



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

PRACTICAS EN INVESTIGACIÓN

Sensibilidad del coeficiente de transferencia de oxígeno ($K_L a$) con aireadores frente a parámetros operacionales en experimentos con agua pura e influencia de diferentes grados de hermetismo a la transferencia de oxígeno natural superficial ($K_L a_s$) sin aireadores

Autor(es)

ELIAS DANIEL DAVID NOVA BURGOS

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

28 Julio 2019



**SENSIBILIDAD DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO
($K_L a$) CON AIREADORES FRENTE A PARÁMETROS OPERACIONALES EN
EXPERIMENTOS CON AGUA PURA E INFLUENCIA DE DIFERENTES GRADOS
DE HERMETISMO A LA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO NATURAL
SUPERFICIAL($K_L a_s$) SIN AIREADORES**

**EMPFINDLICHKEIT DES SAUERSTOFFÜBERTRAGUNGSKOEFFIZIENTES (KLa)
GEGEN BETRIEBSPARAMETER BEI VERSUCHEN MIT REINWASSER UND
EINFLUSS DER UNTERSCHIEDLICHER VERSIEGELUNGSSTUFEN AUF
DEN TRANSFER VON OBERFLÄCHLICHEM UND NATÜRLICHEM SAUERSTOFF
($KLas$)**

ELIAS DANIEL DAVID NOVA BURGOS

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero civil e ingeniero Sanitario

Asesores (a):

MARKUS AHNERT; Diplom-Ing. Urban Water Managment

NATALIA DA SILVEIRA ARRUDA; Arquitecta y Urbanista, M.Sc. Planificación urbana
y Territorial

Línea de Investigación: Tratamiento de aguas residuales

Grupo de Investigación: Waste water treatment group

Technische Universität Dresden

Fakultät Umweltwissenschaften, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft

Dresden, Deutschland

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, Escuela ambiental.

Ciudad, Colombia

2019.

Contenidos

1. Resumen	3
2. Introducción	3
3. Objetivo.....	4
4. Marco Teórico	5
5. Metodología.....	6
5.1. Requisitos para la toma de datos.....	6
5.2. Procedimiento.....	7
5.3. Comprobación.....	7
5.4. Planeación de los experimentos	7
5.4.1. Primer Ronda de Experimentos	7
5.4.2. Segunda Ronda de Experimentos	8
5.5 Materiales	9
5.6 Procesamiento de datos para el cálculo de KLa y $KLas$	9
6. Resultados y Análisis	10
6.1. Primer Ronda de Experimentos	10
6.2. Segunda Ronda de Experimentos	17
7. Conclusiones	23
8. Agradecimientos	24
9. Referencias Bibliográficas.....	24
10. Anexos	25
Fotografía 1: Montaje de la primera serie de experimentos	8
Fotografía 2: Montaje de la segunda serie de experimentos.....	9

1. Resumen

El coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La) no es solo un valor relevante para la optimización de sistemas de aireación en sistemas de lodos activados, sino que además es un concepto de gran relevancia para la aireación en cuerpos de agua naturales. Para su cálculo se usa comúnmente la ley de transferencia de gases de Fick. Siguiendo la metodología de la normatividad alemana DIN EN 12255-15 se logró demostrar la sensibilidad e influencia que tienen parámetros ambientales y operacionales como la temperatura, los detergentes, el caudal de aire y la velocidad de mezcla al coeficiente de transferencia de oxígeno en experimentos con aireación con el fin de tener la menor cantidad de influencias o ruidos para los experimentos de transferencia natural, sin aireación. Es decir, luego de obtener las influencias en el cálculo del coeficiente de transferencia, se cuantificó la transferencia de oxígeno superficial con que de manera natural el ambiente transfiere a la muestra de agua pura para diferentes grados de hermetismo.

En los experimentos de absorción de oxígeno con y sin aireación posteriores al abatimiento con nitrógeno gaseoso, se demostró que se puede aumentar, en 79.93 h^{-1} el K_La por cada m^3/h del caudal de alimentación de aire ($79.93 \text{ h}^{-1}/(\text{m}^3/\text{h})$) y 0.0022 h^{-1} el K_La_s por cada rpm de velocidad de mezcla. Los niveles de hermetismo simulado se realizaron por medio de una lámina de espuma (foam) y nueces de styrofoam los cuales presentaron una reducción de 0.31% del K_La_s por cada rpm de velocidad de mezcla ($0.31\%/rpm$) para el primero y 32.6% del K_La_s independiente de la velocidad para el segundo. Se demostró, además, un valor constante mínimo de 0.08 h^{-1} de K_La_s para cualquier grado de hermetismo bajo condiciones naturales y sin mezcla, es decir condiciones naturales.

2. Introducción

Los experimentos de caracterización del agua residual pueden incluir ensayos de respiración y toxicidad de aguas residuales, estos ensayos se representan por medio de un gráfico de concentración de oxígeno vs tiempo, en dicho gráfico se muestra el abatimiento del oxígeno por parte de los microorganismos aerobios presentes en los lodos activados. Estos experimentos sirven, por un lado, para determinar la cantidad de oxígeno a suministrar para satisfacer la demanda de respiración basal (endógena) y la demanda de respiración para asimilación del sustrato y reproducción de los microorganismos aerobios (exógena), por otro lado, como una forma alternativa de evaluación de toxicidad que pueda contener una muestra de agua residual frente a los mismos microorganismos indicadores de toxicidad (Ahnert, Dr. Kühn, Dr. Brückner, & Fritsche, 2017). Como consecuencia de los experimentos de respiración y toxicidad de aguas residuales surgió la pregunta acerca de la influencia que tiene la atmósfera en la transferencia de oxígeno en este tipo de ensayo, que se caracterizan por ser herméticos para evitar errores en las mediciones de la concentración de oxígeno. Por esta razón se decide experimentar en el laboratorio de aguas residuales del instituto de gestión de aguas urbanas e industriales de la universidad de Dresden, acerca del proceso de transferencia de oxígeno interna debido a los aireadores y externa debido a la transferencia atmosférica.

El proceso de absorción y el cálculo del coeficiente de transferencia de oxígeno es altamente influenciado por factores ambientales tales como la temperatura, la presión atmosférica, agentes tensoactivos, sólidos disueltos, materiales biodegradables, y otras variables como la profundidad de los tanques y la velocidad de mezcla (Eckenfelder & Englande, 2009). Es por esto, que se pretende cuantificar (1) la influencia en el proceso de transferencia de oxígeno por parte de los parámetros anteriormente mencionados a excepción de la profundidad, puesto que requiere de otras condiciones e instalaciones necesarias en el cálculo del coeficiente de la transferencia de oxígeno para reactores mayores a 4m de profundidad (H. & Wager, 1994). Además, se busca cuantificar la magnitud de reducción del coeficiente de transferencia debido a las condiciones herméticas de los reactores a escala de laboratorio, que son extrapolables a plantas de tratamiento de aguas residuales de mezcla completa o sistemas naturales con poca mezcla como cuerpos lenticos.

La metodología empleada es la exigida por la normatividad alemana para la medida del suministro de oxígeno en agua pura para tanques de aireación de lodos activados (DIN EN 12255-15, 2004). Donde se debe mostrar: las características del tipo de agua, materiales, químicos, instalaciones, equipos de medición, presentación de los diagramas de concentración de oxígeno, procedimiento del ensayo, planeación de los experimentos, comprobación de los datos, exactitud de los resultados, presentación y discusión de los resultados.

Cabe resaltar además, que la comprensión de los fenómenos de transferencia (difusión) no solo es importante para demostrar la eficiencia de un sistema de aireación en plantas de aguas residuales, sino que también los resultados ayudaran a cuantificar la influencia de la transferencia de oxígeno ($K_L a$) por medio de condiciones ambientales y operacionales, así como también cuantificar y mostrar la influencia que los diferentes grados de hermetismo brinden al coeficiente de transferencia de oxígeno superficial ($K_L a_s$), el cual puede ser comparable al efecto que se tiene en cuerpos lenticos donde se presente por ejemplo alto nivel de plantas acuáticas flotantes o donde se tenga gran cantidad de plásticos o materiales contaminantes flotantes que impidan o retrasen la transferencia de oxígeno natural al agua.

3. Objetivos

- ❖ Cuantificar la influencia que el caudal de alimentación de aire (aireación) tiene sobre el coeficiente de transferencia de oxígeno ($K_L a$) y la influencia que la velocidad de mezcla tiene sobre el coeficiente de transferencia de oxígeno superficial ($K_L a_s$) por medio de absorción de oxígeno de forma natural.
- ❖ Calcular la reducción que tiene el $K_L a_s$ para los diferentes tipos de niveles de hermetismo y diferentes valores velocidades de mezcla.

