

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**INSTALACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE REACTORES PARA  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS POR PROCESO DE  
Lodos Activados**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**MEYNER URIEL CONDORI MAMANI**

**JULIO RUELAS YANQUE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**Puno – Perú**

**2017**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO – PUNO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**INSTALACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE REACTORES PARA  
 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS POR PROCESO DE  
 LODOS ACTIVADOS**

**TESIS PRESENTADA POR:**

**Meyner Uriel Condori Mamani**

**Julio Ruelas Yanque**



**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE: INGENIERO QUÍMICO**

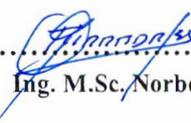
**FECHA DE SUSTENTACIÓN: 01 DE SEPTIEMBRE DEL 2016**

**APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:**

**PRESIDENTE** :   
 .....  
 Ing. M.Sc. Moisés Pérez Capa

**PRIMER MIEMBRO** :   
 .....  
 Ing. M.Sc. Lidia Ensueño Romero Iruri

**SEGUNDO MIEMBRO** :   
 .....  
 Ing. M.Sc. Salomón Ttito León

**DIRECTOR/ASESOR DE  
 TESIS** :   
 .....  
 Ing. M.Sc. Norberto Sixto Miranda Zea

**Área: Procesos industriales**

**Tema: Ingeniería de procesos**

**Línea: Diseño de equipo de procesos**

## DEDICATORIA

*A mis queridos padres: Dionisio y María Salome, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por los ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien pero más que nada, por su amor.*

*A mis hermanos: Flora Olivia, Rosa Luz, Jimmy Orestes, Libia Mizta y sus familias por haberme dado apoyo incondicional para lograr mi objetivo.*

*Meyner Uriel*

*A mis padres Emilio y Salome, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.*

*Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.*

*Julio*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar nuestro agradecimiento al Ing. M.Sc. Moisés PÉREZ CAPA, Ing. M.Sc. Lidia Ensueño ROMERO IRURI, Ing. M.Sc. Salomón TTITO LEÓN, jurados de esta Tesis. Trabajar con ello significa no dejar nunca de aprender, sin sus consejos y su constante apoyo en las revisiones, correcciones, y sugerencias técnicas que supieron dar al presente proyecto hasta su culminación.

Manifiestar nuestro sincero agradecimiento al Ing. M.Sc. Norberto Sixto MIRANDA ZEA director de tesis por su apoyo incondicional en la realización de esta tesis.

A los Administrativos de la Universidad Nacional del Altiplano en especial de la Facultad de Ingeniería Química: a Rosario del Carmen Valenzuela, Brucela Atoche, Percy Mamani, Mirian Choque y Plácido Ancasi por habernos proporcionado las facilidades en el trámite del proyecto.

A todas aquellas personas, amigos y compañeros que de un modo u otro, nos ayudaron y han confiado en la realización del proyecto.

*Los autores*

## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>11</b>
ABSTRACT .....	12
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>13</b>
<b>CAPITULO I</b>	<b>15</b>
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 OBJETIVO GENERAL .....	17
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	18
1.4 ALCANCES .....	19
1.4.1 BENEFICIARIOS .....	19
1.4.2 FINES.....	19
1.4.3 DESARROLLO .....	20
1.4.4 VARIABLES (V).....	20
1.4.5 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....	20
<b>CAPITULO II</b>	<b>22</b>
2. FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS.....	22
2.1 AGUAS RESIDUALES (AR).....	22
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	23
2.3 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL.....	24
2.4 PARÁMETROS DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS .....	26
2.4.1 MATERIA ORGÁNICA .....	26
2.4.2 OXÍGENO DISUELTO .....	28
2.4.3 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO) .....	28
2.4.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	32

2.4.5	SÓLIDOS .....	33
2.5	TRATAMIENTO BIOLÓGICO .....	34
2.6	AIREACION EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	36
2.6.1	AIREACIÓN .....	36
2.6.2	FASES DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO .....	39
2.7	PROCESO DE LODOS ACTIVADOS .....	40
2.8	TIPOS DE SEDIMENTADORES .....	42
2.8.1	TANQUES PRIMARIOS DE SEDIMENTACIÓN .....	44
2.9	MÉTODOS DE DISEÑO Y SELECCIÓN .....	45
2.9.1	EVALUACIÓN PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR AIREADOR RECTANGULAR .....	45
2.9.2	EVALUACION PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR SEDIMENTADOR .....	46
2.9.3	EVALUACIÓN DE LODOS ACTIVADOS DE MEZCLA COMPLETA SIN RECIRCULACIÓN .....	50
2.9.3.1	ESQUEMA DEL FLUJO DE MEZCLA COMPLETA SIN RECIRCULACIÓN .....	51
2.9.4	CANTIDAD MÁSCA TRANSFERIDO DEL GAS DE AIRE AL AGUA(N) .....	56
2.9.5	EVALUACION PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR SEDIMENTADOR DE LODOS ACTIVADOS .....	64
2.9.6	EVALUACIÓN DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS SIN RECIRCULACIÓN .....	68
2.9.7	EVALUACIÓN DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS CONRECIRCULACIÓN .....	72
2.10	VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES DE DISEÑO .....	76
2.10.1	EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE DIMENSIONAMIENTO DEL SEDIMENTADOR CILINDRICO .....	76
2.10.1.1	EL ÁREA REQUERIDA PARA CLARIFICACIÓN: .....	76

2.10.1.2	EL ÁREA REQUERIDA PARA ESPESAMIENTO: .....	76
2.10.1.3	DETERMINACIÓN DEL TIEMPO PARA ALCANZAR LA CONCENTRACIÓN (Cu) DEL LODO: .....	77
2.10.1.4	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN ( $V_s$ ):.....	78
2.10.1.5	TASA DE CLARIFICACIÓN ( $Q_o$ ): .....	78
2.10.1.6	ÁREA DEL TANQUE REACTOR ( $A_R$ ):.....	78
2.10.1.7	DIÁMETRO DEL TANQUE REACTOR (D): .....	78
2.10.1.8	FLUJO DE SÓLIDOS:.....	79
2.10.1.9	CARGA DE SÓLIDOS:.....	79
2.10.1.10	CARGA HIDRÁULICA (CH):.....	79
2.10.1.11	ALTURA DEL REACTOR (CILÍNDRICO) (H):.....	79
2.10.1.12	ALTURA DEL DISEÑO DEL REACTOR CILÍNDRICO ( $H_D$ ): ...	80
2.10.1.13	DIÁMETRO DE LA ZONA CILÍNDRICA DE CLARIFICACIÓN ( $D_1$ ):	80
2.10.1.14	ALTURA DE LA ZONA DE CLARIFICACIÓN ( $H_1$ ).....	80
2.10.1.15	DIÁMETRO DE LA ZONA DE INGRESO DEL AFLUENTE ( $D_2$ )	81
2.10.1.16	ALTURA DE LA ZONA DE INGRESO DEL AFLUENTE ( $H_2$ ) ..	81
2.10.1.17	VOLUMEN DEL REACTOR ( $V_R$ ) .....	81
2.10.1.18	VOLUMEN DE LA ZONA CÓNICA PARA LODOS CONCENTRADOS ( $V_c$ ) .....	81
2.11	EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS COEFICIENTES CINÉTICOS .....	82
2.12	ESPECIFICACIONES Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.....	84
2.12.1	DETERMINACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DE LOS REACTORES .....	85
2.12.2	REACTOR AIREADOR .....	85
2.12.3	REACTOR SEDIMENTADOR.....	85
2.12.4	REACTOR ESTABILIZADOR.....	86

2.12.5	ESTRUCTURA SOPORTE PARA LOS REACTORES .....	86
2.12.6	INSTRUCCIONES PARA EL USO DEL EQUIPO .....	87
<b>CAPITULO III</b>		<b>88</b>
3.	CÁLCULO DE INGENIERÍA .....	88
3.1	DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR AIREADOR .....	88
3.2	DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR SEDIMENTADOR .....	89
3.3	CONSUMO DE OXÍGENO EN EL AIREADOR (C.O) .....	91
3.4	SUMINISTRO DE AIRE REQUERIDO ( $C_{AIRE}$ ) .....	91
3.5	CONSUMO UNITARIO DE AIRE (C.U).....	92
3.6	TASA REAL DE TRANSFERENCIA DE OXIGENO DEL EQUIPO AIREADOR (N).....	92
3.7	POTENCIA REQUERIDA PARA LA AIREACIÓN ( $P_A$ ) .....	93
3.8	NIVEL DE POTENCIA EN EL REACTOR DE AIREACIÓN (NP) .....	93
3.9	POTENCIA DEL COMPRESOR (P) .....	93
3.10	EVALUACIÓN DEL REACTOR DE LODOS ACTIVADOS DE MEZCLA COMPLETA SIN RECIRCULACIÓN.....	95
3.11	RESULTADOS DE PRUEBAS EN MARCHA DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS CON LODOS ACTIVADOS .....	103
3.12	COSTOS DEL EQUIPO .....	107
3.12.1	PRESUPUESTOS Y COSTOS.....	107
3.12.1.1	PROYECTO.....	107
3.12.2	COSTOS.....	108
3.12.2.1	COSTOS DIRECTOS.....	108
<b>RECOMENDACIONES</b>		<b>111</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>112</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>114</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 OPERACIONALIZACION DE VARIABLES.....	21
TABLA 2 COMPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS SIN TRATAMIENTO.....	25
TABLA 3 CATEGORIAS DE CONTAMINACIONES CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES SEGÚN EPA. ....	26
TABLA 4 VALORES DE SATURACIÓN DE OXÍGENO PARA AGUA DESTILADA EN CONDICIONES NORMALES.....	38
TABLA 5 CONSTANTES DE LA LEY DE HENRY PARA DIFERENTES GASES SOLUBLES EN EL AGUA .....	57
TABLA 6 COEFICIENTES CINÉTICOS A 20°C, PARA EL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS .....	67
TABLA 7 VALORES DE COEFICIENTES CINÉTICOS PARA TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE DIFERENTES SUSTRATOS ORGÁNICOS.....	68
TABLA 8 DATOS EXPERIMENTALES DBO, DQO, $\theta=0C$ , X EN AGUAS RESIDUALES AIREADAS.....	82
TABLA 9 REMOCION DEL DQO Y DEL TIEMPO DE AIREACION PARA PRUEBAS DE DISEÑO Y REACTORES DE LODOS ACTIVADOS EN MARCHA	103
TABLA 10 REMOCION DEL DBO Y DEL TIEMPO DE AIREACION PARA PRUEBAS DE DISEÑO Y REACTORES DE LODOS ACTIVADOS EN MARCHA	104
TABLA 11 REMOCION DE (SST) Y TIEMPO DE SEDIMENTACION PARA PRUEBAS DE DISEÑO Y EN REACTORES DE LODOS ACTIVADOS .....	105
TABLA 12 A1.COSTOS DEL EQUIPO DE REACTORES Y REACTIVOS. ....	108
TABLA 13 A2. COSTOS DE ACCESORIOS E INSTRUMENTOS. ....	109
TABLA 14 COSTOS INDIRECTOS .....	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 COMPORTAMIENTO DE LA DBOC y DBON EN EL TIEMPO.....	31
FIGURA 2 CLASIFICACIÓN DE LOS SÓLIDOS EN LAS AGUAS RESIDUALES	33
FIGURA 3 ESQUEMA DE UN TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES .....	35
FIGURA 4 GRAFICO PARA LA OBTENCIÓN DE $k$ Y $K_s$ .....	83
FIGURA 5 GRAFICO PARA LA OBTENCIÓN DE $Y$ y $K_d$ .....	83
FIGURA 6 ESQUEMA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR PROCESO DE LODOS ACTIVADOS .....	84
FIGURA 7 GRAFICO DE DQO CON RESPECTO AL TIEMPO .....	104
FIGURA 8 GRAFICO DE DBO CON RESPECTO AL TIEMPO.....	105
FIGURA 9 GRAFICO DE SST CON RESPECTO AL TIEMPO .....	107

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: VALORES DE SATURACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO, EN AGUA, EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS A 760 MMHG <sup>(+)</sup> .....	114
ANEXO B: EL PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA .....	115
ANEXO C: HOJA DE COSTOS DE EQUIPO .....	116
ANEXO D: DIAGRAMA DE SISTEMA DE REACTORES .....	117
ANEXO E: PRÁCTICAS Y PRUEBAS DEL SISTEMA DE REACTORES PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR PROCESO DE LODOS ACTIVADOS	118

## RESUMEN

El problema ecológico y ambiental que surge por la evacuación no tratada de efluentes de aguas residuales urbanas e industriales a diferentes fuentes receptoras, que por sus características posteriores producen la contaminación ambiental, con componentes de sólidos orgánicos e inorgánicos constituye un problema ambiental. En base a esta problemática, se logró mediante pruebas y puestas en marcha en el sistema; la remoción de sólidos en suspensión total (SST), sólidos volátiles en suspensión (SSV), y demanda química de oxígeno (DQO), se evaluó el nivel de remoción del sustrato de materia orgánica soluble en el agua residual urbana, obteniendo los siguientes resultados; DQO, entro con una concentración de 510 mg/L, finalizando las pruebas se logró bajar a 205 mg/L. DBO, inicio con 250 mg/L, al finalizar 88 mg/L. SST, comenzamos con 2200 mg/L, finalizando con 20 mg/L. Se realizaron en un tiempo de 8 horas corridas, en intervalos de hora y media para tomar muestras y para un volumen de agua residual de 100 L. La investigación es de tipo no experimental ya que fundamentara los principios de diseño y el tratamiento del agua residual por procesos de lodos activados y aplicar en el dimensionamiento de los reactores competentes de la planta de tratamiento de aguas residuales con diseño a escala de laboratorio. Se hacen los cálculos de ingeniería y la validación correspondiente de las fórmulas. Se realizaron diversas pruebas de estos reactores con lodos activados (rumen de ganado vacuno), y aguas residuales urbanas, para hacer estos cálculos como para su validación y funcionamiento.

**Palabras claves:** Aguas residuales, Lodos activados, Principios de diseño, Sistema de reactores, Tratamiento.

## ABSTRACT

The environmental and ecological problem that arises from the untreated evacuation of urban and industrial wastewater to different receiving sources, which, due to their subsequent characteristics, causes environmental pollution with organic and inorganic solids components constitutes an environmental problem. Based on this problem, it was achieved through testing and commissioning in the system; the removal of solids in total suspension (SST), volatile solids in suspension (SSV), and chemical oxygen demand (COD), The level of removal of the soluble organic matter substrate in urban wastewater was evaluated, obtaining the following results; COD, entered with a concentration of 510 mg / L, finalizing the tests was achieved lower to 205 mg / L. BOD, starting at 250 mg / L, at the end of 88 mg / L. SST, we started with 2200 mg / L, ending with 20 mg / L. Were carried out in a time of 8 hours, in hour and a half intervals to take samples and for a volume of residual water of 100 L. There search is of non-experimental type since it bases the principles of design and treatment of the wastewater by activated sludge processes and applied in the dimensioning of the competent reactors of the wastewater treatment plant with laboratory scale design. The engineering calculations and the corresponding validation of the formulas are made. Various tests were carried out on these reactors with activated sludge (cattle rumen) and urban wastewater to perform these calculations for validation and operation.

**Keywords:** Sewage water, Muds activated, Design principles, System of reactors, Treatment.

## INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales de origen urbano e industrial para el proceso de tratamiento debe considerar nuevas tecnologías de acuerdo a sus características Físico-Químicas, Biológicas y de más propiedades propias de las aguas residuales (A.R); parámetros que deben ser evaluados para proponer su tratamiento y de ésta forma obtener los principios de diseño y dimensionamiento técnico de los respectivos reactores para el proceso de tratamiento, el presente objetivo que se plantea es para evitar el problema de contaminación del medio ambiente, para que de esta manera lograr agua con características de calidad natural apto para su posterior uso. Del análisis cuidadoso realizado para las aguas residuales surge la necesidad de identificar y desarrollar un proceso adecuado para el tratamiento de las aguas residuales urbanas, proposición que persigue el presente proyecto de investigación por medio de la tecnología de “Tratamiento de Agua Residuales por Proceso de lodos activados para Remoción del Sustrato de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos en Suspensión Volátiles (SSV)” y Sólidos en Suspensión Total (SST); parámetros que son Indicadores de la calidad del agua residual tratada. (ROMALHO RUBENS, S. 2003)

El proceso de lodos activados es un sistema de tratamiento por aireación en medio suspendido por un periodo de tiempo de la biomasa Carbonacea y Nitrogenada, el que debe ser reducido como contenido de materia orgánica y ser separada del agua en forma de lodos floculantes producto del proceso de tratamiento, sustrato que debe ser controlado ya que éstos lodos están formados por una población de microorganismos heterogéneos que cambian la calidad y composición de la aguas residuales y de las condiciones ambientales por un proceso biológico, (MIRANDA NORBERTO 2011).

El presente Proyecto de Investigación persigue como objetivo fundamentar los principios de diseño de tratamiento del agua residual por procesos de lodos activados y aplicar en el dimensionamiento de los reactores competentes de la planta de tratamiento de aguas residuales con diseño a escala de laboratorio; así mismo el diseño del proceso de lodos activados se desarrollará en un medio de aireación difusa, seguido del proceso de sedimentación y estabilización de lodos, con evacuación de agua residual tratada, el sistema de tratamiento es de flujo continuo el que será sin y con reciclado de lodos biológicos; pruebas que se seleccionaran en base al mejor rendimiento en la remoción del DQO, SSV y SST, así mismo para el proceso de tratamiento del agua residual es de importancia evaluar los parámetros de la relación alimento/biomasa, sustrato DQO/SSV

y DQO/SST, carga orgánica (C.O), la edad de los lodos, tiempo de residencia hidráulica en los reactores de aireación, sedimentación y estabilización de lodos; parámetros que permiten evaluar el nivel de tratamiento según requerimiento neto de oxígeno disuelto proporcionado por los aireadores difusos. El diseño y dimensionamiento de los reactores va dirigido a simular el proceso de mayor calidad del agua residual urbano en función a la concentración del DQO, SSV y SST; durante la transformación del sustrato orgánico soluble e insoluble en forma coloidal o suspendido en sólidos biológicos flocculantes, las que son separados en el reactor sedimentador de lodos y que deben ser concentrados y estabilizados para someterlas a una posterior disposición final en forma de desechos sólidos y por otra parte tener un efluente de agua residual tratada libre de DBOC (Carbonacea), DBON( Nitrogenada) y con mínima concentración de (SSV) y (SST), (MIRANDA NORBERTO. 2011).

## CAPITULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, OBJETIVOS, JUSTIFICACION Y ALCANCES

#### 1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

##### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es el recurso de vital importancia en la vida del hombre y al ser consumido y utilizado en las diferentes actividades del hombre surge cambios y adopciones de patrones debido al desarrollo tecnológico no acorde con la realidad ecológica ambiental y de su formación cultural en el que habita el hombre; problema ecológico y ambiental que surge por la evacuación no tratada de efluentes de aguas residuales urbanas e industriales a diferentes fuentes receptoras, que por sus características posteriores producen la contaminación ambiental por aporte de componentes contaminantes en el agua residual. Los vertidos de aguas residuales sin tratamiento Físico-Químico y bacteriológico según su procedencia producen una serie de efectos nocivos sobre los recursos bióticos receptores que en muchos casos son fuentes de subsistencia del poblador que habita el entorno del sistema natural del agua, (ROMERO, R. J.2002).

El problema del vertido de aguas residuales al medio ambiente natural, con componentes de sólidos orgánicos e inorgánicos constituye un problema ambiental, toda vez que se rompe el ciclo natural del agua por la descomposición de la materia orgánica disuelto en el agua ya sea en medio aeróbico o anaeróbico componentes que contaminan las fuentes de recepción del agua y éstos a su vez favorecen la generación de microorganismos letales a la salud humana y la eutrofización del medio receptor, problema latente que se debe solucionar por medio del tratamiento de aguas residuales (LAWRENCE Y Mc CARTI. (1998).

Para desarrollar procesos de tratamiento de las aguas residuales, se debe tener la selectividad de diferentes parámetros contaminantes, en el que la evaluación de parámetro Físico-Químicos y Biológicos indicaran el nivel de incidencia de la contaminación hídrica-Biológica; dentro de estos parámetros tienen importancia la concentración de la Demanda Química del Oxígeno (DQO) y la concentración de microorganismos expresados por valores de Sólidos en Suspensión Volátiles (SSV) y Sólidos en Suspensión Totales (SST) (RAMALHO R.S. 2003).

Una de las alternativas para el tratamiento de aguas residuales con concentraciones contaminantes de materia orgánica Carbonacea y Nitrogenada, es el tratamiento por el “Proceso de Lodos Activados”, cuyo nivel de contaminación y tratamiento son evaluados por medio de la concentración de la DQO, SSV y SST; en los afluentes y efluentes de los reactores del proceso de tratamiento por lodos activados; en el que inicialmente se requiere la operación de aireación en su respectivo reactor aireador para formar los Flocs biológicos, que posteriormente son separados del agua cruda en el reactor sedimentador con la obtención de Lodos Sedimentados y de Flujo de agua tratada que fluye al reactor de Estabilizador de lodos y evaluación en el efluente agua residual tratada con concentraciones mínimas de solubilidad de materia orgánica (OROZCO J.A. 2005).

El diseño de tratamiento del agua residual por proceso de lodos activados es por flujo batch; con proceso de tratamiento por acción bacteriológica para transformar el sustrato orgánico soluble e insoluble del agua residual, que posteriormente son evaluados en forma de lodos biológicos en el sistema de reactores de aireación de sedimentación de coloides o sólidos en suspensión biológica; y reactor de estabilización de lodos, en el que se obtiene efluente agua residual tratada. Durante éste proceso se debe realizar evaluaciones en los afluentes y efluentes en los diferentes reactores, para evaluar las concentraciones de los sustratos de la DQO, SSV y SST, indicadores del nivel de tratamiento del agua residual y los lodos generados en cada reactor se deben someter a una posterior disposición final en forma de desechos de residuos sólidos.

El presente Proyecto de Investigación propone el diseño de reactores para el tratamiento de aguas residuales urbanas por el proceso de lodos activados, para

obtener agua residual tratada que cumplan con los estándares de calidad ambiental del agua.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GENERAL

- Instalar y evaluar el sistema de reactores para tratamiento de aguas residuales por proceso de lodos activados según la calidad de remoción de sólidos en suspensión total (SST), sólidos volátiles en suspensión (SSV) y demanda química del oxígeno (DQO).

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el diseño a nivel de tamaño de laboratorio de los reactores: Aireador rectangular con flujo difuso para airear agua residual cruda, sedimentador tubular de flujo radial para sedimentar lodos floculados del agua residual tratada y reactor homogenizador rectangular para estabilizar lodos biológicos y emisión del efluente de agua residual tratada por proceso de lodos activados.
- Evaluar el nivel de remoción del sustrato de materia orgánica soluble en agua, expresado por concentración de la DQO, SSV y SST; en los afluentes y efluentes de los reactores, (aireador difuso, sedimentador tubular para lodos y homogenizador para lodos biológicos), y emisión del efluente agua residual tratada, para el sistema con flujo continuo del agua residual urbano sometido a tratamiento por proceso de lodos activados.
- Implementar el laboratorio de tecnología de aguas de la Facultad de Ingeniería Química con la instalación y operatividad de los reactores, aireador de flujo de aire difuso, sedimentador tubular radial y homogenizador para lodos biológicos y emisión de efluentes de agua residual tratada, para evaluar el nivel de remoción de sustratos de la DBO, SSV y SST; de aguas residuales urbanas tratadas por proceso de lodos activados.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

Las innovaciones tecnológicas en el tratamiento de aguas residuales cada vez es más exigente en su control del agua residual para su evacuación a diferentes fuentes receptoras; fundamento tecnológico que desafía a que el diseño y dimensionamiento de los diferentes reactores integrantes del proceso de tratamiento Físico-Químico, Biológico de aguas residuales deben ser experimentados y evaluados a nivel de micro procesos en laboratorio, teniendo como expectativa el cambio de métodos tradicionales por otros que sean técnicamente versátiles en el tratamiento de aguas residuales (MACKENZIE – MASTEN 2005).

