

2012

EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE LA PUESTA EN MARCHA DE LA UNIDAD DIAPAC U.I. E IMPLEMENTACIÓN DEL INDICADOR PARA EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA UNIDAD DE BALANCE DE LA GRB.



ELIANA ALEXANDRA ESTUPIÑÁN BÁEZ

Estudiante en Práctica Industrial

Tutor: Ing. Milton Fernández

**EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE LA PUESTA EN MARCHA DE LA
UNIDAD DIAPAC U.I. E IMPLEMENTACIÓN DEL INDICADOR PARA
EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS
RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA UNIDAD DE BALANCE DE LA GRB.**

ELIANA ALEXANDRA ESTUPIÑÁN BÁEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2012

**EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE LA PUESTA EN MARCHA DE LA
UNIDAD DIAPAC U.I. E IMPLEMENTACIÓN DEL INDICADOR PARA
EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS
RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA UNIDAD DE BALANCE DE LA GRB.**

ELIANA ALEXANDRA ESTUPIÑÁN BÁEZ

**Trabajo de Grado modalidad Práctica Empresarial para optar al título de
Ingeniera Química**

DIRECTOR:

**José Andrés Pérez Mendoza
Ing. Químico**

CODIRECTOR:

**Milton Ricardo Fernández Pacheco
Ing. Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2012

AGRADECIMIENTOS

“A veces, el replanteamiento de un problema es más decisivo que el hallazgo de la solución, que puede ser un puro asunto de habilidad matemática o experimental. La capacidad de suscitar nuevas cuestiones, nuevas posibilidades de mirar viejos problemas, requiere una imaginación creativa y determina los avances científicos auténticos”.

Albert Einstein (1879-1955)

En primer lugar agradezco a Dios quien es el único capaz de dirigir nuestra vida por el camino correcto y quien en sus designios tuvo el traerme a Ecopetrol S.A. a aprender un poco más sobre mi profesión.

A mi familia por su constante apoyo y paciencia durante este proceso.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarme las bases de conocimiento de mi profesión y por facilitar mi formación integral.

A las personas de la coordinación de procesos por su invaluable colaboración y direccionamiento durante este proceso de crecimiento personal. Especial agradecimiento a los ingenieros Milton Fernández, Johan Garzón y Fabián Gómez.

A las personas de la Coordinación de Gestión y Control Ambiental quienes fueron parte vital durante el desarrollo de este trabajo. Especialmente a Carlos Muñoz por su colaboración permanente, a Nelson Herrera quien con sus palabras siempre logró mantener mi ánimo firme a seguir adelante y al ingeniero Libardo Ochoa y la ingeniera Alix Osuna quienes siempre tuvieron una palabra amable y una mano dispuesta a ayudar.

Al ingeniero José Isaías Vargas del ICP quien más que un apoyo se convirtió en un gran amigo para mí y siempre estuvo dispuesto a compartir su conocimiento y amplia experiencia en el tema.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1. METODOLOGÍA	15
1.1. DIAGNÓSTICO DE LOS EQUIPOS, INFRAESTRUCTURA E INSTRUMENTACIÓN DE LA UNIDAD	16
1.2. PLAN DE ARRANQUE Y PUESTA EN MARCHA	16
1.2.1. ETAPA DE INOCULACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO BACTERIANO	16
1.2.2. ETAPA DE ARRANQUE	17
1.2.3. ESTABILIZACIÓN DE LA UNIDAD	18
1.3. SEGUIMIENTO DE PARÁMETROS IN SITU Y CONTROL DEL PROCESO.....	19
1.3.1. PARÁMETROS IN SITU.....	19
1.3.2. CONTROL DEL PROCESO.....	20
1.4. INDICADOR PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.....	21
1.5. ACTUALIZACIÓN DEL MANUAL DE OPERACIÓN DE LA UNIDAD Y DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE ENTRENAMIENTO.....	22
1.6. RECOMENDACIONES PARA LA RECUPERACIÓN DE LA CONFIBILIDAD OPERATIVA DE LA UNIDAD.	22
2. ANÁLISIS DE RESULTADOS	22
2.1. DIAGNÓSTICO DE LOS EQUIPOS, INFRAESTRUCTURA E INSTRUMENTACIÓN DE LA UNIDAD.....	22
2.2. ARRANQUE Y PUESTA EN MARCHA.....	26
2.2.1. ETAPA DE INOCULACIÓN Y ADAPTACIÓN BACTERIANA.....	26
2.2.2. ETAPA DE ARRANQUE	26

2.2.3.	ESTABILIZACIÓN DE LA UNIDAD	27
2.2.4.	CONTROL DEL PROCESO	31
2.3.	EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DURANTE PUESTA EN MARCHA DE LA UNIDAD DIAPAC U.I. 37	
3.	CONCLUSIONES	39
4.	RECOMENDACIONES PARA EL ASEGURAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD OPERATIVA DE LA UNIDAD	40
	BIBLIOGRAFÍA.....	42
	ANEXOS.....	46

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Valores óptimos para asegurar un balance favorable entre poblaciones de microorganismos depuradores de lodos activados.	19
Tabla 2: Parámetros de diseño y operación para un proceso de lodos activados en SBR.	21
Tabla 3: Lista de chequeo para diagnóstico de estado de equipos, infraestructura e instrumentación de la unidad DIAPAC U.I. [Fuente: La autora]	23
Tabla 4: Análisis de desempeño de la DIAPAC U.I. (3 de abril de 2012).....	33
Tabla 5: Análisis de desempeño de la DIAPAC U.I. (BA-3063A) (27 de abril de 2012).....	34
Tabla 6: Análisis de desempeño de la DIAPAC U.I. (BA-3063B) (27 de abril de 2012).....	36
Tabla 7: ICEa para análisis del 3 de abril de 2012. [Fuente: La autora].....	37
Tabla 8: ICEa para análisis del 27 de abril de 2012. [Fuente: La autora].....	38
Tabla 9: Parámetros considerados para la evaluación del ICEa y sus “pesos”.	58

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de la metodología utilizada en la evaluación de la viabilidad de la puesta en marcha de la unidad DIAPAC U.I.	15
Figura 2. Etapa de escalamiento de la BA-3063A.....	18
Figura 3. Perfil de pH durante arranque y puesta en marcha. A) Afluente B) BA-3063A C) BA-3063B	29
Figura 4. Perfil de OD durante arranque y puesta en marcha A) BA-3063A B) BA-3063B	30
Figura 5. Perfil de Temperatura de la muestra durante arranque y puesta en marcha. A) BA-3063A B) BA-3063B	30
Figura 6. Esquema general Planta de tratamiento de aguas residuales domésticas DIAPAC UI, Balance, Ecopetrol Refinería de Barrancabermeja.	47
Figura 7. Correlación para pH.	59
Figura 8. Correlación para Temperatura.	60
Figura 9. Correlación para Oxígeno Disuelto.	60
Figura 10. Correlación para Grasas y aceites.	61
Figura 11. Correlación para DQO.	61
Figura 12. Correlación para DBO.....	62
Figura 13. Correlación para sólidos suspendidos.	62
Figura 14. Correlación para coliformes totales.....	63
Figura 15. Modo de operación de un reactor SBR.....	66

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DIAPAC U.I.....	46
ANEXO B. MÉTODOS DE CONTROL DEL PROCESO	49
ANEXO C. Caracterización de afluente, efluente y licor mixto del DIAPAC (3 de abril de 2012)	53
ANEXO D. Caracterización de afluente, efluente y licor mixto del DIAPAC (27 de abril de 2012)	55
ANEXO E. CORRELACIONES GRÁFICAS PARA DETERMINACIÓN DEL ICEa	57
ANEXO F. REACTORES SBR	64

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA PUESTA EN MARCHA DE LA UNIDAD DIAPAC U.I. E IMPLEMENTACIÓN DEL INDICADOR PARA EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA UNIDAD DE BALANCE DE LA GRB.¹

AUTOR: ELIANA ALEXANDRA ESTUPIÑÁN BÁEZ²

PALABRAS CLAVE: Aguas residuales domésticas, tratamiento aerobio, reactores SBR, DIAPAC U.I., confiabilidad operativa.

Ecopetrol S.A., en cumplimiento de su política de responsabilidad integral, debe garantizar que todos sus proyectos y operaciones cuenten con los permisos que la Ley exige y debe cumplir con todos los requerimientos establecidos por las autoridades ambientales. Por tal razón, en la segunda mitad del año 2011 adquiere importancia la puesta en marcha de la unidad de tratamiento de aguas residuales domésticas (ARD) DIAPAC U.I., como requerimiento exigido por la Corporación Autónoma de Santander (CAS) en calidad de autoridad ambiental y se encuentra dentro de los compromisos que afectan el Índice de Cumplimiento Legal Ambiental (ICLA) de la empresa.

Esta unidad estuvo un largo periodo de tiempo fuera de funcionamiento debido a varios factores, por lo cual el objetivo de este trabajo fue realizar un diagnóstico de las condiciones físicas y operacionales del sistema, evaluar la puesta en marcha de la unidad, determinar la eficiencia en el tratamiento de las aguas residuales domésticas con base en la características de medio receptor y las especificaciones del decreto 1594 de 1984 y emitir recomendaciones para asegurar la confiabilidad operativa de la unidad.

Se espera que este documento sirva como base para lograr la continuidad y operación confiable de la Unidad DIAPAC U.I. asociada a la unidad PTAR Ambiental.

¹ *Proyecto de grado*

² *Facultad de Ingenierías Físico-químicas, Escuela de Ingeniería Química, Director: Ing. José Andrés Pérez Mendoza. Codirector: Ing. Milton Ricardo Fernández Pacheco*

ABSTRACT

TITLE: VIABILITY EVALUATION OF STARTING UNIT DIAPAC UI AND INDICATOR IMPLEMENTATION FOR EVALUATING EFFECTIVENESS IN THE DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT OF THE BALANCE UNIT IN GRB. ¹

Author: ELIANA ALEXANDRA ESTUPIÑÁN BÁEZ²

KEYWORDS: domestic wastewater, aerobic treatment, SBR reactors, DIAPAC UI, operational reliability.

Ecopetrol SA, in compliance with its policy of Responsible Care, must ensure that all projects and operations have the permissions that the law requires and must meet all requirements set by the environmental authorities. For this reason, in the second half of 2011 becomes important commissioning DIAPAC unit, as required by the Corporation's request Autonomous Santander (CAS) as an environmental authority and lies within the commitments that affect the Index Environmental Legal Compliance (ICLA) company.

This unit was a long period of time out of service due to various factors, so the aim of this study was to conduct an assessment of the physical and operational conditions of the system, assess the implementation of the unit, determine the efficiency of the domestic wastewater treatment based on the receiving environment characteristics and specifications of decree 1594 of 1984 and make recommendations to ensure the operational reliability of the unit.

It is hoped that this document will serve as a basis for continuity and reliable operation of Unit DIAPAC UI associated with the PTAR Ambiental unit.

¹ *Bachelor Degree project*

² *PhysicoChemical Engineerings Faculty, Chemical Engineering School, Director: Ing. José Andrés Pérez Mendoza. Codirector: Ing. Milton Ricardo Fernandez Pacheco*

RÉSUMÉ

TITRE: ÉVALUATION DE LA MISE EN MARCHÉ DE L'UNITÉ DIAPAC U.I. ET IMPLÉMENTATION DE L'INDICATEUR POUR L'ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ DANS LE TRAITEMENT DES EAUX RÉSIDUELLES DOMESTIQUES DE L'UNITÉ DU BALANCE DE LA GRB.¹

AUTEUR: ELIANA ALEXANDRA ESTUPIÑÁN BÁEZ²

MOTS CLÉ: Eaux résiduaires domestiques, épuration aérobie, réacteur SBR, DIAPAC U.I., fiabilité opérationnelle.

Ecopetrol S.A, conformément à sa politique de Responsabilité Intégrale, doit garantir que tous ses projets et opérations disposent des autorisations que la Loi exige et doit remplir toutes les demandes établies par les autorités environnementales. Pour telle raison, dans la seconde moitié de l'année 2011 prend de l'importance la mise en marche de l'unité DIAPAC, comme une demande exigée par la Corporation Autonome de Santander (CAS) en qualité d'autorité environnementale et aussi Il est dans les compromis qu'affecte l'Indice d'Accomplissement Légal Environnemental (ICLA) de l'entreprise.

Cette unité a été pour une longue période de temps hors de fonctionnement du a plusieurs facteurs, alors ce projet cherche à effectuer un diagnostic des conditions physiques et opérationnelles du système, il a été évalué la mise en marche de l'unité, déterminé l'efficience dans le traitement des eaux résiduaires domestiques en considérant des caractéristiques de l'environnement récepteur et les spécifications du décret 1594 de 1984 et ils ont été émises des recommandations pour assurer la fiabilité opérationnelle de l'unité.

On espère que ce document sert à obtenir la continuité et l'opération fiable de l'Unité DIAPAC U.I. associée à l'unité PTAR Ambiental.

¹Projet de diplôme

²Faculté d'ingénieries Physico-chimiques, École d'Ingénierie Chimique, Directeur : Ing José Andres Pérez Mendoza. Codirecteur : Ing Milton Ricardo Fernandez Pacheco

INTRODUCCIÓN

La unidad DIAPAC U.I. fue ideada y construida en la década de los 80 por la firma *Dégremont* de Francia para el tratamiento de las aguas residuales domésticas (ARD) provenientes de la unidad de balance y del Club Miramar que se encuentran dentro de la refinería, y su diseño es un sistema de lodos activados con aireación extendida de forma discontinua en dos reactores SBR (*Sequency Batch Reactor*).

Las aguas residuales domésticas (ARD) que ingresan a la unidad, se ponen en contacto con una variada población de microorganismos aerobios depuradores, los cuales por medio de reacciones biológicas en presencia de oxígeno utilizan: el carbono, el nitrógeno amoniacal y el fósforo orgánico para formar biomasa, agua y CO₂. Esto contribuye a la reducción de los niveles de contaminación orgánica en el agua y a la reducción de nutrientes que evitan la alteración biológica del medio receptor (Caño el Rosario).

