, son los equipos actuadores que ajustan el proceso de acuerdo a las órdenes recibidas desde un sistema de control. Este sistema maneja únicamente señales eléctricas.

El control de sobre la dosificación de químicos y sobre los agitadores se lo realiza variando la velocidad de los motores que contiene cada actuador. Estos actuadores disponen de un elemento de interfase (o preactuador) que reacciona a esas señales eléctricas activando el actuador. Entre los más habituales se encuentran: electroválvulas que son preactuadores de los cilindros y actuadores de giro neumáticos e hidráulicos, relés y contactores, que sirven para conectar y desconectar actuadores eléctricos como resistencias calefactores o motores, arrancadores estáticos que sirven para conectar o desconectar motores eléctricos limitando las corrientes de arranque, entre otros [35].

El sistema de control es el encargado de enviar los datos de control hacia el nivel de maquina donde se encuentran los actuadores y preactuadores. Estos últimos reciben señales analógicas que comúnmente son enviadas por PLCs y PAC y normalmente toman los siguientes valores:

Salida analógica en corriente: el rango suele ser de 4-20 mA, 0-20 mA.

Salida analógica en tensión: el rango suele ser de 0-5V, 0-10V, 1-5V.

Y señales digitales que toma normalmente los siguientes valores:

Salida de voltajes: 0 ó 110V ac, 0 ó 240V ac, 0 ó 5V dc, 0 ó 12V dc, 0 ó 24V dc.

De esta manera los actuadores y preactuadores toman propiedades para comunicarse con el controlador y con la red, según sea el nivel de integración al sistema y la procedencia de la señal de control o señal de salida.

Solución a nivel 1: Controladores

Lógica programada.

Como se describió anteriormente la lógica programada se trata de una tecnología desarrollada a partir de la aparición del microprocesador y de los sistemas programables basados en este: Computadores, controladores lógicos y autómatas programables, etc [36]. La lógica programada permite:

Gran flexibilidad
Posibilidades de cálculo.
Implementación de algoritmos para el control de procesos.
Comunicaciones y control.

Autómatas Programables.

Este es un dispositivo diseñado expresamente para el control de procesos industriales. Es un equipo electrónico que permite controlar en tiempo real y en ambiente industrial procesos secuenciales y siguiendo un programa lógico interno actuando sobre los accionadores de la instalación.

Selección de equipos

El equipo que se propone para controlar los procesos de dosificación y agitación en la PTAR-C, es un PLC Micro Logix 1500 de Allen Bradley cuyas características se describen en el cuadro 13.

Cuadro 13. Características de PLC Micrologix 1500

Controladores	Módulos de expansión	Tipo	Descripción
PLC MicroLogix 1500	1769-IF4	Entradas analógicas	Contiene 4 canales de entradas para señales analógicas
	1769-OF2	Salidas analógicas	Contiene 2 canales de salida para señales analógicas

Fuente: [35]

Este equipo se propone ya que las características de este permiten conectar los instrumentos descritos anteriormente para el nivel 0: maquina / subproceso y comunicarlos e integrarlos con el nivel 2: supervisión. Además el PLC Micro Logix 1500 de allen Bradley permite funcionalidad de mensajes sobre DH-485 que es la red de comunicaciones propuesta en este proyecto.

Módulos de interfaz DH485

La interfaz 1761 NET-AIC:

Para conectar un procesador Micrologix 1500 LRP a la red DH-485 se requiere de módulo de interfaz. Una alternativa es el módulo 1761 NET AIC que se muestra en la figura 52.

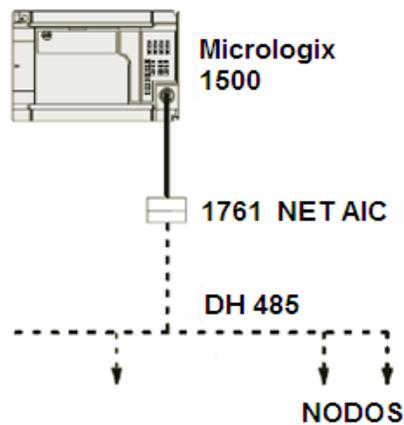


Figura 52. Módulo de interfaz 1761 NET-AIC

Este módulo implementa las funciones de nivel físico y nivel de enlace DH-485 y permite la conexión de máximo dos estaciones hacia DH-485, con direcciones independientes (dos PLCs, un PLC y un PC, dos PCs, dos HMIs, etc.). Adicionalmente, puede ser empleado como repetidor para incrementar la longitud de extensión en DH-485 hasta 2438 mt [37].

La interfaz 1770KF3:

Para conectar un PC de manera serial hacia la red DH-485 se requiere de un módulo de interfaz. Una alternativa es el módulo 1770-KF3 como el de la figura 53.

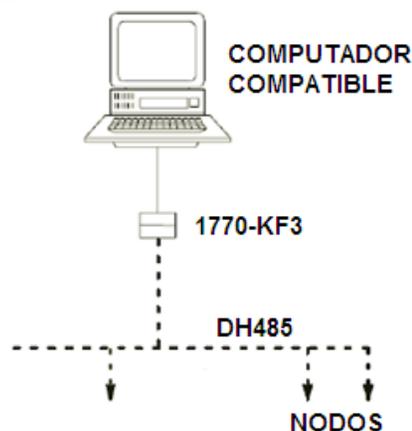


Figura 53. Interfaz 1770KF3

La función del módulo es actuar como enlace entre el protocolo DF1 y el protocolo DH-485. El protocolo DF1 define aspectos de comunicación entre el PC y el KF3, esta comunicación puede ser Maestro-Esclavo a través de un enlace *half dúplex* o *Peer to Peer* a través de un enlace *full dúplex* [37].

Redes de comunicación.

El gran avance que tienen los sistemas de comunicación en red abre grandes posibilidades para que nuevas áreas puedan ser exploradas en el mundo de la automatización industrial. Estas redes se emplean para interconectar equipos avanzados de control (como PCs y PLCs) entre sí de forma que puedan intercambiar información de alto nivel [33].

La red de comunicaciones recomendada para comunicar los instrumentos e integrar los tres niveles inferiores de la pirámide de automatización; maquina/Subproceso, Controladores y Supervisión, es la red DH 485.

Fundamentos de la Red DH485

Definición: La red DH-485 es una red propietaria (Allen Bradley) de bajo costo diseñada para satisfacer determinados requisitos característicos de un ambiente industrial como: Funcionamiento en ambientes hostiles, seguridad en el intercambio de datos, determinismo, fiabilidad y disponibilidad.

DH-485 es una red de nivel de control que suple las necesidades de intercambio de datos entre productos de Allen Bradley del tipo: Aplicaciones de configuración, supervisión y/o programación,

Esta red permite funcionalidad de mensajes con el controlador recomendado Micro Logix 1500 y también se pueden ser conectados todos los instrumentos recomendados y descritos anteriormente. Además la red DH 485 físicamente ya ha sido implementada en la PTAR-C para conducir los datos de otros procesos llevados a cabo en la planta hasta el centro de control y supervisión; como es el caso de las bandas transportadoras que funcionan a lo largo de la línea de tratamiento del lodo hasta obtener el biosólido, los filtros prensa en el área de deshidratación, sensores de caudal ubicados a lo largo de la línea de tratamiento de agua y de nivel ubicados en los digestores, espesadores, sedimentadores, etc.

Solución a nivel 2: supervisión.

El Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de datos de la PTAR – C (Sistema SCADA) realiza todas las funciones de control automático necesarias para el correcto funcionamiento de la planta, entre otros: Arranque automático de equipos en stand by, parada automática, alarmas, sirve de interfase entre la supervisión y el proceso, registra el tiempo de funcionamiento de los equipos para efectos de mantenimiento, pone en escala real registros análogos (por ejemplo señales de caudal), permite obtener hojas de reporte para la elaboración de informes con diferentes propósitos (de resultados periódicamente, para entidades de control, seguimiento de proceso, etc) .El sistema SCADA considera paneles de control local para cada uno de los equipos y para cada una de las áreas, paneles de control de área (Recolección, Tratamiento de agua residual, TPA, Digestión de lodo, deshidratación de lodo, Generación y distribución de energía) [38].

En el centro de control se realiza la supervisión, procesamiento de información y operación de todas las unidades de tratamiento. Adicionalmente se han instalado terminales de computador en varios sitios del edificio de Administración tales como el laboratorio y edificio de trabajadores.

Como un aporte de este proyecto se propone que el Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de datos existente en la PTAR – C (Sistema SCADA) realice todas las funciones de control necesarias para el correcto funcionamiento de los sistemas de dosificación y agitación de la planta.

Las hojas de reportes generados por sistema de SCADA de la planta, servirán para realizar informes con el propósito de comunicar los niveles superiores del esquema de automatización (ERP) con los niveles inferiores, de esta manera se logra integrar los sistemas de dosificación y agitación con los diferentes niveles de automatización de la empresa caso de estudio PTAR-C.

Un posible esquema de conexión que permitiría comunicar los instrumentos descritos en este capítulo y automatizar los sistemas de dosificación y agitación en la PTAR-C, se muestra en la figura 54.

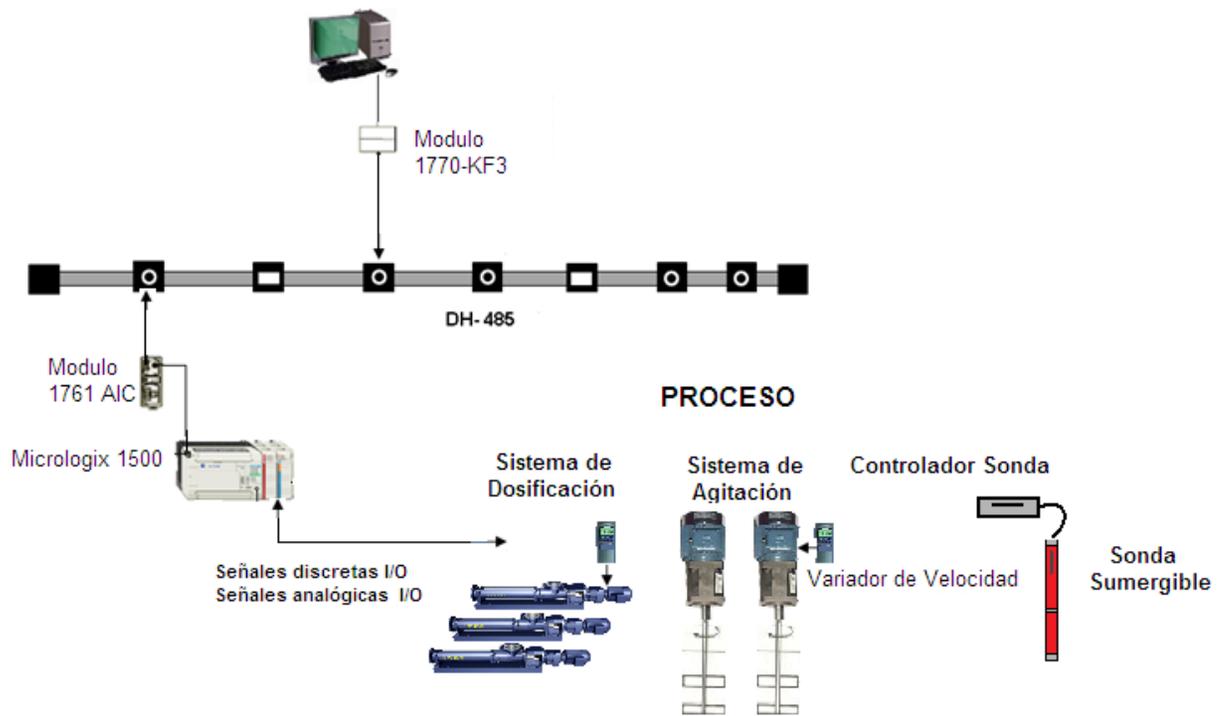


Figura 54. Esquema de comunicaciones entre los niveles de la planta

CONCLUSIONES

Con base a la investigación bibliográfica y documental junto con las actividades de campo que hicieron parte de esta investigación, se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

Aunque hasta el momento de iniciar esta investigación se habían realizado muchos estudios y pruebas en la PTAR-C, no se tenía una visión clara respecto al procedimiento a seguir para dosificar de manera adecuada el cloruro férrico teniendo en cuenta las características del agua residual en un momento dado, en dicho sentido esta investigación hizo evidente la necesidad de ajustar los procedimientos actuales teniendo en cuenta los resultados arrojados por este proyecto.

De manera pormenorizada y en cuanto a las principales características de la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR-C de Santiago de Cali, se puede afirmar que responden a un macro proyecto que debe estar completamente operativo en el año 2015, donde se estima que estarían siendo procesados $12.4\text{m}^3/\text{s}$, prácticamente el doble de la cantidad actual, de aguas residuales de origen residencial, comercial e industrial, no solo del área urbana sino de otras poblaciones como Yumbo, Palmira y áreas circunvecinas. Esto significa que esta planta debe ampliar su cobertura de manera progresiva y para ello requiere optimizar sus sistemas, entre ellos los de dosificación y agitación. Sin embargo, mediante el trabajo de campo quedó demostrado que pese a los criterios estándar según los cuales estos sistemas deben operar con relación al caudal del afluente y a sus variaciones a lo largo del día, se utiliza una dosificación igual de cloruro férrico durante todo el proceso, con las consiguientes repercusiones de sobre costo e inadecuado tratamiento del afluente en los momentos que presenta menor turbiedad y no se hace necesaria tal dosificación.

Ante esta situación, las actividades de campo se orientaron hacia la determinación a lo largo del año 2009 y de acuerdo a las distintas características físico-químicas que presenta en cada momento el agua residual, por medio de la aplicación de la Prueba de Jarras, establecer las combinaciones óptimas de cloruro férrico y polímero, tiempos de mezcla y gradientes. Siendo de anotar que en todo momento se contó con la colaboración del personal técnico de la PTAR-C, lo cual permitió que ellos mismos corroboraran cada uno de los resultados obtenidos.

Finalmente, el trabajo realizado demostró la importancia de las investigaciones con trabajo de campo para mejorar y optimizar los procedimientos tradicionalmente aplicados en plantas de tratamiento de aguas residuales, puesto que muchas veces aunque los cambios y ajustes son más que evidentes, los técnicos y las directivas, mientras los sistemas sigan operando de manera aceptable, tienden a relegar la toma de decisiones y poner en riesgo toda la operación en el mediano y largo plazo.

RECOMENDACIONES

A LAS DIRECTIVAS Y PERSONAL TÉCNICO DE LA PTAR-C:

Poner en ejecución las sugerencias surgidas de la presente investigación, en la dosificación del cloruro férrico y gradientes de velocidad. Del mismo modo, proceder a efectuar los cambios de los equipos que ya dan señales de obsolescencia funcional y operativa, tal como se recomienda en esta investigación.