El consumo del agua y su uso en diferentes actividades antropogénicas tiene su cambio en sus propiedades y calidad al ser evaluados como aguas residuales desde diferentes fuentes puntuales y/o naturales, en el cual los parámetros Físico-Químicos y Biológicos de la solubilidad de la materia orgánica Carbonácea y Nitrogenada y de sólidos en suspensión, son indicadores del nivel de la contaminación de fuentes de agua, en que pueden ser evaluados por medio de la determinación de la concentración de sustratos de la DQO, SSV y SST; en diferentes puntos del flujo del fluido agua residual.

Los procesos de tratamiento de aguas residuales tienen como objetivo principal la degradación de la materia orgánica e inorgánica solubilizado en el agua, para que de esta forma tener como producto agua residual tratada exenta cada vez en menor concentración del contaminante de materia orgánica. El nivel de contaminación del agua residual urbano son evaluados por la determinación del nivel de concentración de los sustratos de la DQO, SSV y SST; en el flujo del fluido del agua residual.

El presente trabajo de investigación, propone el desarrollo del tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la evaluación de reactores para el “Proceso de Lodos Activados”, poner reactivos con el propósito de remocionar el sustrato de materia orgánica disuelto en el agua residual que se manifiestan en el Nivel de concentración y de los sustratos de DQO, SSV y SST; en el afluente y efluente del agua residual urbano con flujo continuo en los reactores aireador con flujo de aire difuso, reactor sedimentador para lodos procedentes del agua residual tratado y en el reactor homogenizador para estabilizar lodos

biológicos y la emisión del flujo del efluente del agua residual tratado. Así mismo la evaluación del DQO nos indica el nivel de la degradación de la materia orgánica Carbonacea y Nitrogenada y otros componentes solubles en el agua por proceso de oxidación por los microorganismos activados por aireación, procesados en su mismo seno y la concentración de los SSV nos indica el nivel de la población de microorganismos desarrollados por la operación de aireación que degradan la materia orgánica, y son obtenidos como producto de lodos biológicos, y de esta manera obtener como producto agua residual tratada, exento de materia orgánica disuelto y libre de microorganismos biológicos (ROMERO, R. J. 2002).

## **1.4 ALCANCES**

El presente proyecto para el tratamiento de aguas residuales urbanas por proceso de lodos activados para la remoción de DBO, DQO Y SSV, propone a desarrollar los alcances en los fines de:

### **1.4.1 BENEFICIARIOS**

Con la implementación física y puesta en funcionamiento, la planta de tratamiento de aguas a nivel de laboratorio, comprendidos por los reactores; aireador, sedimentador y estabilizador para el tratamiento de aguas residuales urbanas por el proceso de lodos activados se busca beneficiar el laboratorio de tecnología de aguas de la Facultad de Ingeniería química de la universidad Nacional del Altiplano Puno (UNA - PUNO).

### **1.4.2 FINES**

Se persigue cumplir con los fines de:

- Fines académicos: Desarrollar evaluaciones de Ingeniería en tratamiento de aguas residuales para determinar las especificaciones, diseño, dimensionamiento y funcionamiento de los equipos reactores para el tratamiento de aguas residuales ´por proceso de lodos activados, cuyos contenidos académicos se tienen comprendidos en

asignaturas del programa curricular de la Escuela Profesional de Ingeniería Química.

- Fines Tecnológicos: Proponer tecnologías ambientales sobre tratamiento de aguas residuales urbanas por proceso de lodos activados con metodologías de flujo continuo con circulación directa y sin recirculación de lodos.

#### 1.4.3 DESARROLLO

- Generar desarrollo académico, tecnológico y de investigación, para: estudiantes, egresados, profesionales y personal técnico de la escuela profesional de Ingeniería Química e Ingenierías afines.
- Generar desarrollo de servicio técnico a instituciones y empresas avocadas al proceso de tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales.

#### 1.4.4 VARIABLES (V)

En el tratamiento de aguas residuales (A.R) se tienen:

- Variable Independiente ( $V_i$ ) = ( Causa)
  - Lodos activados en aguas residuales (A.R)
- Variable dependiente ( $V_d$ ) = ( Efecto)
  - Remoción de la ( DQO), (SSV) y (SST) en (A.R)

#### 1.4.5 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

En la tabla 1 se exponen la operacionalización de las variables para desarrollar el proyecto del diseño, dimensionamiento y funcionamiento de los reactores para el tratamiento de aguas residuales por el proceso de lodos activados.

**TABLA 1**  
**OPERACIONALIZACION DE VARIABLES**

VARIABLES	DIMENSIÓN	INDICADOR	INDICES
(Vi) 1. Lodos activados	1.1 Aireador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reactor: Forma... Tamaño...</li> <li>- Caudal (A.R).....</li> <li>- Oxígeno disuelto (O.D)...</li> <li>- Transferencia (O.D)</li> <li>- Tasa difusión</li> <li>- Coeficiente transferencia (K)</li> <li>- Tiempo residencia(A.R)</li> <li>- Tipo aireador</li> <li>- DQO/SSV Afluente... Efluente...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rectangular</li> <li>-(m<sup>3</sup>/s)</li> <li>-(mg/L)</li> <li>-(g/m<sup>3</sup>)</li> <li>-(m<sup>3</sup>/sm<sup>3</sup>)</li> <li>-(h<sup>-1</sup>)</li> <li>-(min)</li> <li>-Difuso</li> <li>-(mg/L)</li> </ul>
	1.2 Sedimentador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reactor: Forma tamaño</li> <li>- Relación: Alimento/ microorganismos (M.O)/ (SSV)</li> <li>- Caudal (A.R. Aireada)</li> <li>- Balance materia: afluente – efluente – generación – acumulación</li> <li>- Tiempo residencia.</li> <li>- Lodos activados: recirculación Circulación</li> <li>- Edad de los lodos.</li> <li>- DQO/SSV: Afluente... Efluente...</li> <li>- Lodos activados</li> <li>- Eficiencia Reactor</li> <li>- Reactor: Forma Tamaño Lodos finales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cilíndrico</li> <li>-(d<sup>-1</sup>)</li> <li>-(m<sup>3</sup>/s)</li> <li>-(SSV-g)</li> <li>-(h)</li> <li>-(h/m<sup>3</sup>)</li> <li>-(h)</li> <li>-(h/m<sup>3</sup>)</li> <li>-(mg/L)</li> <li>-(mg/L)</li> <li>-(Kg/d)</li> </ul>
	1.3 Tanque estabilizador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DQO/SSV</li> <li>- Caudal efluente (A:R), tratada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-(%)</li> <li>-Cilíndrico</li> </ul>
(Vd) Remoción 1. DQO/ SSV	<b>1.1</b> DQO SSV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentración en c/ Reactor Afluente.....</li> <li>- Efluente.....</li> <li>- Rendimiento remoción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-(mg/L)</li> <li>-(mg/L)</li> <li>-(%)</li> </ul>

Fuente: Elaborado por los ejecutores de la tesis.

## CAPITULO II

### FUNDAMENTOS TECNOLOGICOS, MARCO TEORICO Y MARCO CONCEPTUAL

#### 2. FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS

##### 2.1 AGUAS RESIDUALES (AR)

Comúnmente utilizado en plural, aguas residuales, define un tipo de agua que está contaminado con sustancias fecales y orina, procedentes de vertidos orgánicos humanos o animales de desechos industriales y de servicio urbano. Su importancia es tal que requiere sistemas de canalización, tratamiento y desalojo. Su tratamiento nulo o indebido genera graves problemas de contaminación ambiental. (LEVIN, M. 2002).

Las aguas residuales también se les llaman aguas servidas. Son residuales, habiendo sido usada el agua, estas constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; son negras por el color que habitualmente tienen, y cloacales porque son transportadas mediante cloacas (del latín cloaca, alcantarilla), nombre que se le da habitualmente al colector. Algunos autores hacen una diferencia entre aguas servidas y agua residuales en el sentido que las primeras solo provendrían del uso doméstico y las segundas corresponderían a la mezcla de aguas domesticas e industriales. En todo caso, están constituidas por aquellas aguas que son conducidas por el alcantarillado e incluyen, a veces, las aguas de lluvia y las infiltraciones de agua del terreno. (ROMALHO RUBENS, S. 2003).

Las aguas residuales pueden estar contaminadas por el desecho urbano y de los variados procesos industriales. Las composiciones y su tratamiento pueden

diferir mucho de un caso a otro, por lo que en los residuos industriales es preferible la depuración en el origen del vertido que su depuración conjunta posterior (AWWA, Research, fundation, 1991).

Toda agua residual debe ser tratada tanto para proteger la salud pública como para preservar el medio ambiente. Antes de tratar cualquier agua residual debemos conocer su composición. Esto es lo que se llama caracterización del agua, que permite conocer, que elementos químicos y biológicos que están presentes y las que nos dan la información necesaria para que los profesionales expertos en tratamiento de aguas puedan diseñar una planta apropiada al agua servida que se está produciendo.(AWWA, Research, fundation, 1991).

Una planta de tratamiento de aguas residuales debe tener como propósito eliminar toda contaminación física, química y bacteriológica del agua que pueda ser nociva para los seres humanos, la flora y la fauna; de manera que el agua sea dispuesta en el ambiente 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.

## **2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**

El agua residual doméstica fresca y aeróbica tiene el olor del kerosén. Las aguas residuales sépticas son más ofensivas al sentido del olfato. Las frescas tienen un color gris característico. Las sépticas son negras. Este color se debe a la precipitación de sulfuro de hierro. Las temperaturas de las aguas residuales oscilan, normalmente, entre 10 y 20° C. En general la temperatura de un agua residual será mayor que la del suministro de agua, debido a la adición de agua tibia de los hogares y al calentamiento dentro del sistema de drenaje de la estructura (ROMALHO RUBENS, S. 2003).

Un metro cúbico de agua residual aproximadamente contiene' unos 500g de sólidos. La mitad, de estos estará, como los compuestos de calcio, sodio y los orgánicos solubles. Los restantes serán insolubles. La fracción insoluble consiste de material que se sedimenta y sale, en condiciones tranquilas (sólidos sedimentables). Los restantes permanecerán en suspensión durante un tiempo muy largo (sólidos suspendidos). El resultado es un agua residual turbia.

La cantidad de sustancias químicas presentes en las aguas residuales es casi ilimitada. Con frecuencia, estos tipos de sustancias se conocen por el nombre de la prueba que se usa para medirlos. El análisis de demanda bioquímica de oxígeno  $DBO_5$ , es un caso ilustrativo. Otra prueba muy relacionada es la demanda química de oxígeno (DQO), (ROMERO, R. J. 2002).

Grites (2000) indica, mediante el análisis de DQO se determina el equivalente de oxígeno de la materia orgánica que pueda oxidar un oxidante químico energético. La DQO de un desecho, en general, será mayor que la  $DBO_5$ , ya que hay compuesto susceptibles de oxidarse más química que biológicamente. La  $DBO_5$  normalmente es menor que la  $DBO_5$  total, y esta es menor que la DQO, excepto cuando el residuo es totalmente biodegradable.

El análisis de DQO y del  $DBO_5$  sirve de apoyo en el control de operaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales. El nitrógeno total de Kjeldahl (NTK) es una medida del nitrógeno orgánico y amoniacal total en el agua residual. Es una medida de la disponibilidad de nitrógeno como formador de células, así como de la demanda potencial de oxígeno nitrógeno que se debe satisfacer.

Por otro parte el nitrógeno es un elemento esencial para la materia viviente. Se forma naturalmente en el suelo, el agua y el aire, hallándose en muchos compuestos, tales como el amoníaco y los nitratos. El amoníaco se halla presente en las heces y orina del hombre y los animales. Esta penetra en el suelo desde los pozos sépticos, corrales y galpones donde se almacena estiércol, posteriormente, los microorganismos lo transforman en nitratos (ROMALHO RUBENS, S. 2003).

### **2.3 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL**

Los procesos industriales generan una variedad de contaminantes en las aguas. Las características y concentraciones de los contaminantes varían mucho de una industria a otra. La Environmental Protection Agency (EPA) estadounidense ha agrupado los contaminantes en tres categorías: convencionales, no convencionales y prioritarios; los primeros y los segundos se enumeran en la tabla (2) y (3).

Debido a la variedad de industrias y concentraciones de contaminantes, solo podemos presentar una perspectiva general de las características. En la tabla 2 se ve un muestreo de contaminantes convencionales en unas cuantas industrias.

**TABLA 2**  
**COMPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS SIN TRATAMIENTO**

Componentes	Diluido (mg/L)	Intermedio Excepto los sólidos (mg/L)	Concentrado Sedimentables (mg/L)
Alcalinidad (como CaCO <sub>3</sub> )	50	100	200
DBO <sub>5</sub> (como O <sub>2</sub> )	100	200	300
Cloruro (Cl)	30	50	100
DQO (como O <sub>2</sub> )	250	500	1000
Sólidos suspendidos (SS)	100	200	350
Sólidos sedimentables (en mg. L <sup>-1</sup> )	5	10	20
Sólidos disueltos totales (SDT)	200	500	1000
Nitrógeno total de kjeldahl (NTK) (como N <sub>2</sub> )	20	40	80
Carbono orgánico total (COT) (como C)	75	50	300
Fosforo total (como P)	5	10	20

\*Esta alcalinidad es la contribución de aguas. Se debe sumar a la alcalinidad natural en el suministro de agua.

Fuente: ROMERO, R. J. 2002.

**TABLA 3**

**CATEGORIAS DE CONTAMINACIONES CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES SEGÚN EPA.**

CONVENCIONAL	NO CONVENCIONAL
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	Amoníaco (como N <sub>2</sub> )
Sólidos sedimentables totales (SST)	Cromo (VI) (hexavalente)
Aceite y grasas	Demanda química de oxígeno (DQO)
Aceite (animales, vegetales)	DQO/DBO <sub>5</sub>
Aceite (minerales)	Floruros
pH	Manganeso
	Nitrato (como N <sub>2</sub> )
	Nitrato orgánico (como N <sub>2</sub> )
	Ingredientes activos de Plaguicidas
	Fenoles totales.
	Fosforo total (como P)
	Carbono orgánico total(COT)

Fuente: ROMERO, R. J. 2002.

**2.4 PARÁMETROS DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS**

**2.4.1 MATERIA ORGÁNICA**

- La Materia Orgánica MO:** representa la parte más importante de la contaminación, aquella que agota el oxígeno disuelto, OD, en las masas de agua, ríos, lagos, bahías, etc. En agua residual, AR, de composición típica, cerca del 70% de los sólidos suspendidos, SS, y el 45-50% de los Sólidos Fijos o filtrados, SF, son MO. La materia orgánica está compuesta de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, elementos comunes a todos los compuestos orgánicos, junto con el Nitrógeno en algunos casos. También están presentes otros compuestos como el Fósforo, Azufre, Hierro, etc. La MO en las AR se divide por conveniencia en diferentes grupos como sigue:

- **Proteínas:** componen del 40 al 60 % de las AR. Son el principal constituyente de los organismos animales. Las plantas también contienen proteínas en menor medida. Las proteínas son sustancias complejas e inestables, y su química está asociada a los Aminoácidos, que se componen del grupo ácido,  $-\text{COOH}$ , y el grupo básico,  $-\text{NH}_2$ . El Peso Molecular de las proteínas es muy alto, de 20.000 a 20 millones. La Urea,  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , y las Proteínas son la principal fuente de Nitrógeno de las AR. Cuando están presentes en grandes cantidades, la producción de malos olores es probable (ROMALHO RUBENS, S.2003).
- **Carbohidratos:** constituyen del 25 al 50% de las AR. Proviene de la materia vegetal principalmente. Están distribuidos en Azúcares, Almidones, Celulosa y Fibra de Madera. Las Fibras son insolubles (principalmente la Celulosa) y son muy resistentes a la descomposición en AR.
- **Aceites y Grasas:** este grupo es el tercer componente en importancia en la comida. Las Grasas y Aceites, son compuestos de alcohol y glicerol. Los Glicéridos de los Ácidos Grasos Volátiles, AGV, son los aceites, líquidos a temperaturas ordinarias. En las AR, son las grasas y aceites muy estables y difíciles de descomponer por las bacterias en las AR. Por lo tanto, deben ser removidos antes del tratamiento o traerán problemas en la descomposición de la MO (ROMALHO RUBENS, S. 2003).
- **Surfactantes:** son moléculas grandes ligeramente solubles en agua, y que causan espuma. Conocidos como Detergentes, se usan en limpieza. Pueden causar grandes problemas en la aireación de las AR. Anteriormente los Detergentes se componían de Alkil-Benceno-Sulfonato, ABS, no biodegradables, pero hoy han sido mayormente cambiados por detergentes lineales, Lineal- Alkil-Sul-fonato, LAS, que son biodegradables. (OSORIO A. 2005)

### 2.4.2 OXÍGENO DISUELTO

El OD es uno de los principales parámetros en el tratamiento de aguas residuales (TAR) pues muchos de los organismos dependen de él para mantener los procesos metabólicos, para obtener energía y efectuar su reproducción. Además, el OD es el principal indicador del estado de contaminación de una masa de agua, pues la MO contenida en ella tiene como efecto directo el consumo del Oxígeno Disuelto (MIRANDA NORBERTO 2010).

El Oxígeno es un gas poco soluble en el agua, no reacciona con ella, y su solubilidad depende de la presión parcial. Su concentración de saturación varía entre 7 mg/L a 35o (C y 14,7 mg/L a 0° C, a una atmósfera de presión. también afectan la solubilidad del oxígeno. Como indicador de la calidad de las AR, el OD debe tener un máximo del 10 % de la concentración de saturación-, pues 'ion aguas sobresaturadas de Oxígeno los peces pueden sufrir la enfermedad de la "burbuja de gas". Sin embargo son más frecuente las bajas concentraciones de OD debido a la demanda de Oxígeno causada por la MO presente. En estas circunstancias, por encima de 7 mg/L existe una población diversificada de peces, con presencia de caracoles, insectos, etc. Por debajo de un 1 mg/L promedio medido en las masas de agua, se encontrarán con seguridad zonas anaerobias (que no contienen Oxígeno) y por consiguiente habrá presencia de malos olores. Cuando la concentración llega a cero la descomposición anaerobia es generalizada, y la presencia de los olores también. La presencia de bacterias será generalizada (FAIR-GEYER 1996).

### 2.4.3 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO, es causada por la Materia Orgánica arrojada a las masas y corrientes de agua, la cual se constituye en el alimento para las bacterias que se reproducirán rápidamente. Estas bacterias en condiciones aerobias, consumirán Oxígeno, causando la disminución del OD con los efectos que se explican en el numeral

anterior. La DBO se define como la cantidad de Oxígeno necesaria para descomponer la MO presente en el Agua Residual mediante la acción de bacterias en condiciones aerobias. La DBO es causada por la respiración de las bacterias y cesará al agotarse totalmente la MO. La DBO se efectúa a 5 días y a 20°C, y se denota con el símbolo  $DBO_5$ . Sin embargo, pueden realizarse a diferentes tiempos, por ejemplo la  $DBO_7$  es la demanda medida a los 7 días, y la  $DBO_{11}$  (DBO última o total) es la medida de hasta el agotamiento total de la MO, lo que usualmente toma de 20 a 30 días (MIRANDA N. 2010).

El ensayo de la DBO se efectúa midiendo el OD antes y después de los cinco días. Como el OD en el laboratorio alcanza concentraciones de solo 7 u 8 mg/L, y como la  $DBO_5$  fluctúa entre 200 y 20.000 mg/L o más, es necesario diluir la muestra de AR. Para realizar el ensayo de la DBO se toma la muestra y se diluye en una **alícuota** definida (Vg. la alícuota 1:50 quiere decir que el AR está diluida 50 veces, es decir, se mezcla una parte de AR en 49 partes de agua destilada), dependiendo del valor esperado de la DBO (MIRANDA N. 2010).

El agua empleada para preparar la alícuota se prepara con agua destilada, sales de potasio, sodio, calcio y magnesio que dan buena capacidad amortiguadora (buffer, es decir mantiene el pH aproximadamente constante en un valor cercano a 7,0), y se satura de Oxígeno en las condiciones del laboratorio. Una vez preparadas las alícuotas con las diluciones convenientes, es decir, cuya demanda  $D_{110}$  sea mayor de 2 a 3 mg/L (que es la demanda posible sin problemas con un OD de 6 mg/L) se vierte la muestra en un frasco Winkler (de boca ancha) (MIRANDA N. 2010).

Para ello se prepara un frasco con exactamente las mismas condiciones de la muestra, pero sin el AR, que se conoce como el blanco. Se toman, pues, los OD de la muestra preparada y del blanco a la hora cero denominado OD inicial,  $OD_i$  y  $OD_{bi}$  respectivamente, se ponen en una incubadora a 20 °C, sin luz (para evitar posible oxigenación con la

presencia de algas) y se mide al cabo cinco días el OD final,  $OD_f$  y  $OD_{bf}$ .

El blanco corregirá la  $DBO_5$  de la muestra, así:

$$DBO_5 = \frac{(OD_i - OD_f) - (OD_{bi} - OD_{bf}) \left(\frac{V_m}{V_b}\right)}{D} \quad (2.1)$$

Dónde:

$OD_i$ : OD inicial en la muestra diluida

$OD_f$ : OD final en la muestra diluida

$OD_{bi}$ : OD inicial en el blanco

$OD_{bf}$ : OD final en el blanco

D: Dilución, en decimales (Vg. 2%,  $D = 0,02$ )

$V_m$ : Volumen de blanco menos el volumen de inóculo

$V_b$ : Volumen de blanco.

Como se vio en un aparte anterior, la MO puede ser proteínica o **nitrogenada** la cual causa una DBO nitrogenada o DBON y de Carbohidratos o carbonácea la cual produce una DBO carbonácea o DBOC.

### DBOC

La DBO Carbonácea conforma la parte principal de la mayoría de las AR. Por ello la DBOC se maneja en forma independiente de la DBON y DBOS. Si denominamos la DBOC remanente (es decir la que va quedando en el AR) como L, en general su degradación sigue una cinética de primer orden como sigue:

$$\frac{dL}{dt} = k \cdot L \quad (2.2)$$

Donde k es la constante de reacción, conocida también como constante de la botella (deWinkler). Integrando entre un tiempo 0 y un tiempo t, la DBOC remanente L, siendo  $L_0$  la  $DBOC_u$  o DBOC total, sería:

$$L = L_0 e^{-kt} = 10^{-kt} \tag{2.3}$$

La constante k (base e) = 2,303 K (base 10). Es importante hallar k en laboratorio a partir de ensayos, y el método adecuado es el método de THOMAS.