Por múltiples razones operacionales y de confiabilidad la unidad no operó durante aproximadamente doce años; en el año 2006 se realizó un estudio para su recuperación y en 2009 el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) realizó un diagnóstico general de la unidad donde se plantea además una alternativa para su puesta en marcha en modo manual.

Ecopetrol S.A., en cumplimiento de su política de Responsabilidad Integral, debe garantizar que todos sus proyectos y operaciones cuenten con los permisos que la Ley exige y debe cumplir con todos los requerimientos establecidos por las autoridades ambientales. Por tal motivo, en la segunda mitad del año 2011 adquiere importancia la puesta en marcha de la unidad DIAPAC, debido a que es un requerimiento exigido por la Corporación Autónoma de Santander (CAS) como autoridad ambiental y se encuentra dentro de los compromisos que afectan el Índice de Cumplimiento Legal Ambiental (ICLA) [1], para garantizar el

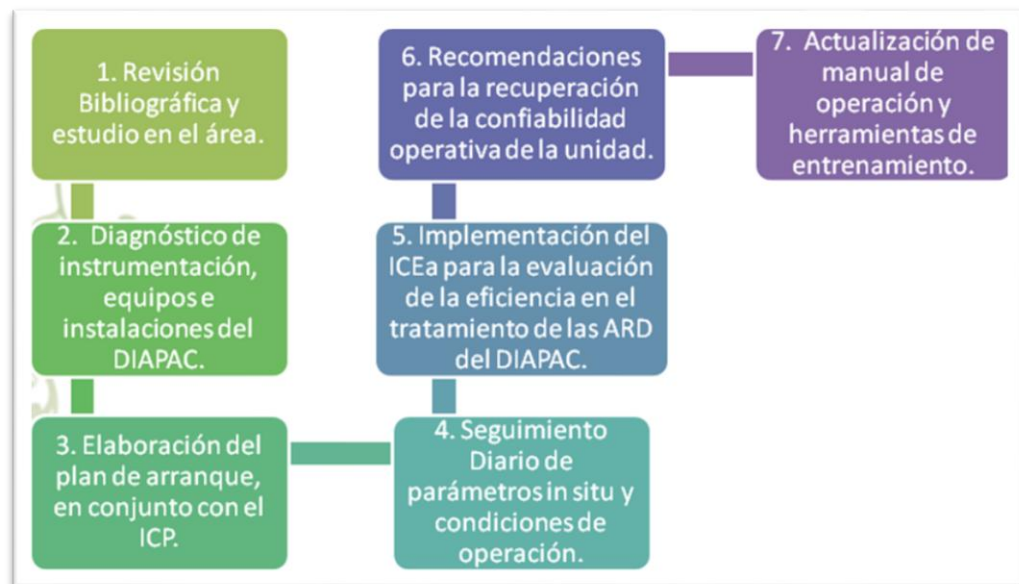
cumplimiento del decreto 1594 del 26 de junio de 1984 [2] en los procesos manejados en la empresa.

Este proyecto es la continuidad del proceso de recuperación de la unidad con el objetivo de cumplir los requerimientos legales ambientales. En este trabajo se desarrollaron las siguientes etapas: un diagnóstico de las condiciones actuales de infraestructura, equipos e instrumentación de la unidad, se realizó una depuración de información debido a que hay varias versiones del manual de operación para este sistema, se diseñó e implementó un plan para la puesta en marcha, se propuso el ICEa como indicador para la evaluación de la efectividad en el tratamiento de las ARD y finalmente se emitieron las recomendaciones para que este proceso continúe en pro de asegurar la calidad del agua que se dispone al Caño El Rosario. Se tiene una breve descripción del sistema en el anexo A.

1. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se muestra la metodología empleada para el cumplimiento al objetivo de este proyecto.

Figura 1. Esquema de la metodología utilizada en la evaluación de la viabilidad de la puesta en marcha de la unidad DIAPAC U.I.



A continuación se describe detalladamente cada una de las etapas empleadas como metodología para el desarrollo de la problemática.

1.1. DIAGNÓSTICO DE LOS EQUIPOS, INFRAESTRUCTURA E INSTRUMENTACIÓN DE LA UNIDAD

Se elaboró una lista de chequeo (*Check List*) donde se consignó el estado y características principales de cada uno de los equipos, instrumentos e infraestructura de la unidad al inicio y durante el arranque de la misma.

1.2. PLAN DE ARRANQUE Y PUESTA EN MARCHA

El plan de arranque y puesta en marcha se elaboró con soporte del ICP y se estructuró a través de 3 etapas: la primera fue la inoculación y acondicionamiento de la biomasa, la segunda fue la etapa de arranque y la tercera etapa es la estabilización de la unidad. Estas tres etapas pretenden preparar la unidad para su operación normal y la definición de sus ventanas operativas (condiciones y parámetros adecuados de operación).

Cada una de estas etapas se realizó de manera independiente en cada uno de los SBR, ya que se consideró más eficiente su funcionamiento en paralelo, pues permite el tratamiento de un volumen de agua mayor reduciendo el impacto ambiental de verter agua sin tratar, sobre todo en temporada de lluvias.

1.2.1. ETAPA DE INOCULACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO BACTERIANO

El proceso de arranque de una planta de tratamiento de ARD habitualmente comienza con la exposición de aire por largos periodos de tiempo, esto permite la reproducción de los microorganismos aerobios formando lentamente el denominado lodo activado, este proceso tiene una duración de dos a tres meses en plantas de pequeña capacidad y de hasta un año en plantas de gran capacidad. Sin embargo y teniendo en cuenta la urgencia con que se requería su operación estable, se decidió inocular lodo activado proveniente de la Planta de

Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas (PTARD) del ICP para acelerar el proceso reproductivo del consorcio de organismos depuradores, con la experiencia del ICP en el arranque de las plantas de tratamiento de la Universidad Pontificia Bolivariana UPB (Bucaramanga), Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB (Bucaramanga) y Rio frío (Bucaramanga), con resultados satisfactorios.

Se recomendó inocular entre el 5% y el 10% del volumen de cada biorreactor. Esto corresponde a una cantidad entre 4,5 y 9m³ de lodos activados provenientes de la PTARD del ICP. Cuyo transporte recomendado es un carro-tanque suministrado por la refinería con la precaución de permitir una cámara de aire del 20% del volumen del mismo, para garantizar la supervivencia de las bacterias aeróbicas.

El tiempo necesario para obtener el acondicionamiento, depende del carácter del desecho y de la naturaleza de las bacterias. Para aguas residuales domésticas o mezclas de éstas con aguas industriales se puede obtener la aclimatación o adaptación en menos de una semana. Si las aguas residuales industriales contienen concentraciones altas de compuestos orgánicos complejos, puede ser necesario un periodo de varias semanas. [3]

1.2.2. ETAPA DE ARRANQUE

Se inició luego de finalizadas las 24 horas de la etapa de inoculación. Se aumentó el volumen de agua progresivamente cada 24 horas, para favorecer la reproducción de los microorganismos hasta llegar al nivel operativo de cada SBR que se estableció en el 80% del nivel total del mismo.

La cantidad de ARD a agregar diariamente debía ser igual a la cantidad total de ARD y lodo activado presente en cada biorreactor el día anterior. Así este proceso tendría una duración de 6 días aproximadamente hasta alcanzar el nivel operativo.

Figura 2: Etapa de escalamiento de la BA-3063A.



1.2.3. ESTABILIZACIÓN DE LA UNIDAD

Para definir la estabilización de la planta se consideró como principal indicador, la prueba de sedimentabilidad de una hora, y según los valores obtenidos por esta se debían ajustar los ciclos de tratamiento de la siguiente manera:

- Se comienza por ciclos de operación de 24 horas, con 23 horas de aireación y 1 hora de clarificación, haciendo seguimiento de condiciones de operación, parámetros in situ y prueba de sedimentabilidad de una hora en cada ciclo.
- Al observar buena sedimentación (300ml de lodo sedimentado aproximadamente) durante la prueba de sedimentabilidad de una hora, se debe llevar el proceso a una duración de 12 horas, con 11 horas de aireación y 1 hora de sedimentación.
- Observar el comportamiento del sistema (parámetros in situ) diariamente, durante una semana usando el criterio de sedimentabilidad anterior (300ml de lodo sedimentado), si este se mantiene se cambia el ciclo de trabajo a 8 horas como se plantea en el manual original de la unidad, con 7 horas de aireación y 1 hora de clarificación.
- De la misma manera, observar el comportamiento del sistema durante dos semanas, y si transcurridas estas se observa un comportamiento estable (y aun se mantienen 300ml de lodo sedimentado) se lleva el sistema a ciclos de trabajo de 8 horas, 7 horas de aireación y una de clarificación. Hasta este

punto todo el proceso de estabilización se realizaría de forma manual y posteriormente al llegar al ciclo de 8 horas se dispondría del PLC (controlador lógico programable) para la operación automática de la unidad ajustando las 8 horas al ciclo completo de la unidad (Llenado-aireación-clarificación-descarga) de manera que se realicen 3 ciclos diarios en cada una de las piscinas.

1.3. SEGUIMIENTO DE PARÁMETROS IN SITU Y CONTROL DEL PROCESO

El seguimiento del sistema se llevó a cabo durante dos meses, se monitorearon varios aspectos: Parámetros in situ, y parámetros y condiciones de operación. Cabe destacar que se realizó también un monitoreo visual del proceso para analizar presencia o ausencia de espumas y las cualidades del licor de mezcla.

1.3.1. PARÁMETROS IN SITU

Los parámetros in situ monitoreados fueron pH, temperatura de la muestra, temperatura ambiente y oxígeno disuelto para muestras tomadas en los biorreactores BA-3063 A/B y en la fosa de llegada BA-3066 de manera que estos valores se encontraran siempre dentro de los valores adecuados para garantizar condiciones habitacionales satisfactorias al consorcio bacteriano depurador.

Los valores óptimos para asegurar un balance favorable entre las poblaciones de microorganismos depuradores se presentan en la tabla 1. [4, 5]:

Tabla 1: Valores óptimos para asegurar un balance favorable entre poblaciones de microorganismos depuradores de lodos activados.

<i>pH</i>	<i>Oxígeno disuelto (OD)</i>	<i>Temperatura de la muestra</i>	<i>Temperatura ambiente</i>
6,5 - 8,5.	2 mg/L	25 - 35 °C	20 - 35 °C

1.3.2. CONTROL DEL PROCESO

El objetivo principal de una planta de tratamiento, es mantener en un nivel adecuado los parámetros requeridos en el efluente del sistema de tratamiento.

Para conservar estos niveles y tener una operación efectiva se debe [6]:

- Mantener un adecuado número de microorganismos
- Mantener buenas propiedades de sedimentación
- Suministrar el aire adecuado en la etapa de aireación
- Remover el lodo acumulado en tiempo y cantidad adecuada.

Para controlar estos aspectos se selecciona uno o más de los siguientes métodos de control de proceso [6]:

- A. Mantener en forma constante el número de sólidos suspendidos en el sistema.
- B. Relación Alimento / microorganismos (F/M)
- C. Tiempo medio de retención celular o edad del lodo (TMRC ó θ_c)
- D. Microbiología
- E. Prueba de sedimentabilidad, IVL (Índice Volumétrico de Lodos)
- F. Velocidad de consumo de oxígeno.

En este caso particular se seleccionaron tres de los anteriores métodos: Relación F/M, TMRC y el IVL (Descritos en el anexo B). Ya que no se poseían medios para hacer seguimiento microbiológico ni análisis de velocidad de consumo de oxígeno.

Los parámetros de diseño y operación para un proceso de lodos activados en un reactor tipo SBR son:

Tabla 2: Parámetros de diseño y operación para un proceso de lodos activados en SBR.

Parámetros de diseño y operación para un proceso de lodos activados (SBR)			
Periodo de aireación	Entre 2 y 4 horas [5]	Sólidos suspendidos en el licor de mezcla (SSLM):	Entre 2000 y 5000 mg/L [5]
Carga volumétrica	Entre 100 y 300 gDBO/m ³ *d [5]	Edad de lodos (TMRC):	Entre 10 y 30 días [5]. Hasta de 40 días para procesos de aireación extendida [6]
Relación F/M	Entre 0,04 y 0,10 gDBO /gSSVLM [5]. Entre 0,05 y 0,10 kgDBO/kg SSVLM para procesos de aireación extendida [6]	Índice volumétrico de lodos (IVL):	Entre 80 y 100 [6]

Para la implementación de estos métodos de control se utilizó la información citada en los anexos 3 y 4, el seguimiento de parámetros in situ y los resultados obtenidos de la prueba de sedimentabilidad de una hora.

1.4. INDICADOR PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

De acuerdo a las mediciones realizadas por la red de monitoreo ambiental [7] en el Caño el Rosario y lo establecido en el decreto 1594 de 1984 [2] se implementó el Índice de Calidad de Efluentes alternos (ICEa) para evaluar la eficiencia en el tratamiento de las ARD tratadas en el DIAPAC de manera que estas no afecten el equilibrio biológico del cuerpo receptor.

El ICEa tiene como objeto la estimación de un valor que define el grado de calidad del efluente del DIAPAC; con ello se pretende reconocer problemas de contaminación en forma ágil sin tener en cuenta todas las variables asociadas, sino las correlaciones asociadas a las mismas. Este indicador se explica en detalle en el anexo E.

1.5. ACTUALIZACIÓN DEL MANUAL DE OPERACIÓN DE LA UNIDAD Y DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE ENTRENAMIENTO.

La capacitación del personal operativo de la Unidad DIAPAC U.I. es uno de los elementos cruciales para garantizar la sostenibilidad del sistema, por tal razón se trabajó en la actualización del manual de la unidad, contenido en el manual de descripción de procesos de la unidad PTAR Ambiental (MDPU PTAR Ambiental) [8] y se desarrollaron guías de aprendizaje relacionadas a cada uno de los capítulos del mismo. Este proceso de actualización fue validado y aprobado por el ingeniero de procesos del área ambiental.

1.6. RECOMENDACIONES PARA LA RECUPERACIÓN DE LA CONFIABILIDAD OPERATIVA DE LA UNIDAD.

Con base en los análisis de desempeño de la Unidad DIAPAC U.I., en el diagnóstico realizado inicialmente, en los resultados entregados por el laboratorio y el comportamiento de la globalidad del sistema durante este proceso, se emitieron recomendaciones para garantizar la recuperación de la confiabilidad operativa de la unidad y asegurar su continuidad operacional confiable.

