

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
CÂMPUS APUCARANA/LONDRINA**

CARLOS HENRIQUE GIANJACOMO

**INFLUÊNCIA DA VAZÃO E DA POSIÇÃO DO JATO DE ÁGUA
NA TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO POR TUBOS VENTURI**

DISSERTAÇÃO

LONDRINA

2017

CARLOS HENRIQUE GIANJACOMO

**INFLUÊNCIA DA VAZÃO E DA POSIÇÃO DO JATO DE ÁGUA
NA TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO POR TUBOS VENTURI**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ajadir Fazolo

LONDRINA

2017

TERMO DE LICENCIAMENTO

Esta Dissertação está licenciada sob uma Licença Creative Commons *atribuição uso não-comercial/compartilhamento sob a mesma licença 4.0 Brasil*. Para ver uma cópia desta licença, visite o endereço <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> ou envie uma carta para Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, Califórnia 94105, USA.



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca UTFPR - Câmpus Londrina

G433i Gianjacomio, Carlos Henrique
Influência da vazão e da posição do jato de água na transferência de
Oxigênio por tubos Venturi / Carlos Henrique Gianjacomio –
Londrina: [s.n.], 2017.
82 f. ; il. ; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Ajadir Fazolo
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Londrina, 2017.
Bibliografia: f. 71-73

1. Águas - Aeração. 2. Águas Residuais. 3. Tubos Venturi. I. Fazolo,
Ajadir, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. III.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.

CDD: 628



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Pró-reitora de Pesquisa e Pós Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
Campus Apucarana/Londrina



TERMO DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DA VAZÃO E DA POSIÇÃO DO JATO DE ÁGUA NA TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO POR TUBOS VENTURI

por

Carlos Henrique Gianjacom

Dissertação de mestrado apresentada no dia 28 de abril de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Câmpus Apucarana/Londrina, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho Aprovado.

Prof. Dr Ajadir Fazolo - Orientador
(UTFPR)

Prof. Dr Hemerson Donizete Pinheiro - Membro Titular
(UEL)

Prof. Dr Cosmo Damião Santiago - Membro Titular
(UTFPR)

Prof. Dr^a Alessandra Furtado da Silva
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o qual me guia com discernimento em todos os passos da minha vida, por ter me concedido o privilégio de ingressar no Mestrado e por ter me abençoado durante todo este tempo com novas oportunidades.

Agradeço aos meus pais, minha esposa, meu filho e todos os amigos que me apoiaram e acreditaram em mim para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao meu orientador Professor Dr. Ajadir Fazolo pela orientação e apoio em todas as etapas.

RESUMO

GIANJACOMO, Carlos Henrique. **INFLUÊNCIA DA VAZÃO E DA POSIÇÃO DO JATO DE ÁGUA NA TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO POR TUBOS VENTURI**. 2017. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2017.

O objetivo desse trabalho foi avaliar o potencial de reoxigenação da água por meio de tubos de Venturi. Os experimentos foram realizados em dois tanques: horizontal (TH) e vertical (TV), com volumes úteis de 100 L e 63 L, respectivamente. Os testes seguiram delineamento experimental associado a metodologia de superfície de respostas, tendo como variáveis independentes a vazão da água ($Q_{\text{água}}$) e a posição de entrada do jato (P_{jato}), para um único tubo de Venturi e dois tubos associados em paralelo. Como respostas, foram determinados os coeficientes globais de transferência de oxigênio do ar para a água (KLa) e as eficiências de oxigenação (EO). Os resultados indicam que a vazão da água influenciou significativamente os valores de KLa e EO, enquanto que a posição do jato só teve efeito quando os tubos de Venturi foram associados em paralelo, em ambos os tanques. De maneira geral, os melhores resultados do KLa , de até 50 h^{-1} , foram obtidos para vazões de água mais elevadas e a jato posicionado 15 cm acima da superfície da água. Eficiências de oxigenação de até $2 \text{ kgO}_2 \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ foram observadas para baixos valores de vazão de água. Considerando-se valores experimentais de densidade de potência (DP) e volume de ar injetado por minuto na massa de água, o tanque vertical apresentou desempenho de KLa e EO ligeiramente superior ao horizontal. Os dados experimentais podem ser satisfatoriamente representados pelos modelos matemáticos obtidos.

Palavras-chave: Tubo de Venturi. Aeração. Oxigênio Dissolvido. Transferência de oxigênio.

ABSTACT

GIANJACOMO, Carlos Henrique. **INFLUENCE OF FLOW RATE AND WATER JET POSITION ON OXYGEN TRANSFER BY VENTURI TUBES**. 2017. 81 p. Thesis (Master's Degree in Environmental Engineering) – Federal Technological University of Paraná. Londrina, 2017.

The objective of this work was to evaluate the reoxygenation potential of water using Venturi tubes. The experiments were performed in two tanks: Horizontal (HT) and vertical (VT), with useful volumes of 100 L and 63 L, respectively. The tests followed the statistical design associated with the surface methodology of responses, having as independent variables the water flow (Q_{water}) and the inlet position of the jet (P_{jet}), for a single Venturi tube and two associated tubes in parallel. Were determined as response the global oxygen transfer coefficients from air to water (KLa) and oxygenation efficiencies (OE). The results indicate that the water flow significantly influenced the values of KLa and OE, whereas the position of the jet only had effect when the Venturi tubes were associated in parallel, in both tanks. In general, the best KLa results, up to 50 h^{-1} , were obtained for higher water flows and a jet positioned 15 cm above the water surface. Oxygenation efficiencies of up to $2 \text{ kgO}_2 \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ were observed at low water flow rates. Considering experimental values of power density (DP) and volume of air injected per minute, the vertical tank showed a performance of KLa and EO slightly higher than vertical. The experimental data can be satisfactorily represented by the mathematical models obtained.

Keywords: Venturi tube. Aeration. Dissolved oxygen. Oxygen transfer

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema explicativo da teoria dos dois filmes.....	21
Figura 2 - Tubo de Venturi (a) fotografia, (b) esquema de variação de energia	26
Figura 3 - Mecanismos de entrada do jato	31
Figura 4 - Fotografia do tanque horizontal	32
Figura 5 - Esquema do tanque horizontal (TH) sendo (1) Reservatório, (2) Bomba, (3) Registro gaveta, (4) Rotâmetro de água (5), Manômetro, (6) Vacuômetro, (7) Rotâmetro de ar, (8) Venturi, (9) Saída do jato de água, (10) Eletrodo para medição de Oxigênio, (11) Oxímetro, (12) Computador;.....	33
Figura 6 - Fotografia e esquema do tanque vertical (TV) sendo (1) Reservatório, (2) Bomba, (3) Registro gaveta, (4) Rotâmetro de água (5), Manômetro, (6) Vacuômetro, (7) Rotâmetro de ar, (8) Venturi, (9) Saída do jato de água, (10) Eletrodo para medição de Oxigênio, (11) Oxímetro, (12) Computador;	33
Figura 7 - Fotografia da saída da água+ar no tanque horizontal para posição do jato submersa.....	35
Figura 8 – Curvas de contorno para KLa em função da vazão e da posição do jato de água no tanque horizontal com 1 tubo de Venturi	44
Figura 9 - Curvas de contorno para KLa em função da vazão e da posição do jato de água no tanque horizontal com 2 tubos de Venturi	44
Figura 10 - Curvas de contorno para KLa em função da vazão e da posição do jato de água no tanque vertical com 1 tubo de Venturi	45
Figura 11 - Curvas de contorno para KLa em função da vazão e da posição do jato de água no tanque vertical com 2 tubos de Venturi.....	45
Figura 12 – Relação entre a vazão de água e a vazão de ar aspirado	47

Figura 13 - Dados experimentais da relação vazão de ar pela vazão de água em função da vazão de água (■) e linha de tendência (—).....	48
Figura 14 - Número de Reynolds conforme vazão de cada teste.....	49
Figura 15 - Dados de pressão medida pelo manômetro na entrada (■) e pelo vacuômetro na seção restrita (●) do tubo de Venturi.	50
Figura 16 - Variação do valor do KLa em 01 tubo venturi em tanque horizontal em função da vazão do líquido para posição do jato (■) 15 cm abaixo da superfície (●) 10,6 cm abaixo da superfície (▲) na superfície (▼)10,6 cm acima da superfície e (◆) 15 cm acima da superfície.....	50
Figura 17 - Variação do valor do KLa em 02 tubo venturi em tanque horizontal em função da vazão do líquido para posição do jato (■) 15 cm abaixo da superfície (●) 10,6 cm abaixo da superfície (▲) na superfície (▼)10,6 cm acima da superfície e (◆) 15 cm acima da superfície.....	51
Figura 18 - Variação do valor do KLa em 01 tubo venturi em tanque vertical em função da vazão do líquido para posição do jato (■) 15 cm abaixo da superfície (●) 10,6 cm abaixo da superfície (▲) na superfície (▼)10,6 cm acima da superfície e (◆) 15 cm acima da superfície.....	51
Figura 19 - Variação do valor do KLa em 02 tubo venturi em tanque vertical em função da vazão do líquido para posição do jato (■) 15 cm abaixo da superfície (●) 10,6 cm abaixo da superfície (▲) na superfície (▼)10,6 cm acima da superfície e (◆) 15 cm acima da superfície.....	52
Figura 20 -Dados experimentais da relação volume de ar pelo volume de água por minuto em função do KLa (■) e modelo linear ajustado (—) para o tanque vertical com 01 tubo de Venturi e jato 15 cm acima da superfície.....	53
Figura 21 - Dados experimentais da relação volume de ar pelo volume de água por minuto em função do KLa (■) e modelo linear ajustado (—) para o tanque vertical com 02 tubos de Venturi e jato 15 cm acima da superfície.....	53