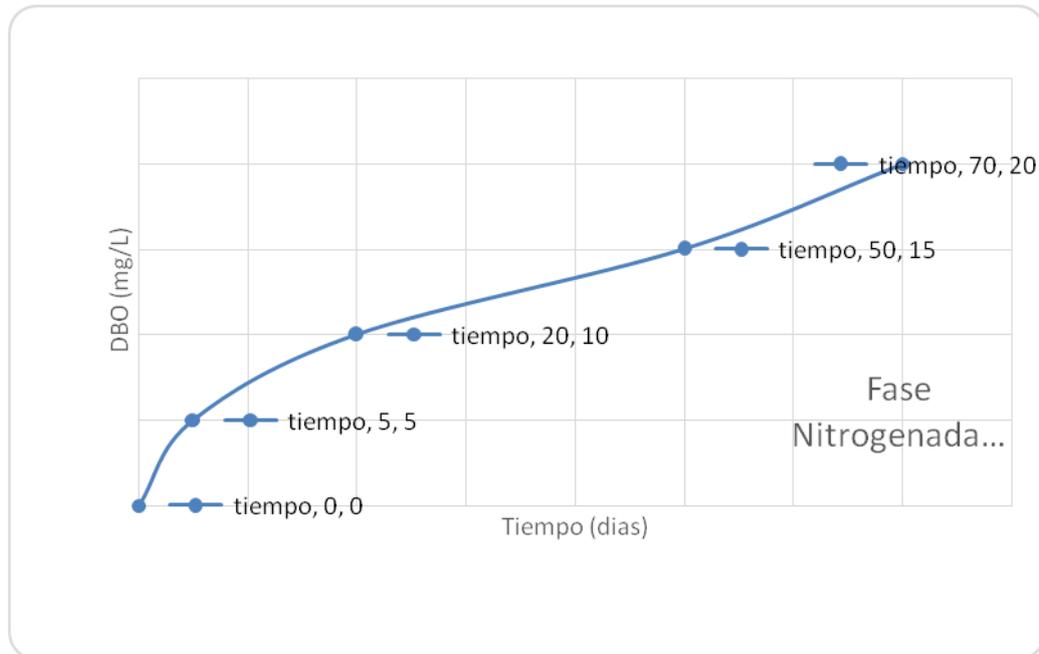
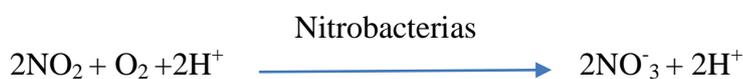


FIGURA 1 Comportamiento de la DBOC y DBON en el tiempo

Ya vimos que para evaluar la DBOC se requiere de un ensayo que demora, en su versión más simplificada, cinco días. Sin embargo, es necesario inhibir la DBON, que se causa por la MO proteínica consumida por las bacterias nitrificantes que surgen espontáneamente a partir de los cinco días. En efecto, el Nitrógeno Orgánico, NTIC medido en términos de NH<sub>3</sub>, se convierte primero en nitritos, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, por las bacterias Nitrosomonas y luego a nitratos, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, mediante las Nitrobacterias como sigue:



La reacción total se resume entonces en:

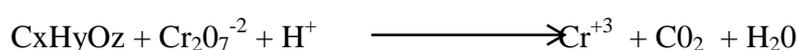


Es decir se requieren 64 g de  $\text{O}_2$  para oxidar 17 g  $\text{NH}_3$  (14 g de N- $\text{NH}_3$ ). Entonces la DBON será de  $64 \text{ g } \text{O}_2 / 14 \text{ R N-NH}_3 = 4,57$ - En otras palabras, la DBON = 4,57 N-NTK.

#### 2.4.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno, DQO, surgió como una necesidad de medir la demanda de Oxígeno de manera rápida y confiable. Esta es otra manera de medir la MO indirectamente, a través de la demanda de Oxígeno de los compuestos orgánicos en lugar de descomponerse la MO mediante el metabolismo bacteriano, que utiliza la respiración como medio para obtener el Oxígeno, en la DQO se utiliza un fuerte agente oxidante en un medio ácido. El agente oxidante más utilizado es el dicromato de Potasio, en presencia del sulfato de Plata como catalizador a alta temperatura (OROZCO J. 2005)

La reacción de la MO con el dicromato es como sigue



Donde  $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$  representa en forma genérica la MO carbonácea. La DQO de un compuesto es generalmente mayor que la DBO debido a que muchos compuestos que pueden ser oxidados químicamente no pueden serlo biológicamente, a través de la biodegradación bacteriana. Los compuestos no-biodegradables son a menudo sustancias moleculares artificiales de gran Peso Molecular. Con frecuencia para un AR determinada se puede correlacionar muy bien la DBO con la DQO lo que es un gran beneficio debido a que la DQO toma solo dos o tres horas para hacerlo mientras la DBO requiere de cinco días. La relación DQO/DBO

determina también la cantidad de materia orgánica no-biodegradable presente en el agua residual (METCALF & EDDY, 1995).

#### 2.4.5 SÓLIDOS

Los sólidos es otro parámetro de gran importancia a menudo está en forma de partículas en suspensión, por lo que es necesario diferenciar: entre los Sólidos Suspendidos, SS, y los' Sólidos Disueltos, SD. Además, los sólidos pueden ser volátiles, SV, que indican procedencia orgánica; o fijos que se presumen como sólidos inorgánicos. La clasificación de los sólidos en general se presenta en la Figura (2) Los Sólidos Totales, ST, se componen de los SS + SD. A su vez éstos se subdividen en SSV y SSF, y en SDV y SDF. Los más importantes en AR son los SS, especialmente los SSV que son la MO orgánica presente en el AR en forma de partículas. La medición de los sólidos se hace gravimétricamente, es decir por peso, y consiste en filtrar la muestra con un filtro seco de peso conocido. Después de secarlos en un horno a 105 °C se vuelve a pesar el conjunto filtro y sólidos filtrados, y por diferencia se conoce el peso de los sólidos filtrados de un volumen determinado de muestra, y así su concentración en mg/L. Los sólidos volátiles se determinan por su evaporación a más de 550 °C en una estufa (mientras los sólidos inorgánicos o fijos no evaporan hasta una temperatura mucho mayor).

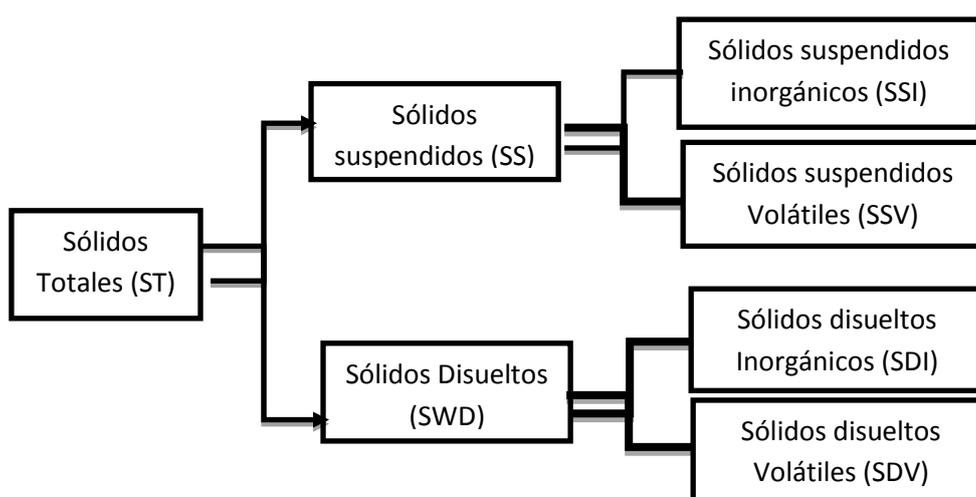


FIGURA 2 CLASIFICACIÓN DE LOS SÓLIDOS EN LAS AGUAS RESIDUALES

Otro tipo de sólido importante en AR son los Sólidos Sedimentables, SSed, que se determinan por el volumen (mL) de sólidos que asienta en 30 minutos en un recipiente cónico conocido como el Cono de Imhoff. Sirven para determinar la cantidad y asentabilidad de los lodos presentes en el AR o el Licor Mixto (LAWRENCE Y Mc CARTI. 1998)

## 2.5 TRATAMIENTO BIOLÓGICO

La DBO y la DQO son medidas del estado de "reducción" de la materia orgánica. La DBO es una medida más ampliamente reconocida, aunque para efectos de interpretar las cinéticas del TAR, la DQO ha ganado popularidad entre los ingenieros. Ambos análisis calculan la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar la materia orgánica, pero la DBO sólo da cuenta de la fracción biodegradable, mientras la DQO tiene en cuenta también la fracción no-biodegradable. Por otra parte, la remoción de sustrato, en términos de DBO y DQO, es equivalente, pues las unidades de O<sub>2</sub> removidas son las mismas. Así, para un sustrato o AR sometido a tratamiento, con una concentración inicial igual a (DBO)<sub>0</sub> y (DQO)<sub>0</sub> y una concentración final de (DBO)<sub>k</sub> y (DQO)<sub>r</sub> (SAWYER, C. – McCARTY P. 1992).

Se tiene:

$$\Delta S = (DBO)_0 - (DBO)_F = (DQO)_0 - (DQO)_F$$

Dónde:

$\Delta S$  = Demanda de oxígeno removido

O sea:  $\Delta S_{DBO} = \Delta S_{DQO}$

La DQO nos indica la cantidad de O<sub>2</sub> requerida para oxidar totalmente la Materia Orgánica, MO. A mayor DQO, mayor capacidad de contaminación de un residuo líquido, pues mayor O<sub>2</sub> será requerido para su oxidación.

Un AR, ARI o sustrato sintéticamente preparado tiene un potencial de contaminación medido con la DQO. Pero para efectos de tratamiento biológico la DQO nos dice la cantidad de alimento que a un determinado, el oxígeno

removido ( $\Delta S$ ) durante el tratamiento es la cantidad de sustrato utilizado en la alimentación de las bacterias, a saber:

$$\Delta S = (S_0 - S) = (DQO)_0 - (DQO)_F$$

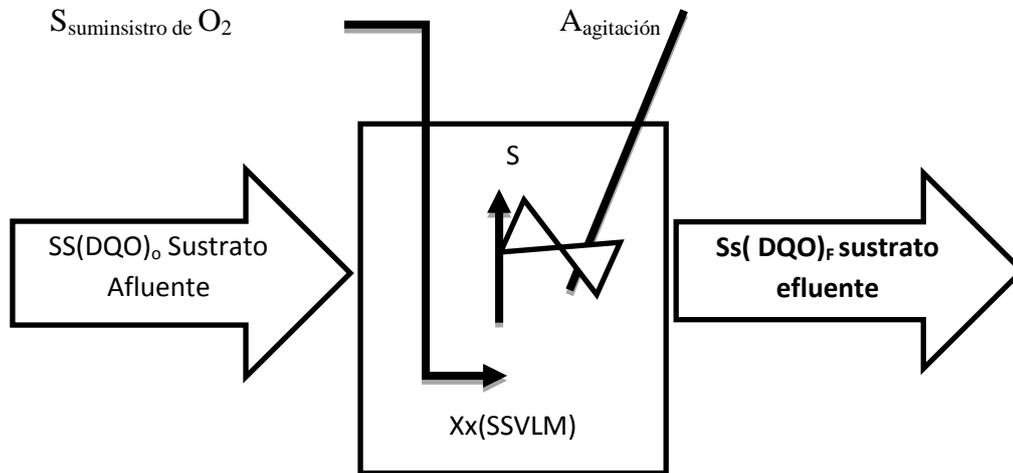
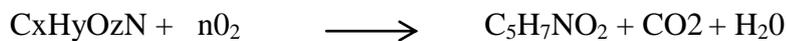


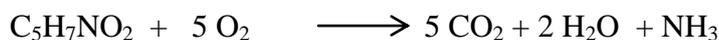
FIGURA 3 ESQUEMA DE UN TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES

Así la DQO es una medida de energía y debe estar directamente relacionada con la capacidad calorífica del sustrato, o con el contenido energía disponible en el compuesto para la oxidación.

En forma resumida podríamos decir que el sustrato,  $C_xH_yO_z$  "reacciona" con el  $O_2$  para producir microorganismos,  $CO_2$  y  $H_2O$ . Es conveniente recordar que la "composición química" o "fórmula" de las bacterias en los cultivos para TAR es  $C_5H_7NO_2$  según Hoover y Porges, por lo que podríamos expresar la reacción de remoción resumida del siguiente modo:



Los microorganismos se miden en el laboratorio gravimétricamente como SSV (mg/L), pero tienen una demanda estequiométrica de oxígeno que puede ser calculada como sigue:



$$(113) + 5 \times (32)$$

Lo que nos permite calcular la DQO teórica, teniendo en cuenta que el  $C_5H_7NO_2$  se mide como SSV:

$$DQO \text{ (teórica)} = \frac{5 \times 32g \cdot O_2}{113g \text{ SSV}} = 1,42g \text{ O}_2/g \text{ SSV}$$

O sea, que los SSV conformados por los microorganismos (de composición  $C_5H_7NO_2$ ) tienen una DQO de  $1,42g \text{ O}_2/g \text{ SSV}$ . La medición experimental de lo anterior con SSVLM en plantas de lodos activados da valores entre 1,40 y 1.46, lo que concuerda con lo expuesto. De este modo, podemos expresar los microorganismos presentes en un reactor en unidades de oxígeno o DQO equivalente, simplemente multiplicando los SSV de lodos aerobios por 1,42, lo que por otra parte nos da el contenido energético total de los microorganismos. Vale anotar que la "fórmula" de los microorganismos anaerobios es  $C_5H_9NO_3$  por lo que el coeficiente estequiométrico de conversión a DQO es  $1,22g \text{ O}_2/g \text{ SSV}$  (LAWRENCE Y Mc CARTI. 1998)

## 2.6 AIREACION EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### 2.6.1 AIREACIÓN

La aireación es el proceso mediante el cual el agua se pone en contacto íntimo con el aire para modificar las concentraciones de sustancias volátiles contenidas en ella. Su función principal, en el tratamiento de aguas residuales, consiste en proporcionar oxígeno y mezcla en los procesos de tratamiento biológico aerobio. A continuación se resumen sus funciones más importantes:

- Transferencia de oxígeno disuelto
- Remoción de sustancias volátiles productoras de olores y sabores
- Remoción de dióxido de carbono
- Remoción de  $H_2S$
- Remoción de hierro y manganeso
- Remoción de metano, cloro y amoníaco
- Remoción de compuestos orgánicos volátiles

Los procesos de tratamiento biológico aerobio, como los procesos de lodos activados, requieren concentraciones de oxígeno disuelto generalmente de 0,2 a 2,0 mg/L con el fin de asegurar un suministro apropiado de oxígeno para el consumo de los microorganismos responsables del tratamiento. Sin embargo, los requerimientos de mezcla generalmente determinan la potencia requerida de los equipos de aireación (ROMALMO, R. 2003).

En embalses de agua, la actividad fotosintética promueve el crecimiento de algas, las cuales pueden producir compuestos constantes de olores y sabores; estos compuestos no son volátiles y la aireación no es eficaz para su remoción. Sin embargo, compuestos volátiles causantes de olores y sabores pueden removerse mediante aireación.

La remoción de  $\text{CO}_2$  en plantas de ablandamiento, mediante aireación, es importante para así disminuir el consumo de cal y, además, para reducir la corrosividad del agua.

El proceso de aireación es la transferencia de oxígeno atmosférico a las aguas residuales sometidas a tratamiento biológico aerobio. El conocimiento de este proceso es básico para especificar los aireadores necesarios. Los aspectos a considerar incluyen: 1) Revisión de la teoría de película estática, aplicada al caso de transferencia de oxígeno. 2) Procedimientos experimentales para determinarlos coeficientes de transferencia a partir de unidades piloto. 3) Discusión de los tipos más comunes de aireadores utilizados en tratamientos de aguas residuales, y 4) Procedimientos para especificar los aireadores adecuados a cada aplicación, y llegar a establecer un diseño correcto de los mismos. (ROMALMO, R. 2003).

Para gases de baja solubilidad en fase líquida (p. ej., absorción de oxígeno por un agua residual), que es el caso a considerar, la resistencia limitante está en la película líquida. Para gases de solubilidad intermedia, ambas películas pueden ofrecer una resistencia significativa.

Los valores de saturación de oxígeno ( $C_s$ )<sub>760</sub> para agua destilada, y a presión atmosférica (760 mm de Hg) se recogen en la tabla 6.1 en función de la temperatura (ROMALMO, R. 2003)

**TABLA 4**  
**VALORES DE SATURACIÓN DE OXÍGENO PARA AGUA DESTILADA EN CONDICIONES NORMALES**

TEMPERATURA	TEMPERATURA	O <sub>2</sub>
(°C)	(°F)	(mg/L)
0	32	14.6
5	41	12.8
10	50	11.3
15	59	10.2
20	68	9.2
25	77	8.4
30	86	7.6
35	95	7.1
40	104	6.6

Fuente: ROMALHO RUBENS, S. (2003).

La notación  $C_s$  utilizará para definir la concentración de oxígeno disuelto (mg/L) en agua corriente, en condiciones de saturación. Los valores de la tabla 3 (agua destilada) pueden considerarse como aproximaciones aceptables para  $C_s$ . Para el caso de aguas residuales, se usará la notación  $C_{sr}$  para designar la concentración de oxígeno disuelto en condiciones de saturación. La relación:

$$\beta = C_{sr} / C_s \tag{A}$$

Puede determinarse experimentalmente para un agua residual determinada. Para la mayoría de los casos ( $\beta$ ) está en el intervalo 0,92-0,98 (mg/L).

A presión atmosférica, el efecto de la temperatura y la presencia de sólidos disueltos pueden estimarse según la ecuación:

$$(C_{sr})_{760} = \frac{(475 - 0.00265SD)}{(33.5 + T)} \quad (B)$$

Donde  $(C_{sr})_{760}$  es la concentración de saturación a la presión normal; SD es la concentración de sólidos disueltos en mg/l, y T es la temperatura en °C.

## 2.6.2 FASES DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO

El proceso de transferencia de oxígeno de una fase gaseosa a otra Líquida se realiza en dos pasos:

Paso 1. Saturación de la interface líquida entre las dos fases. Supongamos que  $C_s$  (o  $C_{sr}$ ) es la concentración de saturación de oxígeno para los casos en que la fase líquida es agua corriente (o agua residual).

La velocidad de transferencia de oxígeno es muy rápida, ya que la resistencia de la película de gas es despreciable y, consecuentemente, esta fase no es la limitante.

Paso 2. Paso de las moléculas de oxígeno de la interface líquida a la masa de líquido. Aquí, C representará la concentración de oxígeno en el total de la masa líquida [ $C < C_s$  (o  $C_{sr}$ )].

En el paso 2 las resistencias que actúan en la transferencia de oxígeno son las que ofrece la película de líquido y la resistencia a la difusión del oxígeno en la masa de fase líquida.

Con poca mezcla (baja turbulencia) la resistencia a la difusión en la masa de la fase líquida es mayor que la resistencia de la película líquida. Con niveles de turbulencia moderados, la primera disminuye, pudiendo ser la resistencia de la película líquida la que gobierne el proceso. Con mayores niveles de turbulencia, se rompe la película de líquido y la transferencia de oxígeno se controla por el «factor de renovación superficial», que es la frecuencia con la cual gotas de líquido, con una concentración C, reemplazan el líquido interfacial, en el cual la concentración de oxígeno es  $C_s$  (o  $C_{sr}$ ). (METCALF & EDDY, 1995).

## 2.7 PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

La expresión tratamiento secundario se refiere a todos los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales tanto aerobios como anaerobios.

El proceso de lodos activos ha sido utilizado para el tratamiento de las aguas residuales tanto industriales como urbanas desde hace aproximadamente un siglo. El diseño de las Plantas de lodos activos se llevó a cabo fundamentalmente de una forma empírica. Sólo a' comienzo de los años sesenta se desarrolla una solución más racional para el diseño del sistema de lodos activos. Este proceso nació de la observación realizada hace mucho tiempo de que si cualquier agua residual, urbana o industrial, se somete a aireación durante un período de tiempo se reduce su contenido de materia orgánica, formándose a la vez un lodo floculento (GRITES R. – TCHOBANOGLOUS G. 2000).

El examen microscópico de este lodo revela que está formado por una población heterogénea de microorganismos, que cambian continuamente en función de las variaciones de la composición de las aguas residuales y de las condiciones ambientales. Los microorganismos presentes son bacterias unicelulares, hongos, algas, protozoos y rotíferos; De éstos, las bacterias son probablemente las más importantes, encontrándose en todos los tipos de procesos de tratamiento biológico. (GRITES R. – TCHOBANOGLOUS G. 2000).

El proceso de lodos activos se ha desarrollado como una operación continua mediante el reciclado de lodo biológico.

En el agua residual (AR) se tiene los componentes de: la DBO soluble está formada principalmente por compuestos carbonosos en disolución.

Debe hacerse hincapié en que el diseño de las plantas de lodos activos se basa en el consumo de la DBO soluble. Este consumo es el resultado del proceso de oxidación biológica que se presenta en el reactor. Por otra parte, la DBO insoluble se separa mediante sedimentación en los clarificadores primario y secundario. (LAWRENCE Y Mc CARTI. 1998).

1. Concentraciones de los sólidos volátiles en suspensión (VSS). Se denotan mediante el símbolo  $X$ . los sólidos volátiles en suspensión corresponden a los lodos biológicos, constituidos por una población heterogénea de microorganismos. La determinación experimental de los VSS se lleva a cabo midiendo la pérdida de peso de los sólidos totales en suspensión después de incineración en una estufa de laboratorio a  $600^{\circ}\text{C}$ . Esta pérdida de peso corresponde principalmente a la volatilización del lodo biológico. Los sólidos remanentes después de la incineración a  $600^{\circ}\text{C}$  corresponden a los sólidos en suspensión no volátiles. Su naturaleza es distinta de la de los lodos biológicos, estando constituidos por materia inerte tanto orgánica como inorgánica.
2. Concentraciones de sólidos no volátiles en suspensión (NVSS). Se indican mediante el símbolo  $X_{NV}$  en el que N V hace referencia a la no volatilidad de los sólidos, por consiguiente:

$$SST = VSS + NVSS$$

*Sólidos en suspensión totales*

$$= \text{sólidos volátiles en suspensión} + \text{sólidos no volátiles en suspensión}$$

- A. DBO soluble. La alimentación inicial, esto es, el agua residual a tratar, penetra en el proceso con un valor de la DBO soluble que se indica por  $S_0$ . El objetivo del tratamiento es reducir este valor a  $S_e$  (DBO del efluente en la corriente 4) mediante oxidación por degradación biológica aerobia de la materia orgánica del agua residual. En el proceso convencional de lodos activos se logra normalmente una reducción de la DBO de 5 a 15% de su valor en la alimentación inicial. Esto significa un rendimiento en el consumo de DBO soluble del 85 al 95%.
- B. Sólidos volátiles en suspensión (VSS). En régimen estacionario, la concentración de lodo biológico en el reactor se mantiene constante en todo momento. En el proceso convencional de lodos activos esta concentración, simbolizada por  $X_{va}$ , en la que el segundo subíndice a se refiere al reactor aireador, está comprendida normalmente entre 2 000 y 3 000 mg/L. Ya que se trabaja bajo condiciones de mezcla completa en el reactor, los sólidos en suspensión en él corresponden a MLVSS (sólidos volátiles en suspensión en

el licor mezclado). Análogamente, los sólidos en suspensión no volátiles en el reactor, estando también completamente mezclados, se indican por MLNVSS (sólidos no volátiles en suspensión en el licor mezclado). Los sólidos totales en suspensión en el reactor se indican mediante MLSS (sólidos en suspensión en el licor mezclado). Por lo tanto

$$MLSS = MLVSS + MLNVSS$$

$$\begin{aligned} \text{Sólidos en suspensión del licor mezclado} \\ = \text{sólidos en suspensión volátiles del licor mezclado} \\ + \text{sólidos en suspensión no volátiles del licor mezclado} \end{aligned}$$

(LAWRENCE Y Mc CARTI. 1998).

## 2.8 TIPOS DE SEDIMENTADORES

Los diferentes tipos de sedimentación que pueden ocurrir, con base en la concentración de partículas y en el tipo de partículas.

En el tratamiento de aguas residuales se usa la sedimentación para los siguientes propósitos:

- Sedimentación primaria para remover sólidos sedimentables y material flotante de aguas residuales crudas, reduciendo así el contenido de sólidos suspendidos.
- Sedimentación intermedia para remover los sólidos y crecimientos biológicos preformados en reactores biológicos intermedios, como los filtros percoladores de primera etapa.
- Sedimentadores secundarios para remover la biomasa y sólidos suspendidos de reactores biológicos secundarios, como los procesos de lodos activados y los filtros percoladores.
- Sedimentadores terciarios para remover sólidos suspendidos y floculados, precipitados químicamente, en plantas de tratamiento de aguas residuales.