2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

2.1. DIAGNÓSTICO DE LOS EQUIPOS, INFRAESTRUCTURA E INSTRUMENTACIÓN DE LA UNIDAD.

Los resultados del diagnóstico de los equipos, infraestructura e instrumentación de la unidad DIAPAC U.I. se muestran a continuación en la en la tabla 3:

Tabla 3: Lista de chequeo para diagnóstico de estado de equipos, infraestructura e instrumentación de la unidad DIAPAC U.I. [Fuente: La autora]

ITEM	NOMENCLATURA	CARACTERÍSTICAS	ESTADO*	OBSERVACIONES
EQUIPO ESTÁTICO				
Fosa de llegada	BA-3066	Profundidad: 9 m (según P&ID)	F	Presenta evidencias de contaminación con hidrocarburo.
Rejilla	W-3062	Forma de canastilla.	F	No tiene habilitado sistema para limpieza periódica (malacate)
Piscinas de aireación (Biorreactores SBR)	BA-3063A	Rectangulares con capacidad de 90 m ³ c/u. sistema de aireación de difusores.	F	Se recomienda restauración de escaleras internas para mantenimiento interior de las piscinas.
	BA-3063B		F	
Cámara de lodos	BA-3064	*Capacidad de 25 m ³ , sistema de aireación de domo, agua drenada hacia la fosa.	NS	Tubería en buen estado, sistema de aireación de difusores de domo en malas condiciones, se encuentran fuera de servicio varios de ellos.
Celdas de secado de lodos	A	Poseen capa de arena y grava en buen estado.	FS	Presencia de lodos residuales provenientes de la limpieza de la fosa, pendiente su caracterización para su disposición final.
	B		FS	
	C		FS	
	D		FS	
EQUIPO ROTATIVO				
Bombas sumergibles	P-3066A	Caudal 50m ³ /h	FS	Casilla eléctrica en mantenimiento.
	P-3066B	Caudal 50m ³ /h	F	Una sola de las bombas supe flujo para ambas piscinas de aireación.
	P-3067A	Caudal 20m ³ /h	ND	No instalada
	P-3067B	Caudal 20m ³ /h	ND	No instalada
Sopladores	C-3061A	Flujo: 95m ³ /h	NS	Esperando mantenimiento mecánico.
	C-3061B	Flujo: 95m ³ /h	FS	Durante proceso de arranque de la unidad se disparó, a la fecha se encuentra en mantenimiento mecánico.
	C-3061C	Flujo: 95m ³ /h	F	Funcionando en regulares condiciones (ruido y vibraciones altas). Se evidencia escape de aceite

				debido al pase de aire hacia el motor.
Triturador	W-3063	Capacidad 70m3/h	FS	No se contempla su recuperación, se recomienda hacerlo para evitar vulnerabilidad del sistema de bombeo, ya que según el manual es el principal equipo de protección el mismo.
Compresor	C-3062	Sistema auxiliar en caso de falla de aire de instrumentos.	NS	Posee SAS eléctrico desde el 2009, por lo cual no está disponible para su operación.
INSTRUMENTACIÓN				
Sensor de nivel Fosa de llegada	LT-30661	Transmisor de nivel por principio de burbujeo.	FS	Reemplazado por uno nuevo el 16 de Abril de 2012, sin embargo presenta lecturas no acordes a lo observado en la realidad. Esperando calibración del tubo de inmersión.
Sensores de nivel de las piscinas	LT-30631	Ultrasónico	FS	Valores fluctuantes no acordes a lo observado en campo, debido a aseguramiento de soporte por parte del personal de mantenimiento.
	LT-30632	Ultrasónico	F	Ajustado para lectura en cuarto de control de CBC.
Sistema Lógico de control	PLC		FS	Aún no se completa su reparación. Pendiente cableado eléctrico hacia los equipos.
Válvulas motorizadas	MOV-30601	Válvula automática Entrada agua a BA-3063 ^a	F	Presentaba obstrucción parcial, ya fue limpiada. Se encuentra en buen estado.
	MOV-30602	Entrada agua a BA-3063B	F	Buen estado
	MOV-30603	Seguridad por rebose BA-3063 ^a	F	Presenta pase de agua que debe ser corregido de forma manual.
	MOV-30604	Seguridad por rebose BA-3063B	F	Buen estado.
	MOV-30605	Entrada de aire BA-3063 A	F	Al cerrarse permite paso de aire. Posee como sistema auxiliar una válvula de bloque que tampoco tiene la hermeticidad requerida.

Válvulas COV	COV-30606	Válvula de diafragma Entrada de aire BA-3063B	F	Buen estado.
	COV-30607	Válvula de diafragma Descarga efluente BA-3063 A	F	Presentaba pase de agua, reparada y en perfecto funcionamiento desde el 28 de marzo de 2012.
	COV-30608	Válvula de diafragma Descarga Efluente BA-3063B	F	Presentaba pase de agua, reparada y en perfecto funcionamiento desde el 20 de abril de 2012.
	COV-30610	Llegada aire desde SIBA	F	
Válvulas manuales	S3	Comunicación entre BA-3063A Y BA-3063B	FS	Por cambio en modo de operación de la unidad, ambas piscinas funcionarán independientemente por lo cual se mantiene permanentemente cerrada.
	S4	Lodos de BA-3063A hacia fosa de llegada BA-3066	F	Presenta obstrucción parcial
	S5	Lodos de BA-3063B hacia fosa de llegada BA-3066	F	Presenta obstrucción parcial
	S8	Lodos de BA-3063A hacia cámara de lodos BA-3064	F	Buen estado. Sin obstrucciones.
	S9	Lodos de BA-3063B hacia cámara de lodos BA-3064	F	Buen estado. Sin obstrucciones.
	S11	Salida de lodos hacia celdas de secado.	F	Buen estado. Sin obstrucciones.
Otros				
Sistema de aireación piscina BA-3063 ^a		Difusores de burbuja gruesa en forma de espina de pescado.	F	Buen estado
Sistema de aireación piscina BA-3063B		Difusores de burbuja gruesa en forma de espina de pescado.	F	Buen estado
Sistema de aireación cámara		Difusores de domo.	FS	En funcionamiento solo la mitad de los difusores.

de lodos				
Toma muestras afluente de las PA-3066A/B			F	Habilitados.
Cámara o canal de distribución.		Interconexión atmosférica entre fosa y piscinas de aireación.	F	Se ha limpiado para evitar obstrucción de las MOV-30601/602.

* F (Funcionamiento); FS (Fuera de servicio); NS (no se sabe); ND (no disponible).

2.2. ARRANQUE Y PUESTA EN MARCHA

2.2.1. ETAPA DE INOCULACIÓN Y ADAPTACIÓN BACTERIANA

Debido a inconvenientes logísticos, el inóculo fue transportado en barriles por tandas y aunque la etapa de inoculación en cada uno de los biorreactores no se llevó a cabo de forma puntual, se realizó en 3 oportunidades hasta cumplir con la recomendación hecha. Esto se reflejó en un efluente con características visuales muy buenas, con poca cantidad de sólidos suspendidos y de buen color, en un tiempo de una semana.

2.2.2. ETAPA DE ARRANQUE

El valor de pH promedio observado durante la etapa de arranque de los biorreactores (BA-3063 A/B) fue de 6,26 y 6,21 respectivamente como se observa en la Figura 3. Este valor obedece al comportamiento del sistema en condiciones de baja carga orgánica, exagerados tiempos de aireación y pH ácido en el afluente.

Aunque estos valores pudieron haberse mantenido en un intervalo más satisfactorio, debido a problemas de disponibilidad del personal no fue posible ajustar el pH en todas las ocasiones a 7,5 el cual es el más favorable para conservar el equilibrio entre las poblaciones bacterianas depuradoras [5, 8, 9, 10].

Operacionalmente existieron pérdidas de biomasa y lavado de lodos debido a problemas con las válvulas de descarga y por ende dificultades en la operación adecuada del sistema.

2.2.3. ESTABILIZACIÓN DE LA UNIDAD

El periodo de estabilización se planeó con una duración de 2 meses. Sin embargo la unidad no mostró un aumento en la proporción de lodos, algunos de los factores a los cuales se atribuye esta situación son:

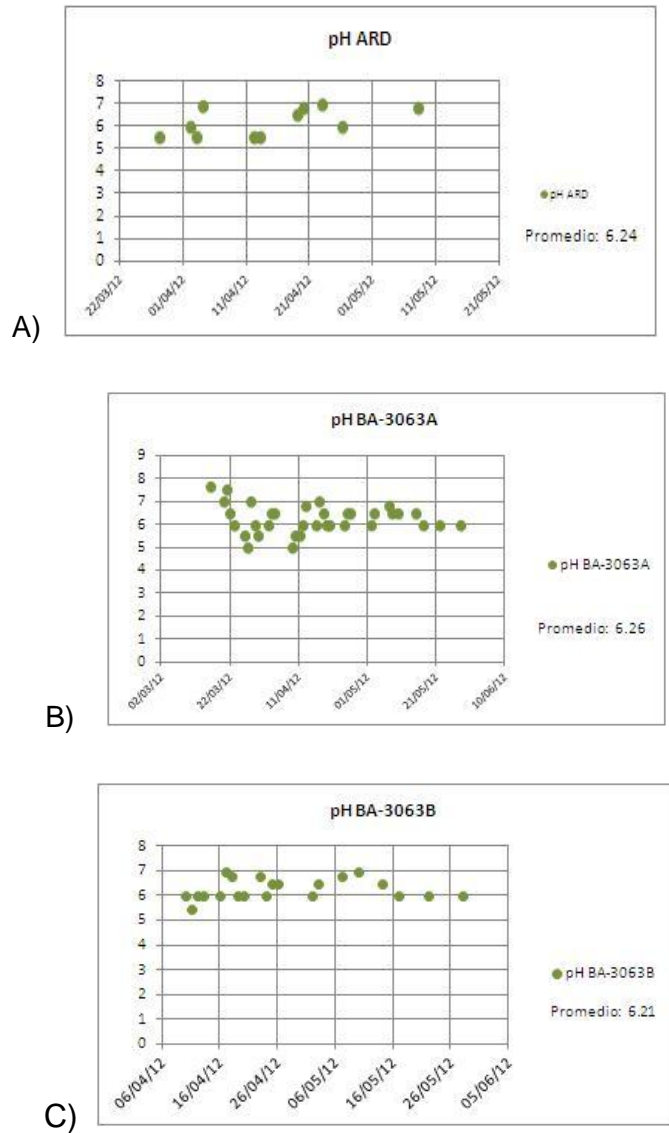
1. El proceso de estabilización propuesto es típico para un sistema convencional de lodos activados en continuo y no de un SBR, lo que impidió mantener una tasa constante de crecimiento a causa de limitación por sustrato.
2. La carga orgánica (DBO) del agua a tratar es muy diferente al valor de diseño de la unidad ya que sus dimensiones se determinaron para el tratamiento de ARD con valor promedio de DBO de 480 mg/L [11] y el afluente tenía apenas 22,1 mg/L [12] lo que no constituye ni siquiera el 10% de los requerimientos nutricionales de los microorganismos.
3. La no disponibilidad del PLC lo cuál impidió hacer los ajustes necesarios en el tiempo de aireación para compensar la falta de sustrato, con ciclos más cortos de operación.
4. Interconexiones atípicas entre los sistemas de aguas residuales domésticas y aguas lluvia, lo cual diluye mucho más la carga orgánica presente en el afluente al sistema y aumenta considerablemente el volumen de agua a tratar de manera inmanejable, por lo cuál debe ser desviada una parte de la misma hacia el separador de aguas lluvia SE-3090, donde genera problemas de tratamiento, y no recibe el manejo adecuado anterior a su disposición en el Caño El Rosario.

5. Interconexiones atípicas entre los sistemas de ARD y de aguas aceitosas en puntos no localizados, aunque hay referencias de algunos posibles puntos de interconexión [13], esto causa que llegue hidrocarburo al sistema inhibiendo la reproducción bacteriana.
6. El sistema de bombeo, presentó síntomas de taponamiento parcial, evidenciados en el alargamiento progresivo de la etapa de llenado. Esto finalmente condujo al taponamiento completo de los filtros de las bombas sumergibles ocasionando el colapso del proceso.

Respecto a los parámetros in situ en la etapa de estabilización se tiene la siguiente información:

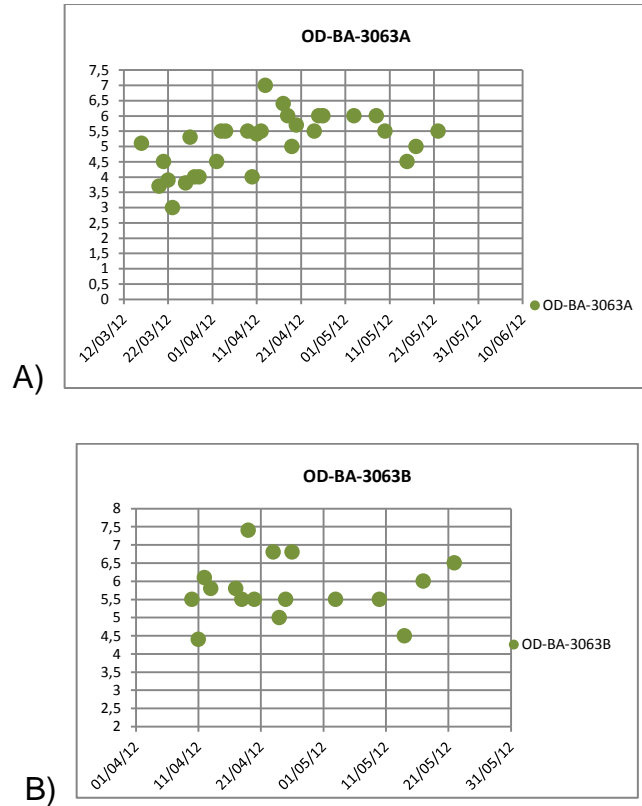
El pH mostró un comportamiento muy variable siendo de mayor tendencia un pH ácido cercano a 5,5 lo cual no era favorable para el proceso. Por tal razón el afluente era neutralizado con lechadas de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (3600 ml de cal en 6L de agua), alcanzando un pH de 7,5, sin embargo durante la etapa de aireación se observó una disminución hasta un valor de 6. Esta circunstancia podría ser aprovechada en un futuro para el diseño de un correcto sistema de control de la unidad con base en el control del pH y el consumo de OD del sistema para optimizar los tiempos de operación.