Figura 22- Dados experimentais da relação volume de ar pelo volume de água por minuto em função do KLa (■) e modelo linear ajustado (—) para o tanque horizontal com 01 tubo de Venturi e jato 15 cm acima da superfície.	54
Figura 23 - Dados experimentais da relação volume de ar pelo volume de água por minuto em função do KLa (■) e modelo linear ajustado (—) para o tanque horizontal com 02 tubo de Venturi e jato 15 cm acima da superfície.	54
Figura 24 - Variação do valor do KLa em função da posição do jato para vazão do líquido (■) 1300 L h ⁻¹ (●) 1500 L h ⁻¹ (▲) 1950 L h ⁻¹ (▼) 2400 L h ⁻¹ e (◆) 2600 L h ⁻¹ no tanque horizontal com 1 tubo de Venturi.....	56
Figura 25 - Variação do valor do KLa em função da posição do jato para vazão do líquido (■) 1300 L h ⁻¹ (●) 1600 L h ⁻¹ (▲) 2350 L h ⁻¹ (▼) 3100 L h ⁻¹ e (◆) 3400 L h ⁻¹ no tanque horizontal com 2 tubos de Venturi	56
Figura 26 - Variação do valor do KLa em função da posição do jato para vazão do líquido (■) 500 L h ⁻¹ (●) 650 L h ⁻¹ (▲) 1020 L h ⁻¹ (▼) 1390 L h ⁻¹ e (◆) 1550 L h ⁻¹ no tanque vertical com 1 tubo de Venturi.....	57
Figura 27 - Variação do valor do KLa em função da posição do jato para vazão do líquido (■) 1300 L h ⁻¹ (●) 1720 L h ⁻¹ (▲) 1900 L h ⁻¹ (▼) 2320 L h ⁻¹ e (◆) 2500 L h ⁻¹ no tanque horizontal com 2 tubos de Venturi.....	57
Figura 28 - Curvas de contorno para EO em função da vazão e da posição do jato de água no tanque horizontal com 1 tubo de Venturi	63
Figura 29 - Curvas de contorno para EO em função da vazão e da posição do jato de água no tanque horizontal com 2 tubo de Venturi	64
Figura 30 - Curvas de contorno para EO em função da vazão e da posição do jato de água no tanque vertical com 1 tubo de Venturi	64
Figura 31 -Curvas de contorno para EO em função da vazão e da posição do jato de água no tanque vertical com 2 tubo de Venturi	65
Figura 32 - Relação entre pressão na entrada do tubo e vazão de água.....	65

Figura 33 - Dados experimentais para KLa (■) e eficiência de oxigenação (□) e ajuste aos modelos de potência para tanque horizontal com 01 tubo de Venturi e entrada de água a 15 cm acima da superfície da água.....	66
Figura 34 - Dados experimentais para KLa (■) e eficiência de oxigenação (□) e ajuste aos modelos de potência para tanque horizontal com 02 tubo de Venturi e entrada de água a 15 cm acima da superfície da água.....	66
Figura 35 -Dados experimentais para KLa (■) eficiência de oxigenação (□) e ajuste aos modelos de potência para o tanque vertical com 01 tubo de Venturi e entrada de água a 15 cm acima da superfície da água.....	67
Figura 36 - Dados experimentais para KLa (■) e eficiência de oxigenação (□) e ajuste aos modelos de potência para tanque vertical com 02 tubo de Venturi e entrada de água a 15 cm acima da superfície da água.....	67
Figura 37 – (a) $Q = 1720 \text{ Lh}^{-1}$ e 10,6cm abaixo (-1;-1) (b) $Q = 2320 \text{ Lh}^{-1}$ e 10,6cm abaixo (+1;-1).....	74
Figura 38 – (a) $Q 1720 \text{ Lh}^{-1}$ e 10,6cm acima (-1;+1) e (b) $Q 2320 \text{ Lh}^{-1}$ e 10,6cm acima (+1;+1).....	74
Figura 39 – (a) $Q 1300 \text{ Lh}^{-1}$ e superfície (-1,41;0) e (b) $Q 2500 \text{ Lh}^{-1}$ e superfície (+1,41;0).....	75
Figura 40 – (a) $Q 1900 \text{ Lh}^{-1}$ e 15cm abaixo (0;-1,41) e (b) $Q 1900 \text{ Lh}^{-1}$ e 15cm Acima (0;+1,41).....	75
Figura 41 – (a) $Q 1900 \text{ Lh}^{-1}$ e superfície (0;0) A e (b) - $Q 1900 \text{ Lh}^{-1}$ e superfície (0;0) B.....	75
Figura 42 – (a) $Q 1900 \text{ Lh}^{-1}$ e superfície (0;0) C e (b) $Q 1900 \text{ Lh}^{-1}$ e superfície (0;0) D.....	76
Figura 43 – (a) $Q 650 \text{ Lh}^{-1}$ e 10,6 cm abaixo(-1;-1) e (b) $Q 1390 \text{ Lh}^{-1}$ e 10,6 cm abaixo(+1;-1)).....	76

Figura 44 – (a) Q 650 Lh ⁻¹ e 10,6 cm acima(-1;+1) e (b) Q 1390 Lh ⁻¹ e 10,6 cm acima(+1;+1)	76
Figura 45 – (a) Q 500 Lh ⁻¹ e Superfície (1,41;0) e (b) Q 1550 Lh ⁻¹ e Superfície(+1,41;0).....	77
Figura 46 – (a) Q 1020 Lh ⁻¹ e 15 cm abaixo (0;-1,41) e (b)Q 1020 Lh ⁻¹ e 15 cm acima(0;+1,41)	77
Figura 47 – (a) Q 1020 Lh ⁻¹ e Superfície (0;0) A e (b) Q 1020 Lh ⁻¹ e Superfície (0;0) B.....	77
Figura 48 – (a) Q 1020 Lh ⁻¹ e Superfície (0;0) C e (b)Q 1020 Lh ⁻¹ e Superfície (0;0) D	78
Figura 49 – (a) Q 1490 Lh ⁻¹ e 10,6 cm abaixo (-1;-1) e (b)Q 2410 Lh ⁻¹ e 10,6 cm abaixo (1;-1).....	78
Figura 50 – (a)Q 1490 Lh ⁻¹ e 10,6 cm acima (-1;+1) e (b)Q 2410 Lh ⁻¹ e 10,6 cm acima (1;1)	78
Figura 51 – (a) Q 1300 Lh ⁻¹ e superfície (-1,41;0) e (b) Q 2600 Lh ⁻¹ e superfície (+1,41;0).....	79
Figura 52- (a)Q 1950 Lh ⁻¹ e 15,6cm abaixo (0;-1,41) e (b) Q 1950 Lh ⁻¹ h e 15,6 cm acima (0;+1,41).....	79
Figura 53 - (a)Q 1950 Lh ⁻¹ e superfície (0;0) A e (b) Q 1950 Lh ⁻¹ e superfície (0;0) B	79
Figura 54-(a) Q 1950 Lh ⁻¹ e superfície (0;0) C e (b) Q 1950 Lh ⁻¹ e superfície (0;0) D	80
Figura 55 – (a) Q 1600 Lh ⁻¹ e 10,6 cm abaixo (-1;-1) e (b) Q 3100 Lh ⁻¹ e 10,6 cm abaixo (+1;-1).....	80
Figura 56-(a) Q 1600 Lh ⁻¹ e 10,6 cm acima (-1;+1) e (b) Q 3100 Lh ⁻¹ e 10,6 cm acima (+1;+1).....	80

Figura 57-(a) Q 1300 Lh ⁻¹ e superfície (-1,41;0) e (b) Q 3100 Lh ⁻¹ e e superfície (+1,41;0)	81
Figura 58-(a) Q 2350 Lh ⁻¹ e 15 cm abaixo (0;-1,41) e (b)Q 2350 Lh ⁻¹ e 15 cm acima (0;+1,41)	81
Figura 59-(a) Q 2350 Lh ⁻¹ e superfície (0;0)A e (b) Q 2350 Lh ⁻¹ e superfície (0;0)B	81
Figura 60-(a) Q 2350 Lh ⁻¹ e superfície (0;0)C e (b) - Q 2350 Lh ⁻¹ e superfície (0;0)D	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos tanques utilizados no experimento.	34
Tabela 2 - Dimensões do Tubo de venturi	34
Tabela 3 - Planejamento experimental com valores codificados e reais das variáveis independentes para 1 e 2 tubos de Venturi nos tanques horizontal e vertical	36
Tabela 4 – Condições experimentais (valores codificados) e valores experimentais obtidos dos KLa para as condições operacionais	39
Tabela 5 – Efeito das variáveis independentes para a variável resposta KLa .	40
Tabela 6 - Análise de Variância para a resposta KLa	42
Tabela 7 - Valores do KLa experimentais, previstos pelo modelo e erro relativo para o tanque horizontal.....	43
Tabela 8 - Valores do KLa experimentais, previstos pelo modelo e erro relativo para o tanque vertical.....	43
Tabela 9 - Validação dos modelos para o tanque horizontal.....	46
Tabela 10 - Validação dos modelos para o tanque vertical.....	46
Tabela 11 – Condições experimentais (valores codificados) e valores estimados obtidos das eficiências de oxigenação para as condições operacionais.....	58
Tabela 12 - Efeito das variáveis independentes para a variável resposta eficiência de oxigenação	59
Tabela 13 - Análise de Variância para a resposta Eficiência de Oxigenação ..	61
Tabela 14 - Valores da Eficiência de Oxigenação experimentais, previstos pelo modelo e erro relativo para o tanque horizontal	61

Tabela 15 - Valores da Eficiência de Oxigenação experimentais, previstos pelo modelo e erro relativo para o tanque vertical	62
Tabela 16 - Tabela Valores experimentais e previstos de eficiência de oxigenação em função dos valores codificados de vazão da água (X1) e posição do jato (X2) para o tanque horizontal com 1 e 2 tubos de Venturi.....	62
Tabela 17 - Tabela Valores experimentais e previstos de eficiência de oxigenação em função dos valores codificados de vazão da água (X1) e posição do jato (X2) para o tanque vertical com 1 e 2 tubos de Venturi.....	63
Tabela 18 - Coeficientes de ajuste ao modelo do tipo potência para KLa e EO para os tanques horizontal e vertical com 1 e 2 tubos de Venturi associados em paralelo	68

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

K_{La}	Coeficiente Global de Transferência de oxigênio
δ_g	Espessura filme gasoso
δ_L	Espessura filme líquido
EO	Eficiência de Oxigenação
J	Fluxo.
A	Área de contato.
dm/dt	Variação da massa pelo tempo.
k_G	Coeficiente de transferência de massa do filmes de gás.
K_G	Coeficiente global de transferência de massa gasosa
P_G	Pressão parcial do gás na fase gasosa.
P_I	Pressão parcial do gás na interface, em equilíbrio com a concentração C_I do gás no líquido.
k_L	Coeficiente de transferência de massa no filme líquido.
K_L	Coeficiente global de transferência de massa líquida.
C_I	Concentração do gás na interface, em equilíbrio com a pressão parcial P_I .
C_L	Concentração do gás na fase líquida.
H	Constante de Henry
C^*	Concentração de oxigênio dissolvido na massa líquida em equilíbrio com a pressão parcial P_G .
P^*	Pressão parcial de oxigênio numa mistura gasosa em equilíbrio com uma fase líquida que possui concentração de oxigênio igual a C_L .
V	Volume
C_s	Concentração de saturação de oxigênio na água.
k_d	Constante de proporcionalidade.
P_a	Pressão Atmosférica na CNTP.
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão.
P_v	Pressão de Vapor.