En el diseño de tanques de sedimentación se deben tener en cuenta los siguientes criterios generales:

- Proveer una distribución uniforme del afluente para minimizar la velocidad de entrada y el cortocircuito.
- Proveer adecuada y rápida recolección del lodo sedimentado, así como de la espuma.
- Minimizar las corrientes de salida, limitando las cargas de rebose sobre el vertedero. El efluente debe salir sin alterar el contenido del tanque.
- Proveer profundidad suficiente para almacenar lodo y permitir su espesamiento adecuado.
- Proveer un borde libre mayor de 30 cm.
- Reducir efectos del viento mediante pantallas y vertederos.
- Evaluar opciones de diseño.
- Repartir uniformemente el caudal entre las unidades de sedimentación.

Existen, básicamente, tres tipos de tanques de sedimentación: tanque de flujo horizontal, tanques de flujo radial y tanques de flujo ascensional. Los primeros son tanques rectangulares en planta, con el fondo inclinado hacia una tolva de extracción de lodos en el extremo de entrada.

Los tanques de flujo radial son circulares en planta, con el fondo inclinado hacia un pozo central; el afluente ingresa por el centro, en un nivel inferior al del vertedero perimetral de salida existiendo un flujo tanto radial como ascensional, de velocidad decreciente entre la entrada y la salida. Los tanques de flujo ascensional pueden ser cuadrados o circulares en planta, constituidos por una pirámide de afluente entra por el centro y fluye hacia abajo, para luego moverse radial y ascensionalmente hacia el vertedero de salida (MACKENZIE – MASTEN 2005).

Los tanques de sedimentación también pueden clasificarse con base en el método de recolección y extracción de lodos. Básicamente, existen cuatro tipos:

- Tanques de flujo horizontal con recolección manual y remoción mediante vaciado del tanque.
- Tanques de flujo horizontal con recolección mecánica y remoción mediante vaciado del tanque.

- Tanques de flujo ascensional con recolección mediante asentamiento en una tolva profunda y extracción mediante presión provista por una cabeza diferencial.
- Tanques de flujo horizontal y de flujo radial con recolección mecánica y extracción mediante presión provista por una cabeza diferencial.  
(MACKENZIE – MASTEN 2005).

### 2.8.1 TANQUES PRIMARIOS DE SEDIMENTACIÓN

Se denominan tanques primarios de sedimentación aquellos que reciben aguas residuales crudas, generalmente antes del tratamiento biológico secundario. Estos tanques pueden ser rectangulares o circulares. En el rectangular, el agua residual cruda ingresa a través de una serie de aberturas, cerca de la superficie del extremo de entrada del tanque, y se mueve a lo largo de éste, con velocidad muy baja, hasta descargar por el extremo opuesto sobre un vertedero. A la entrada, una pantalla corta disipa la velocidad del afluente y dirige el flujo hacia abajo. El material sólido suspendido sedimentable se deposita en el fondo del tanque y es arrastrado hacia una tolva de lodos por un sistema mecánico de barrido o por acción de la pendiente provista en el fondo. El lodo se extrae periódicamente, desde la tolva de lodos, para su tratamiento y disposición.

En el tanque circular el agua residual entra a través de aberturas en la parte superior de una tubería vertical central y fluye radialmente hacia el vertedero perimetral de salida.(MACKENZIE – MASTEN 2005).

En tanques rectangulares la relación longitud/ancho varía entre 3/1 y 5/1, con profundidades de agua mayores de 2 m, longitud menor de 90 m, ancho de 3 a 24 metros y pendiente suave en el fondo hacia la tolva de lodos. Cuando el ancho es mayor de 6 metros se prefiere usar equipo de limpieza múltiple con varias tolvas de lodos, permitiéndose así el uso de anchos iguales a 24 m. o más. En tanques circulares el diámetro es generalmente menor de 90 metros, con profundidades de agua de 2 a 4 metros y pendientes en el fondo del 8%. Estos

tanques son los más usados porque la barredora de lodos requiere menos partes móviles que el mecanismo de arrastre de un sedimentador rectangular y porque los muros pueden ser más delgados que los de los tanques rectangulares.(MACKENZIE – MASTEN 2005).

## 2.9 MÉTODOS DE DISEÑO Y SELECCIÓN

### 2.9.1 EVALUACIÓN PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR AIREADOR RECTANGULAR

#### A. VOLUMEN PROPUESTO DEL REACTOR AIREADOR

(SEGURA GARCIA, CARLOS EDUARDO; PERAZA, ALEXANDER 2008).

De geometría para el área de un cilindro, para el volumen propuesto del agua residual (A.R) a tratarse:

$$V = 100 \text{ L de A.R.}$$

$$V = 0.1 \text{ m}^3 \text{ de A.R.}$$

#### B. DIMENSIONES DEL REACTOR AIREADOR. ES DE:

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (2.4)$$

$$H = 2D \quad (2.5)$$

$$V = \frac{\pi}{2} D^3 \quad (2.6)$$

Dónde:

V = Volumen ( $\text{m}^3$ )

D = Diámetro (m)

H = Altura (m)

Hd = Altura de diseño del reactor (m)

## 2.9.2 EVALUACION PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR SEDIMENTADOR

(LEVENSPIEL, OCTAVE. 2004).

### A. VOLUMEN PROPUESTO DEL REACTOR SEDIMENTADOR

De geometría cilíndrica y base cónica para lados sedimentados.

V= 100 L de A.R.

V = 0.1 m<sup>3</sup> de A.R.

El sedimentador está comprendido por dos secciones: uno cilíndrico seguido de base cónica.

- Volumen del cono (V<sub>C</sub>)

$$V_C = \frac{\pi(H)^3}{3} \quad (2.7)$$

Dónde:

V<sub>c</sub> = Volumen cono

H = Altura del cono (m)

- Volumen de la parte cilíndrica (V<sub>ci</sub>)

$$V_{ci} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (2.8)$$

Dónde:

V<sub>ci</sub> = volumen cilíndrico del sedimentador (m)

D = Diametro (m)

H = Altura del cilindro (m)

- Volumen de la parte cónica (V<sub>c</sub>)

$$V_c = \frac{\pi}{3} (Hc) \quad (2.9)$$

Dónde:

$V_c$  = Volumen del cono

$H_c$  = Altura del cono

#### B. ALTURA DE DESCARGA DE LODOS (HL)

$$H = H_L + H_{ci} + H_c$$

$$H_L = H - H_c - H_{ci} \quad (2.10)$$

Dónde:

$H_L$  = Altura de descarga de lodos (m)

$H$  = Altura total del reactor (m)

$H_{ci}$  = Altura del cilindro (m)

#### C. CONSUMO DE OXÍGENO EN EL AIREADOR (C.O)

$$C.O. = (Q) \text{ (Reducción de DBO)} \quad (2.11)$$

Dónde:

C.O. = Consumo de oxígeno (kg/h)

$Q$  = Caudal del A.R. aireado ( $m^3/h$ )

Rendimiento de DBO = Es el DBO propuesto que debe reducirse en el tratamiento (mg/L)

#### D. SUMINISTRO DE AIRE REQUERIDO

Para determinar el aire requerido se evalúa en relación al % de oxígeno que contiene el aire que es del 23.2%, para una densidad del aire de 1.2 kg/m a

20°C, y con una tasa nominal de transferencia de oxígeno del aireador del 1.25 % kg/kwh.

$$C_{\text{aire}} = \frac{C.O}{(T.O)(Cm O_2)(D_{\text{aire}})} \quad (2.12)$$

Dónde:

$C_{\text{aire}}$  = Suministro de aire requerido ( $m^3/h$ )

$T.O_2$  = Transferencia de oxígeno en (%) = 10 %

$CmO_2$  = Concentración másica de  $O_2$  = 23.2 %

$D_{\text{aire}}$  = Densidad del aire =  $1.2 \text{ kg/m}^3$

#### E. CONSUMO UNITARIO DE AIRE (C.U.)

$$C_u = \frac{C.Aire}{Q} \quad (2.13)$$

#### F. TASA REAL DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO DEL EQUIPO AIREADOR

(N)

$$N = \frac{No(\beta C_s - Cl)\alpha(\theta)^{T-20}}{C_s} \quad (2.14)$$

Dónde:

$N$  = Tasa real de transferencia de  $O_2$  por el aireador ( $\text{kg } O_2/\text{MJ}$ )

$No$  = tasa de transferencia de  $O_2$  del aireador ( $\text{kg/kwh}$ ) = 1.25%

$C_s$  = Saturamiento del  $O_2$  a la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) ( $\text{mg/L}$ ) a 20°C

$Cl$  = Oxígeno disuelto en el A.R. ( $\text{mg/L}$ )

$\beta = 0.95$

$\alpha = 0.80$

$$T = 15^{\circ}\text{C}$$

$$\theta = 1.024 \text{ para temperatura de } (1 - 20)^{\circ}\text{C}$$

#### G. POTENCIA REQUERIDA PARA LA AIREACIÓN ( $P_A$ )

$$P_A = \frac{C.O}{N} \quad (2.15)$$

Dónde:

$P_A$  = Potencia requerida para la aireación (MJ/h)

$R_{\theta}$  = Consumo de oxígeno (kg/h)

$N$  = Tasa de transferencia de  $O_2$  por el aireador (kg  $O_2$ / MJ)

#### H. NIVEL DE POTENCIA EN EL REACTOR DE AIREACIÓN ( $N_p$ )

$$N_p = \frac{P}{Vol.Reactor} = \frac{W}{m^3} \quad (2.16)$$

#### I. POTENCIA DEL COMPRESOR (P)

(Romero R.J: 2002), La potencia de un compresor para suministrar aire comprimido para difusión se calcula para condiciones adiabáticas.

$$P = \frac{WRT_1}{8.41 E} \left( \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{0.283} - 1 \right) \quad (2.17)$$

Dónde:

$P$  = Potencia requerida al freno eje del compresor (Kw)

$W$  = Caudal másico del aire (kg/s)

$T_1$  = Temperatura absoluta de entrada (K)

$R$  = 8.314 (KJ/K mol-°K) cte.Gasaire

$P_1$  = Presión absoluta de entrada (atm)

$P_2$  = Presión absoluta de salida (atm)

E = Eficiencia del compresor (0.70 – 0.90)

J. DENSIDAD DEL AIRE ( Da)

$$Da = \frac{1.293}{1+0.00367(T)} \left( \frac{H}{760} \right) \quad (2.18)$$

Dónde:

Da = Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)

T = Temperatura °C

H = Presión atmosférica en mmHg.

### 2.9.3 EVALUACIÓN DE LODOS ACTIVADOS DE MEZCLA COMPLETA SIN RECIRCULACIÓN

(METCALF & EDDY, 1995).

A) AFLUENTE DEL AGUA RESIDUAL

- DQO<sub>o</sub> = mg/L
- DBO<sub>o</sub> = mg/L
- Caudal Q<sub>o</sub> = m<sup>3</sup>/d
- Coeficientes de producción de células formadas en la masa del sustrato consumido

$$Y = 0.65 \text{ mg SSV/ mg DBO}$$

$$K_d = 0.05 \text{ d}^{-1}, \text{ para aguas residuales domésticas ( Metcal\& Eddy 1993)}$$

- Tiempo de retención hidráulica = hs
- SS y LM = mg/L
- (%) porción volátil de sólidos totales
- Sólidos totales en el lodo

$$\text{STDR} = \text{mg/L}$$

B) EFLUENTE

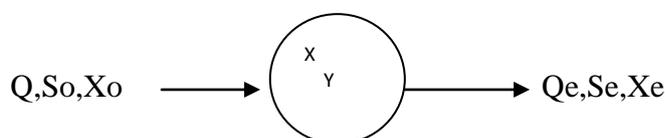
$$DBO_e = \text{mg/L}$$

$$SST = \text{mg/L}$$

### 2.9.3.1 ESQUEMA DEL FLUJO DE MEZCLA COMPLETA SIN RECIRCULACIÓN

(METCALF & EDDY, 1995).

El esquema de flujo es:



El balance de masa para los microorganismos es:

(Afluente – Efluente) + Generación (microorganismos) = Acumulación

Expresado por:

$$Q * X_o - QX + V_{(rg)} = V \left( \frac{dx}{dy} \right) \quad (2.19)$$

Dónde:

V = Volumen del reactor (m<sup>3</sup>)

dx/dy= Tasa de crecimiento de microorganismos (mg SSV/L)

Q = Caudal (m<sup>3</sup>/d)

X<sub>o</sub>= Biomasa en el afluente (mg SSV/L)

X = Biomasa en el reactor (mg SSV/L)

(rg)= Tasa neta de crecimiento de microorganismos (mg SSV/L.d)

a) DBO SOLUBLE DEL EFLUENTE ( SE)

$$S_e = DBO_e - 0.63 (ss) \quad (2.20)$$

Dónde:

$S_e$  = DBO del efluente (mg/L)

$DBO_e$  = DBO total deseada del efluente (mg/L)

$S_s$  = Sólidos suspendidos del efluente (mg/L)

b) VOLUMEN DEL REACTOR (V)

$$V = \frac{Q S_o}{X \left( \frac{A}{M} \right)} \quad (2.21)$$

Dónde:

$\left( \frac{A}{M} \right)$  = Relación Alimento/Microorganismo; g de DBO por día/ g de SSVLM

Q = Caudal de agua residual afluyente ( A.R. cruda) (m<sup>3</sup>/d)

$S_o$  = DBO del agua residual cruda (mg/L)

V = Volumen de A.R. en el reactor de aireación (m<sup>3</sup>)

X = SSVLM, concentración de sólidos en suspensión en el reactor aireador (mg/L)

c) TIEMPO DE RETENCIÓN ( $\theta$ )

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad (2.22)$$

d) EDAD DE LODOS ( $\theta_c$ )

$$V = \frac{\theta_c (Y) Q (S_o - S_e)}{1 + K_d (\theta_c)} \quad (2.23)$$

Dónde:

Y = coeficiente de producción de la masa de células formadas a la masa del sustrato consumido.

$S_o$  = DBO del afluyente (mg/L)

$S_e$  = DBO del efluente (mg/L)

$\theta$  = Tiempo de retención hidráulica (h)

Kd = coeficiente de declinación endógena (d<sup>-1</sup>)

Q = Caudal del A.R. (m<sup>3</sup>/d)

e) PRODUCCIÓN DE LODOS (PX)

$$PX = \frac{YQ(S_0 - S)}{1 + K_d \theta_c} = \frac{XV}{\theta_c} \quad (2.24)$$

f) PRODUCCIÓN DE SÓLIDOS TOTALES DE DESECHO

$$\text{Lodo seco} = \frac{\text{Produccion de lodo}}{\text{Porcion volatil de solidos}} = \frac{Kg}{d} \quad (2.25)$$

g) Caudal de lodos de desecho ( Qw)

$$Q_w = \frac{\text{Lodo seco}}{STD \text{ lodo}} \quad (2.26)$$

h) Cantidad de oxígeno requerido (OD)

$$OD = 1.5 Q(S_0 - S_e) - 1.42 X_e * Q_w \quad (2.27)$$

Dónde:

OD = Oxígeno requerido (kgO<sub>2</sub> /d)

X<sub>e</sub> = Biomasa en el lodo (mg SSV/L)

Q<sub>w</sub> = Caudal de lodos (kg/m<sup>3</sup>)

Q = Caudal de agua residual (m<sup>3</sup>/s)

i) CAUDAL DE AIRE EN CONDICIONES NORMALES DEL EXPERIMENTO

P<sub>atm</sub> (PUNO) = 486 mmHg

$$Q_{\text{aire}} = \frac{OD}{0.178(1.2)} = \left(\frac{m^3}{d}\right) \quad (2.28)$$

Dónde:

OD = Cantidad de oxígeno requerido ( $\text{Kg } \text{O}_2/\text{d}$ )

Debe determinarse el caudal del aire para un rendimiento de transferencia de oxígeno del equipo de aireación que generalmente es considerado en condiciones reales del 60 – 80 por ciento; por lo tanto el caudal real es de:

$$Q_{\text{aire}} = \frac{Q_{\text{aire}}}{0.8} = \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right) \quad (2.29)$$

j) VOLUMEN DE AIRE REQUERIDO POR UNA UNIDAD DE DBO APLICADA AL REACTOR DE AIREACIÓN

$$V_{\left(\frac{\text{aire}}{\text{DBO}}\right)} = \frac{Q_{\text{aire}}}{(\text{DBO})Q} = \left(\frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}\right) \quad (2.30)$$

Dónde:

DBO = DBO del afluente (mg/L)

Q<sub>aire</sub> = Caudal del aire requerido para el 80% de oxígeno transferido ( $\text{m}^3/\text{d}$ )

Q = Caudal del agua residual ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

k) VOLUMEN DEL AIRE REQUERIDO POR UNIDAD DE DBO REMOVIDA ( $Q_{\text{AIRE}}/\text{DBOR}$ )

$$V_{\left(\frac{\text{aire}}{\text{DBOR}}\right)} = \frac{Q_{\text{aire}}}{\text{DBOR}(Q)} = \left(\frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}\right) \quad (2.31)$$

Dónde:

DBOR = DBO removido ( $\text{kg}/\text{M}^3$ )

Q = Caudal de agua residual ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

l) CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA DEL PROCESO (COV)

$$\text{COV} = \frac{Q(S_o)}{V} \quad (2.32)$$

Dónde:

COV = Carga orgánica volumétrica

$S_o$  = DBO en el agua residual cruda afluente (mg/L)

$V$  = Volumen del reactor de aireación ( $m^3$ )

$Q$  = Caudal del agua residual

m) RELACIÓN ALIMENTO/MICROORGANISMO  $\left(\frac{A}{M}\right)$

$$\frac{A}{M} = \frac{Q S_o}{V X} \quad (2.33)$$

Dónde:

(A/M) = relación alimento/microorganismo

$Q$  = Caudal del agua residual cruda ( $m^3/d$ )

$S_o$  = DBO del agua residual cruda (mg/L)

$V$  = Volumen del agua residual en el reactor de aireación

$X$  = SSVLM, concentración de solidos suspendidos, volátiles en el reactor de aireación (mg/L)

n) EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO SOLUBLE ( $E_{DBO}$ )

$$E_{DBO} = \frac{(S_o - S_e)}{S_o} * 100 \quad (2.34)$$

Dónde:

$E_{DBO}$  = rendimiento de la remoción del DBO (%)

$S_o$  = DBO en el efluente o agua residual creada sin tratamiento

$S_e$  = DBO en el efluente o agua tratada

o) EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DQO ( $E_{DQO}$ )

$$E_{DQO} = \frac{(DQO_o - DQO_e)}{DQO_o} * 100 \quad (2.35)$$

Dónde:

$E_{DQO}$  = Rendimiento de la remoción del DQO (%)

$DQO_o$  = DQO en el afluente o agua residual cruda sin tratamiento

$DQO_e$  = DQO en el afluente o agua tratada.

#### 2.9.4 CANTIDAD MÁSCICA TRANSFERIDO DEL GAS DE AIRE AL AGUA(N)

Romero R, J. (2002).

$$N = \frac{dm}{dt} = KA (C_s - C) \quad (2.36)$$

$$\frac{N}{V} \times \frac{dc}{dt} = N \frac{A}{V} (C_s - C) \quad (2.37)$$

Dónde:

$N$  = Tasa máscica de transferencia del gas por difusión ( $\frac{g}{s}$ ).

$K$  = Coeficiente de difusión del gas o velocidad de transferencia ( $\frac{m}{s}$ ).

$A$  = Área a través de la cual se difunde el gas ( $m^2$ ).

$C_s$  = Concentración de saturación del gas en solución ( $g/m^3$ ).

$C$  = Concentración de gas en la fase líquida para el tiempo (t) en ( $g/m^3$ ).

$V$  = Volumen de la fase líquida ( $m^3$ ).

➤ Tasa de cambio en la concentración del gas.

$$\frac{dc}{dt} = K_L a (C_s - C) \quad (2.38)$$

Dónde:

$K_L a$  = Coeficiente global de transferencia del gas ( $m^3/s$ ).

$$C = C_s + (C_0 - C_s) e^{-K_L a(t)} \quad (2.39)$$

- Concentración de saturación de gases en el agua.

De la ley de Henry

$$P = H.X \tag{2.40}$$

$$X = \frac{n_g}{n_g + n_w} \tag{2.41}$$

Dónde:

P = presión parcial del gas (atm)

H = constante de la ley de Henry para el gas a la temperatura de cálculo (ver tabla 4)

X = fracción molar de equilibrio del gas disuelto

$n_g$  = moles del gas

$n_w$  = moles del agua

**TABLA 5**  
**CONSTANTES DE LA LEY DE HENRY PARA DIFERENTES GASES SOLUBLES EN EL AGUA**

Temperatura °C	H*10-4 (Atm/fracción mol)			
	Aire	C O <sub>2</sub>	CO	O <sub>2</sub>
0	4.32	0.0728	3.52	2.55
10	5.49	0.104	4.42	3.27
20	6.64	0.142	5.36	4.01
30	7.71	0.186	6.2	4.75
40	8.7	0.233	6.96	5.35
50	9.46	0.283	7.61	5.88
60	10.1	0.341	8.21	6.29

Fuente: ROMERO R. J. (2002)

### A. EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DEL OXÍGENO ( $K_{La}$ )

- Se determina el factor de corrección de transferencia del oxígeno en el agua ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{K_{La}(\text{agua residual})}{K_{La}(\text{agualimpia})} \quad (2.42)$$

$\alpha$  = relación de la tasa de transferencia de oxígeno en agua residual y agua destilada a la misma temperatura

Se considera  $\alpha = 0.80 - 0.90$

- Se determina el factor de corrección de la concentración de saturación de OD en aguas residuales ( $\beta$ ).

$$\beta = \frac{C_s(\text{agua residual})}{C_s(\text{agualimpia})} = \frac{C_s W}{C_s} \quad (2.43)$$

Generalmente  $\beta = 0.80$  a  $1.0$

- Efecto de la temperatura sobre la difusividad y viscosidad

$$K_{La(T)} = K_{La(20)} \cdot \Theta^{(T-20)} \quad (2.44)$$

Dónde:

$\theta = 1.020$  (para sistema de burbuja)

$\theta = 1.024$  (para sistema de aireación mecánica)

$K_{La(T)}$  = coeficiente de transferencia del gas a ( $T^\circ\text{C}$ )

$K_{La(20)}$  = coeficiente de transferencia del gas a ( $20^\circ\text{C}$ )

### B. SISTEMA DE AIREACIÓN

- Tasa o capacidad de oxigenación del agua residual

$$N = KLa(Cs - Cl) \quad (2.41)$$

Para condiciones estándar,  $20^\circ\text{C}$ ,  $0$  (m.s.n.m) y agua destilada

$$N_o = KLa(20) \cdot Cs(20) \quad (2.45)$$

$C_{s(20)}$  se obtiene de los valores de saturación de oxígeno disuelto en agua

- Para el agua residual a condiciones reales

La capacidad nominal del equipo reactor de aireación (N) es:

$$N = KLa_{(w,T)}(Cs - Cl) \quad (2.46)$$

Dónde:

$C_{sw}$  = concentración de saturación de oxígeno para el agua residual a su temperatura y altitud (mg/L).

$C_L$  = concentración de O.D. en la operación (mg/l).

$C_{s(20)}$  = concentración de saturación en agua destilada a condiciones estándar (20°C) o metros sobre el nivel mar (m.n.s.m) en (mg/L).