4. Marco Teórico

Posterior a la desorción de oxígeno debida al arrastre causado por la sobresaturación de nitrógeno gaseoso, se presenta la absorción del oxígeno descrita y propuesta por la ley de Fick (1) o también llamada ley de transferencia de gases en líquidos, la cual está compuesta por un coeficiente general de transferencia de oxígeno ($K_L a$) y un gradiente de absorción o déficit representado con ($C_s^* - C_i$) (ASCE, 1984). Este déficit se compone de una concentración de saturación o de equilibrio propuesta por la ley de Henry (C_s^*) y la concentración de oxígeno para el tiempo determinado i (C_i). Con este modelo se calcula la transferencia de oxígeno, por ejemplo, para diseñar los sistemas de aireación de un tanque de lodos activados.

$$\frac{dC}{dt} = K_L a * (C_s^* - C_i) \quad (1)$$

Poco tiempo después, McWhirter y Hutter (1989) separaron la transferencia de oxígeno superficial ($K_L a_s$) de la transferencia de oxígeno debido al proceso de aireación ($K_L a_b$), así como también se ajustó el cálculo de la concentración inicial (C_o^*), la cual aparece después de integrar la ecuación 1, que paso a ser en función de la profundidad del tanque y de la fracción molar que se va consumiendo de la burbuja de aire en el ascenso de los tanques de aireación, la cual cambia no solo debido a la presión circundante sino también a la presión de la misma burbuja en su recorrido, ecuación (2). La profundidad desde donde ocurre la difusión hasta la superficie del agua se nombró h_d (McWhirter & Hutter, 1989).

$$\frac{dC}{dt} = \frac{K_L a_b}{h_d} * \int_0^z (C_o^* - C_i) * dz + K_L a_s * (C_s^* - C_i) \quad (2)$$

El valor de la concentración de saturación (C_s^*) puede ser calculado por medio de la ecuación (3), para una temperatura y presión determinada donde se realiza el experimento (C_{S,P^o,T^o}), una constante de saturación a nivel estándar ($C_{S,St,T} = 9,09 \frac{mg O_2}{L}$, es decir a 20°C y 1013hPa (1 atm) de presión, una concentración de saturación a presión estándar pero temperatura determinada (C_{S,St,T^o}), una presión estándar o de referencia $P^* = 1013hPa$ y una presión determinada donde se realiza el experimento (P^o) (Kayser, 1977).

$$C_s^* = C_{S,P^o,T^o} * \left(\frac{C_{S,St,T}}{C_{S,St,T^o}} \right) * \left(\frac{P^*}{P^o} \right) \quad (3)$$

Otro concepto importante para la interpretación de la transferencia de oxígeno, y que es muy utilizada para el diseño de sistemas de aireación, es la tasa de transferencia de oxígeno estándar (standard oxygen transfer rate, SOTR), la cual se define como la cantidad de oxígeno en kilogramos que se transfieren en una hora. Para su determinación es necesario transformar el coeficiente de transferencia de oxígeno de la temperatura determinada a condiciones estándar de 20°C (5), así como es necesario transformar la concentración de saturación del experimento a esta misma condición ($C_{S,20}$), es decir aplicar nuevamente la ecuación (3), pero para 20°C de temperatura y 1 atm(1013hPa) de presión.

$$SOTR = \frac{V * K_L a_{20} * C_{S,20}}{1000} \quad (4)$$

$$K_L a_{20} = K_L a_T * 1,024^{(20-T)} \quad (5)$$

Cabe destacar que, aunque el modelo (1) haya tenido mejoras a través del tiempo, este se sigue siendo válido por la normatividad norteamericana y europea e inclusive hoy en día es aceptado para el diseño de sistemas de aireación debido a su simplicidad y aplicabilidad.

5. Metodología

Por medio del registro de concentraciones de oxígeno disuelto de experimentos de absorción, tomados en el laboratorio de la universidad técnica de Dresde, se proponen regresiones no-lineales, en las cuales se calcula un coeficiente de transferencia, coeficiente de transferencia superficial de oxígeno, una concentración de saturación y una concentración de oxígeno inicial. Para la medición de las concentraciones de oxígeno y la comprobación del ajuste de la regresión no lineal se siguieron las recomendaciones y exigencias alemanas del “Cálculo y medición de oxígeno en experimentos con agua pura en tanques de aireación de lodos activados” (DIN EN 12255-15, 2004), recomendaciones metodológicas que son válidas también para la mayoría de países del territorio europeo.

Es importante aclarar, además, que para este estudio se igualo el coeficiente de saturación para una presión y temperatura determinada ($C_{S,p^{\circ},T^{\circ}}$) y el coeficiente de saturación a presión estándar ($C_{S,st,T^{\circ}}$), debido a la poca diferencia en la presión atmosférica del lugar de los experimentos con la presión estándar, la cual es además mostrada en los resultados.

5.1. Requisitos para la toma de datos

Los equipos de medición fueron calibrados y puestos en funcionamiento por al menos 12 horas, para así comprobar que la concentración de saturación no fuera mayor al 5%, la concentración teórica. El intervalo o resolución de medición de oxígeno fue de 10 segundos, cuyo valor es menor que el mínimo de $0.1/K_L a$ requerido en la norma alemana. Los datos medidos fueron grabados y almacenados en el computador del laboratorio, para posteriormente presentar graficas en tiempo real de concentraciones de oxígeno disuelto Vs tiempo (mg O₂/L Vs t). Para todos los ensayos del numeral 5.4 se registraron más de 30 puntos durante el proceso de aireación o difusión atmosférica. Se registraron valores de temperatura entre el inicio y final de los experimentos con una precisión de 0,1°C, mientras que la precisión para el sistema de medición del caudal de aire fue con un error de tan solo el 5%. Como se usó agua pura, se garantizó un agua sin altos contenidos de nitritos, nitratos o patógenos que influyeran en el consumo del oxígeno. La evaporación natural fue controlada por medio del nivel del reactor, para así garantizar un máximo cambio de 1cm de la columna de agua y evitar errores en la concentración de oxígeno. Se repitió algunos de los experimentos con la misma agua usada en anteriores experimentos, excepto cuando se usó químicos que cambiaran las características de la muestra. El nitrógeno fue suministrado con el mismo sistema a compresión con el que se alimentó el oxígeno. Se calculo la altura de la columna de agua con instrumentación con precisión de 0.1mm. Se estimó la presión atmosférica por medio del promedio de inicio y fin de la experimentación y los datos de presión atmosférica se obtuvieron por medio del portar público gratuito <https://www.niederschlagsradar.de/>.

5.2. Procedimiento

El experimento de absorción inicio con el abatimiento de oxígeno por medio de la sobresaturación de nitrógeno gaseoso. Los datos medidos por el computador fueron tomados dentro de un rango del 10% al 95% de la concentración de saturación (C_s^*), es decir, $10\%C_s^* < C_i < 95\%C_s^*$. La C_s^* fue calculada para los experimentos por medio de la metodología propuesta por Kayser, en la cual se tienen concentraciones de saturación a diferentes temperaturas del agua, pero a una presión atmosférica estándar (Kayser, 1977). Esta es una consideración de gran importancia pues la absorción de oxígeno presta un comportamiento exponencial asintótico en la concentración de saturación, y es antes de alcanzar este punto donde se puede parar de registrar los datos de concentración de oxígeno sin necesidad de esperar grandes periodos de tiempo para alcanzar C_s^* . La presión atmosférica en el lugar de experimentación fue cercana a 1013hPa como se presenta en la ilustración 12, adjunta en los documentos anexos.

5.3. Comprobación

Para cada experimento se debió comprobar la validez del modelo de regresión no lineal, y para esto se recomienda determinar el rango en donde se calculará el coeficiente de transferencia de oxígeno. Esta comprobación puede ser por medio del grafico de residuales, calculados con (6), los cuales debían ser aleatoriamente distribuidos en al menos un rango de longitud igual a $3.5/K_L a$.

No siempre se presenta una distribución “dispersa”, y por lo tanto se debió mover los rangos de inicio de los datos registrados para el cálculo de la pendiente $K_L a$, sin sobrepasar el 25% del C_s^* , es decir, $C_o^* < 0.25 * C_s^*$. Cuando la distribución no era dispersa como se exigía en la norma, se usó el coeficiente de correlación de determinación para comprobar la calidad del calculo de $K_L a$.

$$Residual = (C_{i(medido)} - C_{i(calculado\ por\ el\ modelo)}) \quad (6)$$

5.4. Planeación de los experimentos

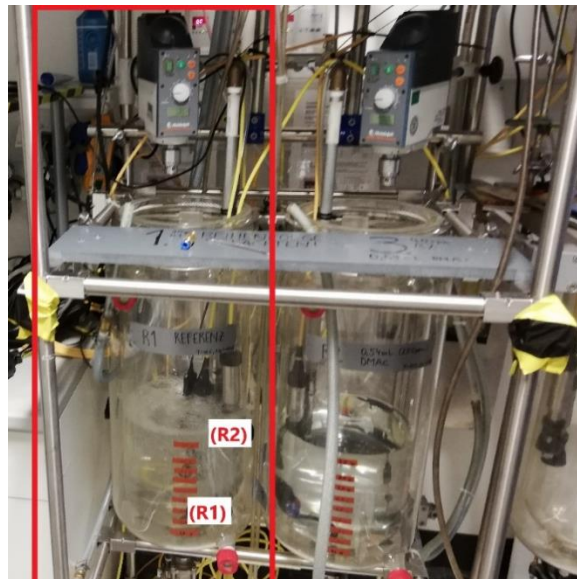
Como se mencionó anteriormente, el proceso de absorción presenta grande sensibilidad a los cambios ambientales, operacionales y de diseño en el caso de tanques de aireación. Para esto se planeó hacer dos series de experimentos: La primera, llamada “primer ronda de experimentos”, se cuantifico y presento dicha sensibilidad a parámetros ambientales y operacionales y para la “segunda ronda de experimentos” se tomaron las medidas representativas para que las influencias ambientales y operacionales no afectaran el proceso de toma de datos de las diferentes condiciones de hermetismo de los reactores.

5.4.1. Primer Ronda de Experimentos

La primera fase de la práctica se caracterizó por el uso del sistema de aireación, es decir, se tiene tanto el $K_L a_b$ del sistema de aireación y el $K_L a_s$ de la difusión atmosférica en un solo coeficiente de transferencia general $K_L a$. Para la primera fase también se registró: La concentración de oxígeno, volumen, altura del punto de aireación y altura de la columna de agua, temperatura del agua, cantidad de nitrógeno y aire usado, medidas del pH, conductividad y velocidad de mezcla, se uso sal y detergentes líquido y en polvo.