Figura 3: Perfil de pH durante arranque y puesta en marcha. A) Afluente B) BA-3063A C) BA-3063B.



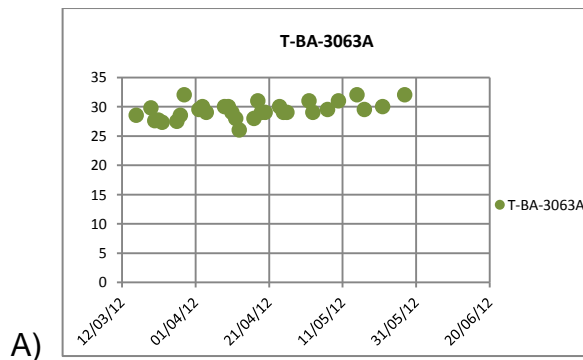
El oxígeno disuelto tuvo valores promedio superiores al mínimo favorable durante todo el proceso en los dos biorreactores como se observa en la figura 4. Esto indica que las condiciones aerobias para el desarrollo de la actividad bacteriana fueron favorables.

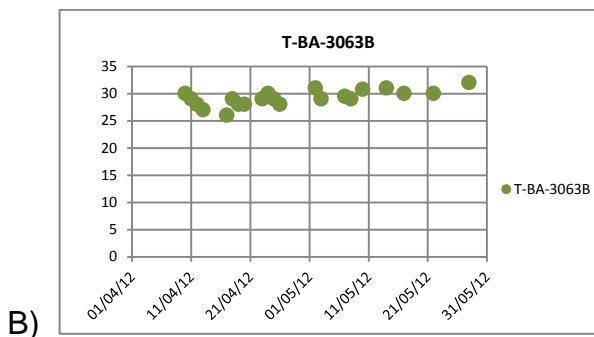
Figura 4: Perfil de OD durante arranque y puesta en marcha A) BA-3063A B) BA-3063B



La temperatura de la muestra y la temperatura ambiente se encontraron siempre en el intervalo de condiciones favorables, dado que las ARD generalmente no presentan contaminación térmica, situación que puede presentarse en aguas residuales industriales, esto se relaciona en la figura 5.

Figura 5: Perfil de Temperatura de la muestra durante arranque y puesta en marcha. A) BA-3063A B) BA-3063B





2.2.4. CONTROL DEL PROCESO

Debido a que los datos requeridos para el control del proceso son fundamentalmente obtenidos por medio de análisis microbiológicos que no son realizables en el laboratorio industrial de la refinería de Barrancabermeja, se solicitó el apoyo del laboratorio de aguas y suelos del ICP de Bucaramanga. Sin embargo los resultados tardan en llegar más de un mes por lo cual esta estrategia no fue la mejor.

Por esta razón únicamente se dispone para el análisis de los parámetros de control del proceso y de la efectividad del mismo, de los resultados de dos muestreos realizados el 3 de abril del 2012 y el 27 de abril del 2012 [12, 14], cuando la unidad trabajaba en ciclos de 24 horas. Con base en ellos, la observación del proceso, la medición de parámetros in situ y la curva de sedimentabilidad, se realizó un análisis de desempeño para la unidad en las dos ocasiones.

El análisis de esta información (Tabla 4) para el 3 de abril de 2012 muestra que:

- La remoción de DBO y DQO tiene buenos niveles (84,57% y 39,36-5 respectivamente). Sin embargo la remoción de sólidos no se lleva a cabo de la mejor manera (45,68% vs 85% como valor óptimo).

- La remoción de nitrógeno amoniacal es superior a la esperada, lo cual se logra con elevados periodos de aireación.
- OD mínimo es fácil de mantener, lo que se demuestra también con altos valores de OD en el licor de mezcla esto puede deberse principalmente a dos factores: exceso de aire en el sistema o aprovechamiento ineficiente del mismo debido a la baja relación F/M lo cual implica menor gasto de oxígeno durante la estabilización de la materia orgánica.
- La sedimentación es lenta lo que favorece la formación de flóculos y una buena calidad del clarificado, ya que se captura casi la totalidad de los sólidos en suspensión.
- Formación de espuma café con aspecto brillante, en etapa de aireación, esto es un indicio de gran cantidad de microorganismos filamentosos en el licor de mezcla, baja relación F/M y alto TMRC.
- Durante la prueba de sedimentabilidad se observan natas en la superficie del clarificado y sólidos gruesos en suspensión, lo que advierte presencia predominante de bacterias filamentosas que dificultan la sedimentación de gran cantidad de sólidos, favoreciendo su flotación.
- La relación F/M es muy baja, lo cual evidencia la baja concentración de materia orgánica en el afluente del DIAPAC, con relación a la cantidad de microorganismos que requieren este sustrato para su supervivencia.
- El recuento de aerobios totales muestra que existen microorganismos suficientes para realizar un buen tratamiento ya que es superior al mínimo requerido de $10E+3$ UFC/100 ml, esto se debe a los refuerzos de inóculo que se adicionaron durante la etapa de arranque [14].

Se aclara que en esta fecha únicamente se encontraba en funcionamiento la BA-3063A del DIAPAC.

Tabla 4: Análisis de desempeño de la DIAPAC U.I. (3 de abril de 2012)

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES					
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	% REMOCIÓN	OPTIMO	CONDICIÓN
DBO	24.4	3.77	84.57	85.00	Buena
SOLIDOS TOTALES	428	233	45.68	85.00	No aceptable
NITRÓGENO AMONIACAL	8.48	0.49	94.22	90.00	Excelente
DQO	82.7	50.15	39.36	NR	Buena
PARÁMETROS DE OPERACIÓN					
PARÁMETRO	VALOR	RANGO OPTIMO	CONDICION	SIGNIFICADO	
<i>F/M (Relación alimento / microorganismos)</i>	0.05	0.05-0.1	Bajo	No hay suficiente sustrato para la supervivencia de los microorganismos en el proceso	
<i>TMRC (Tiempo medio de retención celular o edad del lodo)</i>	8.83	hasta 40 días	Bajo	Microorganismos jóvenes con buen desempeño dentro del proceso	
<i>IVL (Índice volumétrico de lodos)</i>	115.21	80-150	Bien	Lodo con buena asentabilidad y buenas características de formación de flóculo.	
Datos IN SITU					
<i>PH</i>	7.28	6,5-8,5	Normal	Favorece equilibrio microbiano	
<i>OD</i>	8.40	2 a 4 mg/L	Muy alto	Exceso de aire en el proceso o bajo aprovechamiento del mismo debido a baja F/M	
<i>T</i>	30.40	20 a 35°C	Normal	Favorece crecimiento bacteriano	
PRUEBA DE SEDIMENTABILIDAD					
Tiempo (min)	Volumen sedimentado (mL)				
0	0				
5	10				
10	20				
20	22				
30	25				
60	28				

Curva de sedimentabilidad	
Tiempo (min)	Vol. Sed. (ml)
0	0
5	10
10	20
20	22
30	25
60	28

Tabla 5: Análisis de desempeño de la DIAPAC U.I. (BA-3063A) (27 de abril de 2012)

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES					
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	% REMOCIÓN	OPTIMO	CONDICIÓN
DBO	22.1	2.23	89.91	85.00	Excelente
SOLIDOS TOTALES	159	190	-19.50	85.00	No aceptable
NITRÓGENO AMONICAL	7.65	0.49	93.59	90.00	Excelente
DQO	49.5	21.4	56.77	NR	Buena
PARAMETROS DE OPERACIÓN					
PARÁMETRO	VALOR	RANGO OPTIMO	CONDICION	SIGNIFICADO	
<i>F/M (Relación alimento / microorganismos)</i>	0.02	0.05-0.1	Muy bajo	Carga orgánica demasiado baja para supervivencia de microorganismos.	
<i>TMRC (Tiempo medio de retención celular o edad del lodo)</i>	47.60	hasta 40 días	Alto	Lodos viejos exceso de sólidos suspendidos en el efluente y turbidez.	
<i>IVL (Índice volumétrico de lodos)</i>	69.11	80-150	Muy bajo	Flóculos dispersos, turbidez.	
Datos in situ					
<i>Ph</i>	8.00	6,5-8,0	Límite	Operación normal	
<i>OD</i>	6.50	2 a 4 mg/L	Alto	Exceso de aire en la piscina o aprovechamiento ineficiente del mismo	
<i>T</i>	29.00	12 a 35°C	Normal	Favorece actividad bacteriana	
PRUEBA DE SEDIMENTABILIDAD BA-3063 ^a					
Tiempo (min)	Volumen sedimentado (mL)				
0	0				
5	25				
10	30				
20	32				
30	32				
60	32				

Se tiene entonces que el comportamiento de la BA-3063 A (Tabla 5) y el comportamiento de la BA-3063 B (Tabla 6) para el 27 de abril de 2012 son similares, y se anotan las siguientes observaciones:

- La remoción de materia orgánica se lleva a cabo de manera satisfactoria (por encima del valor óptimo de diseño: remoción del 85% de DBO [11]), sin embargo y debido al envejecimiento de los lodos, la cantidad de sólidos totales en el efluente aumentó respecto a los que venían en el afluente.
- La relación F/M es muy baja, esto indica valores peligrosamente bajos de materia orgánica en el afluente, lo cual impide la reproducción de las bacterias y consecuentemente favorece el envejecimiento del lodo, como lo muestra el TMRC.
- OD mínimo es fácil de mantener, lo que se demuestra también con altos valores de OD en el licor de mezcla esto se debe al aprovechamiento insuficiente de este por parte de los microorganismos (Tasa de respiración baja) debido a la baja F/M.
- La sedimentación durante la prueba es rápida (ocurre casi completamente en los primeros 5 minutos) y con excesiva compactación, típica de un lodo viejo (que también se evidencia gracias al TMRC), lo que impide que el lodo capture la mayor cantidad de sólidos en suspensión, lo cual se ve reflejado en un aumento de sólidos suspendidos en el efluente y un clarificado turbio.
- El pH tiene un valor levemente alcalino debido a la adición de cal en momentos previos a la toma de muestras pero este no afecta la actividad bacteriana ya que se encuentra dentro del rango óptimo (6,5 – 8,0).
- El IVL muestra que la capacidad de floculación del lodo es demasiado baja dando lugar a flóculos dispersos y turbidez del efluente.
- Las curvas de sedimentabilidad muestran que es imprescindible efectuar un retiro de lodo viejo, ya que no realiza un buen trabajo de purificación en

materia de sólidos (Determinado por la forma de la curva y la sedimentación demasiado rápida).

Tabla 6: Análisis de desempeño de la DIAPAC U.I. (BA-3063B) (27 de abril de 2012)

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES					
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	% REMOCIÓN	OPTIMO	CONDICIÓN
DBO	22.1	2.37	89.30	85.00	Excelente
SOLIDOS TOTALES	159	255	-60.38	85.00	No aceptable
NITRÓGENO AMONIACAL	7.65	0.49	93.59	90.00	Excelente
DQO	49.5	29.95	39.49	NR	Buena
PARAMETROS DE OPERACIÓN					
PARÁMETRO	VALOR	RANGO OPTIMO	CONDICION	SIGNIFICADO	
<i>F/M (Relación alimento / microorganismos)</i>	0.02	0.05-0.1	Muy bajo	Carga orgánica insuficiente para mantener operación adecuada del sistema.	
<i>TMRC (Tiempo medio de retención celular o edad del lodo)</i>	46.98	hasta 40 días	Alto	Lodos viejos incapaces de flocular causando efluente turbio.	
<i>IVL (Índice volumétrico de lodos)</i>	44.94	80-150	Muy bajo	Flóculos dispersos, turbidez en el efluente.	
Datos in situ					
<i>pH</i>	8.04	6,5-8,0	Límite	Licor de mezcla levemente alcalino	
<i>OD</i>	5.90	2 a 4 mg/L	Alto	Exceso de aire en la piscina o aprovechamiento inadecuado del mismo.	
<i>T</i>	29.80	12 a 35°C	Normal	Favorece actividad bacteriana	
PRUEBA DE SEDIMENTABILIDAD BA-3063B					
Tiempo (min)	Vol. sedimentado (mL)				
0	0				
5	25				
10	25				
20	25				
30	28				
60	28				

En el caso final, para el muestreo de la unidad el 27 de abril, se observa el comportamiento típico cuando el TMRC es muy alto y la F/M es muy baja.

Este tipo de análisis deben convertirse a futuro en herramientas operacionales que garanticen el tratamiento adecuado de las ARD en la Unidad DIAPAC U.I. de la GRB, por esta razón debe asegurarse la confiabilidad y eficacia en los resultados, para realizar los ajustes necesarios a las variables del proceso en el momento que éste lo requiera.

2.3. EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DURANTE PUESTA EN MARCHA DE LA UNIDAD DIAPAC U.I.

Según los dos resultados de análisis de muestras del afluente y el efluente, emitidos por el laboratorio de aguas y suelos del ICP de Bucaramanga [12,14], se utilizó el ICEa y se obtuvieron los siguientes resultados:

Para los resultados del análisis realizado el 3 de abril de 2012, se obtuvieron los valores para los respectivos parámetros y su valor para el ICEa (Ver anexo E) como se muestra en la Tabla 7:

Tabla 7: ICEa para análisis del 3 de abril de 2012. [Fuente: La autora]

Parámetro	Dato de laboratorio	Vi	Wi
pH	7.13	97.40	0.05
OD [ppm]	8.1	100.00	0.15
T[°C]	30.9	96.83	0.05
G&A[ppm]	2.76	94.48	0.1
DBO[ppm]	3.77	98.12	0.2
DQO[ppm]	50.2	76.73	0.1
SS [ml/L]	20.7	94.48	0.2
Coliformes [UFC/100ml]	6.25E+3	79.17	0.15
ICEa [BA-3063A]	92.23		

Para realizar el análisis del muestreo realizado el 27 de abril de 2012, se consideró cada biorreactor por separado, y luego se promedió el indicador entre ambos debido a que cada uno de los dos biorreactores trata la misma cantidad de ARD, luego su aporte al efluente es de igual proporción. Esto se relaciona en la Tabla 8.