A LOS COMPAÑEROS DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA:

Aprovechar los resultados de la presente investigación, como un insumo para evaluar y profundizar en el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales, teniendo en cuenta que en el país hacen falta instalar más de 900 de ellas, para responder a los compromisos de conservación y protección medioambiental tanto nacionales, como internacionales, pues constituyen la opción más inmediata para devolverle a la tierra la oportunidad de auto-regenerarse y curar las heridas causadas por la incesante actividad antrópica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.Glynn,W.Gary. "Ingeniería ambiental". Prentice hall, México. Segunda edición Universidad Nacional Autonoma de Mexico.1999.
- [2] B. Jimenez, La contaminación ambiental en México: Causas, efectos y tecnologías apropiadas, colegio de ingenieros ambientales en México. A.C, México, Limusa, 2001
- [3] Sólidos en suspensión totales. [Referencia de mayo de 2010]. Disponible en http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Interpretacion_Analisis_de_Aguas.htm
- [4] J. Villaseñor, Eliminación biológica de fosforo en aguas residuales urbanas, Universidad de Castilla – La Mancha, 2009.
- [5] Gestión de BIOSOLIDO en Colombia. [Referencia de julio de 2009]. Disponible en <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/fulltext/biosolidos>.
- [6] C. Muñoz. "El Cauca se ahoga en basura". Informe especial. El País de Cali. Septiembre 23 de 2008. [Referencia de febrero 19 de 2010]. Disponible en: www.elpais.com.co.
- [7] Tratamiento de aguas residuales. [Referencia de abril 4 de 2009]. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/tratamiento_de_aguas_residuales
- [8] Tratamiento de aguas residuales. [Referencia de abril 9 de 2009]. Disponible en: <http://www.ecojoven.com/tres/05/aguas>

- [9] Tratamiento de aguas residenciales en zonas urbanas. [Referencia de abril 9 de 2009]. Disponible en: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebook/sequia/p-cap13>.
- [10] Tratamiento de aguas residuales en Colombia. [Referencia del 20 de abril de 2009]. Disponible en: www.agualatinoamerica.com/docs.pdf.
- [11] Plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR. [Referencia de abril 10 de 2009]. Disponible en: www.geocities.com.ptarcolombia.
- [12] J. Walter. W. IR. "Control de la calidad de aguas residuales.: procesos físico-químicos". Jr. Editor Reverte. 2003.
- [13] E. Llanos. "Tratamiento y uso de aguas residuales: Una estrategia para el futuro del saneamiento". Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo PTAR-C. Empresas Municipales de Cali EMCALI E.I.C.E. E.S.P. Memoria presentada en el 43 Congreso Nacional de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambienta ACODAL – Seccional occidente. Santiago de Cali. 2003.
- [14] Metcalf y Eddy. Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, recuperación y reutilización de ARD y ARI. 3ª edición. México. McGraw Hill. 1995.
- [15] Romero J. Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización. Ed. Alfaomega, México, 3ª Ed. 1999.
- [16] Tsukamoto, Ricardo Y. Tratamiento Primario Avanzado: el paradigma moderno de tratamiento de aguas residuales sanitarias. 2002. [Referencia de abril 20 de 2009]. Disponible en :info@agualatinoamerica.com.

- [17] Crites, R. y Tchobanoglous, G. [Referencia de abril 20 de 2009]. 2001. Disponible en: www.lamolina.edu.pe/ecolapl/Articulo_20_vol_7_Ecologia_aplicada.pdf
- [18] Idelovitch, Emmanuel y Ringskog, Klas. Tratamiento de aguas residuales en América Latina. Viejas y nuevas opciones. Estudio patrocinado por el Banco Mundial. [Referencia de febrero 21 de 2009]. 1997. disponible en: www.worldbank.org/depweb/spanish/modules/environm
- [19] Shao Y.J., Liu A., Wada F., Crosse J. y Jenkins D. TPA: una alternativa al tratamiento biológico secundario. Ciudad de los Ángeles. Hyperion Experiencias en una planta de tratamiento. Tecnología en Ciencias del Agua, 1996, Vol 34, No. 3-4, pp 223-233.
- [20] Harleman, D.R.F, Murcott, S.E. An innovative approach to urban wastewater treatment in the developing World. Water 21. Junio 2001.
- [21] Arboleda V. J. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – ACODAL. Medellín. 2000.
- [22] Hernández, A. Depuración de Aguas Residuales. 3ª edición. Madrid. Paraninfo. 1994.
- [23] WEF-ASCE. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. 4a edición, vol. 2. Water Environment Federation (WEF) – American Society of Civil Engineers (ASCE). Alexandria-Reston (Virginia, EUA). 1998.
- [24] Chetty S. El método de estudio de caso aplicado a la investigación científica. International business journal, vol. 5, octubre – diciembre. Los Ángeles. Newbury Park, CA, Sage.1996.

- [25] N. Nemerow, Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos, Díaz de Santos, S.A. Madrid, España.1998.
- [26] M. Seoáñez-Calvo, Tratado de gestión de medio ambiente urbano, Mundi-prensa, S.A, Madrid, España. 2001.
- [27] J. Bernard, R. Nebel. Ciencias ambientales: ecología y desarrollo sostenible, Vol. 6, McGraw Hill. México. 1999.
- [28] D. García-Cortés "Contribución al estudio de la hidrodinámica y la transferencia de masa en reactores tipo tanque agitado mediante un enfoque global y local en sistemas gas-líquido".Ph. D. Thesis. INP-ENSIACET, Toulouse, France. 2003.
- [29] J.Báes-Noguera, ingeniería ambiental: sistemas de recolección y avluación de aguas. Ediciones uninorte. Medellin, Colombia. 2002.
- [30] Calderon, J. Zambrano, N. Respuesta para información acerca agitadores industriales para coagulación y floculación, gradientes de mezcla. Para: John Ramirez. 8 de mayo de 2010. Comunicación personal.
- [31] M. Alvares-Pulido, Convertidores de frecuencia, controladores de motores y SSR, Boxadereu editores. Barcelona, España. 2000.
- [32] R. Behar-Gutierrez, 55 respuestas a dudas típicas de estadística, Días de Santos, S.A. Madrid, España. 2005
- [33] Garcia,A, "El control automático en la industria" . Universidad de Castilla – La Mancha. Madrid, España. 2005.

- [34] Medina.J, Guadayol.J, “La automatización”. Universidad politécnica de Catalunya. SI. Barcelona, España. 2010.
- [35] Muñoz.D, Arana.J.”Criterios de automatización en control distribuido aplicado a procesos industriales: Caso de estudio la planta de tanques interactuantes”. Universidad del Cauca. Departamento de Ingeniería en Automática Industrial. 2010.
- [36] Garcia.E, “Automatizacion de procesos industriales; robotica y automática”. Universidad politécnica de Valencia. Valencia, España. 1999.
- [37] “Redes Industriales. DH 485. Guía de laboratorio”. [Referencia de Abril 3 de 2010]. Disponible en: http://lcp-bmy.blogspot.com/2009_07_01_archive.html.
- [38] Florez, M. Respuesta para información acerca sistema ESCADA de la PTAR-C. Para: John Ramirez. 13 de mayo de 2010. Comunicación personal.

ANEXOS

ANEXO A. Tratamiento de subproductos del TPA.

Tsukamoto [16] aclara que de necesitarse una mayor remoción de DBO antes de desecharlo, se puede usar cualquier tipo de tratamiento secundario para pulir el efluente de TPA. El desecho líquido en el medio ambiente es por lo general precedido por una desinfección final mediante la aplicación de cloro o rayos ultravioleta. El efluente del TPA generalmente presenta menos de la mitad de la concentración de SST de un sistema de tratamiento primario convencional, reduciendo las necesidades de tratamiento secundario en forma proporcional a su efectividad [13]).

La considerable remoción de fósforo, alcanzada con el proceso TPA, minimiza la eutrofización del ambiente y la propagación de algas tóxicas, especialmente en cuerpos de agua donde se capta agua para consumo humano, propiciando un beneficio ambiental inexistente en el tratamiento secundario [16].