Para medir la sensibilidad que cada uno de los parámetros anteriormente mencionados tenían sobre el coeficiente de transferencia de oxígeno se cambió cada uno de estos parámetros, al menos tres veces, siguiendo el proceso descrito en 5.2, y se calculó el coeficiente de transferencia de oxígeno para mostrar la tendencia que él $K_L a$ tiene frente a cada parámetro.

En la fotografía 1, recuadro rojo se muestra la ubicación de los oxímetros inferior y superior los cuales son llamados respectivamente R1 y R2. Se muestra la posición del mezclador, el electrodo de pH y sonda de conductividad las cuales están detrás del oxímetro R2, además se presenta la ubicación del sistema de aireación fino, que esta 5cm del fondo del tanque.



Fotografía 1: Montaje de la primera serie de experimentos, R1 es el oxímetro inferior y R2 es el oxímetro superior.

5.4.2. Segunda Ronda de Experimentos

Para la segunda fase de experimentos de la práctica y debido a que el término de la izquierda del modelo (2) no se presenta, puesto que ni se tiene sistema de aireación ni se tiene un reactor de profundidades mayores a 4m, se calculó el $K_L a_s$ del modelo (2) similar a como se realizó para el modelo (1). Además, para esta serie de experimentos se tomaron las mediciones de: Concentración de oxígeno, volumen, altura del punto de aireación y altura de la columna de agua, cantidad de nitrógeno y aire usado. Sin embargo y a diferencia de la primera ronda de experimentos, en esta se controló la temperatura del agua por medio de un termorregulador que mantuvo el agua de los 3 reactores a una temperatura de 20°C en todos los experimentos de la segunda ronda.

En esta serie de experimentos la velocidad de mezcla es fundamental ya que se pretende presentar una regresión producto del efecto que la mezcla tiene en la transferencia de oxígeno para cada nivel de hermetismo, es decir, se probó al menos 5 velocidades diferentes para construir dicha regresión.

En la fotografía 2 se muestra la distribución de reactores con sus respectivos niveles de hermetismo nombrados de la siguiente manera: "A1" para la lámina de espuma, "A2" para los 7cm de altura de los granos de Styrofoam y "A3" para el reactor sin tapa. En este caso y a diferencia de la primera

serie de experimentos solo se tiene 1 oxímetro por reactor, los cuales son ubicados en la parte inferior del reactor. En la misma fotografía, se muestra la posición del mezclador, el sistema de alimentación de nitrógeno, en parte inferior también posicionado a 5cm del fondo del tanque.



Fotografía 2: Montaje de la segunda serie de experimentos. Reactor A1 con tapa de espuma, A2 con styrofoam y A3 sin tapa

5.5 Materiales

Ya se ha mencionado anteriormente algunos de los equipos utilizados, sin embargo, se presenta en la siguiente tabla, que contiene de forma resumida los equipos empleados para las dos series de experimentos. En general se usaron diferentes tipos de reactores y número de oxímetros.

Tabla 1: Resumen de materiales usados durante las dos series de experimentos.

Equipo	Nombre	Fabricante	Cantidad	Característica
Reactor	Borosilikatglas 3.3	HWS	1	Diámetro nominal 200mm; 15L de capacidad usado en la 1. ronda de experimentos
Reactor	Borosilikatglas 3.3	HWS	3	Diámetro nominal 150mm; 15L de capacidad usado en la 2. ronda de experimentos
Multiparámetro	Multi HQ40d	Hach	2	Almacenador de datos usado en el 1. y 2. ronda de experimentos
Oxímetro	LDO	Hach	2	Sensor usado en la 1. y 2. ronda de experimentos
Multiparámetro	Multi 3420 IDS	WTW	1	Almacenador de datos usado en la 2. ronda de experimentos
Oxímetro	FDO 925	WTW	2	Sensor usado en la 2. ronda de experimentos
tubo Difusor (Difusor)	Ac-168 Porous rubber	Hailea	4	Diámetro 4mm (1 usado en la 1. ronda de experimentos y 3 en la 2. ronda)
Mezclador	RZR 2102 Control	Hedolph	4	Diámetro de las hélices 90mm; 50mm sobre el fondo del reactor
Rotámetro (Tambor medidor de gases)	TG 5/6	Ritter	1	usados en la 1. y 2. ronda de experimentos
Termorregulador	Alpha RA 8	Lauda	1	en la 2. ronda de experimentos
PH-Electrodo	SenTix 940-3	WTW	1	el cual estaba conectado al multiparámetro de la 1. ronda de experimentos

5.6 Procesamiento de datos para el cálculo de $K_L a$ y $K_L a_s$.

Debido al gran la cantidad de experimentos y volumen de datos, se programaron 4 funciones en Excel visual Basic for Applications (VBA), las cuales están adjuntas de forma virtual con la entrega de este documento. La primera función llamada "Modell" se encarga de leer la fecha de inicio y fin de toma de datos de la absorción, es decir se lee la mayor cantidad de datos registrados para cada experimento. "Modell" crea el procedimiento, entre las fechas antes mencionadas, por medio del cual se propone un valor de concentración inicial (C_o^*) y valor de coeficiente de transferencia de

saturación o pendiente general ($K_L a$), la cual es el coeficiente del modelo, pero no el coeficiente de transferencia real, para luego alimentar un modelo de regresión exponencial que es la ecuación integral del modelo (1) o (2). La finalidad de este procedimiento es buscar minimizar el error cuadrático medio por medio de la función Solver. Se debe tener en cuenta que el valor de la concentración de saturación (C_s^*) no fue propuesto sino calculada por medio de la ecuación (3) como ya se mencionó en 5.2.

Posterior a que se corre el modelo para todos los datos, se inicia el proceso de selección del rango en el cual el verdadero coeficiente de transferencia de oxígeno será calculado. Para esto se propone un rango de porcentajes y se corre la función "Test", la cual arroja las fechas reales donde será calculado el coeficiente de transferencia de oxígeno y se presentaran la cantidad de datos entre dicho rango. Se debe tener en cuenta que este valor de muestras presentados en la hoja de calculo no corresponde al numero de muestras total, si no al numero de muestras dentro del rango de cálculo, el numero de muestras totales es presentado en los gráficos de residuales del que se explicaran a continuación.

Después de tener las fechas antes mencionadas en el rango de porcentajes propuesto, se corre la función "Ausdruck" la cual genera las graficas de todos los experimentos donde se presenta las concentraciones medidas y el grafico de residuales o errores de la regresión propuesta y los datos medidos. Estos gráficos deben ser copiados y almacenados para ser comparados con el siguiente valor o porcentaje propuesto.

Cuadro se determine el % optimo, donde el grafico de residuales sea mínimamente distribuido o con la menor magnitud de error, se corre la función "KLA", la cual calcula el coeficiente de transferencia de oxígeno optimo y validado en el paso anterior. En esta función evalúa la ecuación integrada del modelo (1) o (2) pero se le aplica una transformación de variable con el logaritmo natural, que no solo facilita el cálculo, si no que asegura una correcta correlación entre la variable dependiente (t) y la independiente déficit ($\ln(C_s^* - C_i)$), para así lograr un cálculo de la pendiente de la recta, que es a su vez el coeficiente de transferencia de oxígeno real. Además, se determina el valor del coeficiente de correlación de Pearson, así como el coeficiente de determinación (R^2), con el fin de establecer qué tan apropiado es la variación entre los datos registrados y las variaciones de la regresión y de esta manera validar su idoneidad.

6. Resultados y Análisis

6.1. Primer Ronda de Experimentos

Después de correr el modelo para los más 30 experimentos diferentes, se determina que el rango óptimo para el cálculo de $K_L a$ es $15\%C_s^* < C_i < 80\%C_s^*$. Puesto que como se presenta en la ilustración 1 y para los tres caudales de alimentación de aire de 0,035, 0,175, 0.273 m³/h, los cuales están representados en los gráficos de las filas y ordenados de arriba hacia abajo respectivamente, y para los rangos de selección de 5-90%, 15-80% y 25-70%, los cuales están representados en los

gráficos de las columnas de izquierda a derecha respectivamente, es en el rango de 15-80% (Columna con gráficos en la mitad) donde se pueden evitar los datos atípicos extremos del inicio de la aireación y los que presentan mayor magnitud de error en los residuales (como se ve en los experimentos de la columna izquierda), y también se evita ir al extremo de recortar tantos datos (como se presenta en los experimentos de la columna de la derecha). Todo este análisis con el fin de evitar una selección de cálculo, donde los puntos de residuales parezcan menos dispersos.