PM	Peso molecular.
R	Constante Universal dos gases.
T	Temperatura
f_H	Fator de correção da concentração de saturação pela altitude
γ	Fator de redução da concentração de saturação devido a presença de sais
Csal	Concentração de sais dissolvidos em mg Cl L ⁻¹
p1 ou p2	Pressão ponto 1 ou 2
V	Velocidade
g	Aceleração da gravidade
h_L	Perda de carga.
TH	Tanque Horizontal
TV	Tanque Vertical
Qágua	Vazão de Água
Pjato	Posição da tubulação de saída do jato de água
KLa 20°C	Coefficiente Global de transferência de oxigênio corrigido a 20°C
Θ	Coefficiente de correção do KLa
P	Potência
m_{H_2O}	Vazão mássica de água
TTO padrão	Taxa de transferência de oxigênio padrão
TH1V	Tanque horizontal com 1 tubo de Venturi
TH2V	Tanque horizontal com 2 tubos de Venturi
TV1V	Tanque Vertical com 1 tubo de Venturi
TV2V	Tanque Vertical com 2 tubos de Venturi
VVM	Volume de ar injetado por minuto pelo volume de água presente nos tanques.
DP	Densidade de Potência - Relação entre potência e volume

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVO	19
2.1 Objetivo geral	19
2.2 Objetivo específico	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 Transferência de oxigênio do ar para a água	20
3.2 Fatores que influenciam a transferência de Oxigênio	24
3.3 Fundamentos dos tubos de Venturi.....	25
3.4 Aplicação de tubos Venturi na aeração da água;	27
3.5 Efeito do jato de água na transferência de oxigênio.....	30
4 MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1 Instalações experimentais	32
4.2 Funcionamento dos sistemas.....	34
4.3 Procedimento Experimental	35
4.3.1 Determinação do coeficiente global de transferência de oxigênio (KLa)	36
4.3.2 Taxa de transferência de oxigênio padrão (TTOpadrão)	37
4.3.3 Energia consumida no tubo de Venturi.....	38
4.3.4 Eficiência de oxigenação.....	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1 Determinação dos coeficientes globais de transferência de oxigênio – KLa	39
5.2 Avaliação do efeito da vazão de água.....	46
5.3 Avaliação da posição do jato de água.....	55
5.4 Determinação das eficiências de oxigenação - EO	58
6 CONCLUSÕES	69
7 SUGESTÕES	70
REFERÊNCIAS	71
APÊNDICE	74

1 INTRODUÇÃO

A aeração pode ser entendida como um processo natural ou mecânico de transferência do oxigênio do ar para a água, com o objetivo de elevar a concentração na massa líquida. Nos sistemas naturais, tais como rios e lagos, o suprimento de oxigênio se dá, principalmente, pela fotossíntese ou por fenômenos espontâneos de transferência. Já os processos de tratamento de águas residuárias incluem uma ampla gama de alternativas relacionadas a concentrações de oxigênio dissolvido e níveis de agitação do líquido (COX, 2003).

Recentemente, sistemas de micro aeração, com concentrações inferiores a $0,1 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$, têm sido empregados na remoção de compostos de enxofre (KRAYZELOVA et al. 2015). Tecnologias de remoção de nitrogênio pela via curta, requerem concentrações mais baixas de oxigênio nos tanques de aeração e elevada agitação do meio líquido, difíceis de serem mantidos pelos sistemas convencionais (JIANLONG & NING, 2004; ASLAN et al. 2009). Nos processos aeróbios de tratamento, que visam a remoção de matéria orgânica e a nitrificação, o fornecimento de oxigênio por ar difuso e aeradores de superfície são os mais utilizados (MUELLER, et al. 2002; VON SPERLING, 2005, METCALF, L. & EDDY, 2016).

Em sistemas descentralizados de tratamento de esgotos, o fornecimento de oxigênio por esses sistemas de aeração pode ser incompatível com os custos de implantação e manutenção. Assim, as diferentes condições exigidas nos processos de tratamento de águas residuárias demandam de estratégias alternativas de aeração, que melhor se adequem a cada situação.

A utilização de estruturas hidráulicas como vertedores, medidores Parshall, escadas, bocais, entre outros, tem sido estudadas (GULLIVER et al, 1991) e apresentam potencial de favorecer a aeração pela grande área interfacial gerada que permite a entrada de ar, associada com a turbulência do escoamento.

Tubos de Venturi, constituídos sequencialmente de uma seção convergente, estrangulamento ou garganta e seção divergente, que são utilizados como dosadores de produtos químicos (cloro, ozônio) e fertilizantes, podem ser

aplicados para injeção de ar na massa líquida. Entre as principais vantagens, destacam-se a simplicidade operacional, que se baseia na redução da pressão ($< P_{atm}$) com o aumento da velocidade no estreitamento do tubo, o baixo custo de instalação e manutenção e a possibilidade de gerar bolhas com pequeno diâmetro sem a necessidade de difusores (BAGATUR,2005, BAYLAR et al 2010 b).

O objetivo desse trabalho foi avaliar as potencialidades da aplicação de tubos de Venturi na reoxigenação da água. Foram testados tanques horizontal e vertical, combinando-se sistemas com tubos de Venturi individuais e associados em paralelo. Nos experimentos buscou-se determinar os efeitos da vazão de água, que passa pelos dispositivos, e da posição do jato em relação a superfície da água nos valores dos coeficientes globais de transferência de oxigênio do ar para a água (KLa) e na eficiência de oxigenação (EO).

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o potencial de tubos de Venturi na transferência de oxigênio do ar para a água.

2.2 Objetivo específico

- Avaliar o efeito da configuração dos tanques de aeração (horizontal e vertical) na transferência de oxigênio;
- Avaliar a influência da instalação de tubos de Venturi individuais e associados em paralelo na aeração;
- Determinar o efeito da vazão da água ($Q_{\text{água}}$) na capacidade de succionar o ar atmosférico (Q_{ar});
- Determinar o efeito da posição de entrada do jato da água na transferência de oxigênio;
- Calcular os coeficientes globais de transferência de oxigênio (KLa) e as eficiências de oxigenação (EO).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Transferência de oxigênio do ar para a água

3.1.1 Aspectos fundamentais

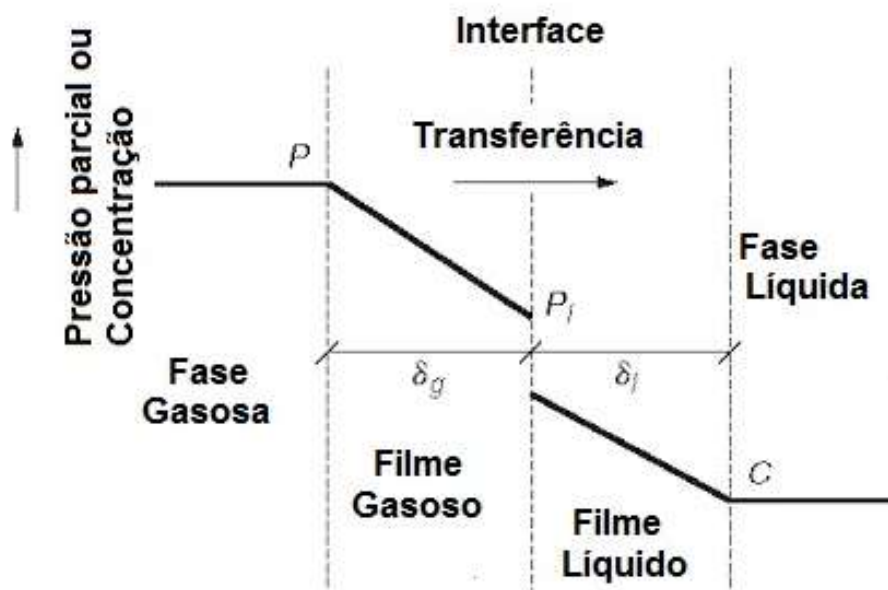
Diversos autores descreveram os mecanismos de transferência do oxigênio do ar para a água, entre eles Lewis e Whitman (1924), Poppel (1974), Mueller et al. (2002), von Sperling (2005), Chisti (1989), Metcalf & Eddy (2016), entre outros. No entanto, as bases para o entendimento dos fenômenos de transferência de gases na interface ar-água foram propostas no início do século passado por Nernst (1904)⁴ apud Gulliver (1991), entre outros pesquisadores, que lançaram a hipótese da existência de filmes estacionários na superfície do líquido quando em contato com um gás.