Los lodos químicos resultan de la adición de sales de hierro o aluminio y cal para mejorar la remoción de SST o para precipitar fósforo. La química del agua residual, el pH, la mezcla, el tiempo de reacción y las condiciones de la floculación afectan las características de los lodos químicos. Generalmente, la adición de cal mejora el desempeño del espesamiento y deshidratación. Para lodos específicos, las sales de hierro y aluminio pueden mejorar la remoción de agua. El contenido de metales pesados es usualmente más alto en los sólidos químicos por la precipitación adicional de metales pesados con el hierro y el aluminio y la adición de metales pesados contenidos en el coagulante [23].

Los sólidos suspendidos y la materia coloidal presentes en las aguas residuales son eliminados en forma de lodo. Los lodos químicos contienen más sólidos que los obtenidos por sedimentación convencional, debido a la precipitación de los hidróxidos metálicos y a la mayor eficiencia del proceso. El volumen del lodo puede, no obstante, ser del mismo orden o menor, debido a la inclusión de menos agua en la masa del lodo. El contenido de humedad puede llegar hasta un 90 %.

La adición de químicos para el tratamiento del agua residual puede cambiar las características de los sólidos, Frecuentemente, una característica resultante es el aumento en la fracción inerte de los sólidos. Además, la cantidad de sólido para ser procesada y dispuesta es aumentada [23], en consecuencia, el TPA produce más lodo que el tratamiento primario convencional, aumentando la necesidad de un manejo eficaz del lodo.

La adición de FeCl_3 en el TPA incrementará la masa de lodo generado por el tratamiento primario. Este aumento resulta de la remoción mejorada de SST, la

formación y remoción de sólidos químicos tales como el fosfato férrico, hidróxido férrico y sulfuro férrico y ferroso, y remoción de sólidos disueltos y/o coloidales. La producción de lodo del TPA es una consideración de diseño clave a causa de sus impactos sobre el espesamiento, deshidratación y disposición [19].

En algunos casos, la adición de cal para remover metales pesados puede generar un lodo químico difícil de deshidratar y disponer apropiadamente [23]. Los lodos provenientes de la coagulación con hierro son muy corrosivos, tienen un color café oscuro y suelen manchar o teñir los objetos y las corrientes de agua. Por eso son difíciles de manejar [21].

Al remover grandes cantidades de microorganismos patógenos del agua, éstos quedan concentrados en los lodos residuales, los cuales deben ser estabilizados adecuadamente antes de ser dispuestos al ambiente. Existen en la literatura pocos reportes de la calidad microbiológica de lodos generados en el TPA así como de la estabilización de los mismos, especialmente en el caso de lodos con alto contenido de patógenos.

El lodo estabilizado se conoce como biosólido, y es de interés como recurso para un reuso agrícola por su contenido en nutrientes minerales, dicho uso ya es adoptado en los Estados Unidos, Europa, Japón, y Brasil [16].

Sin embargo, antes de ser dispuestos, los lodos deben ser estabilizados para eliminar los microorganismos patógenos y parásitos, que constituyen un problema de salud pública, y disminuir la atracción de vectores y la capacidad de putrefacción, con el fin de reducir los riesgos de contaminación, y por otro lado, producir un lodo con características físicas, químicas y biológicas adecuadas para su posible aprovechamiento en la agricultura, o bien para minimizar el impacto que podría significar su disposición sin el debido control.

La digestión anaerobia es un método de tratamiento de aguas residuales y de estabilización de lodos que reduce el impacto al ambiente, al prescindir de la adición de reactivos químicos al proceso, requerir muy poca energía externa y por ser compatible con los criterios de sustentabilidad.

La digestión anaerobia convierte biológicamente la materia orgánica contenida en los lodos bajo condiciones de ausencia de oxígeno, en material celular, metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y otros gases traza. Con esto se reduce el poder contaminante del lodo de desecho, obteniendo un lodo estabilizado, libre de su capacidad de putrefacción, malos olores y en buena medida de microorganismos patógenos y parásitos, que permitan que su disposición en el medio no afecte a la flora, fauna y la salud pública. De esta manera, los biosólidos podrán utilizarse como mejoradores de suelos sin riesgo para el ambiente y la salud pública de acuerdo con los parámetros recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por su sigla en inglés) en materia de manejo de los lodos.

Los resultados obtenidos muestran que la digestión anaerobia termofílica de lodos fisicoquímicos es factible de considerarse como una adecuada opción tecnológica para la producción de biosólidos clase A de la US EPA y por lo tanto susceptibles de ser utilizados con fines agrícolas sin restricciones.

De los procesos de estabilización convencionales, la estabilización alcalina ha mostrado altas eficiencias de remoción de huevos de helmintos, comparada con otros procesos como la digestión anaerobia.

Con base en la eficiencia de la estabilización alcalina para inactivar coliformes fecales, salmonella y huevos de helmintos y tomando en cuenta las altas concentraciones de los mismos en los lodos residuales, su inactivación en lodos generados en procesos de TPA, mediante pruebas de post estabilización alcalina. Asimismo, determinaron las dosis de cal viva necesarias para cumplir con los criterios microbiológicos de biosólidos clase B de la US EPA a partir de lodos generados en un TPA, Las dosis requeridas para lograr la estabilización variaron de acuerdo al contenido de agua presente en el lodo. En general, para lodos con mayor contenido de sólidos la dosis de cal es menor que para lodos con bajo contenido de humedad.

La importancia de regular la concentración de metales en los biosólidos radica en la posibilidad de incrementar la disponibilidad de algunos de ellos que pueden causar problemas de fitotoxicidad o acumulación en los cultivos, sin embargo, el riesgo de lixiviación de metales a los acuíferos es poco probable siempre y cuando los biosólidos no contengan altas concentraciones de ellos. A pesar de esto, los registros de numerosos sitios con aplicaciones agrícolas de biosólidos demuestran que la asimilación de los metales por las plantas es mínimo (NRC, 1996, citado por JIMÉNEZ et al., 2001). Además, el incremento en la concentración de metales en el suelo no será significativo sino hasta después de diversas aplicaciones de biosólidos [19].

La fase más costosa de la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales es el tratamiento y la disposición del lodo. Mientras el efluente deja la planta relativamente limpia, los residuos del agua residual deben manejarse cuidadosamente para prevenir la reintroducción de estos contaminantes en el ambiente y para minimizar los riesgos a la salud de la comunidad local. Sin el tratamiento y la disposición apropiada, el lodo puede ser más dañino que el residuo crudo y el propósito de la planta de tratamiento no tendrán el efecto deseado de mejorar la salud humana y ambiental en la región. Para que las plantas de TPA sean financieramente factibles el lodo debe tratarse y disponerse de manera que tenga un costo real y consistente con las metas ambientales de la región.

ANEXO B. Ventajas y limitaciones del TPA.

La principal ventaja de usar TPA en lugar de tratamiento primario convencional es que los tanques de sedimentación requeridos por el primero son aproximadamente la mitad en tamaño de aquellos requeridos por el segundo. Ya que las tasas de flujo superficial para TPA pueden doblar aquellas usadas por el tratamiento primario convencional, para el mismo flujo volumétrico de agua residual, el área superficial requerida por el TPA será aproximadamente la mitad que la del tratamiento primario convencional, esto se traduce en economías de costo de capital significativas.

La rápida velocidad de sedimentación alcanzada por el TPA permite incrementar la carga hidráulica recomendada para el diseño de los sedimentadores primarios convencionales en aproximadamente un 15% [13]. Las altas cargas superficiales que soportan los sedimentadores primarios cuando se utiliza TPA, han permitido construir plantas más compactas, con menor inversión en infraestructura y menores necesidades de terreno [13].