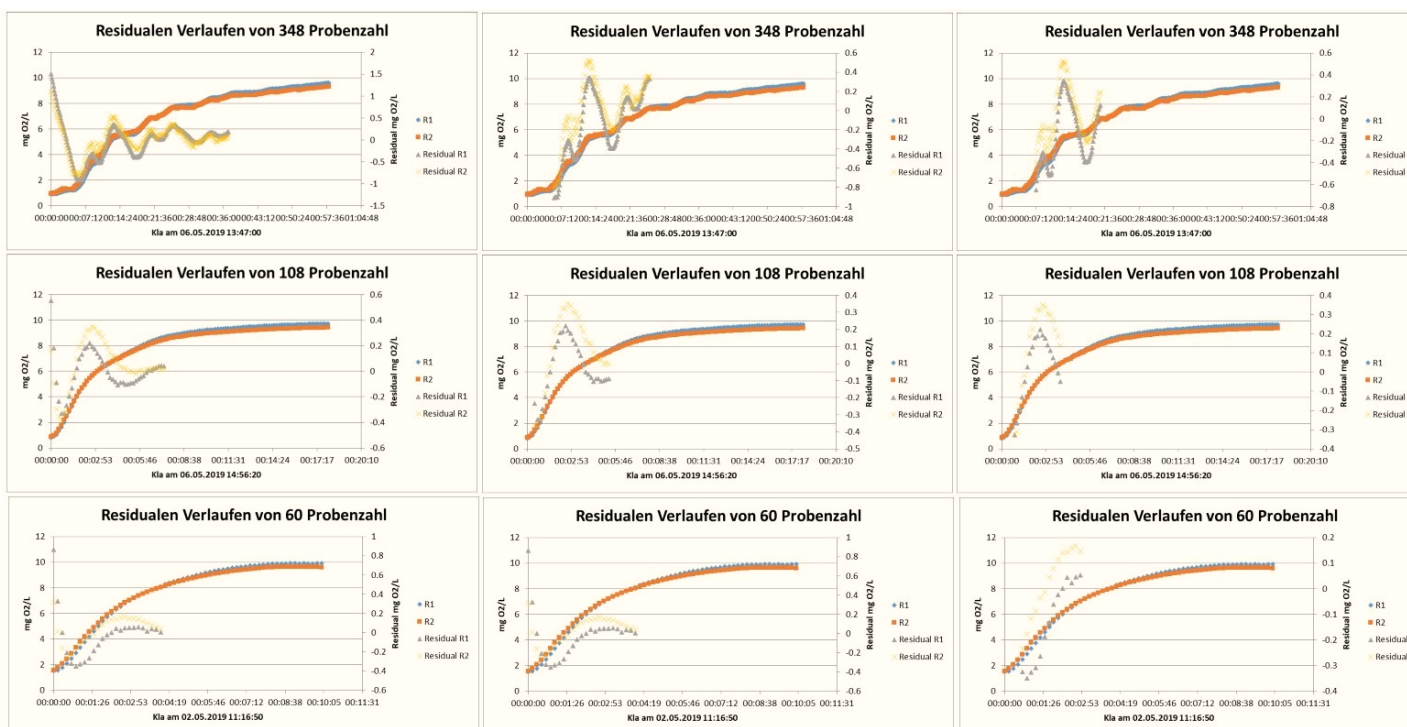


Ilustración 1: Elección del rango de cálculo del coeficiente de transferencia de oxígeno. En cada gráfico se representa el título con la cantidad de muestras registradas para cada experimento, la concentración de oxígeno registrada por los oxímetros en la parte izquierda en mg O₂/L y la concentración de error o residual calculada del modelo en la parte derecha en mg O₂/L.

De la ilustración 1 se puede ver claramente que la dispersión de los residuales solo se cumple en teoría para el caudal de 0,035 m³/h, sin embargo y como una alternativa para la validación y comprobación, de los modelos propuestos de regresión no lineal, se pretende también demostrar la idoneidad del modelo general. Para esto se grafican los datos observados Vs los datos del modelo, donde cómo podemos ver de la ilustración 2 para el experimento de 0.273 m³/h, que fue el que menor dispersión presento en el gráfico de residuales, tercera fila de la ilustración 1, el resultado del coeficiente de determinación entre los datos registrados y el modelo es de 99.71%. Este coeficiente de determinación R² está mostrando que la varianza entre los datos estimados por el modelo y la varianza de los datos observados son aproximadamente del 100%. Lo cual prueba que, aunque el gráfico de residuales no sea totalmente disperso, el modelo propuesto es realmente adecuado.

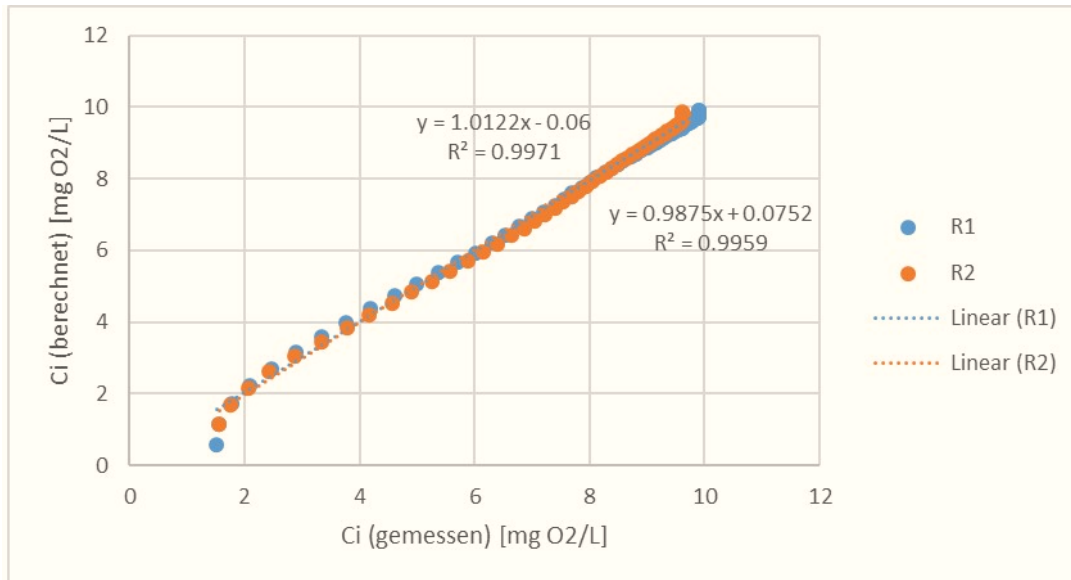


Ilustración 2: Concentraciones de oxígeno medidas en el eje de las ordenadas Vs calculadas en el eje de las abscisas para el modelo general del experimento con $0.273 \text{ m}^3/\text{h}$ de caudal de aire de alimentación, en el rango de 15-80%, experimento realizado el 02.05.2019 11.

Posterior a la comprobación del rango óptimo para el cálculo de $K_L a$ por ejemplo para los puntos del efecto del caudal de aire de alimentación, se presenta a continuación la magnitud del coeficiente de correlación de determinación para las líneas de regresión del cálculo del $K_L a$ como tal. Es decir, de la regresión realizada por la función “KLa” propuesta y explicada en 5.6. Aunque el caudal de aire de $0,035 \text{ m}^3/\text{h}$ presenta el mejor ajuste en comparación con los otros dos, estos últimos no dejan de tener una gran correlación, es decir entre más cercano a 1 o 100%. Lo anterior valida el valor del cálculo de $K_L a$, para los 3 experimentos.

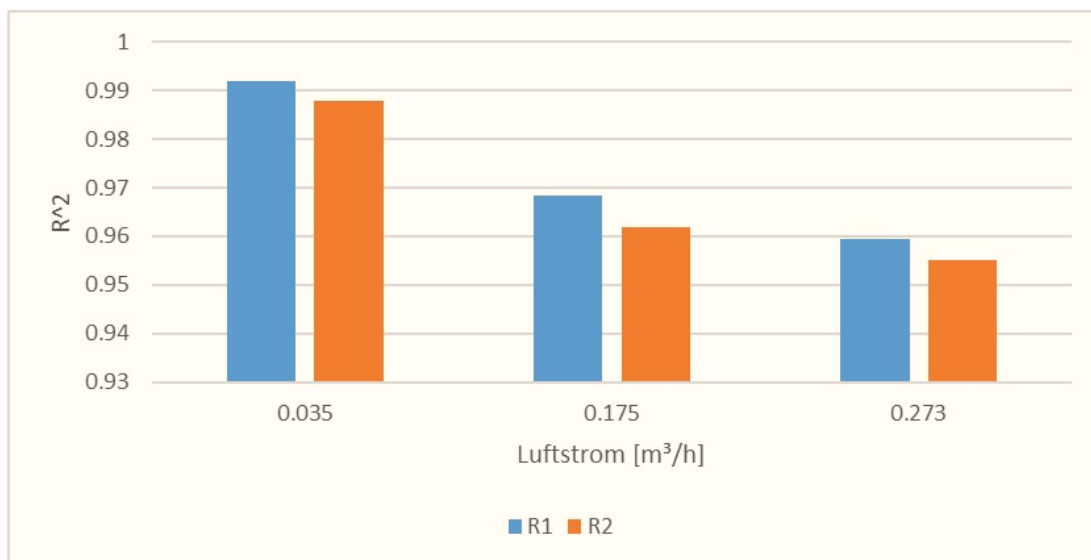


Ilustración 3: Coeficiente de correlación de determinación R^2 para la regresión lineal del cálculo de $K_L a$

El análisis anterior es un ejemplo de la validez del cálculo de coeficiente de transferencia de oxígeno para los 3 puntos o caudales de aire diferentes. Es decir, con estos 3 puntos de caudales diferentes

se construirá la regresión lineal de la influencia del caudal de aire de alimentación al coeficiente de transferencia de oxígeno mostrado en la ilustración 4, subgrafico [3]. Este procedimiento se realizo no solo para la influencia del caudal de aire de alimentación, si no también para las 7 variables presentadas a continuación.