De acuerdo con el ICEa, se envía al medio receptor un efluente de calidad excelente para las dos fechas de muestreo (rangos de evaluación del ICEa en anexo E), con parámetros muy superiores al mínimo que establece la autoridad ambiental en el decreto 1594 de 1984. Por lo cual se evidencia que la unidad está en capacidad de desarrollar un excelente trabajo, y si la recuperación de sus equipos se lleva a cabo y se realiza el estudio del tiempo adecuado de tratamiento respecto a la cantidad de carga orgánica que llega con el afluente, la unidad trabajará de manera estable y eficiente.

Tabla 8: ICEa para análisis del 27 de abril de 2012. [Fuente: La autora]

<i>[BA-3063A]</i>				<i>[BA-3063B]</i>			
<i>Parámetro</i>	<i>Dato de laboratorio</i>	<i>Vi</i>	<i>Wi</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Dato de laboratorio</i>	<i>Vi</i>	<i>Wi</i>
<i>pH</i>	8.07	83.78	0.05	<i>pH</i>	8.02	84.65	0.05
<i>OD [ppm]</i>	6.7	100.00	0.15	<i>OD [ppm]</i>	6.7	100.00	0.15
<i>T[°C]</i>	30.1	98.17	0.05	<i>T[°C]</i>	29.9	98.50	0.05
<i>G&A[ppm]</i>	5.67	88.66	0.1	<i>G&A[ppm]</i>	7.56	84.88	0.1
<i>DBO[ppm]</i>	2.23	98.89	0.2	<i>DBO[ppm]</i>	2.44	98.78	0.2
<i>DQO[ppm]</i>	21.4	89.82	0.1	<i>DQO[ppm]</i>	30.3	85.77	0.1
<i>SS [ml/L]</i>	8.8	97.80	0.2	<i>SS [ml/L]</i>	10	97.50	0.2
<i>Coliformes [UFC/100ml]</i>	1.50E+04	73.33	0.15	<i>Coliformes [UFC/100ml]</i>	3.00E+03	84.44	0.15
<i>ICEa</i>		92.28		<i>ICEa</i>		93.15	
<i>ICEa DIAPAC = 92.71</i>							

3. CONCLUSIONES

- Se realizó el proceso de puesta en marcha en modo manual pero la unidad no alcanzó la estabilización debido a taponamiento del sistema de bombeo (colapso del proceso), se evaluó la eficiencia del sistema en el tratamiento de las ARD provenientes del Club Miramar y la Unidad de Balance de la GRB, y se determinó una calidad excelente (ICEa) para el efluente del sistema.
- Se analizaron las causas de falla de la etapa de estabilización del sistema y se determinó que los tiempos de tratamiento establecidos durante el plan de arranque fueron excesivamente largos, comparados con la cantidad de materia orgánica (DBO) presente en el afluente a la unidad.
- Se analizó la interrelación entre parámetros físico-químicos y microbiológicos del proceso de lodos activados con aireación extendida en un reactor SBR y se trabajaron tres métodos de control operacional que deben trabajar simultáneamente: F/M, TMRC e IVL. Estas herramientas relacionan de manera efectiva los parámetros de operación del sistema.
- Se evidenciaron cambios apreciables en el pH durante los ciclos de tratamiento de cada uno de los dos reactores SBR del DIAPAC U.I. Esta circunstancia podría ser aprovechada en un futuro para el diseño de un correcto sistema de control de la unidad con sensores de pH y OD.
- El ICP realizó un estudio de toxicidad del afluente [15] según cuyo resultado no existe evidencia suficiente que esta fuese un factor determinante en la baja tasa de crecimiento bacteriano, por lo cual se concluye que el sistema puede trabajar de manera eficiente con el adecuado control de los parámetros de operación.

4. RECOMENDACIONES PARA EL ASEGURAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD OPERATIVA DE LA UNIDAD

La unidad DIAPAC U.I. es un sistema de dos reactores tipo SBR en paralelo, que aunque tienen bastantes oportunidades de mejora, están en condiciones de realizar un buen tratamiento a las ARD que reciben, de tal manera que el efluente obtenido es de una excelente calidad como lo demuestra el ICEa obtenido con los datos disponibles, por lo cual se emiten las siguientes recomendaciones para su puesta en marcha, y aseguramiento de la continuidad operacional confiable:

- Se requiere la recuperación de todos los sistemas de aireación de la unidad (sopladores SC-3061 A/B/C) ya que estos son equipos críticos del sistema.
- Se requiere la correcta comprensión de la función de cada uno de los elementos presentes en la fosa de llegada (BA-3066), de manera que se recupere el triturador (W-3063) instalado por diseño y que hoy se encuentra fuera de servicio, y la recuperación del sistema de limpieza de la rejilla de cribado (W-3062) para asegurar que el sistema de bombeo (bombas sumergibles MP-3066 A/B) trabaje de manera confiable, sin riesgo de taponamiento.
- Se requiere la puesta en servicio del PLC (Controlador lógico programable) y su instrumentación, para manipular el tiempo de aireación hasta encontrar el valor óptimo del mismo, de manera que se logre un equilibrio entre las poblaciones depuradoras, que permita asegurar la supervivencia de las mismas en el sistema.
- Deben incluirse los equipos del DIAPAC U.I. en el plan de mantenimiento preventivo anual, para garantizar la sostenibilidad de la operación de tratamiento de aguas residuales domésticas.

- Debe diseñarse un nuevo plan de arranque y puesta en marcha considerando el DIAPAC U.I. como un sistema de reactores SBR y no como un sistema continuo.
- Debe evaluarse durante la puesta en marcha de la unidad, la producción de biomasa para estimar la frecuencia de extracción de lodos, apoyándose en el TMRC y en el IVL.
- Debe recuperarse el sistema de aireación de la cámara de lodos, para garantizar la estabilización adecuada de los mismos cuando se desarrolle esta etapa del proceso.
- Se recomienda instalación de sistema dosificador de cal para efectuar el control de pH cuando la unidad lo requiera.
- Debe asegurarse el muestreo y la periodicidad del mismo dentro de la refinería, antes de la puesta en marcha de la unidad, tanto para el proceso de arranque como para la operación normal de la misma, de manera que sea posible llevar el control adecuado del proceso, ya que la falta de este recurso fue una de las barreras más grandes para determinar los parámetros adecuados de operación de la unidad DIAPAC U.I.
- Se debe capacitar al personal operativo, incluidos los supervisores respecto a la importancia que tiene esta unidad, y la necesidad de su funcionamiento eficiente y confiable.
- El análisis de desempeño de la unidad debe considerar los parámetros de operación, la remoción de contaminantes y el análisis de la curva de sedimentabilidad y deben convertirse en herramientas operacionales para asegurar la continuidad operacional de la unidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ECOPETROL S.A. Instructivo para el cargue y seguimiento de requisitos legales ambientales en CAMI/CAMP, Herramienta administrativa.
- [2] República de Colombia. Decreto 1594 de 1984. Usos del agua y residuos líquidos. 1984. 52p.
- [3] Valencia Montoya, Guillermo. Características de aguas residuales y lodos. Universidad del Valle. Cali, Colombia. 45p.
- [4] Metcalf Y Eddy, Ingeniería Sanitaria, Editorial Mc Graw-Hill, 1995.
- [5] Romero, Jairo Alberto Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Editorial escuela Colombiana de Ingeniería. 2004. Capítulo 17.
- [6] Torrescano, Jose Luis. Parámetros de operación en el proceso de tratamiento de agua residual por lodos activados. 6p
- [7] ECOPETROL S.A. -Red de monitoreo ambiental. Archivo actualizable periódicamente-
- [8] ECOPETROL S.A. Manual de descripción de procesos de la Unidad PTAR Ambiental. Barrancabermeja. 2002. 366p.
- [9] M.M. Vilaseca, Observación microscópica de Fangos Activados. 2001. 6p.
- [10] Componentes y sistemas para el tratamiento biológico de aguas residuales. Disponible en: <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/lodosactivados5.pdf>

[11]ECOPETROL S.A. Manual de operación planta de tratamiento aguas residuales DIAPAC U.I. Traducido por: Cecilia Ivonne Borrero (ICP-ECP). Barrancabermeja, Diciembre 1988. 30p.

[12]ICP-ECOPETROL S.A. Resultados muestreo completo del DIAPAC 27 abril de 2012. 2012. 2p.

[13] ICP. Martinez, María Angélica. Diagnóstico general de la planta de tratamiento de aguas sanitarias DIAPAC de la refinería de Barrancabermeja U-3060. 2009. 61P

[14]ICP-ECOPETROL S.A. Resultados muestreo completo del DIAPAC 3 abril de 2012. 2012. 2p.

[15]ICP-ECOPETROL S.A. Estudio Eco toxicológico De Las Aguas Residuales Domesticas Provenientes De La GRB DIAPAC, Haciendo Uso De *Daphnia Pulex* Como Organismo De Ensayo. 2012. 23p.

[16] Navarro, Javier Ignacio. Diagnóstico y plan de acción para la recuperación y puesta en servicio de la planta DIAPAC de la coordinación ambiental de la GCB-ECOPETROL S.A. Universidad Industrial de Santander. 2006. 82p.

[17] DEGREMONT S.A. Waste water treatment Diapac Process Flow Diagram. Rev. 5. 1976.

[18]ECOPETROL S.A. Diagrama grande de control de la unidad PTAR Ambiental.

[19] M. Casellas, C. Dagot, M. Baudu. Set up and assessment of a control strategy in a SBR in order to enhance nitrogen and phosphorus removal. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/biortech. 2006. 8p.

- [20]Rodríguez, Diana. Pino, Nancy. Peñuela, Gustavo. Monitoring the removal of nitrogen by applying a nitrification–denitrification process in a Sequencing Batch Reactor (SBR). Journal homepage: www.elsevier.com/locate/biortech. 2011. 6p.
- [21]R.S. Bernardes. H. Spanjers. A. Klapwijk. Modelling respiration rate and nitrate removal in a nitrifying-denitrifying SBR treating domestic wastewater. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/biortech. 1999. 13p
- [22]D. P. Cassidy. E. Belia. Nitrogen and phosphorus removal from an abattoir wastewater in a SBR with aerobic granular sludge. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/biortech. 2005. 7p
- [23]DEGREMONT S.A.-ECOPETROL S.A. Waste Water Treatment General Arrangement DIAPAC. 1979.
- [24] EPA. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Reactores secuenciales por tandas. 1999. 11p.
- [25] DEGREMONT S.A. Note Technique N° 501, Sanitary Servage Treatment Plant.1975 8p.
- [26] Ramalho, Rubens Sette. Tratamiento de aguas residuales. 2ª Edición. Ed. Reverté. 2003.
- [27]Carlini, María Florencia. Problemas operacionales en plantas de tratamiento. Pontificia Universidad Católica Argentina.2003. 37p.

[28] Gómez, Claudia. Cabrera, Polonia. Puesta en marcha y operación de una planta de tratamiento de lodos activados a escala laboratorio. 2002.

[29] Instituto de Ingeniería. Evaluación de un Reactor Discontinuo Tratando Aguas Residuales Municipales. Editorial Universitaria, 4510 México

ANEXOS

ANEXO A. DIAPAC U.I.

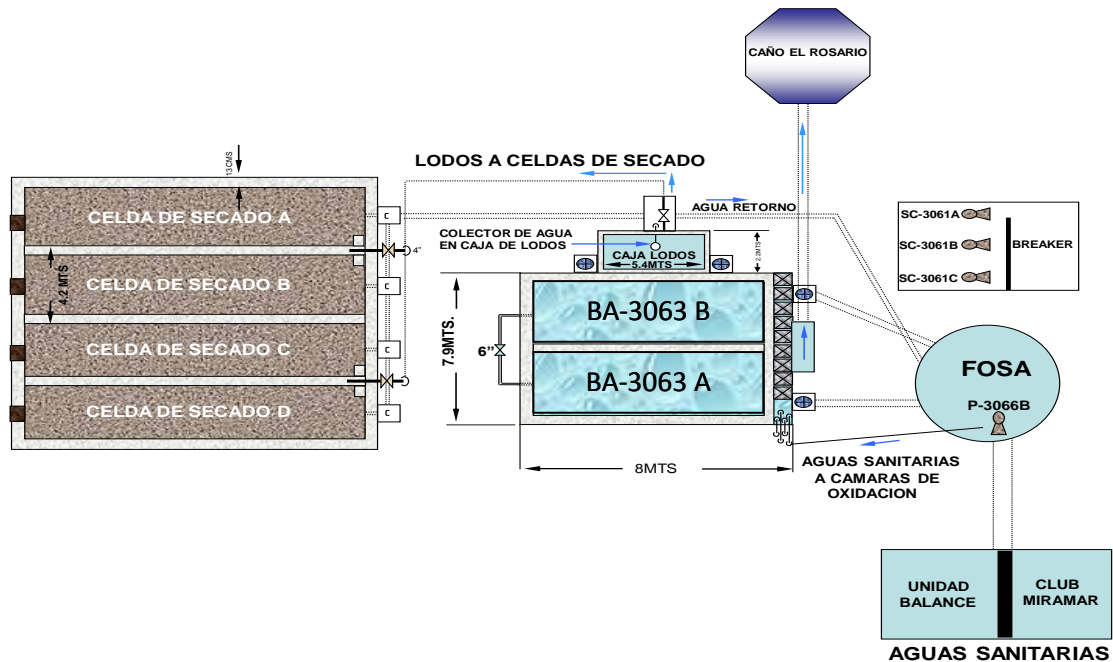
1. DESCRIPCIÓN BÁSICA DEL SISTEMA

Las ARD ingresan a una fosa de agua de llegada; esta se dirige por medio de un sistema de bombeo hacia las piscinas de aireación-clarificación o biorreactores, equipados con un *manifold* para aireación del agua.