$N_0$  = tasa nominal de transferencia de oxígeno en condiciones de operación

$$\left( \frac{Kg}{h} \quad o \quad \frac{Kg}{Kwh} \right)$$

N = tasa de transferencia de oxígeno en condiciones de operación

$$\left( \frac{Kg}{h} \quad o \quad \frac{Kg}{Kwh} \right)$$

$KLa$  = coeficiente de transferencia de oxígeno ( $h^{-1}$ )

$KLa_{(20)}$  = coeficiente de transferencia de oxígeno en condiciones estándar ( $h^{-1}$ )

$KLa_{(w,T)}$  = coeficiente de transferencia de oxígeno en el agua residual a la temperatura T°C ( $h^{-1}$ )

C. CAPACIDAD NOMINAL DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO DEL EQUIPO DE AIREACIÓN (N) ES:

$$N = (N_0) \cdot \alpha \cdot \theta^{(T-20)} \times \frac{(\beta \cdot C_s(TA) - Cl)}{C_{s(20)}} \quad (2.47)$$

Dónde:

$C_{s(TA)}$  = concentración de saturación de oxígeno a la temperatura y altitud correspondiente (mg/L).

$$C_{s(TA)} = \frac{C_s(t,o)Pa}{760} \quad (2.48)$$

$$P_A = 760 \left(1 - \frac{A}{9450}\right) \quad (2.49)$$

$$C_{s(T,A)} = C_{s(T,O)} \left(1 - \frac{A}{9450}\right) \quad (2.50)$$

Dónde:

$P_A$  = presión barométrica del lugar (mmHg)

$C_{s(T,O)}$  = los valores se encuentran tabulados en el anexo 1

A = altitud del lugar en (m).

También se puede evaluar la tasa real de transferencia de oxígeno desde el equipo de aireación (N).

$$N = \frac{N_o(\beta \cdot C_s - C_l) \cdot \alpha}{C_s} (1024)^{(T-20)}$$

#### D. POTENCIA REQUERIDO PARA LA OXIGENACIÓN DEL AGUA RESIDUAL (P)

$$P = \frac{\text{consumo de oxígeno}}{N} \quad (2.51)$$

Si: consumo de oxígeno =  $\frac{Kg}{d}$

$$N = Kg \frac{O_2}{MJ}$$

$$P = \frac{MJ}{d}$$

$$P = \frac{MJ}{d} \times \frac{106}{86400 \times 10^3} = \frac{Kw}{h} \quad (2.52)$$

- NIVEL DE POTENCIA EN EL TANQUE DE AIREACION (N.P)

$$N.P = \frac{P}{V}$$

$$N.P = \frac{W}{m^3}$$

Dónde: V = volumen del reactor (m<sup>3</sup>)

P = Potencia en (w)

### E. DISEÑO DEL SISTEMA DE AIREACIÓN

- Tiempo de aireación: se diseña en función al DBO del agua residual y el volumen del tanque

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad (2.53)$$

Dónde:

$\theta$  = tiempo de retención hidráulica de aireación (h)

V = volumen del reactor de aireación (m<sup>3</sup>)

Q = caudal del agua residual sin incluir la recirculación (m<sup>3</sup>/h)

EL SISTEMA DE AIREACIÓN DIFUSA: se diseña en función a los parámetros de:

- Rendimiento de la unidad de aireación (N)

$$N = (CG^n) \left( \frac{H^m}{W^p} \right) \alpha (1.02)^{(T-20)} (\beta C_{sm} - C_L) \quad (2.54)$$

Dónde:

N = rendimiento (Lb  $\frac{O_2}{h}$ ) de acción

c,n,m,p = constantes características del equipo de aireación en unidades inglesa

c = 0.8 x 10<sup>-2</sup> n = 1.02, m = (0.70-0.74), p = (0.20 – 0.30)

G = flujo del aire  $\left( \frac{pie^3}{min} \right)$  en condiciones estándar

H = Profundidad del agua residual (pie)

$W$  = Ancho del tanque de aireación (pie)

$\alpha = 0.80 - 0.90$  (cte)

$T$  = temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

$C_{sm}$  = concentración de saturación de O.D. en el agua residual a la profundidad, mitad del tanque ( $\text{mg/l}$ ).

$C_L$  = concentración de O.D. en el agua ( $\text{mg/l}$ ).

$$C_{sm} = \frac{C_s}{2} \left[ \frac{P_b}{P} + \frac{O_t}{20.9} \right] \quad (2.55)$$

$$C_{sm} = \frac{C_s}{2} \left[ \frac{P+0.433 \cdot h}{P} + \frac{O_t}{20.9} \right] \quad (2.56)$$

$$O_t = \frac{21(1-E) \cdot 100}{79+21(1-E)} \quad (2.57)$$

Dónde:

$C_s$  = concentración de saturación de (O.D) en la superficie ( $\text{mg/l}$ ).

$P_b$  = presión absoluta a la profundidad del difusor (Psi)

$P$  = presión barométrica ambiental (Psi).

$h$  = sumergencia del difusor (pie)

$O_t$  = contenido de oxígeno en el aire de salida (% en volumen)

$E$  = eficiencia (% de transferencia del oxígeno al agua)

➤ Número de unidades difusoras requeridas. ( $N^{\circ}$ )

$$N^{\circ} = \frac{\text{consumo } O_2}{N} \quad (2.58)$$

➤ Longitud del tanque de aireación.

$$L = \frac{V}{(H)(W)} \quad (2.59)$$

Donde:

V = volumen (pie).

H = Altura (pie).

W = Ancho (pie).

L = Longitud (pie).

Debe cumplir la relación

Ancho (w) < 2 veces profundidad (H)

- Espaciamiento entre difusores (e)

$$e = \frac{L}{N^0} \quad (\text{pie}) \text{ o } (\text{plg}) \quad (2.60)$$

- Flujo de aire del soplador (Q).

$$Q = (G)(N^0) \quad (2.61)$$

$$Q = \left( \frac{\text{pie}^3}{\text{min}} \right)$$

- Potencia del soplador (P)

$$P = \frac{Q(\Delta P)}{E} \quad (2.62)$$

$$Q = \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

$$\Delta P = (KPa)$$

E = eficiencia

P = (kw)

- Capacidad real de transferencia de oxígeno del equipo de aireación (N)

$$N = \frac{\text{consumo } O_2}{P} \quad (2.63)$$

Dónde:

$$N = \text{Kg } O_2 / \text{Kwh}$$

P = Potencia en (Kw)

➤ Eficiencia de transferencia de oxígeno ( $E_0$ )

ECKENFELDER, W. (1980) Indica:

$$E_0 = \frac{\text{oxígeno absorbido}}{\text{oxígeno suministrado}} = \frac{OA}{1.09(G_0)} \dots \quad (2.64)$$

Dónde:

$E_0$  = Eficiencia de transferencia de oxígeno

OA = Oxígeno absorbido ( $Lb/h$ )

$G_0$  = Flujo de aire ( $pie^3/min$ ) en condiciones estándar para el compresor ó soplador.

### 2.9.5 EVALUACION PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR SEDIMENTADOR DE LODOS ACTIVADOS

El reactor sedimentador de lodos activados se diseña para sistemas de proceso de tratamiento de aguas residuales con modelo de flujo continuo sin recirculación o con flujo continuo con recirculación; para ambos casos se tiene las evaluaciones generales de ROMALHO R.S. (2003).

-Tiempo de retención hidráulica en el aireador.

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad (2.65)$$

Dónde:

$\theta$  = Trampa de retención hidráulica o tiempo de aireación. (h)

V = Volumen del reactor de aireación. (m<sup>3</sup>)

Q = Caudal del agua residual, sin incluir el caudal de relación. (m<sup>3</sup>/h)

Carga orgánica (C.O)

$$CO = S_0 \cdot Q \quad (2.66)$$

Carga orgánica volumétrica (COV)

$$COV = \frac{S_0 Q}{V} \quad (2.67)$$

Dónde:

S<sub>0</sub> = DBO en el afluente al sedimentador (mg/L)

-Relación alimento microorganismo ( $A/M$ ).

$$\frac{A}{M} = \frac{QS_0}{VX} \quad (2.68)$$

Dónde:

( $A/M$ ) = Relación alimento microorganismo. g DBO/d g(ssvLM)

Q = Caudal del A.R. (m<sup>3</sup>/d)

S<sub>0</sub> = DBO del A.R. cruda (mg/l)

V = Volumen del A.R. en el reactor aireador (m<sup>3</sup>)

X = SSVLM, concentración de SSV en el reactor de aireación (mg/l)

A.R. = Agua residual.

- Edad de lodos o tiempo promedio de retención celular (Q<sub>c</sub>)

$$Q_c = \frac{VX}{Q_w \cdot X_R + Q_e \cdot X_E} \quad (2.69)$$

Dónde:

$X$  = Concentración de (SSV) en el reactor aireador (SSVLM) en  $(mg/l)$ .

$Q_w$  = Caudal del lodo dispuesto  $(m^3/d)$ .

$X_R$  = Concentración del SSV en el lodo dispuesto  $(mg/l)$ .

$Q_e$  = Caudal del efluente del reactor sedimentador  $(m^3/d)$ .

$X_e$  = Concentración del (SSV) en el efluente del reactor sedimentador  $(mg/l)$ .

Cuando se evalúa el lodo directamente del efluente del reactor sedimentador

$$X = X_R$$

$$\theta_c = \frac{V}{Q_w} \quad (2.70)$$

LAWRENCE y McCARTY (1998) Utilizan los fundamentos de:

- Evaluación de la masa microbial en el reactor sedimentador de lodos activados.

$$XV = \frac{YQ(S_0 - S_e)\theta_c}{1 + K_d\theta_c} \quad (2.71)$$

$$X = \left(\frac{\theta_c}{\theta}\right) \cdot \frac{Y(S_0 - S_e)}{1 + K_d\theta_c}$$

Dónde:

$Y$  = coeficiente de producción de crecimiento masa de las células formadas a la masa del sustrato consumido.

$S_0$  = DBO del afluente  $(mg/l)$ .

$$S_e = \text{DBO del efluente } \left( \frac{mg}{l} \right).$$

$\theta$  = tiempo de retención hidráulica (d)

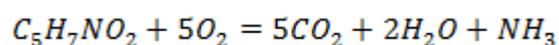
$K_d$  = Coeficiente de declinación endógena ( $d^{-1}$ )

$$S_e = DBO_e - 0,63(SS_e)(2.69)$$

$$DBO_e = \text{DBO total en el efluente } \left( \frac{mg}{l} \right).$$

$$SS_e = \text{(SS) en el efluente } \left( \frac{mg}{l} \right)$$

La biomasa extraída de los microorganismos se evalúa teniendo la reacción química siguiente.



$$113 \text{ g} \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 160 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 1.42 \text{ g}$$

Por lo tanto se tiene:

$$OD = 1.5 Q(S_0 - S_e) - 1.42 \cdot X_R \cdot Q_w$$

En la tabla 6 se tiene los coeficientes cinéticos típicos a 20°C para el proceso de lodos activados.

**TABLA 6**  
**COEFICIENTES CINÉTICOS A 20°C, PARA EL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS**

Parámetros	Valor	
	Intervalo	Típico
y, mg SSv/mg DBO	0.4 - 0.8	0.6
Y, mg SSv/mg DQO	0.25 - 0.4	0.4
$K_d d^{-1}$	0.04 - 0.075	0.06

Fuente: ROMERO, R. J. (2002).

**TABLA 7**

**VALORES DE COEFICIENTES CINÉTICOS PARA TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE DIFERENTES SUSTRATOS ORGÁNICOS.**

Sustrato	$r$ mg SSv mg sustrato	$\mu_m$ d-1	K d-1	$K_s$ mg/L	$K_d$ d <sup>-1</sup>	Base del coeficiente	Tempe ratura °C
Residuo doméstico	0.5	13.2	26.4	120	0.06	DBO	20
Residuo doméstico	0.67	3.84	5.7	22	0.07	DQO	15
aguas residuales municipales	0.35 - 0.45	-	-	25 - 100	0.05 - 0.10	DQO	20
Matadero	0.41	-	0.68	150	0.04	DQO	20

Fuente: ROMERO, R. J. (2002).

**2.9.6 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS SIN RECIRCULACIÓN**

Según, SEGURA GARCIA, CARLOS EDUARDO; PERAZA, ALEXANDER (2008).

El crecimiento de los microorganismos se puede controlar por el tiempo de retención.

$$\frac{Q}{V} = \frac{1}{\theta} = -Y \cdot \left( \frac{r_s}{X} \right) - K_d \quad (2.72)$$

Para el esquema de flujo propuesto “edad de lodos” o tiempo promedio de retención celular está definida por.

$$\theta_c = \frac{\text{Biomasa en el Reactor}}{\text{Biomasa dispuesta por día}} = \frac{V_x}{Q_x} \quad (2.73)$$

Dónde:

$\theta_c$  = Tiempo promedio de retención celular o edad de lodos (h)

$V$  = Volumen del reactor ( $m^3$ )

$X$  = biomasa en el reactor ( $mg^{SSV}/L$ ).

$Q$  = Caudal afluyente ( $m^3/d$ ).

En el módulo sin recirculación de lodos, la edad de los lodos es igual al tiempo de retención hidráulica.

$$\theta_c = \frac{V}{Q} = \theta \quad (2.74)$$

-Tasa específica de utilización de sustrato ( $\mu$ )

$$\mu = \frac{S_0 - S}{\theta \cdot X} = \frac{Q \cdot (S_0 - S)}{V \cdot X} \quad (2.75)$$

Dónde:

$\mu$  = Tasa específica de utilización de sustrato ( $d^{-1}$ ).

$S_0$  = Concentración de sustrato en el afluyente (DBO  $mg/l$ ).

$S$  = Concentración de sustrato en el efluente (DBO  $mg/l$ ).

$\theta$  = tiempo de retención hidráulica (d).

$X$  = Biomasa en el reactor ( $mg^{SSV}/L$ ).

$V$  = Volumen del Reactor ( $m^3$ ).

$Q$  = Caudal afluyente ( $m^3/d$ ).

-Balance de masa para el sustrato.

$$\text{Afluente} - \text{Eficiencia} + \text{Generación} = \text{Acumulación}$$

$$Q \cdot S_0 - Q_s + V(r_s) = V \left( \frac{d_s}{dt} \right) \quad (2.76)$$

$$V \left( \frac{d_s}{d_t} \right) = Q \cdot S_0 - Q_s - V \left( \frac{KXS}{K_s + S} \right)$$

Dónde:

$V$  = volumen del reactor ( $m^3$ ).

$\frac{d_s}{d_t}$  = Tasa de acumulación del sustrato ( $mg/Ld$ ).

$K_s$  = Constante de saturación del sustrato ( $mg/L$ ).

$K$  = Tasa máxima de utilización de sustrato por unidad de masa de microorganismos ( $d^{-1}$ ).

$X$  = Biomasa en el reactor ( $mg/L$  de ssv)

Por lo tanto la predicción de la concentración de microorganismos y sustrato en el efluente del reactor sedimentador sin recirculación se tiene:

$$S = \frac{K_s(1+\theta \cdot K_d)}{\theta(YK\theta - K_d) - 1} \quad (2.77)$$

$$\frac{A}{M} = \frac{Q \cdot S_0}{V \cdot X} = \frac{S_0}{\theta \cdot X} \quad (2.78)$$

La eficiencia del proceso está dado por:

$$E = \left( \frac{S_0 - S}{S_0} \right) \quad (2.79)$$

Dónde:

$E$  = eficiencia del proceso

$S_0$  = Concentración del sustrato en el afluente ( $mg/L$ ).

$S$  = Concentración del sustrato en el efluente ( $mg/L$ ).

La tasa específica de la utilización del sustrato ( $d^{-1}$ ).

$$u = \left(\frac{A}{M}\right) \cdot E \quad (2.80)$$

-Cuando no existe recirculación de biomasa  $\theta_c = \theta$

Por lo tanto se tiene.

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{1}{\theta} = \frac{\mu_m(S)}{K_s + S} - K_d \quad (2.81)$$

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{Y \cdot K(S)}{K_s + S} - K_d \quad (2.82)$$

-Evaluación de la biomasa en el reactor (X.V)

$$XV = \frac{\theta_c Y Q (S_0 - S)}{J + K_d \cdot \theta_c} \text{ en (kg ssv)} \quad (2.83)$$

- Evaluación del volumen del reactor (V)

$$V = \frac{XV}{X} \quad (\text{m}^3) \quad (2.84)$$

- Producción de lodo en el reactor (Px)

$$P_x = \frac{Y Q (S_0 - S)}{J + K_d \cdot \theta_c} = \frac{XV}{\theta_c} \quad (2.85)$$

- Producción de lodo seco.

$$\text{lodo seco} = \frac{P_x}{(ST)} \quad (2.86)$$

Dónde:

$P_x$  = Producción de lodo en el reactor ( $\text{Kg}^{SSV}/d$ ).

ST = Solidos totales en el lodo (%)

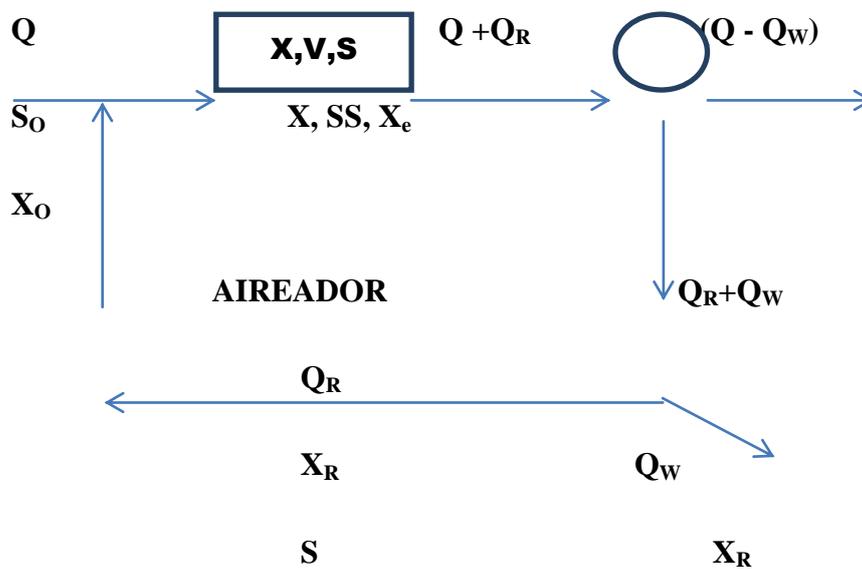
- Caudal del lado de desecho en el reactor ( $Q_w$ )

$$Q_w = \frac{\text{lodo seco } (\frac{Kg}{d})}{(STD)\text{lodo } (\frac{Kg}{m^3})} \tag{2.87}$$

### 2.9.7 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS CONRECIRCULACIÓN

HETCALF & EDDY (1995) Indica:

El esquema del flujo es de:



- Dónde:
- $V$  = Volumen del Reactor Sedimentador ( $m^3$ )
  - $\frac{dx}{dt}$  = tasa de crecimiento de microorganismos (mg SSV/L.d)
  - $Q$  = Caudal afluente ( $m^3/d$ )
  - $X_0$  = Biomasa en el afluente (mg SSV/D)
  - $Q_w$  = Caudal del lodo dispuesto ( $m^3/d$ )
  - $X_R$  = Biomasa en el lodo recirculado (mg SSV/L)
  - $r_g$  = Tasa neta de crecimiento bacterial (mg/Ld)
  - $X_e$  = Biomasa en el efluente (mg SSV/L)
  - $x$  = Biomasa en el reactor (mg SSV/L)

Se supone que el reactor sedimentador recibe carga aireada de mezcla completa con concentración de biomasa en el afluente es despreciable.

(En la práctica es el sistema más usado para simular el proceso de lodos activados)

Balance de Masa:

Acumulación ó= Biomasa - Biomasa + Crecimiento

Cambio de la Biomasa    Afluente    Efluente    Neto

$$V \left( \frac{dx}{dt} \right) = (Q * X_o) - (Q_w * X_R + (Q - Q_w) X_e) + V(r_g) \quad (2.88)$$

Como  $X_o \cong 0$

$$V \left( \frac{dx}{dt} \right) = -(Q_w * X_R + (Q - Q_w) X_e) + V(r_g)$$

Dónde:  $V$  = Volumen del Reactor Sedimentador

$\frac{dx}{dt}$  = tasa de crecimiento de microorganismos ( mg SSV/L.d)

$Q$  = Caudal afluente ( $m^3/d$ )

$X_o$  = Biomasa en el afluente (mg SSV/d)

$Q_w$  = Caudal del lodo dispuesto ( $m^3/d$ )

$X_R$  = Biomasa en el lodo recirculado (mg SSV/L)

$r_g$  = Tasa neta de crecimiento bacterial (mg/Ld)

$X_e$  = Biomasa en el efluente (mg SSV/L)

$x$  = Biomasa en el reactor (mg SSV/L)

Para un estado permanente:

$$\left( \frac{dx}{dt} \right) = 0 \quad \text{No hay cambio en la biomasa}$$

- La edad de los lodos es de ( $\theta_c$ ):

$$\theta_c = \frac{Vx}{(Qw * XR + (Q - Qw) * Xs)} \quad (2.89)$$

- El tiempo promedio de retención hidráulico del sistema es ( $\theta_s$ )

$$\theta_s = \frac{Vs}{Q} \quad (2.90)$$

Dónde:  $\theta_s = \text{Tiempo de retención hidraulica del sistema (d)}$

$Vs = \text{Volumen aireador} + \text{Volumen sedimentador (m}^3\text{)}$

- La tasa específica de utilización de sustrato ( $\mu$ )

$$\mu = -\frac{r_s}{x} \quad (2.91)$$

$$\frac{1}{Qc} = Y\mu - Kd \quad (2.92)$$

- El sustrato en el efluente del reactor de mezcla completa con recirculación es de ( $S$ ):

$$S = \frac{Ks(1 + Ks\theta_c)}{\theta_c(Yk - Kd) - 1} \quad (2.93)$$

- El balance de masa para el sistema o alimento se tiene:

Acumulación o

Cambio en el = Alimento - Alimento + Asimilación

Sustrato Afluente Efluente

Sin cambio en la concentración del alimento

$$0 = QS_o - QS - \frac{UmSx}{Y(Ks+S)} * (V) \quad (2.94)$$

- El valor de la biomasa es ( $X$ ):

$$X = \frac{\theta_c Y (S_o - S)}{\theta (1 + K_d \theta_c)} \quad (2.95)$$

- La tasa de producción de lodos es de ( $P_x$ ):

$$P_x = \frac{Xy}{\theta_c} = \frac{YQ(S_o - S)}{1 + K_d \theta_c} \quad (2.96)$$

$$P_x = \left( \frac{g}{d} \right)$$

- La edad de los lodos es de ( $\theta_c$ ):

$$\theta_c = \frac{X\theta}{Y(S_o - S_e) - X\theta K_d} \quad (2.96) \quad (2.97)$$

- El caudal de recirculación ( $QR$ ):

$$QR = \frac{Q_x}{X_R - X} \quad 2.98$$

- La cantidad de oxígeno requerido (OD):

$$OD = 1.5Q(S_o - S_e) - 1.42XRQ_w$$

$$OD = (KgO_2)$$

- El caudal de aire ( $Q_{aire}$ )

$$Q_{aire} = \frac{OD}{0.232(1.2)} \quad (2.99)$$

$$Q_{aire} = (m^3/d)$$

- Eficiencia en Remoción de DBO total es ( $E$ ):

$$E = \frac{S_o - S_e}{S_o} \quad (2.100)$$

$$E = (\%)$$

## 2.10 VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES DE DISEÑO

### 2.10.1 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE DIMENSIONAMIENTO DEL SEDIMENTADOR CILINDRICO

Para el diseño de reactores sedimentador cilíndrico de flujo ascendente indica:

El sedimentador se diseña para proveer el área requerida para clasificación de la suspensión y permitir el espesamiento máximo de lodo activado MIRANDA, N. (2011).