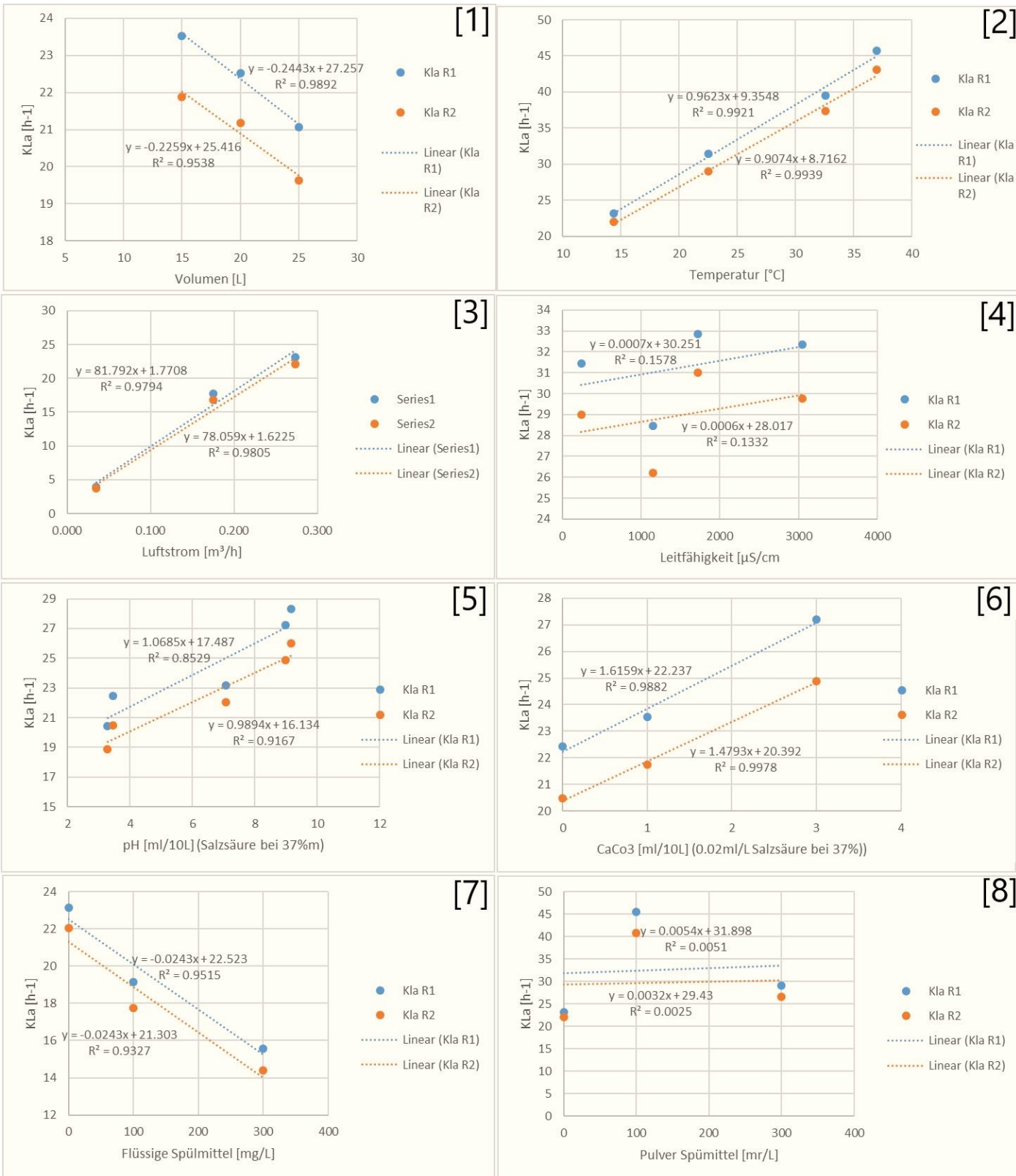


Ilustración 4: Regresiones de los parámetros [1] Volumen, [2] Temperatura, [3] Caudal de aire, [4] Conductividad, [5] pH, [6] Adición de carbonato de calcio bajo ambiente ácido, [7] Detergente líquido, [8] Detergente en polvo que afectan el KLa bajo condiciones de aireación.

Para la construcción de cada uno de los parámetros presentados en la ilustración 4 fue necesario mantener constante las demás variables. Así por ejemplo para la construcción del subgrafico [1] fue necesario tratar de mantener la temperatura y caudal de aire constante, así como realizar el experimento el mismo día para no tener mayores cambios en la presión atmosférica.

Aunque el volumen no afecte como tal el $K_L a$, se pretendió representar el efecto de tener un mayor volumen en el reactor y como esto respondería en el cálculo del $K_L a$. En general el coeficiente de transferencia disminuye con el cambio del volumen ya que realmente este depende de la relación área superficial, donde se da la difusión, sobre el volumen, naturalmente si se aumenta el volumen y se mantiene constante el área de difusión se obtendrán reducciones en el $K_L a$ como se muestra en [1].

La temperatura por el contrario si es un parámetro que afecte directamente el coeficiente de transferencia, es por esto que cuando se aumenta la temperatura se aumenta el $K_L a$, gráfico [2]. Lo cual es un comportamiento opuesto a lo que le ocurre la concentración de saturación de oxígeno (C_s^*), ya que, con el aumento de la temperatura, la concentración de saturación de oxígeno en el agua se reduce. El modelo (1) y (2) están fundamentados en el modelo de la doble capa de Fick, donde se tiene una fase gaseosa en la parte superior una capa gaseosa-liquida y una fase liquida en donde finalmente los gases se disuelven por ejemplo para el caso del oxígeno (no siempre la disolución de gases es en sentido hacia el agua, si no que también puede ser hacia la atmosfera), cuando la temperatura aumenta la capa liquido-gaseosa disminuye lo que permite una mayor transferencia, puesto que el $K_L a$ y el grosor de la capa liquido-gaseosa son opuestos (Eckenfelder & Englande, 2009). Este hecho es importante en los cuerpos de agua naturales, ya que los cambios de la temperatura entre la noche al día aumentan la transferencia natural. Se debe prestar atención al fenómeno que se presenta debido a la temperatura, ya que tener una transferencia de oxígeno mayor o menor no quiere decir que necesariamente se tendrá una concentración de oxígeno más alta o más baja en las medidas del oxímetro, sino que tan eficiente es la transferencia de oxígeno del sistema de aireación o de la atmosfera al cuerpo de agua. La línea de tendencia en el grafico [2] es una representación del efecto de la temperatura en el coeficiente de transferencia, ya que en general la transferencia de oxígeno es afectada por la temperatura tal y como se presenta en la ecuación (5).

En el subgrafico [3] se muestra la fuerte influencia de caudal de alimentación de aire, el cual aumenta la transferencia de oxígeno proporcionalmente con el aumento de caudal de alimentación a una razón de $79.93 \text{ h}^{-1}/(\text{m}^3/\text{h})$. Este efecto es mayormente causado por los equipos de difusión, el cual también tiene un papel importante debido al diámetro de las burbujas, entre más fino mayor es la transferencia.

Para ejemplificar lo que el coeficiente de transferencia causa a una muestra de 10L por ejemplo bajo la temperatura y presión de experimentación del lugar de los experimentos, es que muestra la ilustración 5 de la tasa de transferencia de oxígeno (SOTR). Cabe resaltar que estos valores

normalmente se dan en kilogramos de oxígeno trasferido por hora, pero como se trabajó solo con 10L de muestra los resultados se presentaran en mg debido a la cantidad de decimales que se obtienen con las unidades de kilogramos. La SOTR más bajo entre los 3 caudales de experimentación fue para el caudal más bajo de solo 376 mg O₂/h, mientras que para el caudal mas alto se transfieren 2358 mg O₂/h. Lo cual indica simplemente que para un mismo volumen de agua y condiciones de presión y temperatura el causal de aire de 0.273 m³/h es mucho mas eficiente que el de 0,035 m³/h como lógicamente se esperaba.

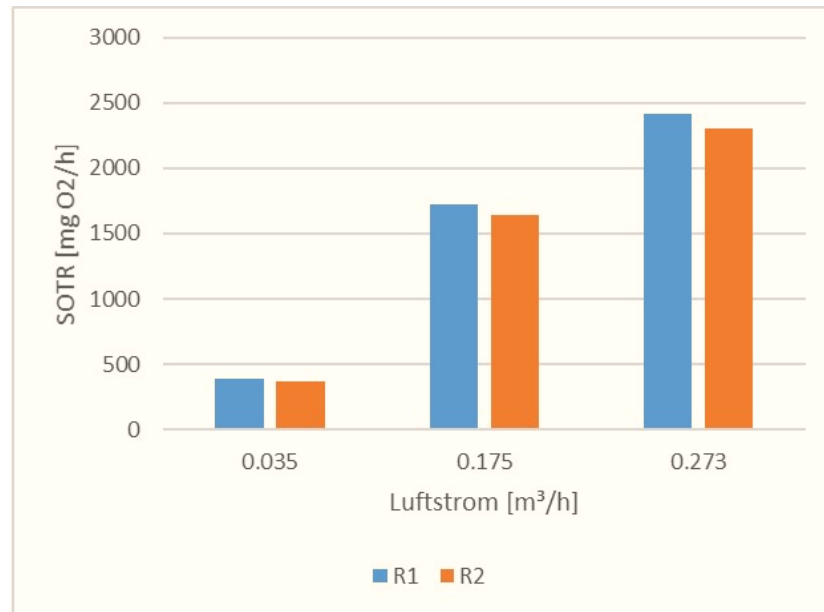


Ilustración 5: SOTR para el caudal de aire de alimentación para 10L de volumen de muestra en el reactor. Los datos de SOTR se dan en kg O₂/h pero a modo de ejemplo para los 10L se presentan en mg O₂/h.

Por otro lado, el efecto que tiene la conductividad eléctrica [4] sobre el coeficiente de transferencia, no es un buen predictor, ya que no presenta una relación clara de correlación y aunque bien es cierto que se podría pensar en una regresión que no sea necesariamente lineal el comportamiento con el cambio de la conductividad no es realmente claro o tendencial.

El efecto del pH [5] presenta mejores relaciones de correlación que para el caso anterior, aunque no necesariamente deba ser una línea recta. Por otro lado, si por ejemplo al ambiente ácido de los primeros puntos del gráfico del pH se le intenta contrarrestar el efecto ácido al agua por medio de la adición básica de carbonato de calcio (CaCO₃) gráfico [6], su tendencia si pudiera ser lineal.