A teoria dos dois filmes, proposta por Lewis e Whitman (1924) é a mais simples e a mais utilizada e, conforme Metcalf & Eddy (2016) “em pelo menos 95% das situações encontradas, os resultados obtidos são essencialmente os mesmos que aqueles verificados por meio de teorias mais complexas”.

Por esse modelo, a interface gás-líquido é considerada como sendo composta de dois filmes, um situado na fase gasosa e o outro na fase líquida, os quais proporcionam resistência à passagem de moléculas de gás entre a massa do líquido e a massa gasosa. As massas líquida e gasosa externas aos filmes são consideradas completamente misturadas, o que torna os gradientes de concentração desprezíveis nessas fases. Por outro lado, os filmes são praticamente livres de correntes de convecção e, conseqüentemente, a transferência de soluto através deles se dá por difusão molecular (LEWIS e WHITMAN, 1924). Este processo segue a primeira lei de Fick, em que, o transporte se dá a partir de regiões de mais altas para mais baixas concentrações. Assim, Lewis e Whitman (1924) consideraram que a difusão através do filme gasoso ocorre a uma velocidade proporcional à diferença entre as concentrações (ou pressões parciais) do soluto na interface e na fase gasosa, e a difusão pelo filme líquido é igualmente controlada pela diferença entre a concentração do gás na interface e no meio líquido (Figura 1).

¹ NERNST, W.(1904) *Theorie der reaktionsgeschwindigkeit in heterogenen systemen. zeitschrift fur physikalische chemie*, Vol. 47:52-55

Figura 1 - Esquema explicativo da teoria dos dois filmes



Fonte: Metcalf & Eddy(2016).

Como os filmes superficiais são considerados muito finos, a quantidade de soluto contida neles é desprezível se comparada com a quantidade que se difunde através deles. Assim, todo o soluto que passa através de um filme é, praticamente, o mesmo que passa pelo outro, e os dois filmes podem ser considerados como duas resistências em série. Dessa forma, sob condições de regime permanente, a taxa de transferência de massa de um gás através do filme gasoso deve ser igual à taxa de transferência através do filme líquido.

Lewis e Whitman (1924) consideraram que o perfil de concentração no interior dos filmes é linear e admitiram ainda a existência de um equilíbrio instantâneo na interface gás-líquido entre a pressão parcial (P_i) e a concentração (C_i) do gás.

Admitindo-se as considerações feitas por Lewis e Whitman (1924), podem-se obter relações para o fluxo de massa (J) através da fase gasosa e fase líquida, equação (1), conforme apresentado a seguir:

$$J = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = k_G \cdot (P_G - P_i) = k_L \cdot (C_i - C_L) \quad (1)$$

Sendo, J o fluxo, A é área de contato, dm/dt é a variação da massa pelo tempo, k_G é o coeficiente de transferência de massa no filmes gasoso, P_G é a Pressão parcial do gás na fase gasosa, P_I a pressão parcial do gás na interface em equilíbrio com a concentração C_I do gás no líquido, k_L é o coeficiente de transferência de massa no filme líquido, C_I é a concentração do gás na interface em equilíbrio com a pressão parcial P_I e C_L é a concentração do gás na fase líquida.

A equação (1) não tem muita aplicação prática, uma vez que a concentração (C_I) e a pressão parcial (P_I), na interface, são de difícil medida. Por conveniência, então, são empregados coeficientes globais de transferência de massa (K_G e K_L), baseados na diferença entre a pressão parcial no meio gasoso (P_G) e a concentração no meio líquido (C_L). A relação entre os coeficientes globais e os coeficientes individuais em cada fase pode ser obtida quando a relação de equilíbrio é linear, isto é, quando as concentrações são baixas e seguem a lei de Henry (equações 2, 3 e 4):

$$P_G = H C^* \quad (2)$$

$$P^* = H C_L \quad (3)$$

$$P_I = H C_I \quad (4)$$

Nessas expressões, H é a constante de Henry, C^* é a concentração de oxigênio dissolvido na massa líquida em equilíbrio com a pressão parcial P_G , e P^* é a pressão parcial de oxigênio numa mistura gasosa em equilíbrio com uma fase líquida que possui concentração de oxigênio igual a C_L , que é a concentração do gás na interface, em equilíbrio com a pressão parcial P_I e C_L é a concentração do gás na fase líquida.

Dessa forma, substituindo-se as equações (2) e (4) na equação (1), tem-se:

$$J = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = k_G \cdot H(C^* - C_I) = k_L(C_I - C_L) \quad (5)$$

Assim a concentração na interface pode ser explicitada na equação (6):

$$C_I = \frac{k_G \cdot H \cdot C^* + k_L \cdot C_L}{k_L + k_G \cdot H} \quad (6)$$

Utilizando-se o valor de C_I da equação (6) na equação (5), obtém-se a equação (7) que correlaciona os coeficientes de transferência individuais com o coeficiente de transferência global referente à fase líquida:

$$K_L = \frac{1}{\frac{1}{Hk_G} + \frac{1}{k_L}} \quad (7)$$

Assim, reescrevendo a equação (7), obtém-se a equação (8)

$$J = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = K_L \cdot (C^* - C_L) \quad (8)$$

Por um procedimento semelhante, chega-se à equação (9) que expressa a relação entre a resistência global, referenciada com a fase gasosa, e as individuais, e a equação (10):

$$K_G = \frac{1}{\frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L}} \quad (9)$$

$$J = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = K_G \cdot (C^* - C_L) \quad (10)$$

Conforme Lewis e Whitman (1924), para gases que apresentam baixa solubilidade, como o oxigênio, os valores de H são relativamente grandes (aproximadamente 29 a 20°C). Então, da equação (7) pode-se verificar que $K_L \approx k_L$. Isso significa que praticamente toda a resistência à transferência de massa da fase gasosa para a fase líquida (99,8%, conforme Muller et al. 2002) se deve ao filme estacionário do lado líquido.

Assumindo-se dm/dt como $d(V C_L)/dt$, sendo V o volume relativo ao líquido, a equação (10) pode ser reescrita como:

$$\frac{dC_L}{dt} = K_L \cdot \frac{A}{V} (C^* - C_L) = K_L a (C^* - C_L) \quad (11)$$

Nessa expressão, "a" é a área interfacial gás-líquido por unidade de volume líquido, L⁻¹, e KLa é o coeficiente volumétrico global de transferência de massa, t⁻¹.

3.2 Fatores que influenciam a transferência de Oxigênio

Os fatores principais que influenciam a transferência do oxigênio são a concentração de saturação, a qual depende da temperatura, da altitude, da salinidade (POPEL, 1974; SILVA FILHO et al, 2014 e MULLER et al. 2002), além do dispositivo utilizado.

Conforme Popel (1974), a concentração de saturação do oxigênio na água (C_s), pode ser determinada a partir da lei universal dos gases, conforme equação (12):

$$C_S = k_D \cdot d_v \cdot (P_a - P_v) \cdot \frac{PM}{R \cdot T} \quad (12)$$

Em que: k_d é a constante de proporcionalidade, d_v é a distribuição volumétrica do oxigênio no ar (0,20948 ou 20,948%), P_a a pressão atmosférica (101,325 Pa nas CNTP), P_v a pressão de vapor (2,330 Pa a 20°C), PM o peso molecular do oxigênio (32gmol⁻¹), R a constante universal (8,3143 J Kmol⁻¹) e T a temperatura (K). Observa-se que a concentração de saturação de um gás na água depende da temperatura e da pressão.

Entretanto, para efeito prático, são apresentadas na literatura valores tabelados e fórmulas empíricas (POPPEL,1974, MULLER et al., 2002, Von SPERLING, 2005, METCALF & EDDY, 2016) que fornecem o valor de C_s em função da temperatura da água (equação 13) altitude (equação 14) e salinidade (equação 15):

$$C_s = 14,652 - 4,1022 \times 10^{-1} \cdot T + 7,9910 \times 10^{-3} \cdot T^2 - 7,7774 \times 10^{-5} \cdot T^3 \quad (13)$$

Em que T é a temperatura (°C).

$$f_H = \frac{C_s^*}{C_s} = \left(1 - \frac{\text{altitude(m)}}{9450}\right) \quad (14)$$

Onde f_H é o fator de correção de C_s pela altitude, e C_s^* é a concentração de saturação corrigida.

$$\gamma = 1 - 9 \times 10^{-6} \cdot C_{\text{sal}} \quad (15)$$

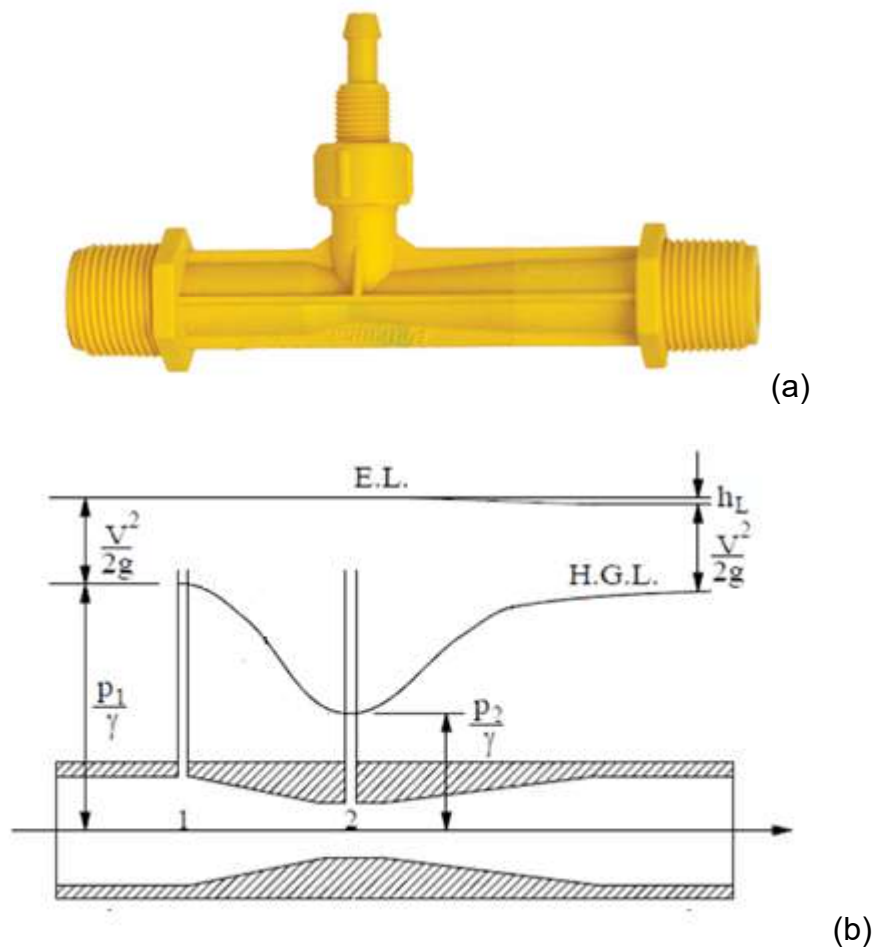
Sendo γ o fator de redução de C_s e C_{sal} a concentração de sais dissolvidos ($\text{mg C}_L \text{ L}^{-1}$).