#### 2.10.1.1 EL ÁREA REQUERIDA PARA CLARIFICACIÓN:

$$A = \frac{Q_o}{V_s} \quad (2.101)$$

$$Q_o = \frac{Q(H_o - H_u)}{H_u} \quad (2.102)$$

Dónde:

*A = área superficial de la zona de sedimentación.*

*Q<sub>o</sub> = tasa de clarificación*

*V<sub>s</sub> = velocidad de asentamiento, Calculada con base en la pendiente de la porción de asentamiento interferido de la interfaz, tramo AB de la curva de asentamiento.*

*H<sub>o</sub> = altura inicial de la interfaz en la columna (m)*

*H<sub>u</sub> = altura de la zona de lodos(m)*

#### 2.10.1.2 EL ÁREA REQUERIDA PARA ESPESAMIENTO:

Por la ecuación de Talmadge y Fitch (1962)

$$A = \frac{Q t_u}{H_o} \quad (2.103)$$

Dónde:

$A = \text{área superficial requerida para empesamiento del lodo, m}^2$

$Q = \text{Caudal afluyente al tanque, (m}^3/\text{s)}$

$t_u = \text{Tiempo requerido para alcanzar la concentración deseada } C_u \text{ en el espesado, s.}$

La concentración crítica que controla la capacidad de manejo de lodo del tanque, ocurre a la altura  $H_2$ , donde la concentración es  $C_2$ . Esta concentración requiere el valor máximo de  $A$ . Este punto se determina prolongando las tangentes a la sección de sedimentación interferida y a la sección de compresión de la curva de sedimentación interferida y a la sección de compresión de la curva de asentamiento hasta que se corten. Por el punto de corte se traza la bisectriz del ángulo formado y se obtiene el punto  $C_2$ .

### 2.10.1.3 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO PARA ALCANZAR LA CONCENTRACIÓN ( $C_u$ ) DEL LODO:

- a) Se traza una recta horizontal por la profundidad ( $H_u$ ), la cual corresponde a la concentración deseada del sólido en el lodo espesado ( $C_u$ ). Teniendo en cuenta que la masa total de sólidos en el sistema debe ser igual a  $C_oH_oA$  o a  $C_uH_uA$ , la profundidad  $H_u$  se puede calcular por la ecuación siguiente:

$$H_u = \frac{C_oH_o}{C_u} \quad (2.104)$$

- b) Se traza una tangente a la curva de sedimentación por el punto  $C_u$ .
- c) Se traza una recta vertical desde el punto de intersección de las rectas trazadas en los pasos a y b hasta el eje del tiempo para determinar el valor de  $t_u$  (figura 6.3)

**2.10.1.4 VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN ( $V_s$ ):**

$$V_s = \frac{H_o - H_s}{t_s} \quad (2.105)$$

Dónde:

$t_s$  = *tiempo de sedimentación (hs) en la tangente Sedimentación Interferida.*

$H_s$  = *altura de sedimentación interferida (m)*

$V_s$  = *Velocidad de sedimentación ( $\frac{m}{h}$ )*

**2.10.1.5 TASA DE CLARIFICACIÓN ( $Q_o$ ):**

$$Q_o = \frac{Q(H_o - H_u)}{H_o} \quad (2.106)$$

Dónde:

$Q_o$  = *Caudal del efluentem<sup>3</sup>/d*

$Q$  = *caudal afluente al tanque reactor m<sup>3</sup>/d*

**2.10.1.6 ÁREA DEL TANQUE REACTOR ( $A_R$ ):**

$$A_R = S_e$$

“Elige” el área mayor entre el área calculada de espesamiento y el área de clarificación (m<sup>2</sup>).

**2.10.1.7 DIÁMETRO DEL TANQUE REACTOR (D):**

Del área elegida para el reactor.

$$D = \left(\frac{4A}{\pi}\right)^{1/2} \quad (2.107)$$

**2.10.1.8 FLUJO DE SÓLIDOS:**

$$\text{Flujo de sólidos} = C_o Q = \left( \frac{\text{Kg}}{\text{d}} \right) \quad (2.108)$$

Dónde:  $C_o = \text{Concentración inicial de sólidos (KgSST/m}^3\text{)}$

$$Q = \text{Caudal del fluido (m}^3\text{/d)}$$

**2.10.1.9 CARGA DE SÓLIDOS:**

$$\text{Carga de sólidos} = \text{flujo de } \frac{\text{sólidos} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{d}} \right)}{\text{Area eligida (m}^2\text{)}} = \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2\text{d}} \right) \quad (2.109)$$

**2.10.1.10 CARGA HIDRÁULICA (CH):**

$$CH = Q(\text{m}^3\text{/d})/A (\text{m}^2\text{d}) = (\text{m}^3\text{/m}^2\text{d}) \quad (2.110)$$

**2.10.1.11 ALTURA DEL REACTOR (CILÍNDRICO) (H):**

Altura cilíndrica del proceso de tratamiento del agua Residual con flujo ascendente.

$$H = \frac{Q_o(tu)CH}{Q_e} \quad (2.111)$$

$$Q_e = \frac{Q_o(C_u - C_o)}{C_u - C_e} \quad (2.112)$$

Para una separación de sólidos en suspensión del agua residual al 50%

$$C_e = C_o * 0.5 \quad (2.113)$$

Dónde:

$H = \text{altura efectiva del reactor parte cilindrico(m)}$ .

$$Q_o = \text{m}^3\text{/d}$$

$$Qe = m^3/d$$

$$Cu = \frac{mgSST}{L} \text{ (lodos)}$$

$$Co = \frac{mgSST}{L} \text{ (afluentes)}$$

$$Ce = \frac{mgSST}{L} \text{ (espesado)}$$

*tu = tiempo requerido para alcanzar la concentración de lodos (Cu)*

#### 2.10.1.12 ALTURA DEL DISEÑO DEL REACTOR CILÍNDRICO

**(H<sub>D</sub>):**

$$HD = H \quad (2.114)$$

$$HD = (m)$$

#### 2.10.1.13 DIÁMETRO DE LA ZONA CILÍNDRICA DE CLARIFICACIÓN

**(D<sub>1</sub>):**

(D<sub>1</sub>), es el diámetro (D) del área elegida.

$$D1 = D \quad (2.115)$$

$$D1 = (m)$$

#### 2.10.1.14 ALTURA DE LA ZONA DE CLARIFICACIÓN (H<sub>1</sub>)

Es la altura seleccionada.

$$H_1 = H \quad (2.116)$$

$$H_1 = (m)$$

**2.10.1.15 DIÁMETRO DE LA ZONA DE INGRESO DEL AFLUENTE****(D<sub>2</sub>)**

$$D_2 = D_0(0.25) \quad (2.117)$$

$$D_2 = (m)$$

Dónde:

*D<sub>0</sub> = Diámetro del área no elegido***2.10.1.16 ALTURA DE LA ZONA DE INGRESO DEL AFLUENTE****(H<sub>2</sub>)**

$$H_2 = H_1(0.75) \quad (2.118)$$

**2.10.1.17 VOLUMEN DEL REACTOR (V<sub>R</sub>)**

$$V_R = \frac{\pi D^2 H}{4} \quad (2.119)$$

$$V_R = (m^3)$$

**2.10.1.18 VOLUMEN DE LA ZONA CÓNICA PARA LODOS****CONCENTRADOS (V<sub>c</sub>)**

Fair - Geyer (1996)

$$V_c = \frac{\pi}{3} \cot^2 \alpha (h_1^3 - h_2^3) \quad (2.120)$$

$$V_c = (m^3)$$

Altura total del cono (*h<sub>1</sub>*)

$$h_1 = H_1$$

$$h_1 = (m)\alpha = (40^\circ - 60^\circ)$$

Altura menor del cono (*h<sub>2</sub>*)

Es la altura de instalación para evaluar los lodos

$$h_2 = H_1 (0.25)$$

$$h_2 = (m)$$

Diámetro mayor  $D_c = D$

$$D_c = (m)$$

$$h_2 = H_1 (0.25)$$

Dónde:

$\alpha$  = Angulo de inclinación del cono.

$\alpha$  = (40°- 60°) Recomendable

### 2.11 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS COEFICIENTES CINÉTICOS

(K,  $K_s$ ,  $y$ ,  $K_d$  y  $\mu_m$ )

GERARD, K. (1999).

Se deben tomar datos experimentales en el reactor de mezcla completa de aireación sin recirculación, total como se muestra en la tabla. 2.4

**TABLA 8**  
**DATOS EXPERIMENTALES DBO, DQO,  $\theta = \theta_c$ , X EN AGUAS RESIDUALES AIREADAS**

EXPERIENCIA	DBO Afluente (Sc) (mg/L)	DBO Efluente (S) (mg/L)	$\theta = \theta_c$ (d)	X (mg SSV/L)
1				
2				
3				
4				
5				

Graficar los valores de:

$(1/S)$  en (L/mg) vs  $(X\theta/So-S)$  en (d) ver Figura 7.1

Para determinar los valores de:  $(K)$  en (d);  $(Ks)$  en (mg/L)

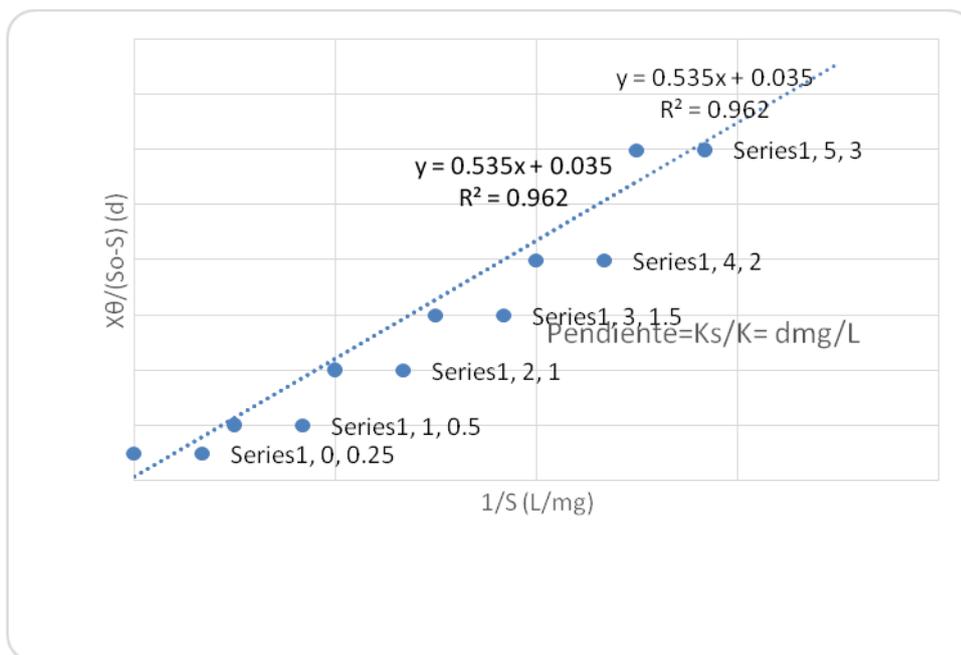


FIGURA 4 GRAFICO PARA LA OBTENCIÓN DE  $k$  Y  $Ks$

Graficar los valores de:

$(So-S)/K\theta$  en ( $d^{-1}$ ) (VS)  $(1/\theta_c)$  en ( $d^{-1}$ )

Para determinar los valores de:  $(Kd)$  en ( $d^{-1}$ );  $(Y)$

+Ver Figura 7.2.

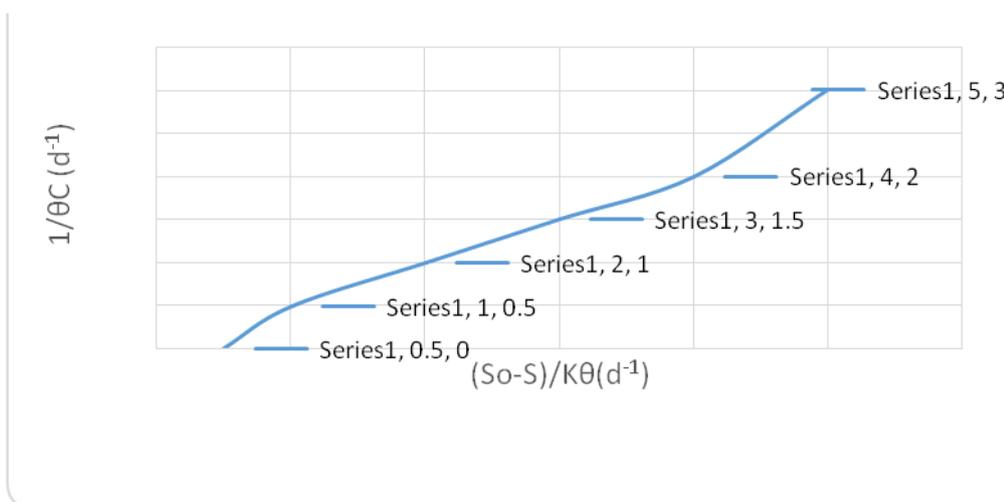


FIGURA 5 GRAFICO PARA LA OBTENCIÓN DE  $Y$  y  $Kd$

## 2.12 ESPECIFICACIONES Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

Las especificaciones de los reactores – equipos que integran el sistema de tratamiento de aguas residuales por proceso de lodos activados; son descritos de acuerdo al siguiente “esquema del proceso de lodos activados”.

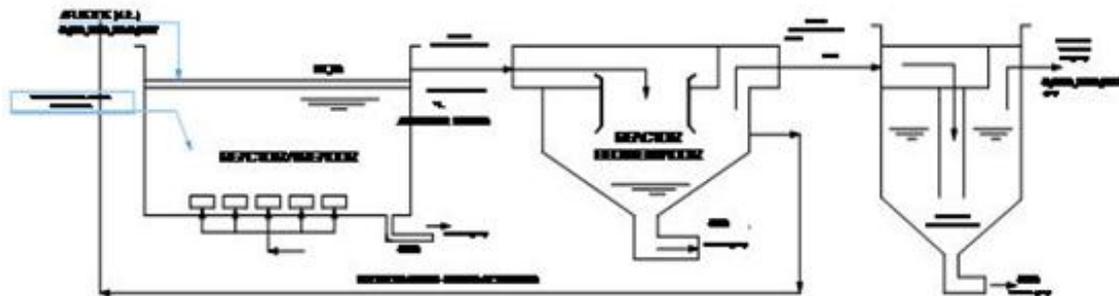


FIGURA 6 ESQUEMA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

DONDE:  $Q$  = Caudal

$C_o$  = Carga orgánica

$C_A$  = Capacidad de aireación

$T_o$  = Taza de oxigenación

DBO = Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO = Demanda Química de Oxígeno

SSv = Sólidos en Suspensión Volátiles

$C_m$  = Carga másica

A.R. = Aguas Residuales

$Q_L$  = Caudal de licor activado

$Q_{(LA)}$  = Caudal de Lodos Activados

$Q_{(AT)}$  = Caudal de agua Tratada

$Q_{LD}$  = Caudal de Lodos

### 2.12.1 DETERMINACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DE LOS REACTORES

El dimensionamiento de cada reactor: Reactor de aireación, Reactor de sedimentación y reactor de estabilización serán expuestos y denominados en los planos de diseño respectivos de levantamiento (A-A), (B-B) y planos isométricos a escala.

### 2.12.2 REACTOR AIREADOR

El reactor aireador tendrá las características técnicas de:

Modelo (Geometría) : Rectangular

Volumen : 115 Litros

Material de construcción: Fibra de vidrio

Función : Airear aguas Residuales, Activar microorganismos y en el reactor control de CA, TO.

Tipo aireación: Aireadores Difusos

Tipo Flujo(A,R): Flujo continuo

Control Parámetros: Q, CO, DQO,Ssv en el afluente y efluente

Proceso de (A,R) : Activación del agua Residual (A,R) y proceso de activación de los lodos para remoción de materia orgánica carbonacea (DBO), materia orgánica Nitrogenada(DQO parcial) que integra el licor de licor activado.

### 2.12.3 REACTOR SEDIMENTADOR

El reactor sedimentador tendrá las características técnicas:

Modelo-Geometría : Cilíndrico concéntrico

Volumen : 115 litros

Material de Construcción: Fibra de vidrio

Tipo de Flujo (A.R) : Flujo continuo de licor de lodos activados

Tipo de Sedimentación : De flujo ascendente

Control de Parámetros: para remoción de DQO, SSV, CO; con flujo continuo de licor de lodos activados con control de caudal  $Q_{(LA)}$  del licor de lodos activados y caudal  $Q_L$  de lodos.

Función: Sedimentar los lodos del licor de lodo activado y remoción de DQO, SSV y CO

Proceso: Remoción por sedimentación de la concentración de material lodo carbonaceo, lodo Nitrogenado y activación de la oxidación de materia no biodegradable que titula como DQO.

Flujo de recirculación: Recirculación de licor de lodo activado en (%)  $\leq$  30(%) al aireador.

#### 2.12.4 REACTOR ESTABILIZADOR

El reactor estabilizador tendrá las características técnicas de:

Modelo (geometría) : Cilíndrico de base cónico.

Volumen : 115 litros

Material de construcción: Fibra de vidrio

Tipo de flujo : Flujo continuo de lodos activados clarificado

Tipo de estabilización : De tipo centrípeta gravitatorio.

Control de parámetros : Calidad de remoción de; DQO,SSV,CO con flujo continuo de lodos activados clarificados en el caudal  $Q_{(AT)}$  de agua tratada y caudal de lodos  $Q_{(LD)}$ .

Función : Estabilizar la concentración de lodos removidos con material Carbobaceo, Nitrogenado y Óxidos no Biodegradables y Evacuar agua tratada Clarificada.

Proceso : Remoción de DQO, SSV, CO en lodos y agua tratada clarificada.

#### 2.12.5 ESTRUCTURA SOPORTE PARA LOS REACTORES

Los reactores, aireador difuso, sedimentador y estabilizador estarán instalados en estructuras metálicas de acero galvanizado de 2" de diámetro en orden de altura escalonada para flujo del agua residual de caudal continuo de caudal continuo de flujo hidráulico gravitatorio.

Las estructuras físicas Instaladas serán del tipo móvil por desplazamiento.

### 2.12.6 INSTRUCCIONES PARA EL USO DEL EQUIPO

La operación, manipulación, manejo y funcionamiento del sistema de reactores de: Aireador difuso, sedimentador de flujo ascendente y estabilizador para tratamiento de aguas residuales urbanas por proceso de lodos activados; contará con un “manual de instrucciones” en forma detallado, de acuerdo a su instalación, funcionamiento y control del proceso de tratamiento del agua residual.

Los equipos reactores se instalaran en el laboratorio de tecnología de aguas de la facultad de ingeniería Química de la UNA – PUNO.

Las instrucciones, funcionamiento y uso de los reactores para proceso de lodos activados se detallaran para cada uno de los reactores basados en las operaciones de:

- Funcionamiento y control del reactor:
  - Aireador: de aireación de flujo
  - Sedimentador: De flujo ascendente
  - Estabilizador: De centrípeta gravitatorio
- Evaluación: De remoción de DQO, SSV y secundario de CO
- Procedimiento de trabajo detallado:

Los usuarios de los reactores para tratamiento de aguas residuales por proceso de lodos activados deberán cumplir con el procedimiento de trabajo de tallado:

- a. Cumplir con las normas de seguridad y usar su equipo de protección personal (EPP)
- b. Manejar y manipular adecuadamente las válvulas de control de flujo del agua residual (A.R)
- c. Evaluar los parámetros de control en el efluente, proceso de tratamiento y en el efluente del flujo del agua residual.
- d. Restricción: No podrán realizar trabajos en los reactores ningún personal que no tenga sus (EPPs) completo.

## CAPITULO III

### CALCULOS DE INGENIERIA

#### 3. CÁLCULO DE INGENIERÍA

##### 3.1 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR AIREADOR

###### A. Volumen propuesto del reactor aireador:

Geometría cilíndrica

Volumen del agua residual a tratar: 100 L = 0.1 m<sup>3</sup>

###### B. Dimensiones del reactor aireador:

$$\text{De (2.69)} \quad V = \frac{\pi}{4} * D^2 * H$$

Dónde:

V = Volumen del reactor aireador (m<sup>3</sup>)

H = Altura del cilindro (m)

D = Diámetro (m)

$$H = 2D$$

$$\text{De (2.70)} \quad V = \frac{\pi}{2} * D^3$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{(0.1)(2)}{\pi}}$$

$$D = 0.4 \text{ m}$$

$$H = 2D$$

$$H = 0.8 \text{ m}$$

Altura de diseño  $H_D = H(1.2)$

$$H_D = (0.8)(1.2) = 0.96 \text{ m}$$

$$H_D = < 1 \text{ m} >$$

### 3.2 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR SEDIMENTADOR

#### A. Volumen del sedimentador ( $V_s$ )

$$V_T = 0.1 \text{ m}^3$$

#### B. Volumen de la parte cilíndrica ( $V_{ci}$ )

$$V_{ci} = \frac{\pi}{4} * D^2 * H$$

$$D = 0.4 \text{ m}$$

$$D = H$$

$$H = 0.40 \text{ m}$$

Altura del diseño  $H_D = 0.55 \text{ m}$

$$H_D = H (1.37)$$

$$H_D = (0.40)(1.37) = 0.55 \text{ m}$$

$$V_{ci} = \frac{\pi}{4} * (0.4)^2 * 0.4$$

$$V_{ci} = 0.050 \text{ m}^3$$

C. Volumen de la parte cónica ( $V_C$ )

$$V_c = \frac{\pi}{3} * (H_c)^3$$

Dónde:

$V_c$  = volumen cónico ( $m^3$ )

$H_c$  = Altura del cono (m)

$$V_C = V_T - V_{CL}$$

$$V_C = 0.1 - 0.069$$

$$V_C = 0.031 m^3$$

$$H_C = \left(\frac{3 V_C}{\pi}\right)^{1/3}$$

$$H_C = \left(\frac{3 (0.069)}{\pi}\right)^{1/3}$$

$$H_C = 0.31 m$$

Por lo tanto se tiene:

Volumen del cono  $V_C = 0.031 m^3$

Altura del cono  $H_C = 0.31 m$

Altura de descarga de lodos ( $H_L$ )

$$H = H_C + H_{ci} + H_L$$

Dónde:

$H_c$  = Altura del cono (m)

$H_{ci}$  = Altura cilíndrica (m)

$H_L$  = Altura de descarga de lodo (m)

$$1 \text{ m} = 0.31 + 0.55 + H_L$$

$$H_L = 0.14 \text{ m}$$

### 3.3 CONSUMO DE OXÍGENO EN EL AIREADOR (C.O)

$$C.O = (Q) * (\text{Reducción del DQO})$$

El caudal propuesto es para un volumen de 100 L = (0.1 m<sup>3</sup>) de agua residual para ser aireado por 4 (horas)

$$Q = \frac{0.100}{4 \text{ h}} (\text{m}^3) = 0.025 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$$

$$Q = 25 \left( \frac{\text{L}}{\text{h}} \right)$$

La reducción propuesta del DQO en el agua residual (AR) es de: 20(mg/L)

$$C.O = 25 \left( \frac{\text{L}}{\text{h}} \right) * 20 \times 10^{-3} \left( \frac{\text{g}}{\text{L}} \right)$$

$$C.O = 0.5 \left( \frac{\text{g}}{\text{h}} \right)$$

$$C.O = 5 \times 10^{-4} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right)$$

### 3.4 SUMINISTRO DE AIRE REQUERIDO (C<sub>AIRE</sub>)

$$C_{\text{aire}} = \frac{C.O}{(T.O)(C_m * O_2)(d_{\text{aire}})}$$

Dónde:

C<sub>aire</sub> = Suministro de aire (m<sup>3</sup>/d)

C.O = Consumo de oxígeno

T.O = Transferencia de oxígeno (%)

C<sub>m</sub> = Concentración máxima de oxígeno (%)

$d_{\text{aire}} = \text{Densidad de aire (kg/m}^3\text{)}$

$$C_{\text{aire}} = \frac{5 \times 10^{-4}}{(0.1)(0.232)(1.2)} = 0.0179 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