Por último se presenta el efecto que tienen los detergentes en el coeficiente de transferencia de oxígeno [6] y [7]. Aunque no se haya obtenido una relación decreciente clara para el detergente en polvo debido a la falta de otro punto de comparación, si se obtuvo para el detergente líquido, lo cual era lo esperado, ya que estos actúan como una barrera que endurece la superficie del agua y que reduce la transferencia de oxígeno debida a la disminución de circulación de gases internos (Makinia, 2010). Este efecto es mayor cuando la turbulencia es baja, es decir, en ambientes

naturales el uso de detergente afecta más la transferencia de oxígeno que cuando se está en una planta de tratamiento donde hay mezcla o turbulencia debida a la aireación (Eckenfelder & Englande, 2009). Además, los agentes tensoactivos tienen otro efecto y es que disminuyen la tensión superficial lo que favorece la disminución del diámetro de las burbujas ascendentes, en el caso de aireación, lo cual aumenta la transferencia (Eckenfelder & Englande, 2009). Es decir, que el efecto de los agentes tensoactivos es más fuerte en los ambientes naturales, ya que en las plantas de tratamiento se puede llegar a ser de alguna forma positivo en la transferencia.

Si se compara la magnitud del $K_L a$ entre el detergente en polvo y el detergente líquido se corrobora que el efecto del detergente en polvo es mayor que el líquido, puesto que el uso de detergente en polvo crea una capa de espuma más alta que en el uso del detergente líquido la cual desfavorece la transferencia (Goel & kaur, 2012).

De la ilustración 1 y 3, y en general para todos los experimentos, las diferencias entre los valores de oxígeno del oxímetro R1 y R2 no fueron muy significantes. Resultado que es opuesto a la finalidad de haber usado dos oxímetros a alturas diferentes, puesto que se pretendía mostrar una diferencia entre el coeficiente de transferencia superficial ($K_L a_s$) y el coeficiente de transferencia debido a la aireación ($K_L a_b$). Este resultado desalentador puede ser a causa al aporte en magnitud que tiene la aireación en comparación con la transferencia natural de oxígeno, es decir que bajo las condiciones del laboratorio es mucho más fuerte el efecto que tiene la aireación en comparación con el efecto de la atmósfera y por esto para los análisis del laboratorio no se logró ni el 1% de aporte natural. Esta afirmación sobre las magnitudes de los aportes de $K_L a_b$ y $K_L a_s$ la comprueba una serie de experimentos en Minnesota USA, donde en un reactor de 7.6m de diámetro y 9.6m de profundidad se calculó que el $K_L a_s$ fue de 11% el $K_L a$, mientras que el $K_L a_b$ fue del 89% del $K_L a$ (DeMoyer, Schierholz, Gulliver, & Wilhelms, 2003).

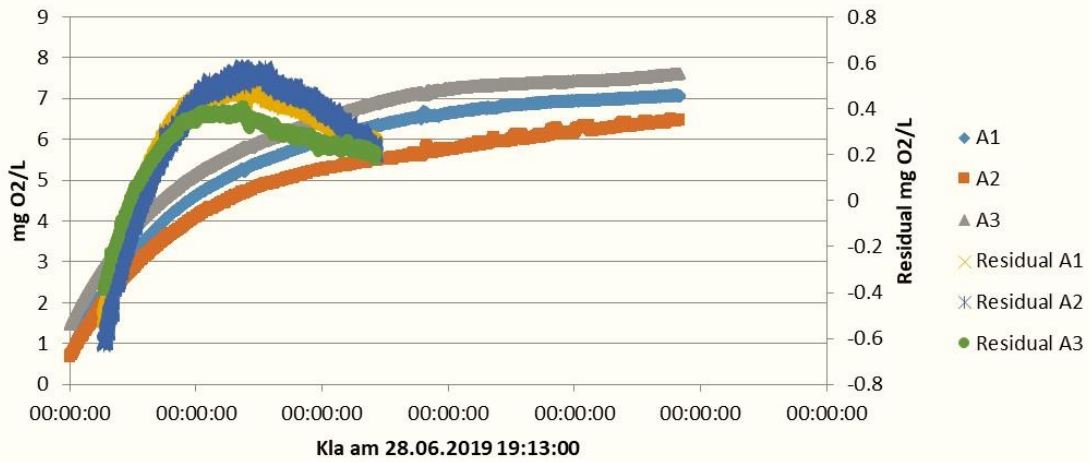
6.2. Segunda Ronda de Experimentos

El cálculo del coeficiente de transferencia para la segunda ronda de experimentos es el $K_L a_s$, el cual es el término de la derecha del modelo (3), como ya se mencionó antes en 5.4.2, y aunque el modelo matemático parezca ser el mismo, no lo es, ya que el $K_L a_b$ creado por el sistema de aireación no está presente en estos experimentos. También es importante resaltar que, aunque se hayan planeado 5 experimentos con 5 velocidades de mezcla diferentes, se presentaron problemas a las velocidades mayores debido a que para velocidades mayores no se puede asegurar una mezcla igualitaria en los mezcladores puesto que tiende a ser poco estable y por esta razón los dos últimos puntos de 60 y 90 rpm fueron descartados.

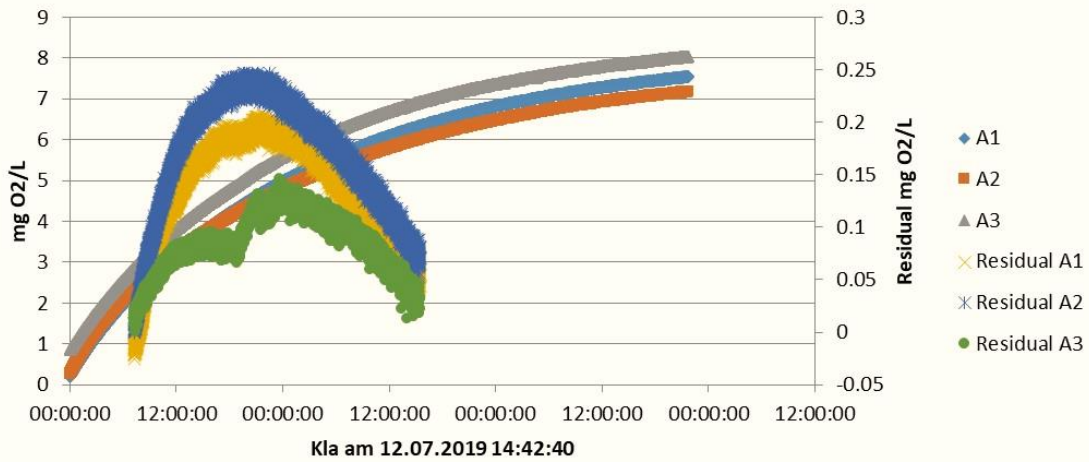
Similarmente como se hizo para la primera ronda de experimentos se determina el rango óptimo para el cálculo de la pendiente $K_L a_s$ donde esta vez se selecciona el rango de 25-70% del total de los datos, ya que fue el que menos magnitud de error en los valores de residuales se presentó, siempre y cuando siguiendo con la recomendación de no sobre pasar el 25% mínimo según las normatividades alemana.

Aunque parezca evidente por ejemplo para grafico [1] de la ilustración 6 que el reactor sin tapa presenta la mayor transferencia de oxígeno, esta conclusión no se puede tomar desde el análisis visual debido a que el coeficiente de transferencia es una pendiente del grado de transferencia y no una simple concentración como ya se ha mencionado.

Residualen Verlaufen von 83541 Probenzahl



Residualen Verlaufen von 25085 Probenzahl



Residualen Verlaufen von 16760 Probenzahl

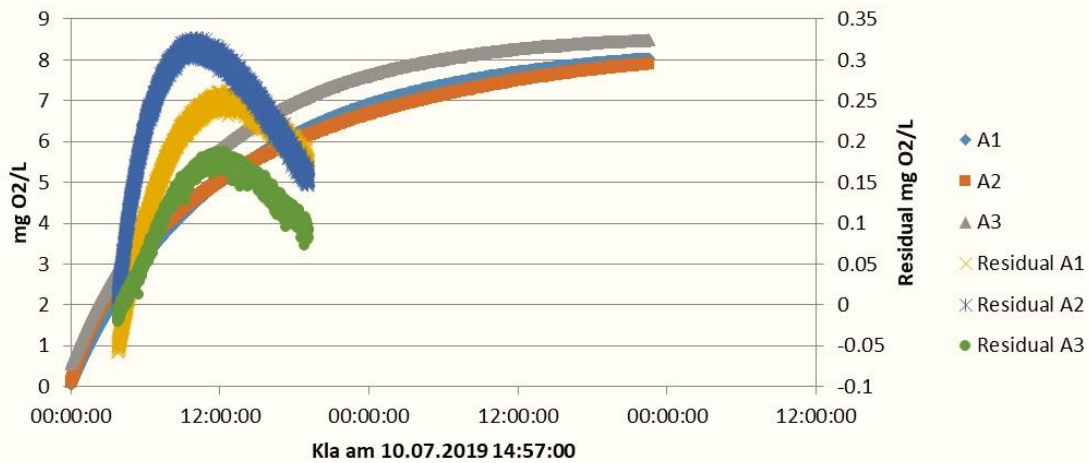


Ilustración 6: Selección del rango 25-70% de cálculo del coeficiente de transferencia. Los gráficos son en su orden de arriba abajo 0rpm, 12rpm y 30rpm. Los gráficos presentados muestran las concentraciones de oxígeno registrado por los equipos de medida en el eje y principal, mientras que las concentraciones de residuales en el eje secundario y.