A pesar de su uso en nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales, Tsukamoto [16] afirma que la versatilidad del proceso permite duplicar la capacidad y la eficiencia de las plantas preexistentes, prácticamente sin la necesidad de obras civiles.

Una planta de TPA también puede extenderse fácilmente para procesar volúmenes de flujo más grandes, si es necesario, aumentando la dosificación de químicos y agregando tanques adicionales, puesto que ellos tienden a ser pequeños y fáciles de acomodar. Tal mejoramiento en una planta de TPA tiene los mínimos impactos negativos en el desempeño del sistema, como se demostró en el proyecto de la Rivera de Sao Laureano.

Muchos tratamientos convencionales de aguas residuales liberan a la atmósfera olores indeseables, aerosoles que contienen organismos patogénicos y pueden ocupar grandes áreas, por eso, las estaciones de tratamiento convencionales son generalmente construidas lejos de lugares habitados. El transporte de aguas residuales hasta esas estaciones requiere infraestructura y equipos específicos, resultando en un costo adicional para la implementación, mantenimiento y operación de ese transporte. Según Tsukamoto [16] la infraestructura necesaria para alejar el tratamiento de una comunidad urbana puede tener un costo de implementación igual o mayor al de la propia estación de tratamiento.

En contraste con los tratamientos convencionales, el TPA permite controlar la producción de H₂S en los digestores y en todas las etapas de manejo de lodos [8], no genera aerosoles, ocupa un área muy pequeña y trata rápidamente las aguas residuales. Por eso; el tratamiento puede ser efectuado dentro de la ciudad. Simplemente por eliminar el transporte a largas distancias, puede propiciar un ahorro considerable, sin tomar en cuenta los ahorros adicionales del tratamiento en sí [16].

El proceso TPA es sencillo, eficaz y rápido, proporcionando bajos costos de capital y de operación, con menores costos de inversión en obras de infraestructura y menor consumo de energía en los sistemas de aplicación de aire u oxígeno [13]. El TPA influye sobre todos los procesos que siguen al tratamiento primario, reduciendo costos de capital y operación.

El TPA mejora la eficiencia de la sedimentación primaria incrementando la remoción de SST desde 50% hasta aproximadamente un 85% y la remoción de DBO desde 25% hasta aproximadamente un 55%; el nivel de remoción obtenido depende de la dosis de productos químicos utilizada y del tipo de agua residual [8]. Las dosis de químicos pueden ser alteradas convenientemente para igualar los cambios en carga y composición, permitiendo mayor confiabilidad y flexibilidad. La remoción de metales en el TPA es dos veces superior a la del tratamiento secundario convencional [13].

La mayor reducción en el contenido de sólidos suspendidos del efluente del TPA, con relación a la sedimentación primaria convencional, permite que se presenten reducciones en el contenido de metales, tóxicos orgánicos y organismos patógenos asociados con los sólidos suspendidos contenidos en el agua residual, condición que ha permitido a diferentes plantas de tratamiento en Estados Unidos lograr exoneración para realizar tratamiento secundario completo cuando la descarga se realiza al océano [13].

En un estudio se encontró que el tratamiento de coagulación - floculación de las aguas residuales de la Ciudad de México [16] puede proporcionar la remoción total de huevos de helminto, pero no de coliformes fecales y totales. En ese caso, este tipo de tratamiento no puede resolver todos los problemas sanitarios y este hecho es una consideración cuando el agua es usada en irrigación, debe usarse un proceso de tratamiento complementario.

El sistema de TPA puede operarse y mantenerse más eficazmente que un sistema de lodos activados porque permite una confiabilidad y elasticidad mayor. Los sistemas de TPA permanecen funcionales y puede mantener las eficiencias de remoción óptimas en presencia de un rango amplio de composición y temperatura del flujo residual, lo que ocasiona un problema característico con las unidades de tratamiento secundario biológico, ya que se perturban debido a la formación de compuestos tóxicos.

Cuando se utilizan lodos activados para realizar tratamiento secundario, la remoción proporcionada por el TPA disminuye los requerimientos de oxígeno disuelto en un 40% a 50% [8]. La implementación del TPA permite reducir el tiempo de residencia celular, debido a la reducción en la carga orgánica aplicada y menor incidencia de nitrificación durante flujos bajos [13].

La operación del TPA permite incrementar la producción de sólidos en el tratamiento primario, reduciendo la producción de lodo secundario, el cual es más difícil de

deshidratar y digerir. Además, permite reducir la cantidad de polímeros catiónicos requerida para realizar la deshidratación del lodo [13].

La implementación del TPA permite incrementar la producción de gas en la planta y la energía generada a partir del gas proveniente de los digestores [8]. También es posible reducir el nivel de corrosión del concreto y estructuras del sistema de tratamiento debido a los menores niveles de sulfuro de hidrógeno en el flujo. La utilización de cloruro férrico en el TPA se constituye en una medida muy efectiva para proteger los sistemas de cogeneración en aquellas plantas que aprovechan el gas producido en los digestores, por la reducción de la producción de H₂S en el biogás. También ha permitido controlar posibles problemas de generación de olores en las plantas que utilizan esta tecnología [13].

El TPA puede tratar aguas residuales mezcladas con agua pluvial proveniente de sistemas combinados o unitarios, que están sujetos a cambios repentinos de flujo y de contaminantes [16]. En las plantas de tratamiento que vierten sus aguas residuales tratadas al mar, la alta remoción de material particulado y coloidal obtenida con el TPA ha permitido demostrar que su utilización es suficiente para proteger la comunidad béntica y que no se requiere realizar las cuantiosas inversiones derivadas de la implementación de un tratamiento secundario [13]. Según Tsukamoto [16], la aplicación del TPA no se ha generalizado a causa de sus limitaciones, que son las siguientes: remoción prácticamente nula de materia orgánica soluble, incompatible con condiciones de descarga medianamente estrictas en este aspecto; dependencia de reactivos químicos en cantidades significativas y, sobre todo, su alta producción de lodos con materia orgánica altamente putrescible, propia de un lodo primario. Esto último tendrá fuertes implicaciones al momento de considerar los costos de inversión y operación de la línea de lodos, incluida su disposición final. En los costos de operación, el transporte de los lodos estabilizados hacia su sitio de disposición final puede incidir fuertemente en los costos totales y, por ende en la tarifa del metro cúbico tratado.

El TPA [16] sólo transfiere los contaminantes (materia en suspensión principalmente) de la fase líquida a la fase sólida (lodos) con la ayuda de reactivos coagulantes como el sulfato de aluminio o cloruro férrico. Además, estos reactivos vendrán a aumentar la masa de los lodos. La posición anterior no descalifica la opción fisicoquímica TPA, sólo pretende ubicarla en su justo sitio: aquel donde no se requiera reducir el contenido de materia orgánica soluble, donde sea imperativo ajustar inmediatamente el proceso a condiciones en extremo variables en las características del afluente y donde haya condiciones favorables para una disposición económica del lodo producido, previamente estabilizado.

ANEXO C. Descripción del proceso de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Cali PTAR-C.

Afluente a la planta (estación de bombeo al inicio de la Planta)

El agua residual ingresa a la planta por dos sistemas:

Uno por gravedad, que lo hace a través de una tubería existente de 2.0 m de diámetro, construida en concreto reforzado; aproximadamente 100 m antes de su entrada a la planta, se construyó sobre la tubería existente una cámara de derivación, dotada de dos compuertas deslizantes de vástago ascendente, accionadas por una unidad hidráulica, las cuales son operadas mediante un panel de control local; dichas compuertas permiten el paso del agua residual a la PTAR-C ó su desvío hacia el Río Cauca utilizando la tubería existente; la longitud total es de 210 m aproximadamente. Dado que el Colector Central transporta flujos combinados (aguas lluvias y aguas residuales), existe en la cámara de derivación un vertedero que permitirá controlar el flujo máximo que ingresa a la PTAR-C ($5.87 \text{ m}^3/\text{s}$). El vertedero también desempeña la función de impedir el ingreso a la planta de flujos provenientes del río Cauca.