El proceso comienza con la aireación del agua en presencia de lodos activados. Luego del periodo de aireación, se detiene el suministro de aire permitiendo la separación entre el agua clarificada y el lodo que se sedimenta en el fondo. El agua clarificada posee menor carga contaminante que las ARD y es conducida al humedal Madre Vieja, punto de conexión directa con el Caño el Rosario. Los lodos resultantes del tratamiento se concentran en el fondo de las cámaras y posteriormente se evacuan desde estas hacia la cámara de lodos donde se estabilizan preparándolos para su secado.

La operación normal del DIAPAC está sujeta a un sistema de control automático por medio de un Controlador Lógico Programable (PLC) para manejar secuencias de llenado, aireación, decantación y descarga final del agua tratada (efluente) al humedal Madre Vieja, que garanticen que la calidad del agua a disponer no afecte el equilibrio biológico del cuerpo receptor. Sin embargo, la unidad DIAPAC debe ser arrancada en modo manual sin intervención del PLC hasta llegar a la Estabilización de la actividad microbiana que realiza la depuración.

Figura 6: Esquema general Planta de tratamiento de aguas residuales domésticas DIAPAC UI, Balance, Ecopetrol Refinería de Barrancabermeja.



2. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROCESO

2.1. ADMISIÓN DE AGUA CRUDA

Las ARD llegan a la fosa BA-3066, equipada con un triturador W-3063 cuya función es disminuir el tamaño de los sólidos para mitigar el riesgo de taponamiento del sistema de bombeo; cuando este no se encuentra disponible, el agua pasa a través de una rejilla W-3062 que se encarga de filtrar y evitar que sólidos de gran tamaño o basura impidan la operación correcta del sistema de bombeo. El agua es transportada por medio de dos bombas sumergibles MP-3066 A/B a las piscinas de oxidación clarificación (biorreactores) BA-3063 A/B de 90 m³ de volumen cada una.

2.2. TRATAMIENTO BIOLÓGICO POR LODOS ACTIVADOS CON AIREACIÓN EXTENDIDA

Las ARD que ingresan a las BA-3063 A/B, se ponen en contacto con una variada población de microorganismos que en presencia de una aireación uniforme durante largos periodos de tiempo, degradan la materia orgánica y el nitrógeno amoniacal presente en estas; como productos se generan CO₂ y agua por medio de síntesis bacteriana, lo que lleva al aumento de la biomasa.

Posteriormente se detiene la aireación y comienza la etapa de clarificación, donde los microorganismos se aferran a los sólidos suspendidos y se sedimentan en el fondo del tanque para permitir que el agua clarificada permanezca en la parte superior del mismo, desde donde se evacua hacia el medio receptor. Por diseño la planta remueve entre el 85 y el 90% de la DBO y los sólidos suspendidos presentes en el afluente.

2.3. ESTABILIZACIÓN Y SECADO DE LODOS

Durante la operación de la planta la biomasa aumenta progresivamente y no debe superar el 60% en volumen (nivel del cono de salida de agua clarificada), por lo que se hace necesario efectuar un retiro de los mismos hacia la cámara de lodos BA-3064, para evitar la salida de estos con el efluente. En ella, los lodos activados son concentrados y aireados en ausencia de sustrato (ARD), y en consecuencia se inicia la estabilización e inactivación de los mismos.

La frecuencia de extracción de lodos es determinada durante la puesta en marcha, como una función de la producción de biomasa en los biorreactores BA-3063 A/B, la edad del lodo y el índice volumétrico de lodos.

Finalizado el periodo de estabilización, se envía el sobrenadante hacia la fosa de llegada y los lodos estables se drenan por gravedad hacia los lechos de secado donde previamente debe haberse dispuesto una capa de arena y grava que facilite el secado de los mismos por filtración y evaporación. Los lodos deshidratados son sometidos a análisis físico-químicos y microbiológicos que determinarán su disposición final.

ANEXO B: MÉTODOS DE CONTROL DEL PROCESO

1. Relación alimento/microorganismos F/M

Para una operación conveniente del sistema de lodos activados, es necesario que los microorganismos tengan una cantidad adecuada de alimento, poco o demasiado alimento causa problemas de sedimentación en el clarificador [6], o en este caso, en la etapa de clarificación.

Para calcular la F/M se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{F}{M} = \frac{DBO_{afluente} * Q_{entrada}}{SSVLM * V_{reactor}}$$

Como en el caso de los reactores SBR no se tiene un caudal de alimentación sino un volumen de agua a tratar en cada corrida, la relación F/M se calcula para cada cochada con una expresión de la siguiente manera:

$$\frac{F}{M} = \frac{DBO_{afluente} * V_{ARD \text{ a tratar}}}{SSVLM * V_{reactor}}$$

Donde $DBO_{afluente}$ representa la carga orgánica presente en el afluente expresada en mg O/L. $V_{ARD \text{ a tratar}}$ es el volumen de agua a tratar en cada cochada en m^3 . SSVLM Representa la cantidad de sólidos suspendidos volátiles en el licor de mezcla en mg/L, la cual se toma como aproximación de la cantidad de microorganismos presentes en la misma, y $V_{reactor}$ representa el volumen útil del biorreactor SBR en m^3 .

2. Tiempo medio de retención celular (TMRC)

Se refiere al tiempo que el promedio de microorganismos permanece en el proceso de tratamiento, otro término usado algunas veces y que significa lo mismo es: edad del lodo (θ_c) [6].

Para trabajar con este método se deberá determinar el TMRC con el cual trabaja mejor la planta y tratar de mantener ese valor. La expresión para calcular el TMRC es [6]:

$$TRMC = \frac{kg\ SSVLM}{kg\ SSV_{en\ el\ lodo\ desechado} + kg\ SSV_{efluente}}$$

Donde *SSVLM* es la cantidad de sólidos suspendidos volátiles en el licor de mezcla mg/L, la cual se toma como aproximación de la cantidad de microorganismos presentes en la misma. *SSV_{en el lodo desechado}* indica los sólidos suspendidos volátiles en el lodo extraído en mg/L, y *kg SSV_{efluente}* expresa la cantidad de sólidos suspendidos volátiles en el efluente en mg/L.

2.1. Relación entre F/M y TMRC

La relación entre F/M y TMRC dependen uno del otro; al cambiar uno se controla el otro. Estos cambian al incrementar o disminuir la cantidad de lodo de desecho. Se citan a continuación algunos indicios de esta relación:

Si el TRMC es muy corto y la F/M es muy alta se tienen los siguientes indicios [6, 9]:

- El oxígeno disuelto (OD) en el aireador es bajo.
- El lodo es ligeramente café y de sedimentación lenta.
- La velocidad de respiración está arriba de lo normal
- Hay espuma espesa blanca en el aireador.

Si el TMRC es alto y la F/M es muy baja se tienen los siguientes indicios [6, 9].

- El OD mínimo en el aireador es fácil de mantener.

- La sedimentación es rápida con alta compactación y sobrenadante turbio con finas partículas de materia.
- Tasa de respiración más baja de lo normal.
- Los sólidos suspendidos en el efluente muestran un incremento.
- Una densa y algunas veces grasosa capa de espuma color canela café, cubre el tanque de aireación.

3. Prueba de sedimentabilidad e IVL

Durante la etapa de clarificación, las bacterias se agrupan en flóculos lo suficientemente pesados para sedimentar, y atrapan en este proceso los sólidos suspendidos presentes en el medio acuoso de manera que se reduce la presencia de estos en el efluente final (La velocidad de sedimentación dependerá de cuestiones como la edad del lodo, material atrapado en el flóculo y número de microorganismos filamentosos). Por tal razón el examen y pruebas de las características de sedimentación es la mejor forma examinar si el proceso está trabajando con una adecuada relación F/M [6].

Consiste en la observación de la formación del flóculo y el manto de lodo haciendo discrepancia entre las siguientes características [6]:

- Si el flóculo es granular, esponjoso o ligero.
- Si el manto de lodo formado es rasgado y aterronado, o uniforme sobre la superficie.
- Si se captura la mayoría del material suspendido en el agua residual conforme se sedimenta.

Durante este proceso de observación, se cuantifica además, el volumen de lodo sedimentado en varios intervalos de tiempo durante una hora y estos resultados


son usados para calcular el índice volumétrico de lodos mediante la siguiente expresión:


$$IVL = \frac{SSe}{SSTLM} * 1000$$

Esta expresión se interpreta de la siguiente manera: El IVL representa el volumen de lodo sedimentado en una probeta de 1L, después de 30 minutos (ml/L) dividido por la concentración de sólidos suspendidos totales en el licor de mezcla y este resultado multiplicado por 1000.


La prueba de sedimentabilidad es una herramienta para juzgar la calidad del lodo, la información de esta prueba advierte cambios necesarios en el sistema, para realizarlos por anticipado [6]. Por tal razón se realizó esta prueba con una periodicidad diaria durante el proceso de puesta en marcha de la unidad DIAPAC U.I.

ANEXO C. Caracterización de afluente, efluente y licor mixto del DIAPAC (3 de abril de 2012)

		IDENTIFIC. MUESTRA	ENTRADA TK-BA 3063A PLANTA DE TRATAMIENTO ARD-DIAPAC	PISCINA DE CARGA U HOMOGENIZACION DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO ARD DIAPAC	SALIDA TK-BA 3063A-PLANTA DE TRATAMIENTO ARD-DIAPAC	DECRETO 1594/84 ART. 72-74
SUBMISSION: 100119258		FECHA DE MUESTREO	2-abr-2012	3-abr-2012	3-abr-2012	
Componente		Unidad	200734561	200734562	200734564/65	
ANÁLISIS IN SITU						
CAUDAL	L/s	N.M	0.86		Promedio	NR
OXIGENO DISUELTTO	mg O2/L	0.0	0.0		N.M	NR
PH / T (GR C)	Uni. pH	6.74/30.9	6.86/34.2		7.13/30.9	5 a 9 unidades
TEMPERATURA DEL AGUA	°C	30.9	34.2		30.9	≤ 40
TEMPERATURA AMBIENTE	°C	33.0	35.8		34.5	NR
ANÁLISIS DE LABORATORIO						
ANÁLISIS FISIQUÍMICOS						
ACIDEZ TOTAL	mg CaCO3/L	-63.6	-128		-7.64	NR
ALCALINIDAD TOTAL	mg CaCO3/L	81	151		17.15	NR
CONDUCTIVIDAD	uS/cm/°C	276/25.0	531/25.0		376/25.0	NR
DB05	mg O2/L	24.4	47.6		3.77	≥ 30 R.C
DQ0	mg O2/L	82.7	293		50.2	NR
FOSFORO TOTAL	mg P/L	1.25	3.46		1.69	NR
GVA-HIDROCARBUROS	mg/L	8.00	254		2.76	≥ 80 R.C
FENOLES (FOTOMETRICO)	mg/L	<0.10	<0.10		<0.10	0.2
NITRATOS (NO3)	mg NO3-N/L	<0.090	<0.090		3.92	NR
NITRITOS (NO2)	mg NO2-N/L	<0.070	<0.070		17.7	NR
NITROGENO AMONIAICAL	mg NH3-N/L	8.48	23.6		<0.49	NR
NITROGENO KJELDAHL	mg N/L	11.4	26.4		1.69	NR
NITROGENO TOTAL	mg N/L	20.0	50.2		23.8	NR
SOLIDOS DISUELTOS	mg/L	NS	NS		NS	NR
SOLIDOS SEDIMENTABLES	mg/L	<0.10	<0.10		<0.10	NR
SOLIDOS SUSPENDIDOS	mg/L	18.4	65.0		20.7	≥ 50 R.C
SOLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES	mg/L	11.4	50.2		12.8	NR
SOLIDOS TOTALES	mg/L	428	256		233	NR
SURFACTANTES	mg SAAM/L	0.79	4.18		<0.28	NR
ANÁLISIS DE METALES						
MERCURIO	microg/L	<0.441	<0.441		<0.441	20*
ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO						
RECuento COLIFORMES TOTALES	UFC./100 mL	1.40E+06	1.80E+06		6.25E+03	NR
RECuento ESCHERICHIA COLI	UFC./100 mL	2.20E+05	8.80E+05		5.90E+02	NR
RECuento DE MESOFILOS TOTALES	UFC./100 mL	4.50E+07	4.10E+07		7.85E+06	NR
NR: No Reporta RC: Remoción en Carga (*) Aun cuando la norma reporta las concentraciones en mg/L, se hace la conversión a µg/L debido a las bajas concentraciones de las muestras analizadas Los datos aquí reportados corresponden únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s) y no pueden ser reproducidos en forma parcial. En caso de queja o reclamo favor dirigirse en comunicación escrita a quien firma el informe con copia a Calidad-HSEQ Informe aprobado por: Laura Cristina Aguilar Firma: Mat: PQ_0998						

 AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS DIAPAC - GRB	IDENTIFIC. MUESTRA	TK-BA 3063A- LICOR DE MEZCLA PLANTA DE TRATAMIENTO ARD-DIAPAC
	SUBMISSION: 100119258	FECHA DE MUESTREO
Componente	Unidad	200734563
ANÁLISIS IN SITU		
OXIGENO DISUELT	mg O ₂ /L	8.4
PH / T (GR C)	Uni. pH	7.28/30.4
TEMPERATURA DEL AGUA	°C	30.4
TEMPERATURA AMBIENTE	°C	35.0
ANÁLISIS DE LABORATORIO		
ANÁLISIS FISCOQUIMICOS		
SOLIDOS DISUELTOS	mg/L	217
SOLIDOS SUSPENDIDOS	mg/L	217
SOLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES	mg/L	113
SOLIDOS TOTALES	mg/L	432
ANÁLISIS BACTERIOLOGICO		
MEDIO DE CULTIVO	N/A *	Agar Nutritivo
RECuento AEROBIOS	UFC/mL	6.10E+05
MEDIO DE CULTIVO	N/A *	Agar cetrimide
RECuento AEROBIOS EN GOTA	UFC/mL	2.60E+04
MEDIO DE CULTIVO	N/A *	Agar MBS+Fe
RECuento AEROBIOS EN GOTA	UFC/mL	5.10E+05
NR: No Reporta RC: Remoción en Carga		
Los datos aquí reportados corresponden únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s) y no pueden ser reproducidos en forma parcial. En caso de queja o reclamo favor dirigirse en comunicación escrita a quien firma el informe con copia a Calidad-HSEQ		
Informe aprobado por:		Laura Cristina Aguilar
Firma:		
Mat: PQ. 0998		