De la ilustración 6, se puede además apreciar que los datos para las velocidades de mezcla de 12 y 30 rpm tienen un sesgo en los datos positivos de la regresión no lineal propuesta de los residuales, por este hecho, es que nuevamente se decide comprobar la idoneidad de dichas regresiones, por medio de la gran relación de los datos registrados de concentración de oxígeno versus los datos calculados de concentración de oxígeno por la regresión. Los R^2 mayores al 98.1% comprueban, por lo tanto la idoneidad entre el modelo de regresión no lineal y los datos registrados.

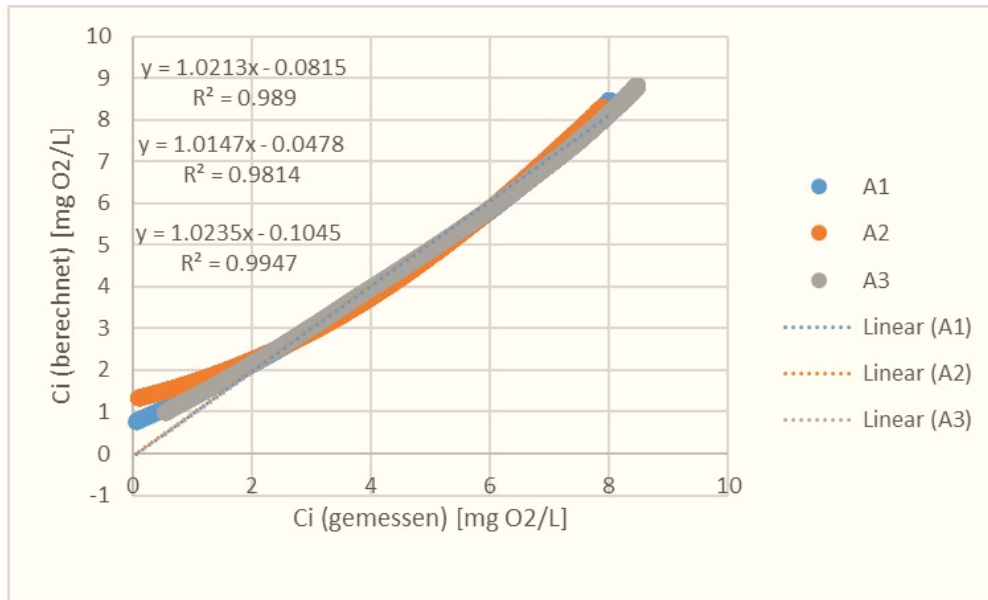


Ilustración 7: Concentraciones de oxígeno medidas Vs calculadas por la regresión, para el experimento con velocidad de mezcla de 30 rpm, experimento realizado el 10.07.2019 14:57:00. Las líneas de tendencia son un en su orden descendente A1, A2, A3.

Tal y como se muestra en la ilustración 8, para el rango del 25-70% de los datos de la regresión, en general los valores de correlación de determinación para las 3 puntos o velocidades es muy próximo a uno, lo cual también prueba la idoneidad del calculo de la pendiente $K_L a_s$ dentro de este rango.

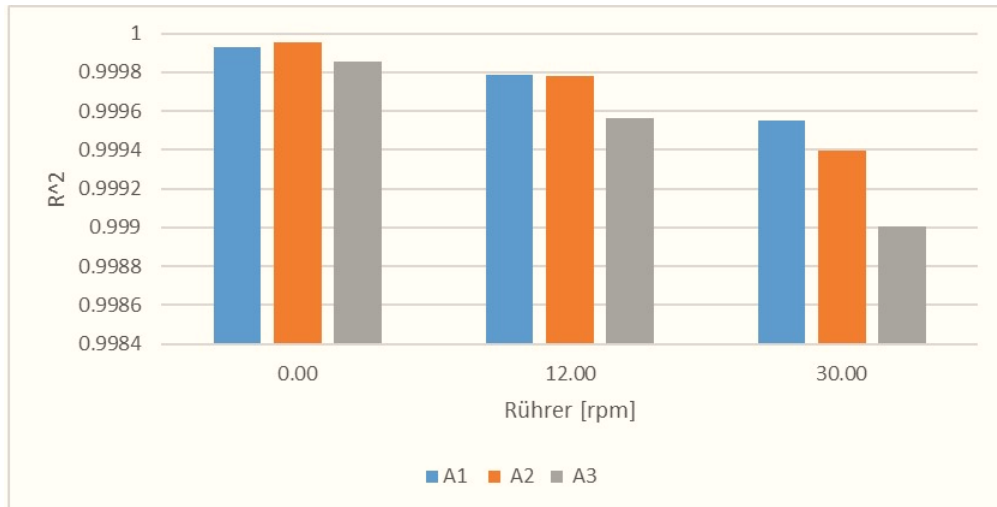


Ilustración 8: Coeficiente de correlación de determinación R^2 para las 3 velocidades de mezcla

De la ilustración 9, es importante resaltar que en general para los 3 experimentos, el reactor sin tapa "A3" presentó, para las 3 velocidades de mezcla, los valores más elevados de $K_L a_s$ puesto que no tiene interferencia para la transferencia del exterior hacia el agua, mientras que el mayor grado de hermetismo se presentó para el reactor con la lámina de Styrofoam "A2". De este gráfico es importante resaltar el intercepto de aproximadamente 0.08 h^{-1} con el eje de las ordenadas, presente para los 3 grados de hermetismo, puesto que éste, es el valor es el coeficiente de transferencia de oxígeno mínima a escala de laboratorio. En general se tiene que un reactor abierto a la atmósfera "A3" cambia su $K_L a_s$ respecto a la mezcla con una tasa de $0.0022 \text{ h}^{-1}/\text{rpm}$.

Como ya se había mencionado anteriormente el coeficiente de transferencia es inversamente proporcional a la altura de la capa de líquido-gas en la superficie del agua, por esto con el aumento de la velocidad o patrón de mezcla, se disminuye la capa líquido-gas, lo cual a su vez se traduce en un aumento en la magnitud del del $K_L a_s$ tal y como se obtuvo en el gráfico 9.

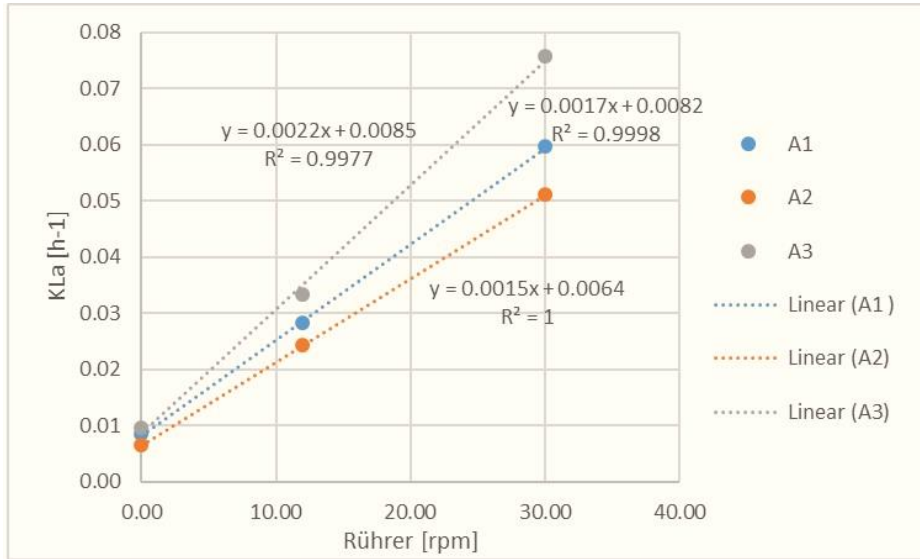


Ilustración 9: Coeficiente de transferencia superficial Vs velocidad de mezcla

En la ilustración 10 se presentan los porcentajes de reducción de la magnitud del $K_L a_s$ de los reactores sellados con la lamina de espuma y el reactor con nueces de styrofoam en relación con el reactor sin tapa, donde se puede observar el aumento considerable en la reducción de la transferencia de oxígeno a medida que se incrementa la mezcla, al menos para el reactor A1. Esto se debe mientras se aumenta la velocidad de mezcla se aumenta la transferencia del reactor A3, quien es el denominador de cálculo de este porcentaje, mientras que el reactor con la lamina de espuma sigue teniendo limitaciones para tomar el oxígeno de la atmosfera debido a su tapa. La reducción en general es de 0.31%/rpm del $K_L a_s$ para el reactor A1. Por lado, la reducción para el reactor con nueces de styrofoam no tiene una tendencia clara y su reducción se mantiene en promedio en 32.6% en comparación con A3.

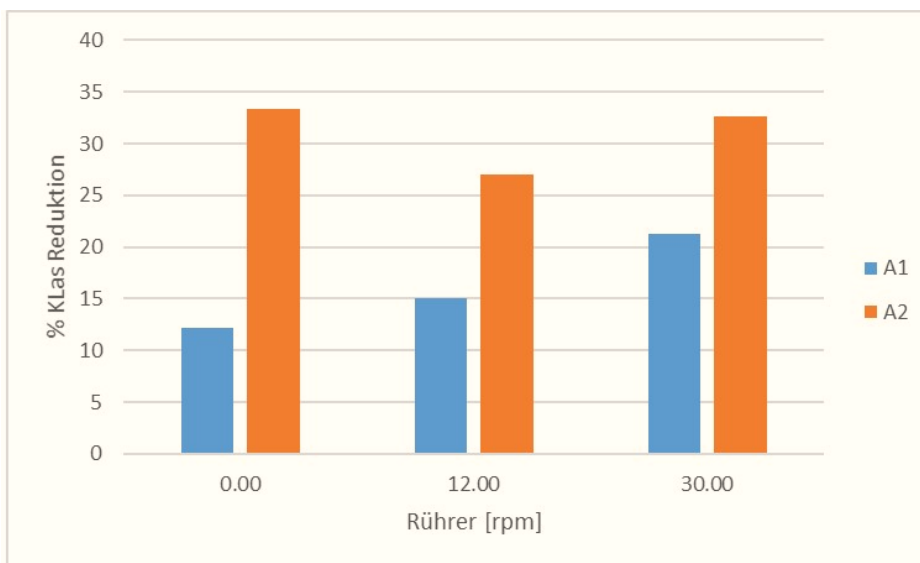


Ilustración 10: Porcentaje de reducción de $K_L a_s$ de los reactores A1 y A2 en relación al A3.