Y otro, mediante bombeo, a través de una tubería de 1.8 m de diámetro en poliéster reforzado con fibra de vidrio, la cual se construyó con el objeto de interceptar las aguas residuales de las estaciones de bombeo de Aguablanca y Navarro y conducir las hacia la PTAR-C; antes de su ingreso a la planta, dicha tubería intercepta el flujo de agua residual proveniente de la estación de bombeo de Cañaveralejo.

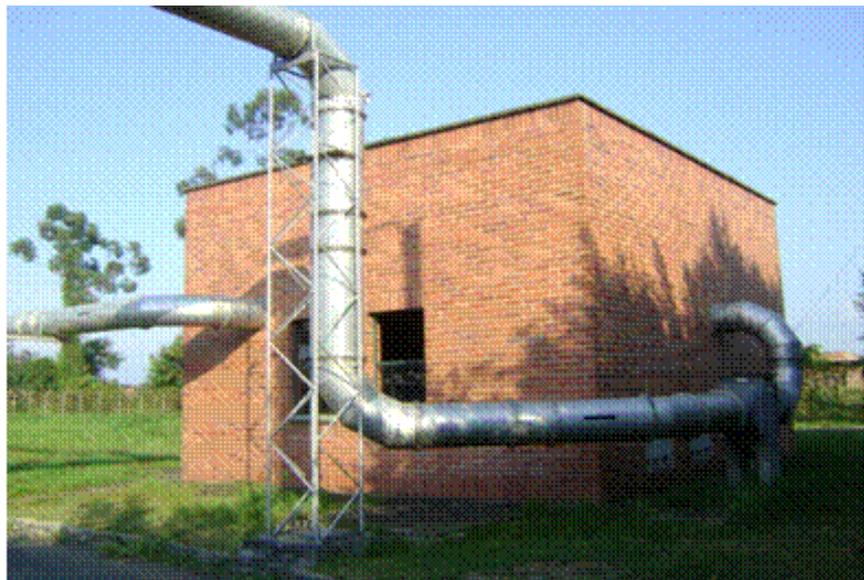


Figura 55. Estación de bombeo al inicio de la Planta

Medición de caudal afluente. Al ingreso de las aguas residuales a la planta se toman registros de caudal en dos puntos: sobre la tubería de impulsión de 2.0 metros de diámetro y en la estación de bombas de tornillo del Colector General. Adicionalmente en las estaciones de bombas se dispone de medición de flujo. Esta información se reporta en forma continua en el sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) de la planta.



Figura 56. Medidores de caudal.



Figura 57. SCADA

Tornillos. Esta estación eleva el agua residual afluyente por el Colector central mediante tres bombas de tornillo de 2.0 metros de diámetro cada una y capacidad nominal de 2 m³/seg por bomba. Se cuenta adicionalmente con una bomba de repuesto, ya que no se hace necesario emplearlo debido al caudal que llega a la planta.

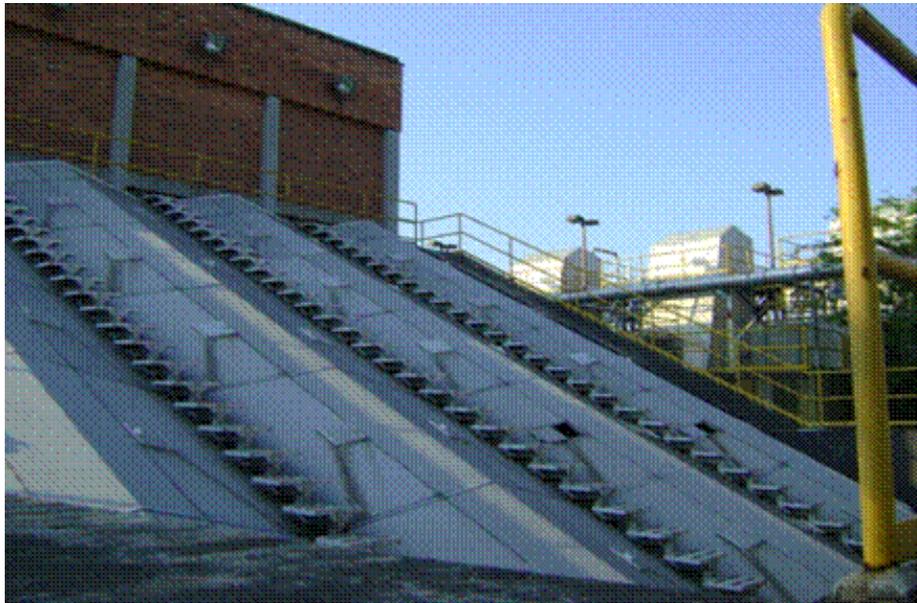


Figura 58. Sistema de bombas de tornillo.



Figura 59. Sistema de bombas de tornillo parte inferior.

Rejillas Gruesas. Previo al bombeo el agua residual es cribada a través de dos rejillas gruesas de limpieza mecánica con separación entre barras de 10 cm para remover los sólidos gruesos. El material removido de las rejillas es transportado mediante sistema de limpieza automático usando una banda transportadora, hacía una tolva de 3 m³ de capacidad, donde se almacena para posteriormente enviarla al sitio de disposición final.

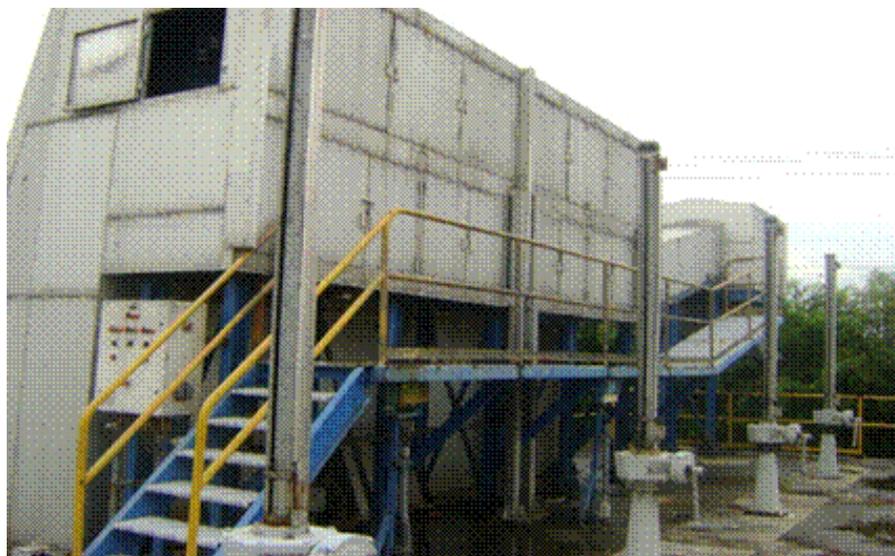


Figura 60. Rejillas Gruesas.

Rejillas finas. El agua residual que ingresa por Impulsiones Aguablanca, Navarro y Cañaveralejo, se mezcla en la Cámara de Integración con el agua residual de Colector Central. Posteriormente el agua mezclada pasa a través de seis rejillas finas, para cribado fino, con separación entre barras de 2 cm. La evacuación de los desechos se hace usando bandas transportadoras hacia una tolva de almacenamiento. Cuando en la tolva se alcanza el peso ajustado, se envía una señal a la sala de control que indica que se debe desocupar la tolva, y finalmente llevarla al sitio de disposición.