ANEXO D. Caracterización de afluente, efluente y licor mixto del DIAPAC (27 de abril de 2012)

 AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS DIAPAC - GRB		PISCINA DE CARGA O DE HOMOGENIZACION DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO ARD-DIAPAC COMPLETA		ENTRADA TK BA 3063 A Y/B PLANTA DE TRATAMIENTO ARD-DIAPAC		SALIDA TK BA 3063 A PLANTA DE TRATAMIENTO ARD-DIAPAC		SALIDA TK BA 3063 B PLANTA DE TRATAMIENTO ARD-DIAPAC		DUPLICADO SALIDA TK BA 3063 B PLANTA DE TRATAMIENTO ARD-DIAPAC		SALIDA TK BA 3063 B PLANTA DE TRATAMIENTO ARD-DIAPAC		DECRETO 1594/84 ART. 72-74	
IDENTIFIC. MUESTRA		FECHA DE MUESTREO		26-abr-2012		26-abr-2012		27-abr-2012		27-abr-2012		27-abr-2012		27-abr-2012	
SUBMISSION:100120554		Unidad		200744829		200744830		200746235		200746236		200746237		Promedio	
ANALISIS IN SITU															
CAUDAL	L/s	0.94	N.M	N.M	N.M	N.M	N.M	N.M	N.M	N.M	N.M	N.M	N.M	NR	NR
OXIGENO DISUELTTO	mg O2/L	0.0	0.4	7.0	7.0	8.07/30.1	8.02/29.9	8.00/29.8	8.01/29.9	8.01/29.9	8.01/29.9	8.01/29.9	8.01/29.9	5 a 9 unidades	NR
PH / T (GR C)	Uni. pH	7.02/31.3	6.95/27.4	30.1	30.1	30.1	29.9	29.8	29.9	29.9	29.9	29.9	29.9	≤ 40	NR
TEMPERATURA DEL AGUA	°C	31.3	27.4	30.1	30.1	30.1	29.9	29.8	29.9	29.9	29.9	29.9	29.9	≤ 40	NR
TEMPERATURA AMBIENTE	°C	31.9	27.2	32.5	32.5	32.5	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	NR	NR
ANALISIS DE LABORATORIO															
ANALISIS FISICOQUIMICOS															
ACIDEZ TOTAL	mg CaCO3/L	-62.6	-54.7	-54.6	-54.6	-54.6	-50	-51.4	-50.7	-50.7	-50.7	-50.7	-50.7	NR	NR
ALCALINIDAD TOTAL	mg CaCO3/L	78.4	78.6	60.2	60.2	60.2	59.4	59.6	59.5	59.5	59.5	59.5	59.5	NR	NR
CONDUCTIVIDAD	uS/cm/°C	274/25.0	218/25.0	282/25.0	282/25.0	282/25.0	340/25.0	339/25.0	340/25.0	340/25.0	340/25.0	340/25.0	340/25.0	NR	NR
DBO5	mg O2/L	26.9	22.1	2.23	2.23	2.23	2.44	2.29	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	≥ 30 R.C	NR
DQO	mg O2/L	92.4	49.5	21.4	21.4	21.4	30.3	29.6	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	NR	NR
FENOLES	mg/L	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.2	NR
FOSFORO TOTAL	mg P/L	1.36	1.24	1.07	1.07	1.07	1.07	1.27	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	NR	NR
GYA-HIDROCARBUROS	mg/L	138.4	5.91	5.67	5.67	5.67	7.56	6.32	6.94	6.94	6.94	6.94	6.94	≥ 80 R.C	NR
HIDROCARBUROS NO POLARES	mg/L	50.3	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	NR	NR
NITRITOS	mg NO3-N/L	<0.090	<0.090	10.9	10.9	10.9	14.4	14.3	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	NR	NR
NITRITOS	mg NO2-N/L	<0.070	<0.070	<0.070	<0.070	<0.070	<0.070	<0.070	<0.070	<0.070	<0.070	<0.070	<0.070	NR	NR
NITROGENO AMONIAICAL	mg NH3-N/L	9.16	7.65	<0.49	<0.49	<0.49	<0.49	<0.49	<0.49	<0.49	<0.49	<0.49	<0.49	NR	NR
NITROGENO KJELDAHL	mg N/L	11.0	9.09	1.07	1.07	1.07	1.16	1.35	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	NR	NR
NITROGENO TOTAL	mg N/L	20.3	16.9	12.5	12.5	12.5	16.1	16.2	16.17	16.17	16.17	16.17	16.17	NR	NR
SOLIDOS SEDIMENTABLES	ml/L	0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	NR	NR
SOLIDOS SUSPENDIDOS	mg/L	34.7	19.1	8.8	8.8	8.8	10.0	17.2	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	≥ 50 R.C	NR
SOLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES	mg/L	13.1	<5.00	<5.00	<5.00	<5.00	<5.00	7.90	6.45	6.45	6.45	6.45	6.45	NR	NR
SOLIDOS TOTALES	mg/L	184	159	190	190	190	274	236	255	255	255	255	255	NR	NR
SURFACTANTES	mg SAAM/L	2.27	1.97	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28	NR	NR
ANALISIS BACTERIOLOGICO															
RECuento COLIFORMES TOTALES	UFC./100 mL	1.40E+06	1.40E+05	1.50E+04	1.50E+04	1.50E+04	3.00E+03	2.00E+03	2.50E+03	2.50E+03	2.50E+03	2.50E+03	2.50E+03	NR	NR
RECuento ESCHERICHIA COLI	UFC./100 mL	2.60E+05	3.70E+04	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.70E+02	3.90E+02	3.00E+02	3.00E+02	3.00E+02	3.00E+02	3.00E+02	NR	NR
RECuento DE MESOFILOS TOTALES	UFC./100 mL	7.30E+07	3.00E+06	2.00E+07	2.00E+07	2.00E+07	3.20E+06	7.30E+06	5.25E+06	5.25E+06	5.25E+06	5.25E+06	5.25E+06	NR	NR
ANALISIS DE METALES															
MERCURIO	µg/L	<0.441	<0.441	<0.441	<0.441	<0.441	<0.441	<0.441	<0.441	<0.441	<0.441	<0.441	<0.441	20*	NR

NR: No Reporta RC: Remoción en Carga

(*) Aun cuando la norma reporta las concentraciones en mg/L, se hace la conversión a µg/L debido a las bajas concentraciones de las muestras analizadas

Los datos aquí reportados corresponden únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s) y no pueden ser reproducidos en forma parcial. En caso de queja o reclamo favor dirigirse en comunicación escrita a quien firma el informe con copia a Calidad-HSEQ

Informe aprobado por: Laura Cristina Aguilar Firma: Mat: PQ_0998

ANEXO E. CORRELACIONES GRÁFICAS PARA DETERMINACIÓN DEL ICEa

El ICEa tiene como objeto la estimación de un valor que define el grado de calidad del efluente del DIAPAC; con ello se pretende reconocer problemas de contaminación en forma ágil sin tener en cuenta todas las variables asociadas, sino las correlaciones asociadas a las mismas [9].

Estas correlaciones fueron determinadas gráficamente al darle una calificación al valor de cada parámetro considerado respecto al valor obtenido por este según los respectivos análisis de laboratorio (V_i). Así, al multiplicarlo por un factor de peso dentro del indicador (W_i) y sumar los resultados para cada parámetro se obtiene un resultado que describe numéricamente la calidad del vertimiento realizado en el Caño el Rosario.

En este orden de ideas, la expresión para su obtención es:

$$ICEa = \sum(V_i * W_i)$$

Donde V_i es la calificación de cada parámetro multiplicada por el valor que obtuvo el mismo en el laboratorio. Y W_i es el peso que tiene este parámetro dentro del Indicador.

Los parámetros considerados y sus “pesos” dentro del indicador son los que aparecen en la tabla 9:

Tabla 9: Parámetros considerados para la evaluación del ICEa y sus “pesos”.

Parámetro	Wi
pH	0.05
OD	0.15
Temperatura	0.05
DBO	0.2
DQO	0.1
SS	0.2
Grasas y aceites	0.1
Coliformes totales	0.15

Por ejemplo para el pH, la gráfica se desarrolló de la siguiente manera: primero se consultó con la red de monitoreo ambiental, cuál es el pH promedio de los últimos 2 años del Caño el Rosario [7], y se comparó este valor con el decreto 1594 de 1984 [2] que establece los usos del agua y las disposiciones legales en cuanto a vertimientos de residuos líquidos y basados en esta información se procedió con la lógica siguiente:

Si el pH en el efluente es de 7, valor ideal para vertimientos ya que no afecta el equilibrio biológico del cuerpo receptor, el parámetro obtiene una calificación de 100% ($V_i = 100$). Pero si el valor de pH en el efluente es de 6,5 su calificación será menor, será de 90% ($V_i = 90$) (ya que un pH levemente ácido causa poco daño al ecosistema receptor). Y en un caso extremo donde el pH en el afluente es de 3, la calificación obtenida será menor al 50 % ($V_i < 50$) ya que es un valor que afecta en gran medida el pH natural del cuerpo receptor.

Así para cada uno de los parámetros analizados se construyeron correlaciones gráficas basadas en estas consideraciones de manera que se le asigne una calificación a cada dato de laboratorio que aplique al ICEa. Y finalmente se aplica

la expresión de sumatoria citada anteriormente para la obtención del valor final del mismo.

La escala de evaluación del ICEa se presenta como sigue:

- ICEa Malo, < 50
- ICEa Aceptable, [50-70]
- ICEa Bueno, [71-87]
- ICEa Excelente, > 87

Así es posible evaluar de manera sencilla, las condiciones del efluente que es dispuesto por el DIAPAC U.I. en el Caño El Rosario, sin recurrir a un análisis operacional complejo, aunque este último es necesario para la determinación de las acciones correctivas durante la operación del sistema.

Figura 7. Correlación para pH.

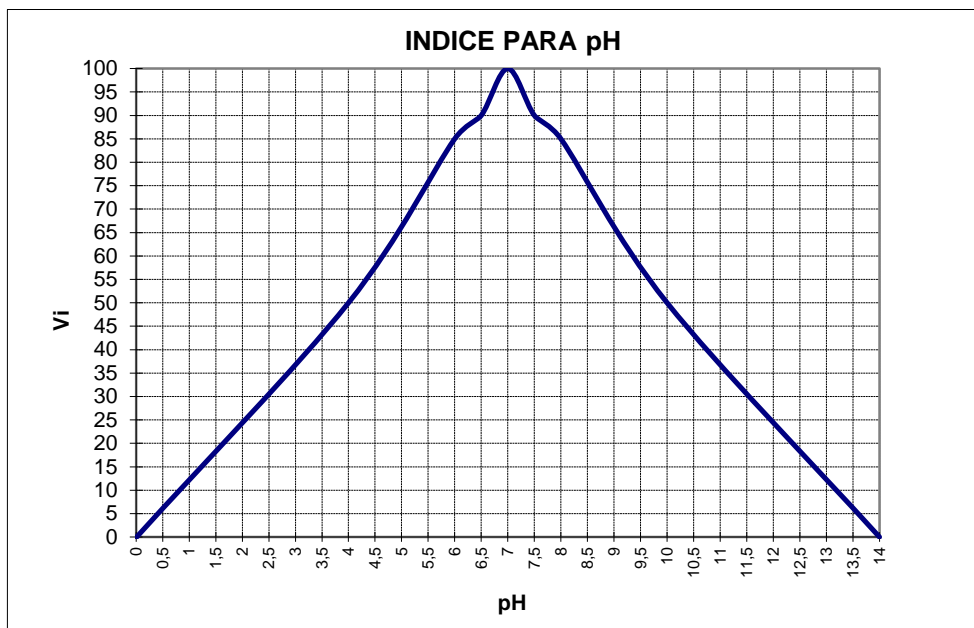


Figura 8. Correlación para Temperatura.

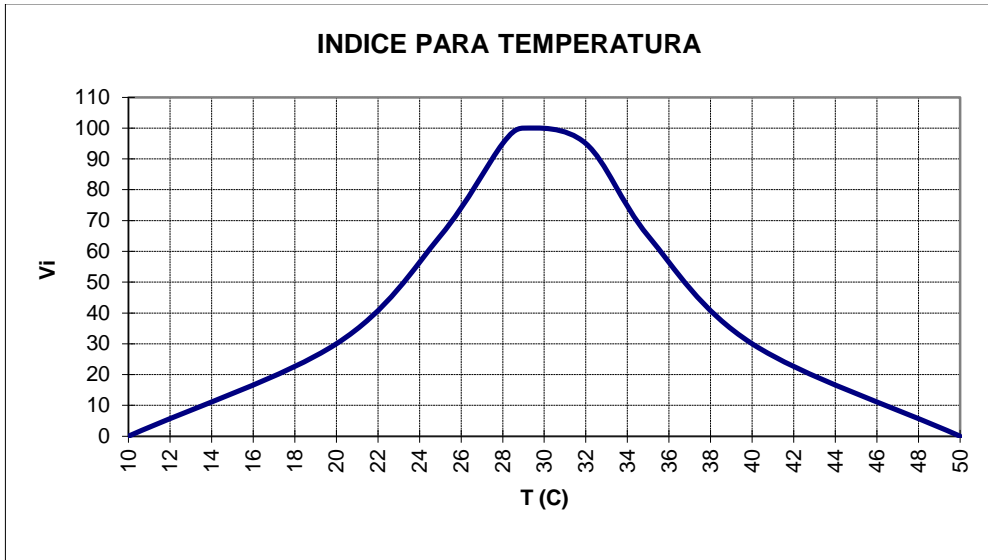


Figura 9. Correlación para oxígeno disuelto.