3.3 Fundamentos dos tubos de Venturi

O tubo de Venturi compreende três seções principais: uma peça convergente, outra divergente (difusor) e uma seção intermediária (garganta ou estrangulamento) conforme mostrado na Figura 2a.

Quando um fluido pressurizado, tal como a água, entra pelo tubo Venturi, e passa pela região estrangulada, ocorre aumento da velocidade (energia cinética) e, ao mesmo tempo, redução da carga de pressão (BRATER et al. 1996, OZKAN et al, 2009 e BAYLAR,2010c), como pode ser visualizado na Figura 2b.

Figura 2 - Tubo de Venturi (a) fotografia, (b) esquema de variação de energia



Fonte: BAYLAR, 2009.

Aplicando-se o teorema de Bernoulli (equação 16) nas seções 1 e 2, considerando-se fluido ideal (sem perda de carga) obtém-se:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (16)$$

Em que p é a pressão nos pontos 1 ou 2, V a velocidade nos pontos 1 ou 2, γ é o peso específico, e g a aceleração da gravidade.

Embora em fluidos reais observa-se uma perda de carga (h_L), o seu valor é minimizado quando os ângulos convergente e divergente do tubo de Venturi for de até 20° e 7° , respectivamente (PORTO, 1999).

Aplicando-se a equação da continuidade nos pontos 1 e 2 ($Q = V_1A_1 = A_2V_2$) e fazendo $\beta = V_2A_2/A_1$, obtém-se a eq. (17).

$$\frac{(p_2 - p_1)}{\gamma} = \frac{(\beta^2 - 1) V_2^2}{2g} \quad (17)$$

O efeito Venturi acontece devido ao aumento da velocidade e, conseqüentemente, redução da pressão no estrangulamento do tubo. Quando a pressão p_2 atingir valor inferior a pressão atmosférica, ocorre a sucção do ar pelo orifício localizado no estrangulamento (BAYLAR et al, 2009).

Conforme Baylar et al. (2006) e Shiau (1995) este sistema é vantajoso por incorporar ar através do jato de água, não necessitando de compressor/soprador para inserir oxigênio, ser de fácil construção e manutenção, não apresenta dificuldades operacionais, tais como entupimento de difusores e outros problemas habituais.

De acordo com Bagatur (2005) os sistemas que usam este dispositivo podem ser usados para resolver uma série de problemas, tais como:

A) Excessiva demanda biológica e química de oxigênio, DBO e DQO no tratamento de águas residuais

B) Aumentar o nível de oxigênio dissolvido para água potável, em aquários e pisciculturas.

C) Oxidação de compostos dissolvidos ou suspensos em água.

D) Desinfecção no tratamento de água potável.

E) Dispersão de outros gases dissolvidos, tais como dióxido de carbono, enxofre e metano.

F) Redução do odor nas estações de tratamento de águas residuais

3.4 Aplicação de tubos Venturi na aeração da água;

Segundo Baylar et al (2007) a performance de estruturas hidráulicas tem sido estudada experimentalmente por diversos autores, no entanto não existem muitos estudos específicos sobre o uso do tubo de Venturi e sua capacidade de aeração. A possibilidade do uso do tubo de Venturi para aeração foi proposta inicialmente por BOON (1978), o qual ressaltou que podem ser utilizados dois critérios para avaliar a eficiência de um aerador: a capacidade de oxigenação, definida como a taxa de absorção de oxigênio durante a aeração com temperatura específica (por exemplo, 20 °C) e a eficiência de oxigenação, sendo a capacidade de oxigenação do aerador por unidade de energia consumida.

Conforme Baylar et al. (2007) diversas variáveis podem interferir na transferência do oxigênio, tais como taxa de entrada de ar, velocidade da água, dimensões do tubo de Venturi utilizado e forma do jato de água.

Em trabalho anterior, Baylar et al. (2003) verificou que um aumento da velocidade do jato de água proporciona um aumento na taxa de entrada de ar, um aumento da penetração da bolha, mas provoca uma diminuição da eficiência de transferência de oxigênio.

Bagatur (2005) cita o número de Reynolds como outro fator relevante neste tipo de sistema, em que valores abaixo de 1900 não observou pressão negativa (vácuo) que permite a entrada de ar no tubo de Venturi. Segundo Piccin et al (2009) e Gordiychuk et al (2016) este parâmetro é correlacionado com o tamanho da bolha, que influencia a área de contato entre a fase gasosa e líquida, e conseqüentemente com a eficiência da transferência de oxigênio.

Feitosa Filho et al. (1997) avaliaram um aerador por injetor tipo Venturi acoplado a linhas de PVC rígido perfuradas e submersas. O ar era captado da atmosfera pelo injetor e incorporado na água que passava pela tubulação principal de um sistema de criação de peixes, sendo ambos, ar e água, distribuídos pela tubulação perfurada no reservatório de tratamento. Eles conseguiram boa eficiência na quantidade de ar incorporado na água (0,097 L de ar por segundo), porém sua distribuição no reservatório foi bastante irregular ao longo das tubulações.

Conforme Dong et al (2012), Baylar e Ozkan (2006), a taxa com que o líquido é bombeado através do tubo de venturi influencia significativamente a taxa de transferência de oxigênio. Dong et al (2012) verificou que um aumento na vazão proporcionou um aumento de até 1,5 vezes o valor do Coeficiente Global de Transferência de Oxigênio (KLa), no entanto, Bauer et al (1963), observou também que uma vazão alta pode gerar um consumo de energia em excesso na bomba. Isto implica que existe uma vazão máxima ideal para a transferência de oxigênio. De outra forma, Baylar e Ozkan (2006) relataram também que a razão do fluxo gás (QG) pelo fluxo do líquido (QL), QG/QL diminui com o aumento da vazão do líquido depois de atingir um valor máximo.

Baylar et al. (2005) conduziram um outro experimento avaliando a influência do ângulo convergente e divergente do tubo de Venturi e indicou como ótimos os ângulos convergentes, de 20°, e divergente, de 10°. Também foi

avaliado o diâmetro do tubo de venturi, onde um aumento do diâmetro da garganta proporcionou um maior volume de entrada de ar no sistema.

Jackson e Collins (1964) verificaram também que aeradores de Venturi em série não melhoram significativamente a transferência de oxigênio. Dong et al (2012) também não obtiveram melhora no KLa com tubos de Venturi associados em série e verificaram queda de pressão em toda a linha, resultando em aumento de gasto energético da bomba.

Em 2015, Kadzinga avaliou a capacidade de aeração do tubo de venturi utilizando como variáveis a velocidade de agitação de um tanque biológico, a taxa de recirculação no tanque e dois modelos diferentes de tubos de Venturi e comparou experimentalmente com um sistema convencional de aeração utilizando compressor em um sistema biológico com leveduras. Neste trabalho também foi avaliado o uso de dois tubos de venturi em paralelo. Foi verificado uma maior sucção total de ar com o uso de tubos de Venturi em paralelo embora não tenha verificado um aumento do KLa, sugerindo que é necessário um equilíbrio entre fluxo de líquido e gás, podendo ter uma formação de bolhas com elevado diâmetro resultando em perda na área de contato, obtendo valores de KLa próximos a $8,0 \text{ min}^{-1}$ com vazões de líquido de $45,0 \text{ L min}^{-1}$.

No trabalho de kadzinga (2015) também foi verificado um aumento do KLa com o aumento do fluxo de água, e também foi constatado um comportamento de crescimento das leveduras similar ao observado com o uso do compressor mostrando uma eficiência de aeração do tubo de Venturi.

Kadzinga (2015), também cita em seu trabalho como recomendação um aprofundamento na avaliação da relação do fluxo de água, tempo de residência das bolhas e KLa e avaliação da aeração com tubo de Venturi sem agitação. Isto para reduzir o consumo energético já que a agitação pode ser promovida pela circulação da água. Neste trabalho verificou consumo energético similar entre o uso do tubo de Venturi e um sistema convencional de aeração com compressor.