### 3.5 CONSUMO UNITARIO DE AIRE (C.U)

$$C.U = \frac{C_{\text{aire}}}{Q}$$

$$C.U = \frac{0.0179}{0.025} = 0.716$$

### 3.6 TASA REAL DE TRANSFERENCIA DE OXIGENO DEL EQUIPO AIREADOR (N)

De (2.16.A) 
$$N = \frac{N_0(\beta * C_s - C_L) * \alpha * (\theta)^{T-20}}{C_s}$$

Dónde:

$N = \text{Taza de transferencia de oxígeno (Kg O}_2\text{/MJ)}$

$N_0 = \text{Taza nominal de transferencia de oxígeno del aireador (Kg/MJ)}$

$\beta = 0.95$

$C_s = \text{Concentración de saturación del O}_2 \text{ en agua a } 20^\circ\text{C (mg/l)}$

$C_L = \text{Concentración de O.D (mg/L)}$

$\alpha = 0.85$

$\theta = 1.024 \text{ (A.R. urbanas)}$

$T = \text{Temperatura del agua en } (^\circ\text{C)}$

$$N = \frac{0.0125(0.09 * 9.17 - 1)(0.85)(1.024)^{(15-20)}}{9.17}$$

$$N = 0.00793 \frac{Kg O_2}{MJ}$$

### 3.7 POTENCIA REQUERIDA PARA LA AIREACIÓN (P<sub>A</sub>)

De (2.17) 
$$P_A = \frac{c.o}{N}$$

$$P_A = \frac{5 \times 10^{-3} (Kg/h)}{0.00793 (Kg O_2/MJ)}$$

$$P_A = 0.63 \frac{MJ}{h}$$

$$P_A = \frac{0.63 \times 10^6}{3600 \times 1000} = 0.175 (Kw)$$

$$P_A = 0.234 (Hp)$$

### 3.8 NIVEL DE POTENCIA EN EL REACTOR DE AIREACIÓN (N<sub>P</sub>)

De (2.18.A) 
$$N_P = \frac{P_A}{Vol.Reactor}$$

$$N_P = \frac{175 w}{0.1 m^3} = 17.5 \frac{w}{m^3}$$

### 3.9 POTENCIA DEL COMPRESOR (P)

$$P = \frac{W R T_1}{8.41 E} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{0.283} - 1 \right]$$

Dónde:

P = Potencia al eje del compresor (Kw)

W = Caudal másico (kg/s)

T<sub>1</sub> = Temperatura absoluta °k al ingreso de aire

R = 8.314 (Kj/kmol°k)

P<sub>1</sub> = Presión absoluta al ingreso del aire

P<sub>2</sub> = Presión absoluta a la salida del aire

E = Eficiencia compresor (0.7 – 0.9)

**A. Suministro de o<sub>2</sub> difuso = (C.O).(eficiencia transferido de O<sub>2</sub> difuso)**

$$C.O = 5 \times 10^{-3} \frac{Kg}{h}$$

Datos operativos:

Eficiencia transferido de O<sub>2</sub> difuso = 1%

Temperatura entrada (T<sub>1</sub>) = 15°C = 298 K

Presión de salida P<sub>2</sub> = 2.5 (Psi) = 0.17 atm

Eficiencia del compresor E = 75 %

**B. Oxígeno requerido (OR)**

$$OR = \frac{C.O}{(\text{Eficiencia transferido de } O_2 \text{ difuso})}$$

$$OR = \frac{5 \times 10^{-4} \frac{Kg}{h}}{0.01} = 0.050 \frac{Kg O_2}{h}$$

**C. Caudal de aire requerido (W)**

$$W = \frac{(OR)}{(\%)O_2 \text{ atmosférico}}$$

$$(\%)O_2 \text{ atmosférico} = 23.2 \%$$

$$W = \frac{0.050}{0.232} = 0.2155 \frac{Kg O_2}{h}$$

$$W = 5.98 \times 10^{-5} \frac{Kg}{h}$$

#### D. Potencia del compresor (P)

$$P_2 = 486 \text{ mmHg} = 0.64 \text{ atm}$$

$$P_{2 \text{ absoluta}} = 1 + 0.64 = 1.64 \text{ atm (Condición de Puno)}$$

$$P = \frac{(5.98 \times 10^{-5})(8.314)(298)}{(8.4)(0.75)} \left[ \left( \frac{1.17}{1.64} \right)^{0.283} \right]$$

$$P = 0.016 \text{ Kw}$$

$$P = 0.0214 \cong < 0.25 \text{ HP} >$$

$$P = < \frac{1}{4} \text{ HP} >$$

### 3.10 EVALUACIÓN DEL REACTOR DE LODOS ACTIVADOS DE MEZCLA COMPLETA SIN RECIRCULACIÓN

Datos operativos

#### A. Afluentes del agua residual

$$(x) \dots DQO = 460 \left( \frac{mg}{L} \right)$$

$$DBO = 2200 \left( \frac{mg}{L} \right)$$

$$\text{Caudal } Q_o = 25.0 \left( \frac{L}{h} \right) = 0.025 \left( \frac{m^3}{h} \right) = 0.6 \left( \frac{m^3}{d} \right)$$

Coficiente de producción de células formadas en la masa del sustrato consumido (Y) es:

$$Y = 0.65$$

$$K_d = 0.05 \text{ d}^{-1}$$

Para aguas residuales domesticas (Metcales Eddy – 1995)

Tiempo de retención hidráulica  $\theta = 4 \text{ (hs)}$

Los sólidos en suspensión volátil máximo  $SSVLM = 2200 \text{ (}^{mg}/L\text{)}$

(%) Porción volátil de solidos totales  $ST \text{ (\%)} = 80 \text{ (\%)}$

Edad de lodos  $\theta_c = 8 \text{ h} = 0.33 \text{ día}$

## B. Efluentes del agua residual

Los datos reportados para el efluente del agua residual con valores propuestos, para el diseño de los reactores.

$$DBO_e = 20 \text{ (}^{mg}/L\text{)}$$

$$SST_e = 20 \text{ (}^{mg}/L\text{)}$$

- **Evaluación del proceso de lodos activados**

### DBO soluble en el efluente

De (2.38)  $S_e = DBO_e - 0.63(SST_e)$

$$S_e = 20 - 0.63(20)$$

$$S_e = 7.4 \text{ (}^{mg}/L\text{)}$$

### Volumen del reactor (V)

De la evaluación en el diseño  $V = 100(L) = 0.1 \text{ (}m^3\text{)}$  (propuesto)

**Producción de lodos (Px)**

De (2.53) 
$$P_x = \frac{Y \cdot Q \cdot (S_o - S)}{1 + K_d \cdot \theta_c}$$

$$P_x = \frac{(0.65)(0.6)(200 - 7.4)}{1 + (0.05)(1)} = 71.60 \text{ (g SSV/d)}$$

$$P_x = 0.0716 \text{ (Kg SSV/d)}$$

**C. Datos de análisis en laboratorio en el agua residual del efluente y en los lodos**

- **En el agua residual efluente o tratada.**

(x).....  $DBO_e = 38 \text{ (mg/L)}$

(xx).....  $SST_e = 20.5 \text{ (mg/L)}$

(xxx).....  $DQO_e = 180 \text{ (mg/L)}$

- **En lodos**

(xx) solidos totales en lodos sedimentado =  $8200 \text{ (mg/L)}$

**Fuente:**

(x), (xx) y (xxx) Laboratorio de control de calidad de la FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA UNA-PUNO (Mayo 2016)

Evaluación de la edad de lodos  $\theta_c$

De la ecuación (2.51)

$$X.V = \frac{\theta_c \cdot (Y) \cdot Q (S_o - S_e)}{1 + K_d \cdot \theta_c}$$

$$(2200)(0.1) = \frac{\theta_c * (0.65) * (0.6 \text{ m}^3/\text{d}) (200 - 7.4)}{1 + (0.05) * \theta_c}$$

$$\theta_c = 0.2992 \text{ dias}$$

$$\theta_c = 7.10 \text{ horas}$$

$\theta_c = < 7.30 > \text{ horas}$  Para tiempo de edad de lodos

▪ **Producción de solidos totales de desechos:**

De (2.54) se tiene:

$$\text{lodo seco} = \frac{\text{producción de lodo}}{\% \text{ volatil de sólidos}}$$

$$\text{lodo seco} = \frac{0.0716 \text{ (Kg SSV/d)}}{0.8} = 0.0895 \text{ (Kg/d)}$$

▪ **Caudal de lodos de desecho ( $Q_w$ )**

De (2.55) se tiene:

$$Q_w = \frac{\text{Lodo seco (Kg/d)}}{\text{STD Lodo (Kg/m}^3\text{)}}$$

De análisis en laboratorio de tecnología de aguas FIQ-UNA-PUNO, se tiene:

$$\text{STD Lodo} = 8200 \text{ mg/L} = 8.2 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_w = \frac{0.0895 \text{ (Kg/d)}}{8.2 \text{ (Kg/m}^3\text{)}} = 0.0194 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)$$

- **Cantidad de oxígeno requerido (OD)**

De (2.38.A) se tiene:

$$OD = 1.5 Q(S_o - S_e) - 1.42 X_R * Q_w$$

De análisis en el laboratorio de tecnología de aguas FIQ-UNA-PUNO, se tiene:

$X_R$  = biomasa extraída en los lodos de recirculación batch

$$X_R = (0.8)(8200) \text{ mg/L}$$

$$X_R = 6560 \text{ mg/L}$$

$$Q = 0.025 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$OD = \frac{(1.5)(0.025)(86400)(200 - 7.4) - 1.42 (6560)(0.0194)}{1000}$$

$$OD = 645.55 \text{ kg } \frac{O_2}{d}$$

$$OD = 26.898 \text{ kg } \frac{O_2}{h}$$

- **Requerimiento del caudal de aire en condiciones normales**

$$Q_{\text{aire}} = \frac{OD}{0.178(1.20)}$$

$$Q_{\text{aire}} = \frac{645.55}{0.178(1.20)}$$

$$Q_{\text{aire}} = 3022.23 \text{ (m}^3\text{/d)}$$

$$Q_{\text{aire}} = 125.92 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

$$Q_{\text{aire}} = 2.1 \text{ (m}^3/\text{min)}$$

Para el rendimiento del (80%) de transferencia de oxígeno del equipo de aireación en condiciones reales, el caudal real de aire es de:

$$Q_{\text{aire (R)}} = \frac{Q_{\text{aire}}}{0.8}$$

$$Q_{\text{aire (R)}} = \frac{3022.23 \text{ (m}^3/\text{d)}}{0.8} = 3777.8 \text{ (m}^3/\text{d)}$$

$$Q_{\text{aire (R)}} = 157.4 \text{ (m}^3/\text{h)}$$

$$Q_{\text{aire (R)}} = 26.23 \text{ (m}^3/\text{min)}$$

Por lo tanto se debe transferirse  $26.23 \text{ (m}^3/\text{min)}$  de aire para satisfacer el requerimiento de oxígeno para el proceso aireación en el reactor aireador.

- **Volumen de aire requerido por unidad de DQO aplicado al reactor de aireador:**

$$V_{(\text{aire}/\text{DBO})} = \frac{Q_{\text{aire}}}{(\text{DBO}) * Q} = \text{(m}^3/\text{Kg)}$$

$$V_{(\text{aire}/\text{DBO})} = 3022.23 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times \frac{\text{L}}{200 \text{ mg}} \times \frac{\text{s}}{25 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ d}}{86400 \text{ s}} \times \frac{10^6 \text{ mg}}{\text{Kg}}$$

$$V_{(\text{aire}/\text{DBO})} = \frac{(3022.23)(10^6)}{(200)(25)(86400)} = 6.99 \text{ (m}^3/\text{Kg)}$$

- **Volumen de aire requerido por unidad de DBOR removida**

$$V_{(\text{aire}/\text{DBOR})} = \frac{Q_{\text{aire}}}{(\text{DBOR}) * Q}$$

$$V_{(aire/DBOR)} = 3022.23 \frac{m^3}{d} \times \frac{L}{(200 - 7.4) mg} \times \frac{s}{25 L} \times \frac{1d}{86400s} \times \frac{10^6 mg}{Kg}$$

$$V_{(aire/DBOR)} = \frac{3022.23}{(200 - 7.4)} \times \frac{10^6}{(25)(86400)} = 7.26 \left(\frac{m^3}{Kg}\right)$$

- **Carga orgánica volumétrica (COV)**

De (2.33) se tiene:

$$COV = \frac{Q * S_o}{V}$$

$$COV = \frac{0.6(m^3/d)(200 mg/L)}{0.1 m^3} \times \frac{1 Kg}{1000 g} \times \frac{1000 L}{m^3}$$

$$COV = \frac{(0.6)(200)}{0.1} \left(\frac{g}{m^3 d}\right)$$

$$COV = 1200 \left(\frac{g}{m^3 d}\right)$$

- **Relación *Alimento/microorganismo* (A/M)**

De (2.34) se tiene:

$$\frac{A}{M} = \frac{Q * (S_o)}{V(x)}$$

$$\frac{A}{M} = \frac{(0.6 m^3/d \times 200 mg/L)}{(0.1m^3)(2200 mg/L)}$$

$$\frac{A}{M} = 0.545 d^{-1}$$

- **Eficiencia de remoción de DBO soluble (E<sub>DBO</sub>)**

De (2.30) se tiene:

De datos de análisis de laboratorio de aguas residual

$$E_{DBO} = \frac{(S_o - S_e)}{S_o} \times 100$$

Dónde:

$S_o$  = DBO –afluente (mg/L)

$S_e$  = DBO –efluente (mg/L)

La ecuación se realiza con valor de DBO reales después del tratamiento de aguas residual.

$$E_{DBO} = \frac{(200 - 38)}{200} \times 100$$

$$E_{DBO} = 81 \%$$

▪ **Eficiencia de remoción de DQO ( $E_{DQO}$ )**

De (2. )

De datos de análisis de laboratorio.

$$E_{DQO} = \frac{(DQO_o - DQO_e)}{DQO_o} \times 100$$

Dónde:

$DQO_o$  = DQO afluente (mg/L)

$DQO_e$  = DQO efluente (mg/L)

La evaluación se realiza con valores del DQO reales después del tratamiento de agua residual.

$$E_{DQO} = \frac{(460 - 180)}{460} \times 100$$

$$E_{DQO} = 68.87 \%$$

### 3.11 RESULTADOS DE PRUEBAS EN MARCHA DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS CON LODOS ACTIVADOS

**TABLA 9**

**REMOCION DEL DQO Y DEL TIEMPO DE AIREACION PARA  
PRUEBAS DE DISEÑO Y REACTORES DE LODOS ACTIVADOS EN  
MARCHA**

n	T	DQO(I)	DQO (II)
1	0	460	510
2	30	398	430
3	60	350	358
4	90	307	301
5	120	249	266
6	150	197	212
7	180	180	210
8	210	183	205

$$\%R(I) = \frac{DQO_o - DQO_f}{DQO_o} * 100$$

$$\%R(I) = \frac{(460 - 183)}{460} * 100$$

$$\%R(I) = 60.22\%$$

$$\%R(II) = \frac{510 - 205}{510} * 100$$

$$\%R(II) = 59.85 \%$$

DQO(I) = Evaluaciones para diseño en reactores de laboratorio

DQO (II) = Evaluaciones para diseño en reactores diseñados puesto en marcha

INTERPRETACION: se realizaron ocho pruebas tanto en el laboratorio como en la puesta en marcha del reactor, según tabla podemos ver la disminución del DQO, conforme va aumentando el tiempo de prueba. El porcentaje de remoción de la concentración de DQO en laboratorio fue 60.22 % , y en la puesta en marcha del reactor fue de 59.85 % , lo que nos indica que el equipo si cumple con los objetivos planteados.

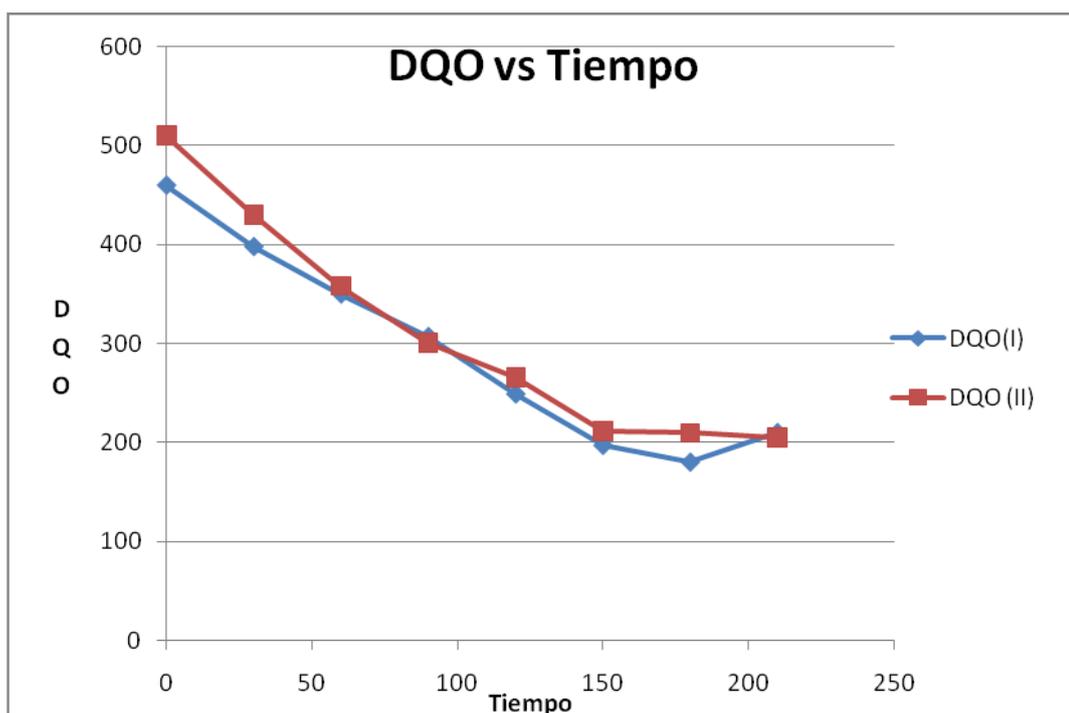


FIGURA 7 GRAFICO DE DQO CON RESPECTO AL TIEMPO

INTERPRETACION: La demanda química de oxígeno disminuye conforme pasa el tiempo, tanto en la prueba experimental en laboratorio, como en la prueba puesta en marcha del reactor, lo cual nos indica que el nivel de remoción de la materia orgánica por la disminución de la concentración de DQO. También vemos en el grafico que el efluente tiene baja concentración para su emisión, según los límites máximos permisibles.

TABLA 10

**REMOCION DEL DBO Y DEL TIEMPO DE AIREACION PARA PRUEBAS DE DISEÑO Y REACTORES DE LODOS ACTIVADOS EN MARCHA**

N	T	DQO(I)	DQO (II)
1	0	200	250
2	30	192	205
3	60	165	152
4	90	155	126
5	120	98	116
6	150	55	108
7	180	38	88
8	210	35	88

$$\%R(I) = \frac{(200 - 35)}{200} * 100 = 82.5\%$$

$$\%R(I) = \frac{250 - 88}{250} * 100 = 64.8\%$$

INTERPRETACION: se realizaron ocho pruebas tanto en el laboratorio como en la puesta en marcha del reactor, según tabla podemos ver la disminución del DBO, conforme va aumentando el tiempo de prueba. El porcentaje de remoción de la concentración de DQO en laboratorio fue 82.5 %, y en la puesta en marcha del reactor fue de 64.8 %, lo que nos indica que el equipo si cumple con los objetivos planteados.

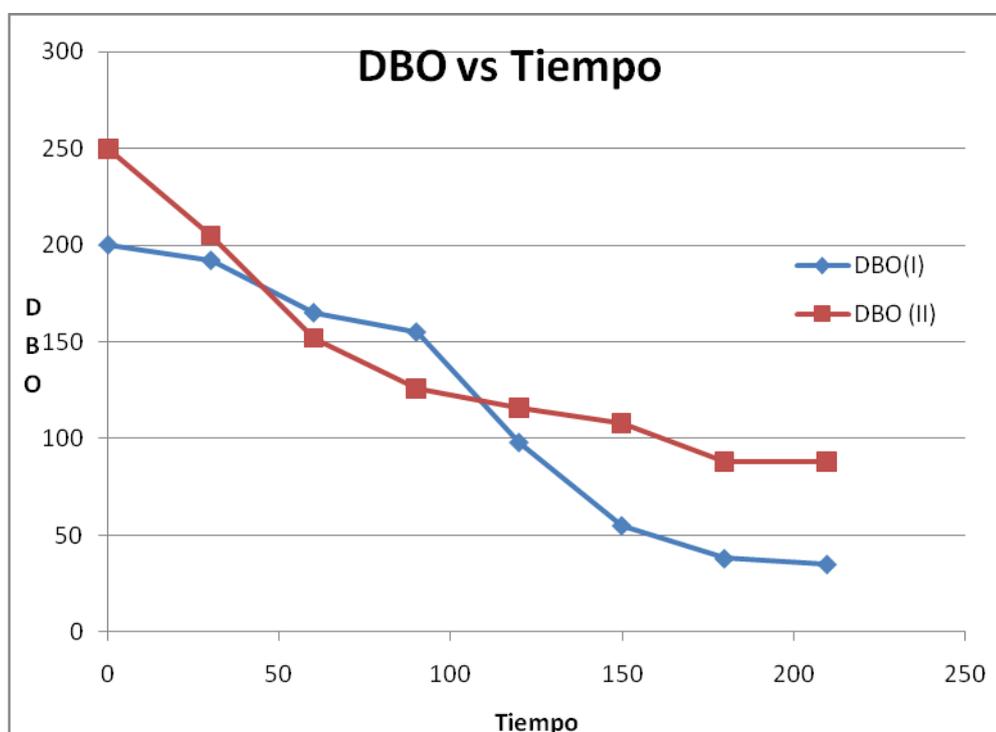


FIGURA 8 GRAFICO DE DBO CON RESPECTO AL TIEMPO

INTERPRETACION: La demanda bioquímica de oxígeno disminuye conforme pasa el tiempo, tanto en la prueba experimental en laboratorio, como en la prueba puesta en marcha del reactor, lo cual nos indica que el nivel de remoción de la materia orgánica por la disminución de la concentración de DBO. También vemos en el grafico que el efluente tiene baja concentración para su emisión, según los límites máximos permisibles.

TABLA 11

**REMOCION DE (SST) Y TIEMPO DE SEDIMENTACION PARA PRUEBAS  
DE DISEÑO Y EN REACTORES DE LODOS ACTIVADOS**

n	t	SST(I)	SST(II)
1	0	2200	2100
2	30	2005	1701
3	60	1902	1098
4	90	1210	796
5	120	600	390
6	150	52	169
7	180	20	39
8	210	20	39
9	240	20	39

$$\%R(I) = \frac{(2200 - 20)}{2200} * 100 = 99.1 \%$$

$$\%R(II) = \frac{(2100 - 39)}{2100} * 100 = 98.1 \%$$

INTERPRETACION: Se realizaron ocho pruebas tanto en el laboratorio como en la puesta en marcha del reactor, según tabla podemos ver la disminución del SST, conforme va aumentando el tiempo de prueba. El porcentaje de remoción de la concentración de SST en laboratorio fue 99.1 % , y en la puesta en marcha del reactor fue de 98.1 % , lo que nos indica que el equipo si cumple con los objetivos planteados.