Finalmente, y a modo de ejemplificación se presenta la ilustración 11, la cual muestra la tasa de transferencia en mg de O₂ lograda en 1 hora (SOTR), para un sistema con 10 L, para los 3 tipos de velocidad de mezcla y para los 3 tipos de niveles de hermetismo, en donde se logra transferir desde la atmosfera para el reactor A3 0.87mg de O₂ mientras que para el reactor con stryrofoam solo 0.58mg de O₂.

Lo cual indica simplemente que para un mismo volumen de agua y condiciones de presión y temperatura El reactor sin tapa mucho más eficiente que el de A2 como lógicamente se esperaba.

De la comparación entre la ilustración 5 e ilustración 11, se puede concluir los grados de magnitud de diferencia que se pueden transferir por medio de un sistema de aireación, en comparación con un sistema de mezcla inclusive para el caudal más bajo de alimentación de aire.

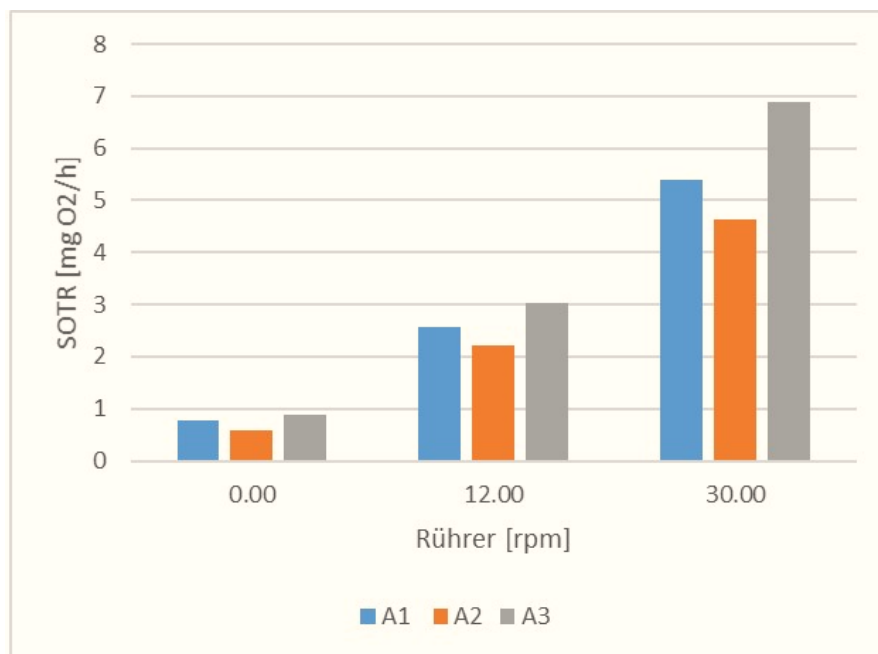


Ilustración 11: Transformación del $K_L a_s$ de los experimentos al SOTR, para 10L de volumen de muestra en el reactor.

7. Conclusiones

- ❖ Se demostró que se puede aumentar, en 79.93 h^{-1} el $K_L a$ por cada m^3/h del caudal de alimentación de aire ($79.93 \text{ h}^{-1}/(\text{m}^3/\text{h})$) en el caso de los experimentos con aireación y aumentar de 0.0022 h^{-1} del $K_L a_s$ por cada rpm de velocidad de mezcla en el caso de transferencia sin aireación.
- ❖ Se debe destacar la influencia negativa que pueden tener los detergentes en la transferencia de oxígeno especialmente para cuerpos de agua naturales donde hay poca mezcla, puesto que los detergentes como el líquido reducen la transferencia de oxígeno una razón de 0.0243 h^{-1} el $K_L a$ por cada mg/L de detergente líquido ($0.0243 \text{ h}^{-1}/(\text{mg/L})$).

- ❖ Aunque se hayan puesto 2 oxímetros en la primera fase, no se encontró grandes diferencias entre el $K_L a$ entre ambos oxímetros tal y como se esperaba, debido a que se realizó la aireación con sistema de aireación muy potente. Sin embargo, esta idea si se puede confirmar con las magnitudes de la tasa de transferencia de oxígeno entre el SOTR para los diferentes caudales de alimentación de aire y la transferencia para 0rpm de la segunda fase de experimentos.
- ❖ Según los niveles de hermetismo simulado por medio de una lámina de espuma y nueces de styrofoam se presentó una reducción de 0.31% del $K_L a_s$ por cada rpm de velocidad de mezcla (0.31%/rpm) para el primero y 32.6% del $K_L a_s$ independiente de la velocidad para el segundo.
- ❖ Es destacable el valor constante de $K_L a_s$ mínimo de 0.08 h^{-1} para los ensayos sin aireación y para cualquier grado de hermetismo bajo condiciones naturales y sin mezcla, es decir bajo condiciones naturales siempre se presentará esta magnitud de coeficiente de transferencia, al menos a escala de laboratorio.

8. Agradecimientos y estudios futuros

Los experimentos descritos y los datos presentados fueron realizados en la universidad de Dresden Alemania, donde se permitió el uso de los equipos y soporte técnico para la realización del presente documento, el cual es además el resultado de las practicas académicas del programa “jóvenes ingenieros Alemania cohorte 2018/2 que es financiada por el gobierno colombiano por medio del ICETEX y el gobierno alemán por medio del DAAD.

Para estudios futuros se podría relacionar el porcentaje de cobertura de plantas o densidad en la reducción del coeficiente de transferencia de oxígeno. Así como también se podría estudiar la influencia que tiene la mezcla en la transferencia de oxígeno que pueda ser usada posteriormente como bases establecer cálculos de cantidades de transferencia de oxígeno causada con el uso de vertederos de pared delgada, por ejemplo, por medio de la relación del gradiente de mezcla de la aireación en estos experimentos con el gradiente de mezcla del canal.

9. Referencias Bibliográficas

- Ahnert, M., Dr. Kühn, V., Dr. Brückner, H., & Fritsche, G. (2017). *Abwasserbehandlung Abwassertechnisches Abwasserbehandlung*. Dresden, Deutschland: Technische Universität Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften.
- ASCE. (1984). *Standard Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water*. New York: ASCE.
- DeMoyer, C. D., Schierholz, E. L., Gulliver, J. S., & Wilhelms, S. C. (2003). Impact of bubble and free surface oxygen transfer on diffused aeration systems. *Pergamon*.
- DIN EN 12255-15, D. I. (2004). Kläranlagen-Teil 15: Messung der Sauerstoffzufuhr in Reinwasser in Belüftungsbecken von Belebungsanlagen.

- Eckenfelder, w., & Englande, A. J. (2009). *Industrial Water Quality, fourth edition. Aeration and mass transfer*. McGraw-Hill.
- Goel, G., & kaur, S. (2012). A Study on Chemical Contamination of Water Due to Household Laundry Detergents. *J Hum Ecol*.
- H., J. P., & Wager, M. (1994). Modelling of Oxygen transfer in deep diffused-aeration tanks and comparison with full scale plant data.
- Kayser, R. (1977). *Zur Frage der Überprüfung des Sauerstoffeintrages*. . Wien, Österreich.
- Makinia, J. (2010). *Mathematical Modelling and Computer Simulation of Activated Sludge Systems*. London: IWA.
- McWhirter, J. R., & Hutter, J. C. (1989). Improved Oxygen Mass Transfer Modeling for Diffused/Subsurface Aeration Systems. *AIChE Journal*, 1530.

10. Anexos

A continuación, se presenta la fuente de donde se tomaron los datos de presión para el experimento de la segunda ronda de experimentos con 30 rpm de mezcla, en donde se promedia los dos valores máximos de presión atmosférica tal y como se recomienda la normatividad alemana (DIN EN 12255-15, 2004).

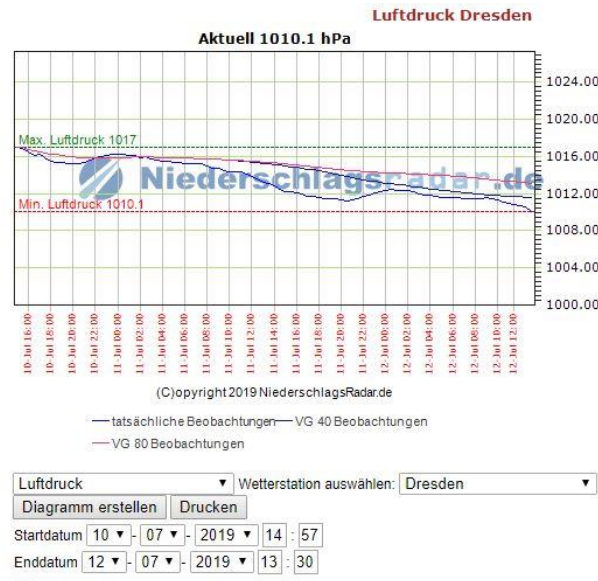


Ilustración 12: Tomado del portal público y gratuito Niederschlagsradar, sitio web de donde se extrajeron los datos de presión atmosférica acorde a los días de la experimentación. Web: <https://www.niederschlagsradar.de/>