Rodriguez et al (2012) também avaliou a transferência de oxigênio utilizando tubo de Venturi em um tanque de 200L, variando a vazão do líquido e as dimensões dos difusores e mantendo a pressão constante no sistema, tendo como objetivo principal da aeração a aplicação em sistemas biológicos, neste trabalho a taxa de fluxo de ar foi mantida constante em 20 L min^{-1} em todos os experimentos, foi utilizado também diferentes concentrações de sulfato na água

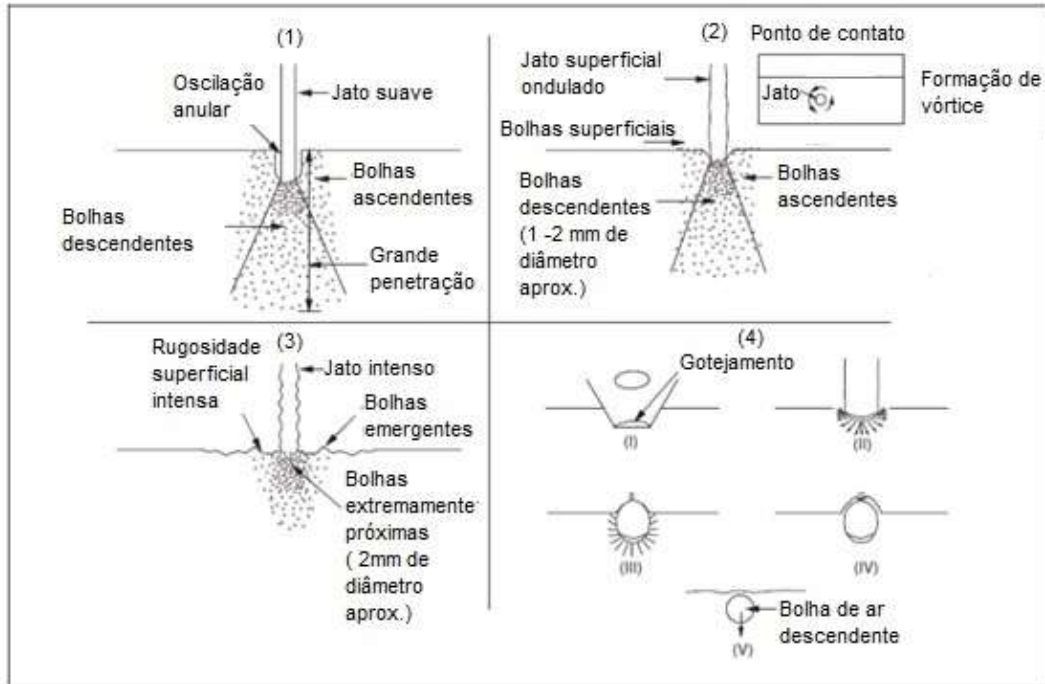
utilizada nos testes. Os resultados obtidos de KLa variaram de 19 a 38 h^{-1} e observou uma melhora na eficiência de transferência com um aumento de pressão no sistema e não obteve grandes alterações do KLa na presença de sais de sulfato.

3.5 Efeito do jato de água na transferência de oxigênio

Conforme Baylar e Emiroglu (2003), outro fator importante no processo de transferência de oxigênio é o efeito da entrada do jato na água. O mecanismo é variado e complexo.

Mckeogh e Ervine (1981) classificam o efeito da entrada do jato na água em quatro tipos dependentes da turbulência, conforme ilustrado na Figura 3: 1) oscilação anular; 2) vórtice intermitente; 3) oclusão turbulenta e 4) arraste de gotas.

Figura 3 - Mecanismos de entrada do jato



Fonte: Baylar (2003)

Segundo Mckeogh e Ervine (1981), no mecanismo de oscilação anular, quando o jato atinge a superfície da água, tem-se uma depressão do menisco. Este tipo de jato ocorre apenas quando o escoamento é laminar. Conforme Baylar (2003), neste tipo de jato mais suave, observa-se a formação de oscilação anular no ponto de contato com a água, sendo que a entrada do ar ocorre quando há o rompimento deste anel. Quando ocorre a transição do escoamento do regime laminar para o regime turbulento tem-se a formação de um vórtice intermitente (2) e, a medida que o jato se torna totalmente turbulento (3) a superfície da água torna a ficar totalmente irregular e o ar é distribuído no formato de bolhas pelo processo de difusão. Já no arraste de gotas (4), conforme Baylar (2003), a medida que o jato de água cai na água, observa-se uma desintegração da gota, e o jato em formato de gotas arrasta o ar.

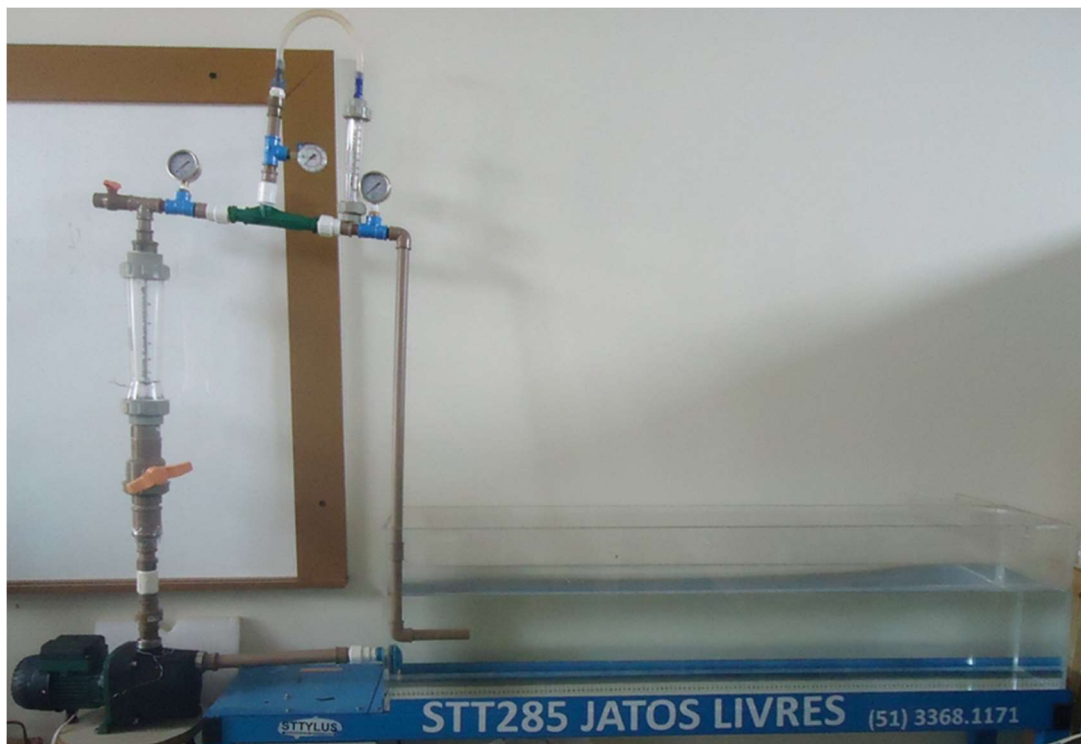
4 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Hidráulica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina.

4.1 Instalações experimentais

Para a realização dos testes experimentais foram utilizados dois (2) tanques, construídos em acrílico: um horizontal denominado TH e outro vertical chamado de TV, conforme apresentados nas Figuras 4, 5 e 6.

Figura 4 - Fotografia do tanque horizontal



Fonte: Autor

Figura 5 - Esquema do tanque horizontal (TH) sendo (1) Reservatório, (2)Bomba, (3)Registro gaveta, (4) Rotâmetro de água (5),Manômetro, (6)Vacuômetro, (7)Rotâmetro de ar, (8)Venturi, (9) Saída do jato de água, (10) Eletrodo para medição de Oxigênio, (11) Oxímetro, (12) Computador;

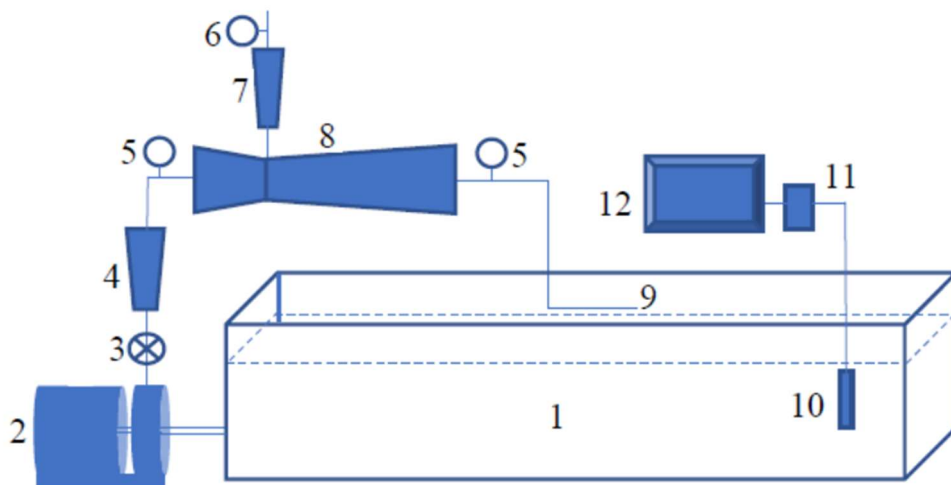
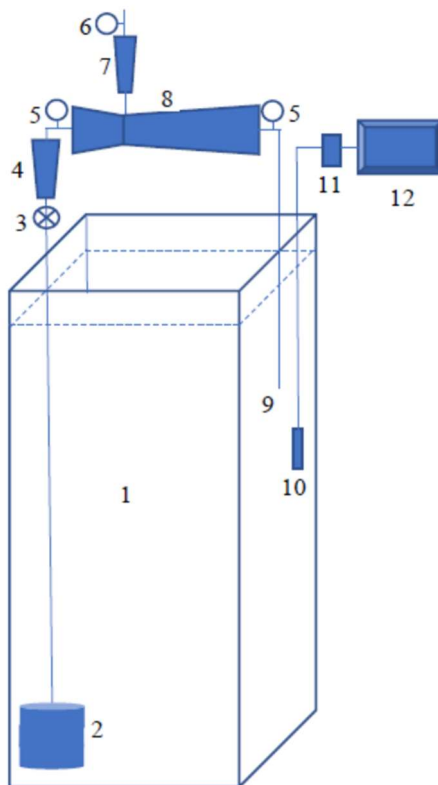


Figura 6 - Fotografia e esquema do tanque vertical (TV) sendo (1) Reservatório, (2)Bomba, (3)Registro gaveta, (4) Rotâmetro de água (5),Manômetro, (6)Vacuômetro, (7)Rotâmetro de ar, (8)Venturi, (9) Saída do jato de água, (10) Eletrodo para medição de Oxigênio, (11) Oxímetro, (12) Computador;



Fonte: Autor

Na tabela 1 estão descritos as dimensões de cada tanque utilizado nos testes experimentais.