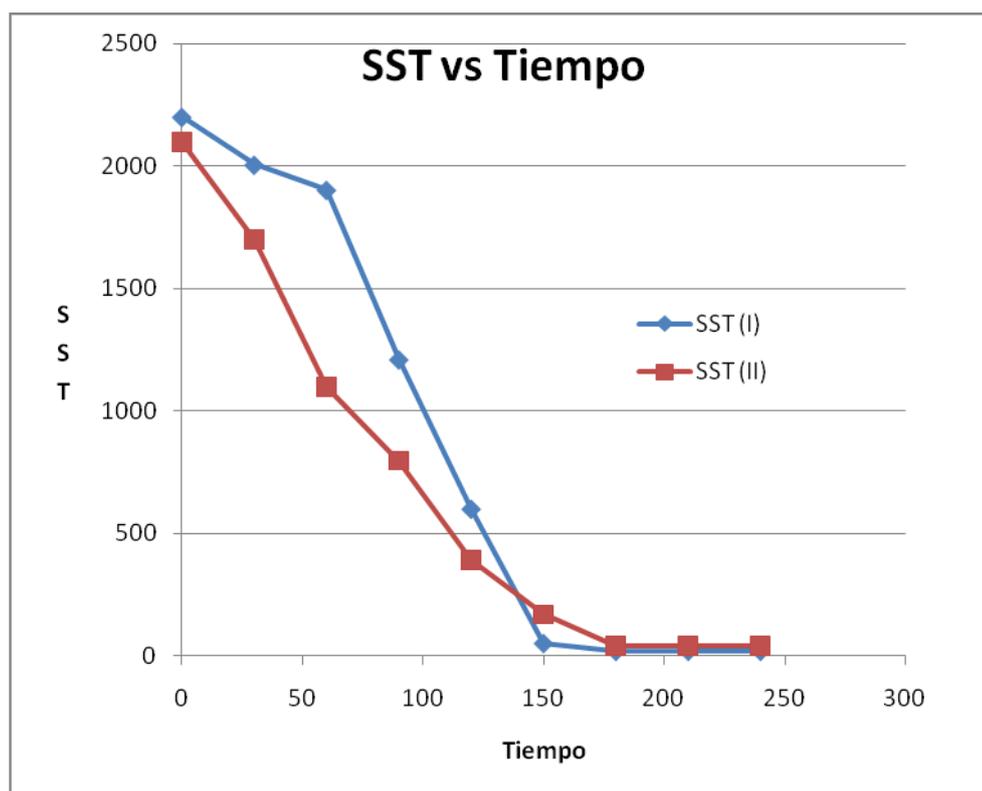


FIGURA 9 GRAFICO DE SST CON RESPECTO AL TIEMPO

INTERPRETACION: Los sólidos suspendidos totales disminuye conforme pasa el tiempo, tanto en la prueba experimental en laboratorio, como en la prueba puesta en marcha del reactor, lo cual nos indica que el nivel de remoción de la materia orgánica por la disminución de la concentración de SST, también como se ve en un tiempo de 150 min, ya no ocurre la sedimentación. También vemos en el grafico que el efluente tiene baja concentración para su emisión, según los límites máximos permisibles.

### 3.12 COSTOS DEL EQUIPO

#### 3.12.1 PRESUPUESTOS Y COSTOS

##### 3.12.1.1 PROYECTO

Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas Por Proceso De Lodos Activados Para Remoción De La Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos en Suspensión Volátiles (SSV) y Sólidos en Suspensión Totales (SST).

**3.12.2 COSTOS.****3.12.2.1 COSTOS DIRECTOS.****TABLA 12****A1. COSTOS DEL EQUIPO DE REACTORES Y REACTIVOS.**

RUBRO	DETALLE	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (US) \$	COSTO (US) \$
A1.1. Reactor mecánico Aireador	- para proceso de Aireación - sedimentador Primario. - control de DQO,SSV a diferentes Caudales de Aire y Solubilidad Aire- A.R.	Equipo	01	1050.00	1050.00
A1.2. Reactor mecánico floculador ascensional	- para proceso de Sedimentación ascensional de Lodos Activados de flujo continuo. - control de DQO, SSV, y Realimentación de Lodos en el Afluente Efluente.	Equipo	01	750.00	750.00
A1.3. Tanque Estabilizador	- Recepción del Agua Residual (A.R.) tratado. - control de Lodos y del A.R. Tratada.	Equipo	01	350.00	350.00
		<b>SUB TOTAL (US) \$.</b>			<b>2150.00</b>

**TABLA 13**

**A2. COSTOS DE ACCESORIOS E INSTRUMENTOS.**

RUBRO	DETALLE	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (US) \$	COSTO (US) \$
A2.1 Impulsión Realimentación de Flujo de Lodos.	- Bomba Perilstática.	Equipo	01	350.00	350.00
A2.2 Tablero de Control	- Reles Airead	Equipo	01	620.00	620.00
A2.3. Accesorios Instalación	- Tuberías.	Accesorios	12m	002.50	030.00
	- Válvulas.	Accesorios	06	012.00	072.00
	- Uniones.	Accesorios.	12	003.00	036.00
	- Estructura con soporte Móvil.	Equipo.	01	650.00	650.00
				<b>Sub total (us) \$</b>	<b>1758.00</b>

**10.2.2. COSTOS INDIRECTOS**

**TABLA 14**

**COSTOS INDIRECTOS**

RUBRO	DETALLE	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (US) \$	COSTO (US) \$
8.2.1. materia Escritorio	material de escritorio	-	Varios	250.00	250.00
8.2.2. Impresión.	Impresión.	-	Varios	200.00	200.00
8.2.3. Bibliografía.	publicación	-	Varios	150.00	150.00
8.2.4. publicación	publicación	-	Varios	200.00	200.00
<b>Sub total (US) \$.</b>					<b>800.00</b>

Imprevistos	(5%)	235.00
Costo del proyecto		4708.00
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>(US)\$.</b>	<b>4943.00</b>

## CONCLUSIONES

- La evaluación e instalación del sistema de reactores para tratamiento de aguas residuales por proceso de lodos activados se logró mediante pruebas y puestas en marcha de este sistema y fue posible la remoción de sólidos en suspensión total (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO).
- Se evaluó el diseño y se dimensiono a nivel de laboratorio el tamaño de los reactores, tanto del aireador rectangular con flujo difuso; también el sedimentador tubular de flujo radial, como del reactor homogenizador rectangular, por medio de las pruebas y mediante cálculos matemáticos.
- Se evaluó el nivel de remoción del sustrato de materia orgánica soluble en el agua residual urbana, obteniendo los siguientes resultados; DQO, entro con una concentración de 510 mg/L, finalizando las pruebas se logró bajar a 205 mg/L. DBO, inicio con 250 mg/L, al finalizar 88 mg/L. SST, comenzamos con 2200 mg/L, finalizando con 20 mg/L.
- Se implementó el laboratorio de tecnología de aguas de la Facultad de Ingeniería Química con la instalación, evaluación y su operatividad de los reactores: aireador de flujo de aire difuso, sedimentador tubular radial y homogenizador para lodos biológicos, en los cuales se podrá evaluar el nivel de remoción de DQO, DBO Y SST, de aguas residuales urbanas.

## RECOMENDACIONES

- El equipo debe ser manejado con mucho cuidado, ya que es de un material que puede ser quebrado.
- Cuando se use el rumen como lodo activado, es mejor q sea del mismo día, ya que los microorganismos mueren por falta de sustratos.
- Una vez terminado las pruebas realizadas en el equipo se debe dejar completamente limpio, porque si no los lodos obstruirán el flujo por la tuberías de recirculación.
- El diseño del reactor aireador debió tener una descarga por la parte central del cilindro para evacuar todos los sedimentos.
- Para una mejor remoción de sustratos y una mejor precipitación de los sólidos en suspensión total, se recomienda usar floculantes como el  $\text{Ca(OH)}_2$ .

**BIBLIOGRAFÍA**

- AWWA – RESEARCH FOUNDATION (1991). Calidad de tratamiento de Aguas Residuales. Edit. Mc GRAW – HILL (USA).
- ECKENFELDER, w. (1980). Principles of water Quality Management, CBI Preb. Co. USA.
- FAIR – GEYER (1996). Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. Edit. Limusa México D. F.
- GERARD KIELY (1999). Ingeniería ambiental Edit. Mc GRAW – HILL México.
- GRITES R. – TCHOBANOGLOUS G. (2000). Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. Edit. Mc GRAW – HILL ESPAÑA.
- LAWRENCE Y Mc CARTI. (1998). Tratamiento de Aguas Residuales. Edit. Mc Graw Hill México.
- LEVIN M. GEALT M. (2002). Biotratamiento de residuos tóxicos y Peligrosos en Aguas Edit. Mc GRAW – HILL Madrid – España.
- MACKENZIE – MASTEN (2005). Ingeniería y Ciencias Ambientales. Edit. Mc GRAW – HILL Canada.
- METCALF & EDDY, (1995). Ingeniería de Aguas Residuales. Edición 3ra Edit. Mc GRAW – HILL TORONTO CANADA.
- MIRANDA NORBERTO (2010). Tecnología de Aguas. Edit. Econocopi S.R. Puno – Perú.
- MIRANDA NORBERTO (2011). Curso Tratamiento de Aguas Residuales. PENUMA – PERÚ – PUNO.

- OROZCO JARAMILLO ALVARO (2005). Bio Ingeniería de Aguas Residuales Edit. ACODAL Bogotá Colombia.
- ROMERO, R. J. (2002). Tratamiento de aguas residuales. Edit. Escuela Colombiana de Ingeniería Colombia.
- ROMALHO RUBENS, S. (2003). Tratamiento de aguas Residuales. Edit. Reberte, S, A. México.
- SAWYER, C. – Mc CARTY, P. (1992). Chemistry For Sanitary Engineers. Edit. Mc GRAW – HILL Book Co. New York.
- VARO GALVAÑO SEGURA BENEYTO, M. (2009). Curso de manipulador de Agua de consumo Humano. Edit. Texto Docentes. Alicante España.
- [WWW.WIKEPEDIA](http://www.wikipedia.org): Aguas Residuales.

ANEXOS

**ANEXO A: VALORES DE SATURACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO, EN AGUA, EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS A 760 MMHG<sup>(+)</sup>**

(°C)	0*	5.000*	10.000*	15.000*	20.000
0	14,62	13,79	12,97	12,14	11,32
1	14,23	13,41	12,61	11,82	11,03
2	13,84	13,05	12,28	11,52	10,76
3	13,48	12,72	11,98	11,24	10,50
4	13,13	12,41	11,69	10,97	10,25
5	12,80	12,09	11,39	10,70	10,01
6	12,48	11,79	11,12	10,45	9,78
7	12,17	11,51	10,85	10,21	9,57
8	11,87	11,24	10,61	9,98	9,36
9	11,59	10,97	10,36	9,76	9,17
10	11,33	10,73	10,13	9,55	8,98
11	11,08	10,49	9,92	9,35	8,80
12	10,83	10,28	9,72	9,17	8,62
13	10,60	10,05	9,52	8,98	8,46
14	10,37	9,85	9,32	8,80	8,30
15	10,15	9,65	9,14	8,63	8,14
16	9,95	9,46	8,96	8,47	7,99
17	9,74	9,26	8,78	8,30	7,84
18	9,54	9,07	8,62	8,15	7,70
19	9,35	8,89	8,45	8,00	7,56
20	9,17	8,73	8,30	7,86	7,42
21	8,99	8,57	8,14	7,71	7,28
22	8,83	8,42	7,99	7,57	7,14
23	8,68	8,27	7,85	7,43	7,00
24	8,53	8,12	7,71	7,30	6,87
25	8,38	7,96	7,56	7,15	6,74
26	8,22	7,81	7,42	7,02	6,61
27	8,07	7,67	7,28	6,88	6,49
28	7,92	7,53	7,14	6,75	6,37
29	7,77	7,39	7,00	6,62	6,25
30	7,63	7,25	6,86	6,49	6,13

Fuente: H. SCOTT FOGLER (2001).

- **Concentración de cloruros en mg/L**

Para cualquier otra presión barométrica, P (mm), la solubilidad, Cs (mg/L) se puede calcular por la ecuación:

$$C_s = OD \frac{P - p}{760 - p}$$

Dónde:

OD = valor de la tabla a 760 mm Hg

P = presión barométrica, mm Hg

p = presión de vapor a la temperatura del agua, mm Hg

El valor de p puede ignorarse para elevaciones menores de 900 m y temperaturas menores de 25°C.

(+) Según Whipple y Whipple, Jour. Am. Che. Soc., 33 (1911): 362.

**ANEXO B:EL PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA**

	Peso	Densidad	(1)	Viscosidad		(2)	Presión de
	específico	$\rho$ .	Módulo	dinámica	cinemática	Tensión	vapor
Temperatura	$\gamma$ ,	$\text{kg/m}^3$ ,	de elasticidad	$\mu \times 10^3$	$\nu \times 10^6$	superficial	
°C	$\text{N/m}^3$		$\text{E}/10^5$ $\text{kN/m}^2$	$\text{N.s/m}^2$	$\text{m}^2/\text{s}$	$\text{N/m}$	$\text{kN/m}^2$
0	9805	999,8	1,98	1,781	1,785	0,0765	0,61
5	9804	1000,0	2,05	1,518	1,519	0,0749	0,87
10	9804	999,7	2,10	1,307	1,306	0,0742	1,23
15	9798	999,1	2,15	1,139	1,139	0,0735	1,70
20	9789	998,2	2,17	1,002	1,003	0,0728	2,34
25	9777	997,0	2,22	0,890	0,893	0,0720	3,17
30	9764	995,7	2,25	0,798	0,800	0,0712	4,24
40	9730	992,2	2,28	0,653	0,658	0,0696	7,38
50	9689	988,0	2,29	0,547	0,553	0,0679	12,33
60	9642	983,2	2,28	0,466	0,474	0,0662	19,92
70	9589	977,8	2,25	0,404	0,413	0,0644	31,16
80	9530	971,8	2,20	0,354	0,364	0,0626	47,34
90	9466	965,3	2,14	0,315	0,326	0,0608	70,10
100	9399	958,4	2,07	0,282	0,294	0,0589	101,33

Fuente: H. SCOTT FOGLER (2001).

(1) A presión atmosférica.

(2) En contacto con aire.

**ANEXO C: HOJA DE COSTOS DE EQUIPO**



Calle Pez Austral 387 Oficina 202  
Urb.Sol de Vitarte Ate Lima – Perú  
☎ : 425-5683  
☎ : 999-365655  
E-mail: [igartem\\_aquaf@hotmail.com](mailto:igartem_aquaf@hotmail.com)  
[Global\\_hidraulica@speedy.com.pe](mailto:Global_hidraulica@speedy.com.pe)

**Proforma N° 5051-2014**  
Lima, 01 de Abril del 2014

Señores  
**FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA – UNA – PUNO**

Presente.-

**Atn.** : David Machaca  
Uriel Condori  
**Ref.** : Diseño de una Planta Piloto de Tratamiento de Efluentes Domésticos.

Estimados señores:

Es muy grato para nosotros enviarles un cordial saludo y de acuerdo a su solicitud, tenemos a bien poder presentarles nuestra **PROFORMA** por lo siguiente:

**ITEM 1: DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS.**

El fin del suministro consiste en efectuar el diseño de un sistema de tratamiento a nivel piloto laboratorio, para eliminar los contaminantes a un grado tal, que su vertimiento cumpla con los límites permisibles del medio receptor. El diseño y suministro de la Planta Piloto de Tratamiento de Efluentes Domésticos, consiste en lo siguiente:

- Esquema de diseño de la Planta Piloto. \$ 1,000.00
  - Estructuras y componentes de la planta piloto y sus características \$ 3,500.00
- Características Técnicas:
- \* Caudal de diseño : 10 LPH
  - \* Medidas Reactor: Ancho: 0.2 m Largo: 0.40 m Altura: 0.60 m
  - \* Componentes básicos:
    - Bomba de alimentación
    - Reactor de Aireación
    - Reactor de Sedimentación
    - Equipo de aireación
    - Sistema de recirculación de lodos
    - Recipiente de alimentación
    - Recipiente de efluente tratado
    - Tablero de control
    - Estructura metálica de soporte y anclaje.

<b>VALOR TOTAL</b>	<b>U.S. \$ 4,500.00</b>
--------------------	-------------------------

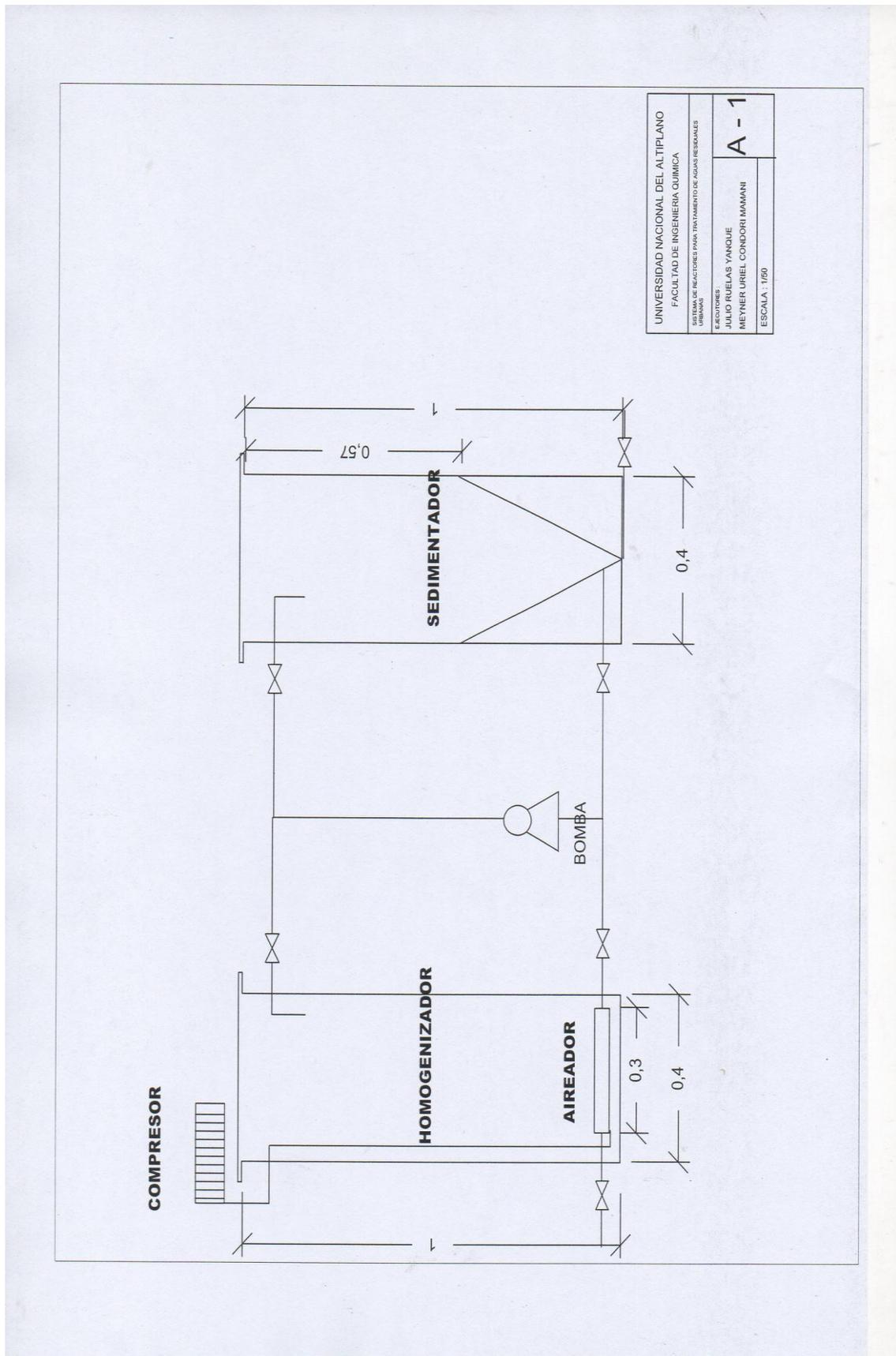
**Términos de Venta:**

- Valores : Expresados en Dólares Americanos
- Forma de Pago : 60% con la aceptación, 40% a la entrega
- Cuenta \$ Banco Continental : 0011-0132-88-0200158278
- Plazo de Entrega : 30 Días (No incluye gastos de envío).

Sin otro particular, quedamos a la espera de sus gratas órdenes;  
Muy atentamente,

ING. ARTEMIO CHOQUEZA NINA  
RPM # 999365655

**ANEXO D: DIAGRAMA DE SISTEMA DE REACTORES**



**ANEXO E: PRÁCTICAS Y PRUEBAS DEL SISTEMA DE REACTORES PARA  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR PROCESO DE Lodos  
ACTIVADOS**



EQUIPO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES



AIREADOR DE REACTOR DE TIPO RECTANGULAR



SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS



SEDIMENTADOR CONICO

**HACIENDO LAS PRUEBAS CON RUMEN Y AGUAS RESIDUALES URBANAS**



RUMEN DE GANADO VACUNO FRESCO



SACANDO LAS BACTERIAS DEL RUMEN DE GANADO VACUNO



TOMA DE MUESTRAS DEL AGUA RESIDUAL



TOMANDO MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES URBANAS PARA LABORATORIO



TOMANDO MUESTRAS INICIALES DE AGUAS RESIDUALES URBANAS



AGREGANDO LOS LODOS ACTIVADOS (RUMEN) A LAS AGUAS RESIDUALES



MIDIENDO EL VALOR DE SOLIDOS EN SUSPENSION DE LAS MUESTRAS



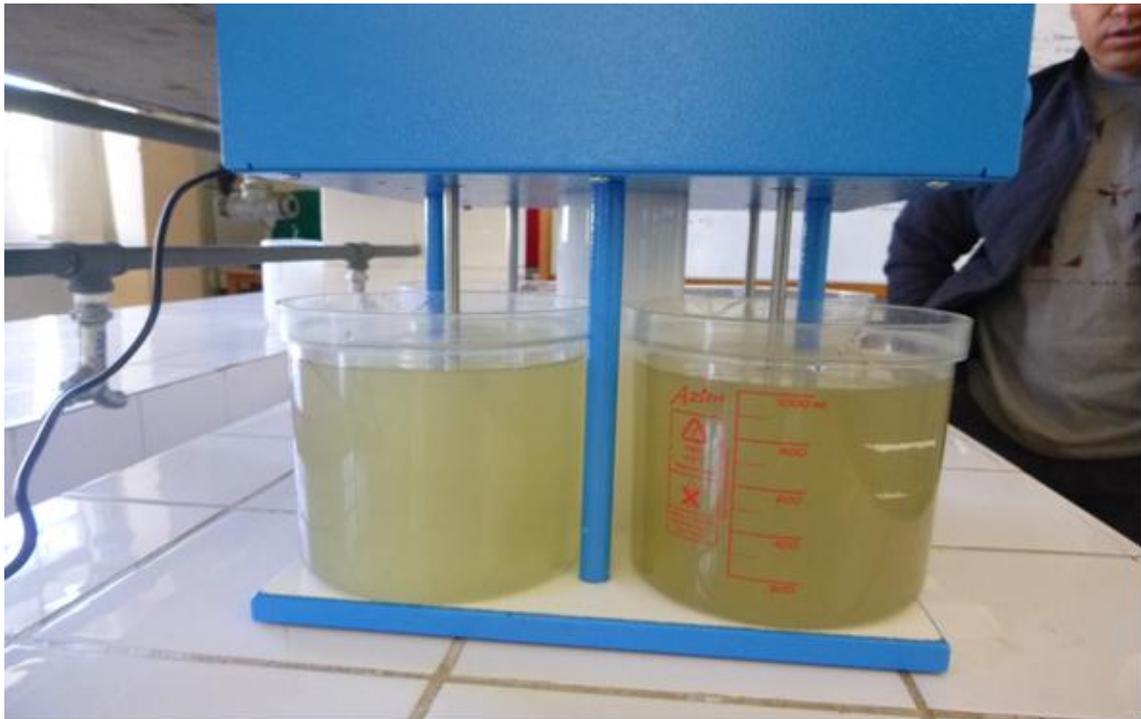
MIDIENDO EL PH DE LA MUESTRA



AGREGANDO 1 L DE MUESTRA PARA LLEVAR A PRECIPITACION



AGREGANDO EL FLOCULANTE (CaOH)



PRECIPITANDO CON EL EQUIPO AGITADOR



RESULTADO DE LA PRECIPITACION CON FLOCULANTE