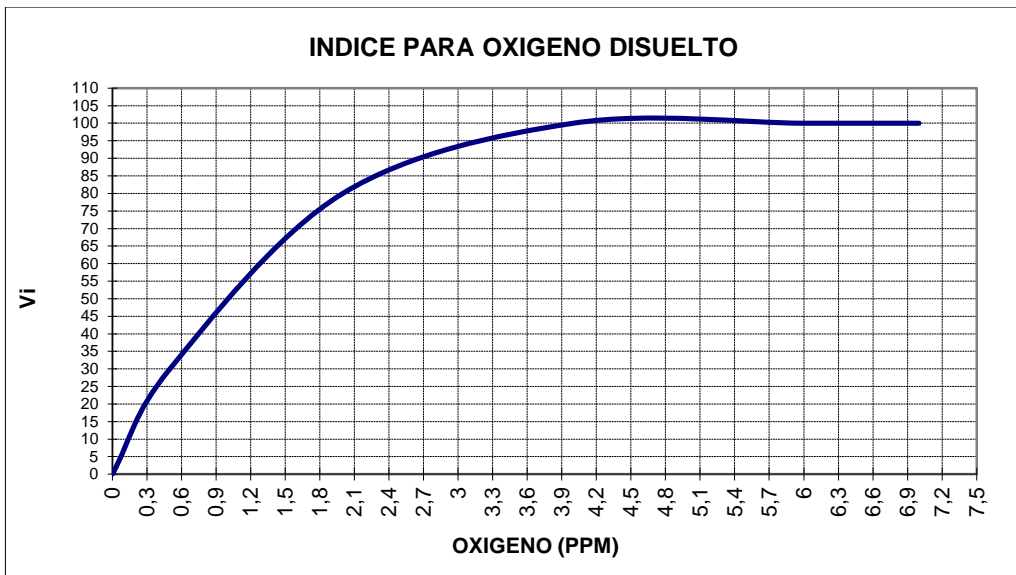


Figura 10. Correlación para Grasas y aceites.

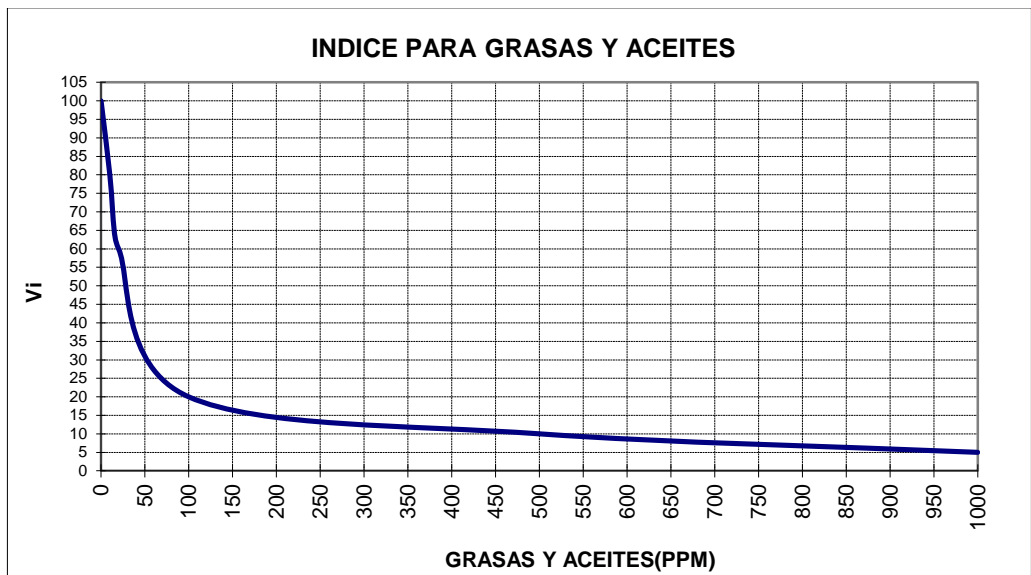


Figura 11. Correlación para DQO.

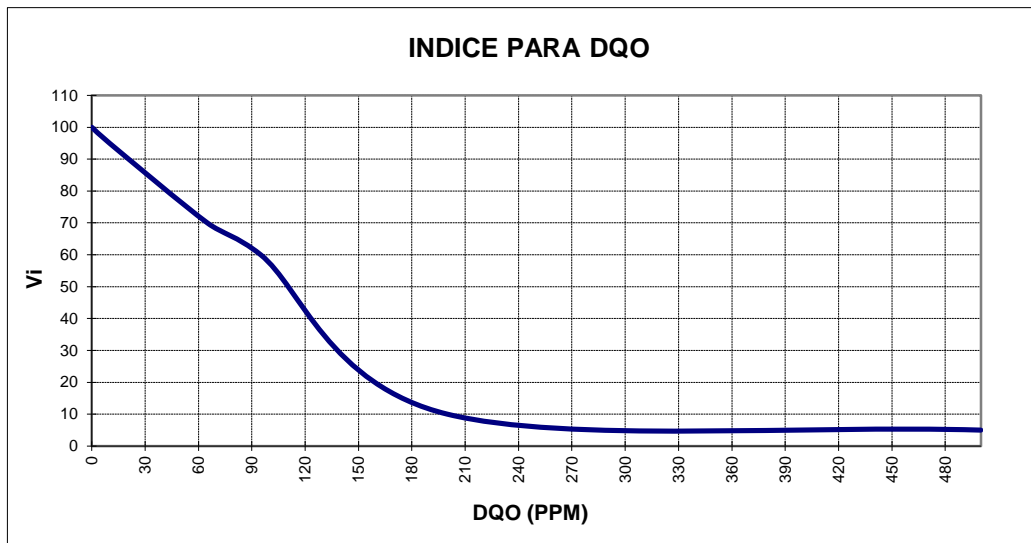


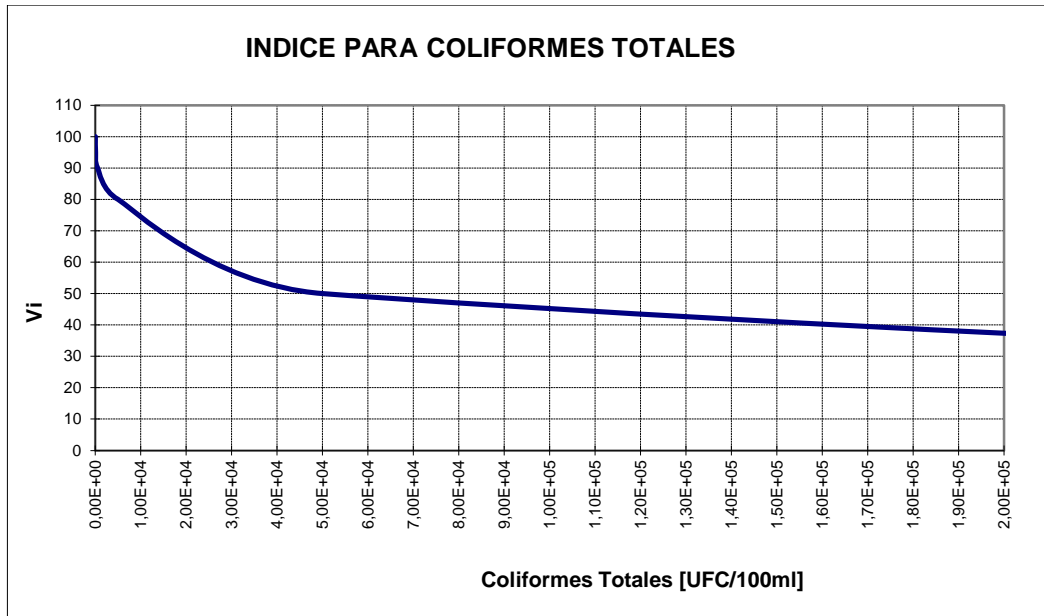
Figura 12. Correlación para DBO.



Figura 13. Correlación para sólidos suspendidos.



Figura 14. Correlación para coliformes totales.



ANEXO F. REACTORES SBR

Un sistema SBR (Secuency Batch Reactor) procesa las aguas residuales por medio de un tratamiento biológico aeróbico-anóxico, basado en la generación de lodos activados por medio de aireación y disminución de nutrientes en etapa anóxica.

El SBR es un proceso de tratamiento de aguas servidas biológico de llenado y vaciado que fue diseñado en USA como una innovación tecnológica alternativa. El proceso de tratamiento biológico es conocido como el proceso más eficiente en cuanto a costo y a eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos en aguas domésticas e industriales. El SBR ha sido exitosamente aplicado en USA y Canadá en cientos de plantas. - En su forma más simple, el SBR consiste en un estanque en el cual se suceden en forma secuencial en el tiempo diferentes procesos de ecualización, aireación y clarificación. Esto sumado a la última tecnología de biomasa, permite el tratamiento de un gran espectro de compuestos orgánicos. El SBR también permite la remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) simplemente incorporado un mezclado anaeróbico/anóxico en la etapa de llenado del estanque y cambiando on/off el soplador durante la etapa de reacción. El principio de operación de un SBR se basa en la siguiente secuencia: Llenado-Aireación-Sedimentación-Vaciado. - Normalmente las dos primeras etapas varían en duración dependiendo del flujo y la carga orgánica; las dos siguientes (Sedimentación/Vaciado) serán de duración constante (excepto en condiciones excepcionales durante peaks extraordinarios).

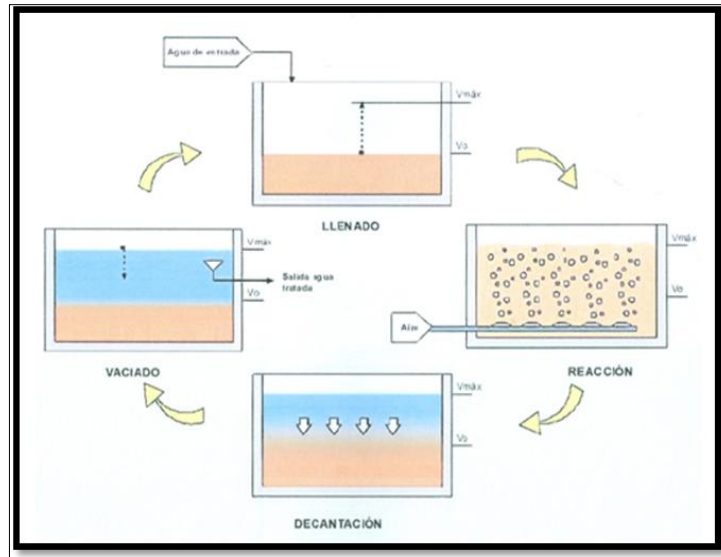
1. Etapas Del Proceso

- **Llenado:** Existen principalmente tres modalidades de llenado y cada una de ellas, depende de la estrategia operacional de la unidad, estas son:

Llenado estático, llenado con mezclado y llenado con aireación. El primero favorece la eliminación biológica del fósforo y desfavorece la formación de microorganismos filamentosos, el segundo favorece la desnitrificación en condiciones anóxicas aunque podrían presentarse condiciones anaerobias en ausencia de nitratos, y el tercero reduce el tiempo requerido para el paso de reacción en la etapa de aireación.

- **Aireación:** Durante esta etapa se completan las reacciones aeróbicas y puede lograrse la nitrificación. En esta etapa se suministrará el oxígeno suficiente para la reducción del DBO. El lodo se encontrará en la etapa endógena dado que la edad del lodo es entre 20-30 días. Esto hace que la operación sea mucho más fácil y estable en cuanto a calidad de efluente frente a cambios en las condiciones de entrada.
- **Sedimentación:** Durante este período se detienen los equipos para dar reposo absoluto al sistema y así permitir la sedimentación de los sólidos. En algunos casos una agitación moderada durante las fases iniciales de la sedimentación puede producir un efluente mejor clarificado y lodo sedimentado de mayor concentración. En un reactor SBR no existen corrientes de afluente o efluente que interfieran con el proceso de sedimentación como sí es el caso de los sistemas convencionales de lodos activados. El extender esta fase minimiza la posibilidad de que los sólidos en el agua residual floten sobre el decantador.
- **Vaciado:** Esta etapa consiste en extraer por medio del Decantador, el agua clarificada de la parte superior. Es el paso en el cual tienen mayores diferencias los fabricantes de sistemas SBR. En general, existen decantadores flotantes y fijos.
- **Vaciado de Lodo:** En esta etapa una parte del lodo activado es llevado al digestor de lodo donde continúa su proceso de degradación.

Figura 15: Modo de operación de un reactor SBR.



2. Ventajas Y Desventajas Del Proceso De Lodos Activados En Reactores SBR

Las principales ventajas y desventajas en el uso de reactores SBR a escala real reportadas por la literatura son [4, 28, 29]:

2.1. Ventajas

- Eliminación de la DBO y nutrientes.
- Control del crecimiento de microorganismos filamentosos.
- Costos bajos de instalación.
- Alta calidad del efluente aún frente a grandes variaciones de carga

- La homogenización de caudales, la sedimentación primaria (en la mayoría de los casos), el tratamiento biológico y la sedimentación secundaria pueden lograrse en un tanque reactor único.
- No existen malos olores
- Flexibilidad de operación y control.
- Mejora la sedimentación al proveer condiciones perfectamente estáticas.
- Bajos costos operacionales disminuyendo el consumo de energía innecesaria para aireación.
- La biomasa se adapta bien a las fuertes variaciones de carga de DBO y grandes variaciones de flujo.
- No se requiere recircular el lodo.
- Este sistema puede ser operado para obtener nitrificación-desnitrificación y remoción de fósforo, sin adiciones químicas, incrementando simplemente la reacción mediante la aireación o aumentando el período anaerobio según sea el caso.

2.2. Desventajas

- Al inicio de la etapa de reacción aerobia se requiere una mayor tasa de transferencia de oxígeno que en los sistemas de flujo continuo.
- Se requiere un nivel más sofisticado (en comparación a los sistemas convencionales) de las unidades de programación temporal y controles, especialmente en sistemas de gran tamaño.
- Dificultades para minimizar la descarga de espuma flotante o lodo sedimentado.

- Taponamiento potencial de los dispositivos de aireación durante ciclos operativos específicos dependiendo del sistema de aireación utilizado por el fabricante.