Tabela 1 - Características dos tanques utilizados no experimento.

Tanque	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)	Altura útil (m)	Volume útil (m ³)
Vertical (TV)	0,26	0,28	1,08	0,86	0,063
Horizontal (TH)	1,47	0,28	0,39	0,24	0,100

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Bomba autoaspirante Mark Dar modelo Jetcom 32, potência de 600W e vazão 0,6-3,6 m³ h⁻¹ utilizada no tanque horizontal;

- Bomba submersa Karcher modelo SDF 700 potência de 320W e vazão máxima de 0,7 m³ h⁻¹ utilizada no tanque vertical;

- Rotâmetro BLI 5000 faixa 300 a 4000 Litros de água por hora, precisão ±2%, repetibilidade 0,25%

- Rotâmetro BLI 200 faixa 300 a 4000 Litros de Ar por hora, precisão ±2%, repetibilidade 0,25%

- Manômetro Genebre faixa 0 a 60 PSI

- Vacuômetro Makil faixa – 760 a 0 mmHg

- Tubos de Venturi D 1" Marca Irritec, CO

Tabela 2 - Dimensões do Tubo de venturi

	Comprimento (mm)	Diâmetro da seção de entrada/saída (mm)	Diâmetro da seção intermediária (mm)
Venturi D 1"	227,5	20	7,50

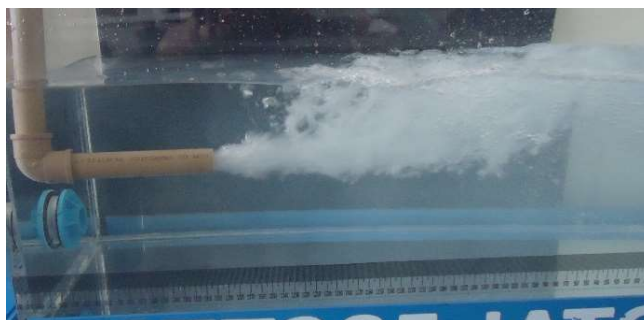
4.2 Funcionamento dos sistemas

Tanque horizontal: Foi utilizada água potável proveniente de sistema de abastecimento. Para realização dos ensaios, a vazão da bomba era controlada por meio de registro de gaveta RG e ajustada pela leitura da vazão de água no rotâmetro R1. A medida da vazão de ar era feita no rotâmetro R2, as pressões de montante, e de jusante nos manômetros M1 e M2 e vacuômetro V1 instalados na linha de bombeamento.

Nos ensaios com um único tubo de Venturi, a vazão total passava pelo dispositivo, enquanto que para dois tubos associados em paralelo, a vazão era dividida entre as linhas.

A saída do jato de água era horizontal, conforme Figura 7. As posições de saída da água + ar eram ajustadas por meio da extensão/redução da(s) tubulação(ões) de saída.

Figura 7 - Fotografia da saída da água+ar no tanque horizontal para posição do jato submersa.



Fonte: Autor

Tanque vertical: Foi utilizado sistema idêntico ao tanque horizontal, com os mesmos dispositivos de controle e monitoramento. O jato d'água entrava no sentido perpendicular à superfície da água.

4.3 Procedimento Experimental

Foi utilizado o planejamento estatístico Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), descrito por Rodrigues e Lemma (2005). Como variáveis independentes foram adotadas a vazão de água na(s) entrada(s) do(s) tubo(s) de Venturi ($Q_{\text{água}}$) e a posição da tubulação (P_{jato}) de saída da água (valores positivos, acima e negativos abaixo do nível da água). A Tabela 3 sumariza as condições operacionais testadas.

Como respostas (variáveis dependentes) foram calculados os coeficientes globais de transferência do oxigênio do ar para a água (KLa) e as eficiências de oxigenação (EO).

Os ensaios foram executados em 4 etapas:

Etapa 1. Tanque horizontal com 1 tubo de Venturi (12 ensaios)

Etapa 2. Tanque horizontal com 2 tubos de Venturi em paralelo (12 ensaios)

Etapa 3. Tanque vertical com 1 tubo de Venturi (12 ensaios)

Etapa 4. Tanque vertical com 2 tubos de Venturi em paralelo (12 ensaios)

Tabela 3 - Planejamento experimental com valores codificados e reais das variáveis independentes para 1 e 2 tubos de Venturi nos tanques horizontal e vertical

Ensaio	Tanque horizontal			Tanque vertical		
	Vazão da água (L h ⁻¹)		Posição do jato (cm)	Vazão da água (L h ⁻¹)		Posição do jato (cm)
	1 Venturi	2 Venturi		1 Venturi	2 Venturi	
1	-1(1490)	-1(1600)	-1(-10,6)	-1(650)	-1(1720)	-1(-10,6)
2	1(2400)	1(3100)	-1(-10,6)	1(1390)	1(2320)	-1(-10,6)
3	-1(1490)	-1(1600)	1(+10,6)	-1(650)	-1(1720)	1(10,6)
4	1(2400)	1(3100)	1(+10,6)	1(1390)	1(2320)	1(10,6)
5	-1,41(1300)	-1,41(1300)	0(0,0)	-1,41(500)	-1,41(1300)	0(0,0)
6	+1,41(2600)	+1,41(3400)	0(0,0)	+1,41(1540)	+1,41(2500)	0(0,0)
7	0(1950)	0(2350)	-1,41(-15,0)	0(1020)	0(1900)	-1,41(-15,0)
8	0(1950)	0(2350)	1,41(+15,0)	0(1020)	0(1900)	1,41(15,0)
9	0(1950)	0(2350)	0(0,0)	0(1020)	0(1900)	0(0,0)
10	0(1950)	0(2350)	0(0,0)	0(1020)	0(1900)	0(0,0)
11	0(1950))	0(2350)	0(0,0)	0(1020)	0(1900)	0(0,0)
12	0(1950)	0(2350)	0(0,0)	0(1020)	0(1900)	0(0,0)

Entrada jato: (+) acima da superfície da água (-) abaixo da superfície da água

4.3.1 Determinação do coeficiente global de transferência de oxigênio (KLa)

Foi empregado o método não estacionário que consiste na redução da concentração de oxigênio dissolvido na água e, em seguida, injeção de ar e acompanhamento da variação do oxigênio dissolvido com o tempo.

Inicialmente foi ajustada a vazão da bomba e injetado nitrogênio gasoso na abertura localizada na garganta do tubo de Venturi para a remoção do oxigênio da fase líquida até uma concentração próxima de 2,0 mgL⁻¹. Em seguida, pela abertura do tubo de Venturi, foi permitido a entrada e difusão do ar na massa líquida, acompanhando-se a concentração de oxigênio dissolvido até que o valor

se estabilizasse. A medida da variação do oxigênio dissolvido nos tanques, foi realizada por meio de um medidor digital, marca Thermo Scientific, modelo Orion 5 Star, com faixa de medição de 0,00 - 20,00 mgO₂ L⁻¹ e resolução de 0,01 mgO₂ L⁻¹, conectado a um computador, permitindo a aquisição "on-line" de dados a cada 2 (dois) segundos.

Os dados experimentais foram ajustados pela equação 18 originada da integração da equação 11, sendo que foi utilizado o software Origin para cálculo dos resultados.

$$C = C^* - (C^* - C_0) \cdot e^{-K_L a \cdot (t - t_0)} \quad (18)$$

Nessa expressão, C* é a concentração de equilíbrio do oxigênio no meio líquido, t, t₀ e C₀ são, respectivamente, o tempo final, inicial e a concentração em que se reinicia da aeração.

A temperatura da água foi monitorada em todos os testes, a fim de corrigir para o valor padrão de 20°C, de acordo com a equação 19, descrita por von Sperling (2001):

$$K_{La} (20^\circ C) = \frac{K_{La} (T^\circ C)}{\theta^{(T-20)}} \quad (19)$$

Em que θ é o coeficiente de temperatura, com valor adotado igual a 1,024. (Metcalif & Eddy, 2016)

4.3.2 Taxa de transferência de oxigênio padrão (TTOpadrão)

$$TTO_{PADR\tilde{A}O} = \frac{K_{La} \cdot C_s \cdot V}{1000} \quad (20)$$

Em que TTO padrão é a taxa de transferência de oxigênio padrão (kgO₂ h⁻¹), KLa o coeficiente global de transferência de oxigênio (h⁻¹), C_s a concentração de saturação de oxigênio na água limpa, nas condições padrão de temperatura (0°C) e altitude (0 m) igual a 9,092 g m⁻³ (MetCalf & Eddy, 2016) e V o volume do tanque (m³).

4.3.3 Energia consumida no tubo de Venturi

A energia consumida foi calculada considerando a perda de carga do ejetor, sendo adotada a expressão (equação 21) apresentada por Piccin et al (2009):

$$P = \frac{(p_2 - p_1) m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} \quad (21)$$

Sendo P a potência (kW), p_1 e p_2 são as pressões de trabalho na entrada e saída do tubo de Venturi (kN m^{-2}), m_{H_2O} a vazão mássica de água (kg s^{-1}) e ρ_{H_2O} é a densidade da água (kg m^{-3}).

4.3.4 Eficiência de oxigenação

A eficiência de oxigenação (EO) se apresenta como uma das variáveis mais importantes, em virtude de reportar a quantidade de oxigênio transferida por quantidade de energia consumida podendo desta forma ser utilizada para comparar a eficiência com outros sistemas convencionais de aeração, para cálculo desta variável foi utilizada a equação abaixo apresentada por von Sperling (2001):

$$EO = \frac{TTO_{\text{PADRÃO}}}{P} \quad (22)$$

Em que EO é a eficiência de oxigenação ($\text{kg O}_2 \text{ kWh}^{-1}$), $TTO_{\text{padrão}}$ dada pela equação 20 e P a potência (kW) calculada pela equação 21.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados compreende a análise estatística dos efeitos da vazão da água e da posição de saída do jato d'água no cálculo do coeficiente global de transferência do oxigênio do ar para a água - KLa - (item 5.1) e eficiência de oxigenação – EO – (item 5.2).