La operación de estos rastrillos se puede realizar de forma automática, manejando el sistema desde la sala de control o desde la zona local de operación. El agua después de pasar por el cribado fino pasa a los desarenadores. Es posible aislar cada rejilla y su correspondiente desarenador mediante su respectiva compuerta. Estas últimas de 1.52 m por 1.52 m están equipadas con actuador eléctrico que hace posible aislar cada línea para labores de mantenimiento.



Figura 61. Rejillas Finas.

Sistema de Dosificación de Químicos. Para incrementar la eficiencia de remoción de la DBO5 que no está soluble en el agua residual y de los SST, se aplicará Cloruro férrico como coagulante primario antes del ingreso del agua a los desarenadores ,sitio en el cual se dispone del gradiente y tiempo de mezcla suficientes para que se realice el proceso de coagulación . Igualmente se aplicará un ayudante de floculación (polímero) en los vertederos de salida de los desarenadores.



Figura 62. Sistema de dosificación de Cloruro férrico



Figura 62. Sistema de dosificación de Polímero

Desarenadores Para remover la materia inorgánica propia de las aguas residuales y evitar presencia de arenas en el lodo que se va a digerir, se tienen seis desarenadores (tanques rectangulares de 18m de largo por 5m de ancho), en línea con cada una de las rejillas finas. El proceso de separación y asentamiento de las arenas en el fondo de los desarenadores, se ayuda aplicando aire comprimido procedente de sopladores, a través de tubería en acero galvanizado. El tiempo de retención promedio es de 5 a 8 minutos.

Las arenas removidas son recolectadas en un canal localizado en el fondo de cada desarenador y a través de un tornillo sin eje (5.4 m³/h de capacidad y 290 mm de diámetro), son conducidas hacia una cámara localizada en uno de sus extremos; en la cámara se encuentra localizada la línea de succión de una bomba eyectora de 60 m³/h de capacidad, 15 m de presión de descarga y 7 m de presión de aspiración, la cual es accionada con agua e impulsa la mezcla (con 5% de arena) hacia dos tornillos separadores; la arena es descargada en dos (2) tolvas cubiertas de 12 m³ de capacidad cada una y de manejo local, existiendo además una alarma por exceso de peso que a través del centro de supervisión y control, informa al operador del llenado completo de la tolva considerada. Cada tolva y tornillo separador funcionan alternadamente y en forma independiente. El funcionamiento del sistema de separación y extracción de arenas es automático y todas las estructuras involucradas se encuentran provistas de cubiertas y sistemas de extracción y tratamiento de olores. El agua efluente del tamiz separador retorna a la cabecera de la planta (entrada de los desarenadores).



Figura 64. Desarenadores.

Recolección y disposición de natas. Después de desarenada el agua, pasa a los sedimentadores primarios. Se cuenta con ocho (8) sedimentadores primarios, de flujo ascendente, ubicados en dos grupos de cuatro (4) unidades. Los sedimentadores primarios son tanques circulares de 47.50 m de diámetro, 4.20 m de altura útil y 7.4% de pendiente de fondo, provistos de un sistema mecánico barredor de lodos, de funcionamiento continuo y accionamiento local, y de un sistema desnatador superficial.

El agua cruda ingresa a cada sedimentador por un tubo central; con un tiempo de retención de 2 horas, y el agua clarificada rebosa por vertederos perimetrales de sierra a una canaleta perimetral, para ser conducida hacia el río Cauca, por medio de una tajea rectangular simple de 2.6 x 2.6 m, Los sólidos removidos son evacuados por el fondo del sedimentador y son bombeados hacia el espesador de lodo por medio de tubería en hierro dúctil de 200 mm de diámetro.



Figura 65. Sedimentadores.

Las natas que flotan en los sedimentadores primarios, se retiran por medio de un barredor de natas que las transporta hacia dos tolvas; por gravedad llegan a un tanque de natas donde mediante 4 bombas centrífugas (2 son de reserva), son enviadas hacia una rejilla de tambor rotatorio provista de compactador para remoción del material sólido.

El agua utilizada para el transporte de las natas es extraída mediante bombeo, de la tajea de agua tratada y circulada por un cernidor para remoción de sólidos finos antes de su utilización. La rejilla utilizada para la limpieza de las natas presenta una capacidad de 1 m³/min, una separación entre barrotes de 1 mm y utiliza un sistema externo de lavado del compactador por rociado intermitente (20 segundos cada 30 minutos); las basuras removidas en la rejilla se transportan por medio de un tornillo sin eje, provisto de compactador hacia un depósito del que serán evacuadas utilizando un recipiente hermético provisto de ruedas, hacia un camión cerrado que las transportará hacia el sitio de disposición final. El agua que se separa de las natas se retorna por gravedad a la cabecera del proceso.



Figura 66. Sedimentadores.

Digestores El lodo primario de los sedimentadores (que contiene una concentración de sólidos de 1,5 a 2 %) se bombea hacia el espesador, antes de su ingreso se tamizan mediante una rejilla, para retirar los desechos sólidos que por su tamaño y consistencia afectan el proceso. Las dimensiones del espesador son 29 m de diámetro y 4m de alto; se alcanzan concentraciones de 5 - 6 % de sólidos. Para evitar fermentación del lodo por efecto de las características del mismo, se añade solución de cal al 5% aprox. El sobrenadante se retorna a la cabecera del proceso. Una vez espesados los lodos, son conducidos mediante bombeo hacia los digestores. Se tienen cuatro (4) unidades de digestión provistas de mezcla completa y calentamiento para mantener una temperatura de 37°C, con un volumen efectivo de 6250 m³ cada una. Allí se lleva a cabo el tratamiento anaerobio, que se ofrece como una opción tecnológica compatible con los requerimientos y restricciones de la problemática del manejo de las aguas residuales en América Latina y que se ha podido utilizar para el tratamiento de los lodos con muchas experiencias a nivel mundial.

Dado que los microorganismos son los responsables de llevar a cabo un proceso biológico, sus características metabólicas determinarán el tipo de aplicación. La energía contenida en la materia orgánica contaminante utilizada por los microorganismos, medida como demanda química de oxígeno (DQO) o como demanda bioquímica de oxígeno (DBO), es transformada en diversos productos, dependiendo del metabolismo de la célula, es así que una bacteria anaerobia utilizará el 10% de la energía contenida en su alimento o sustrato para funciones de reproducción, dando origen a nuevas células; el 90% restante la “perderá” en forma de gas metano.

Se conoce como digestión anaerobia a la transformación bacteriana, en ausencia de oxígeno, de residuos orgánicos, líquidos o semisólidos, a metano. Esta transformación se lleva a cabo mediante la hidrólisis y la conversión de sustancias de naturaleza orgánica en productos intermedios para llegar finalmente a la mezcla gaseosa llamada biogás, compuesta por metano y dióxido de carbono, principalmente.

La producción de lodo es un aspecto muy importante del proceso de digestión biológica, puesto que para la producción de nuevas células, debe haber suficiente sustrato o alimento. El tiempo de retención hidráulica en el digestor es de 17 a 22 días para tener una actividad biológica efectiva. El amoníaco y el Dióxido de Carbono durante la digestión producen bicarbonato de amoníaco en una solución y da lugar a un sobrenadante a partir de digestor con una alcalinidad de 50 a 1500 mg/l. Los lodos digeridos son evacuados de los digestores por gravedad y conducidos al tanque de almacenamiento de lodos. El tanque de almacenamiento presenta un volumen útil aproximado de 4279 m³ y se concibió con el objeto de flexibilizar la operación del proceso de deshidratación.



Figura 67. Digestores.

Sistema de filtros prensa para deshidratación de lodos De la unidad de digestión, los lodos son enviados a los filtros prensa donde la operación que se realiza es simplemente exprimir el lodo al paso de unas telas, unos rodillos que los va secando. El biosólido sale de allí con una humedad del 20 %. El lodo para deshidratar se extrae del tanque de almacenamiento y es enviado a dos (2) tanques auxiliares, localizados en el edificio de deshidratación; cada tanque se encuentra provisto de un medidor de nivel con señal de salida hacia el centro de supervisión y control de la planta y de un agitador. Posteriormente, el lodo será conducido por bombeo a los filtros prensa de bandas, utilizando siete (7) bombas de desplazamiento positivo y cavidad progresiva, provistas de variador de velocidad para suministrar caudales que varían entre 300 y 350 L/min.

El lodo deshidratado se lleva por medio de bandas transportadoras hasta el patio de lodos, se deposita en (5) volquetas herméticas provistas de sello de compresión en la compuerta trasera que garantiza que no habrá goteo de líquidos, presentando cubierta superior con mecanismo de poleas y rieles para facilitar su desplazamiento y es llevado al relleno sanitario de Puertas del Sol. Se generan aproximadamente 100 ton/día. Las bombas de alimentación de lodos tienen su funcionamiento ligado al filtro prensa de bandas que se controla desde el PLC y el centro de supervisión y control de la Planta.



Figura 68. Filtros Prensa.

Tanques de almacenamiento de biogás El gas producido durante la digestión es de 8646 m³/d. La composición del biogás por volumen es de 64% - 70% de CH₄, 25% - 30% de CO₂ y pequeñas proporciones de N₂, H₂ y H₂S entre otros. Previo al proceso de generación de energía, el gas que se produce en los digestores, es circulado a través de un purificador de gas seco con el objeto de remover el H₂S y controlar su nivel de corrosividad. La concentración de H₂S en el gas afluente al purificador es menor de 60 ppm y la concentración de salida menor de 10 ppm.

El gas es almacenado en dos tanques de 1000 m³ cada uno, luego es aprovechado para generar energía; se tienen dos generadores de energía con capacidad de generar 1000 KW; el requerimiento de la planta es de 1600 KW-hr. El agua que se utiliza para el enfriamiento de las camisas de los motores, se pasa por un intercambiador de calor de placas que la enfría, por medio de agua externa, esta agua se calienta y es enviada a calentar el lodo de los digestores a través de sus respectivos intercambiadores de calor (4 unidades). El intercambio térmico por el calentamiento del lodo ocasiona el enfriamiento del agua; esta retorna para enfriar las camisas de los motores, cerrando el ciclo de aprovechamiento del recurso.



Figura 69. Tanques de almacenamiento de biogás.

CONTROL DE OLORES.

La PTAR-C cuenta con un sistema completo para controlar los olores desagradables que se producen durante el tratamiento de las aguas residuales; está conformado por los siguientes elementos:

Cubiertas: Todas las estructuras de la planta que almacenan o transportan agua residual durante el proceso de tratamiento y lodo han sido tapadas con cubiertas de aluminio para confinar los desprendimientos de gases: rejas gruesas, bombas de tornillo, rejas finas, desarenadores, sedimentadores, bandas transportadoras, espesador, filtros prensa y tolvas de almacenamiento de residuos sólidos.

Extracción: El segundo elemento en el control de olores es la extracción del aire contaminado utilizando ventiladores. En este caso, el aire confinado bajo las cubiertas se extrae mediante equipos de ventilación mecánica que succionan con presión negativa extrayendo el aire y descargándolo con presión positiva.



Figura 70. Sistema de Aireación

Filtros biológicos

Tratamiento: El tratamiento consiste en la filtración del aire a través de los “filtros biológicos” que son lechos filtrantes que proporcionan un medio adecuado para que los microorganismos ejerzan la transformación de los gases causantes del mal olor.

Los filtros están conformados por material con humus orgánico con alto contenido de cenizas volcánicas y capa vegetal, se soportan en capas inferiores: la primera en el fondo, es piedra triturada de 50 mm de espesor; la capa intermedia de canto rodado de 500 mm de espesor, entre las dos capas se tiene una red de PVC para imprimir estabilidad a la estructura. El aire confinado procedente de las unidades de tratamiento entra por el fondo mediante cámaras de distribución de aire a través de conductos elevados que descienden a los lechos. La parte superior está cubierta con césped para prevenir la erosión por la lluvia. Para asegurar la actividad de los microorganismos se debe garantizar una humedad del 40% y un pH de 7.



Figura 71. Filtros biológicos.

Disposición final y manejo de los biosolidos generados en la PTAR-C. Como se mencionó anteriormente el biosólido deshidratado, es conducido por bandas a volquetas de 10m³ de capacidad, en las que son transportados hasta el Monorrelleno, lugar debidamente acondicionado para tal fin. El biosólido en el Monorrelleno se riega y se le adiciona cal al voleo para el control de vectores, disminución de olores y patógenos.



Figura 72. Disposición final y manejo de los biosolidos generados en la PTAR-C.

Una vez el agua ha recibido el tratamiento adecuado sale del sistema por un conducto y converge hacia el río Cauca. De esta manera el agua ya clarificada no presenta peligro alguno para cualquier forma de vida existente aguas abajo del río Cauca.

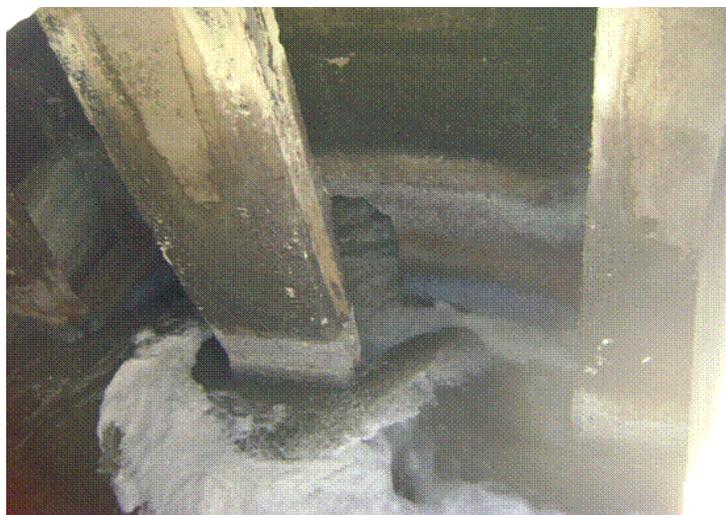


Figura 73. Salida de agua Clarificada hacia el río Cauca.

Anexo D

Ficha técnica de diseño de la PTAR-C

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PTAR – C. DESCRIPCIÓN TÉCNICA PRINCIPALES UNIDADES DE TRATAMIENTO.

La planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralejo (PTAR-C), se construirá en dos etapas:

La primera etapa, que en la actualidad se encuentra en su última fase de construcción y montajes, incluye tratamiento preliminar, tratamiento primario avanzado, tratamiento de lodo (espesamiento, digestión, almacenamiento, deshidratación), generación de energía y control de olores. La segunda etapa, para construcción futura, comprende el tratamiento secundario mediante el proceso de lodos activados estabilización por contacto y el tratamiento del lodo secundario.

PARÁMETROS DE DISEÑO

A continuación se presentan los criterios utilizados en el diseño de la planta:

Año horizonte para el proyecto 2015

Área de influencia 9800 Hectáreas

Población 2060000 habitantes

Caudal medio 7.6 m³/seg

Afluente DBO₅ 211 mg/l

Afluente SST 180 mg/l

Remoción de DBO₅ hasta 47% en el Agua Residual

Remoción de SST hasta 68 % en el agua Residual

Remoción de sólidos volátiles (SV) hasta 46% en el lodo Digerido