Para cada sistema estudado, são apresentadas tabelas com as variáveis resposta, estimativa dos efeitos e para os resultados estatisticamente significativos ao nível de confiança de 95% (valor do Teste $F_{calculado} > F_{tabelado}$) do cálculo da ANOVA, os modelos reparametrizados (variáveis codificadas), curvas de contorno e tabelas comparativas dos dados experimentais e previstos pelos modelos matemáticos.

5.1 Determinação dos coeficientes globais de transferência de oxigênio – KLa

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de determinação dos KLa , conduzidos conforme planejamento experimental (Tabela 3). Os valores foram corrigidos para a temperatura de 20°C, de acordo com a equação 19.

Tabela 4 – Condições experimentais (valores codificados) e valores experimentais obtidos dos KLa para as condições operacionais

Ensaio	Vazão da água (valores codificados)	Posição do jato (valores codificados)	KLa (h^{-1})			
			TH1V	TH2V	TV1V	TV2V
1	-1	-1	9,83	8,09	7,07	18,11
2	1	-1	29,34	30,95	23,55	36,87
3	-1	1	11,45	9,71	5,73	24,14
4	1	1	31,47	38,13	24,29	36,87
5	-1,41	0	6,99	6,16	4,81	8,15
6	1,41	0	37,28	48,92	26,16	36,42
7	0	-1,41	18,56	12,01	12,30	30,42
8	0	1,41	21,04	21,39	12,59	31,72
9	0	0	16,58	22,79	12,20	25,17
10	0	0	19,63	22,77	13,54	23,34
11	0	0	18,66	23,26	12,38	25,40
12	0	0	19,66	22,15	13,14	25,78

Observa-se na Tabela 4 que, nos ensaios 6 (máximas vazões da água) foram obtidos os melhores resultados de transferência de oxigênio. O oposto pode ser constatado nos ensaios 5, com as mais baixas vazões de água.

O efeito das variáveis independentes (vazão da água e posição do jato d'água) sobre a variável dependente, coeficientes globais de transferência de oxigênio do ar para a água (KLa) foi avaliada por meio do software Statistica®. Os fatores significativos, ao nível de confiança de 95% (p-valor < 0,05), estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Efeito das variáveis independentes para a variável resposta KLa

Ensaio	Fatores	Efeito	Erro padrão	t	p-valor	Estimativa por intervalo (95%)	
						Limite inferior	Limite superior
TH1V	Média	18,63	0,58	31,96	<0,0001	17,21	20,06
	Vazão água (L)	20,62	0,83	24,97	<0,0001	18,60	22,64
	Vazão água (Q)	3,29	0,93	3,56	0,0120	1,03	5,56
	Posição jato (L)	1,82	0,83	2,20	0,0701	-0,20	3,84
	Posição jato (Q)	0,94	0,93	1,02	0,3481	-1,32	3,21
	Interação	0,26	1,17	0,22	0,8342	-2,60	3,11
TH2V	Média	22,74	0,77	29,35	<0,0001	20,85	24,64
	Vazão água (L)	27,98	1,10	25,49	<0,0001	25,29	30,66
	Vazão água (Q)	4,63	1,23	3,76	0,0094	1,62	7,64
	Posição jato (L)	5,52	1,10	5,03	0,0024	2,84	8,21
	Posição jato (Q)	-6,28	1,23	-5,10	0,0022	-9,29	-3,27
	Interação	2,78	1,55	1,79	0,1230	-1,01	6,57
TV1V	Média	12,81	0,54	23,80	<0,0001	11,49	14,13
	Vazão água (L)	16,33	0,76	21,43	<0,0001	14,47	18,20
	Vazão água (Q)	3,29	0,85	3,85	0,0085	1,20	5,38
	Posição jato (L)	-0,05	0,76	-0,06	0,9519	-1,91	1,82
	Posição jato (Q)	0,23	0,85	0,27	0,7977	-1,86	2,32
	Interação	1,04	1,08	0,97	0,3713	-1,59	3,67
TV2V	Média	24,92	1,03	24,15	<0,0001	22,39	27,44
	Vazão água (L)	17,89	1,46	12,24	<0,0001	14,31	21,47
	Vazão água (Q)	-1,48	1,64	-0,91	0,3997	-5,49	2,52
	Posição jato (L)	1,97	1,46	1,35	0,2260	-1,60	5,55
	Posição jato (Q)	7,35	1,64	4,49	0,0042	3,34	11,36
	Interação	-3,02	2,06	-1,46	0,1943	-8,06	2,03

Os modelos matemáticos podem ser simplificados, pela exclusão dos fatores com nenhum ou pouco efeito na variável resposta (termos não significativos ao nível confiança de 95%). Tais modelos, denominados reparametrizados, são válidos para as variáveis codificadas e representam os valores do KLa em função da vazão da água (X_1) e posição do jato de água (X_2), descritos nas equações 23,24,25 e 26:

No tanque horizontal usando um tubo de Venturi foi obtida a equação reparametrizada abaixo, mostrando que apenas a vazão de água (X_1) apresentou uma resposta significativa com nível de confiança superior a 95%.

$$KLa (h^{-1}) = 19,01 + 10,31 X_1 + 1,55 X_1^2 \quad (23)$$

Já no tanque horizontal usando dois tubos de Venturi foi obtida a equação abaixo, evidenciando uma relação tanto com a vazão de água (X_1) quanto com a posição do jato de água (X_2).

$$KLa (h^{-1}) = 22,75 + 13,99 X_1 + 2,31 X_1^2 + 2,76 X_2 - 3,14 X_2^2 \quad (24)$$

No tanque vertical usando um tubo de Venturi foi obtido a equação abaixo tendo comportamento similar ao tanque horizontal com 1 tubo de Venturi.

$$KLa (h^{-1}) = 12,90 + 8,17 X_1 + 1,62 X_1^2 \quad (25)$$

No tanque vertical usando dois tubos de Venturi foi obtido a equação abaixo tendo também comportamento similar ao tanque horizontal com dois tubos de Venturi.

$$KLa (h^{-1}) = 24,32 + 8,85 X_1 + 3,82 X_2^2 \quad (26)$$

As equações 24,25,26 e 27 foram obtidas por meio da validação pelo teste ANOVA..

A análise de variância (ANOVA), ao nível de 95% de confiança, indicam que os modelos se ajustam bem aos valores experimentais, com as variações explicadas acima de 94% e os valores de Fcalculado superiores aos valores de Ftabelados, conforme pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 - Análise de Variância para a resposta KLa

Ensaio	Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fcalculado Ftabelado	R ² (%)
TH1V	Regressão	863,88	2	431,94	239,39 ¹	98,15
	Resíduos	16,24	9	1,80	4,26 ²	
	Total	880,11				
TH2V	Regressão	1717,62	4	429,41	135,84 ¹	98,74
	Resíduos	22,13	7	3,16	4,12 ³	
	Total	1739,75				
TV1V	Regressão	549,61	2	274,80	304,02 ¹	98,54
	Resíduos	8,14	9	0,90	4,26 ²	
	Total	557,74				
TV2V	Regressão	734,72	2	367,36	72,08 ¹	94,12
	Resíduos	45,87	9	5,10	4,26 ²	
	Total	780,59				

¹ Fcalculado ²F tabelado 2;9;0,05 = 4,26 ³F tabelado 4;7;0,05 = 4,12

O bom ajuste dos dados experimentais aos valores previstos pelos modelos pode ser verificado nas Tabelas 07 e 08. Constata-se que, nas regiões de interesse, com valores máximos de KLa, os erros relativos são respectivamente de 1,7%, 3,8%, -5,7% e -1,43% para TH1V, TH2V, TV1V e TV2V.

Tabela 7 - Valores do KLa experimentais, previstos pelo modelo e erro relativo para o tanque horizontal.

Ensaio	Variável		Sistema					
	X ₁	X ₂	TH1V			TH2V		
			KLa Experimental (h ⁻¹)	KLa Previsto (h ⁻¹)	Erro relativo (%)	KLa Experimental (h ⁻¹)	KLa Previsto (h ⁻¹)	Erro relativo (%)
1	-1	-1	9,83	10,25	-4,3	8,09	5,17	36,1
2	1	-1	29,34	30,87	-5,2	30,95	33,15	-7,1
3	-1	1	11,45	10,25	10,5	9,71	10,69	-10,1
4	1	1	31,47	30,87	1,9	38,13	38,67	-1,4
5	-1,41	0	6,99	7,55	-8,1	6,16	7,62	-23,6
6	1,41	0	37,28	36,63	1,7	48,92	47,07	3,8
7	0	-1,41	18,56	19,01	-2,4	12,01	12,62	-5,0
8	0	1,41	21,04	19,01	9,6	21,39	20,40	4,6
9	0	0	16,58	19,01	-14,7	22,79	22,75	0,2
10	0	0	19,63	19,01	3,2	22,77	22,75	0,1
11	0	0	18,66	19,01	-1,9	23,26	22,75	2,2
12	0	0	19,66	19,01	3,3	22,15	22,75	-2,7

Erro relativo (%) = ((valor experimental – valor previsto)/valor experimental)x100

Tabela 8 - Valores do KLa experimentais, previstos pelo modelo e erro relativo para o tanque vertical

Ensaio	Variável		Sistema					
	X ₁	X ₂	TV1V			TV2V		
			KLa Experimental (h ⁻¹)	KLa Previsto (h ⁻¹)	Erro relativo (%)	KLa Experimental (h ⁻¹)	KLa Previsto (h ⁻¹)	Erro relativo (%)
1	-1	-1	7,07	6,35	10,2	18,11	19,19	-5,96
2	1	-1	23,55	22,69	3,7	36,87	37,09	-0,60
3	-1	1	5,73	6,35	-10,8	24,14	19,19	20,51
4	1	1	24,29	22,69	6,6	36,87	37,09	-0,60
5	-1,41	0	4,81	4,60	4,3	8,15	11,70	-43,56
6	1,41	0	26,16	27,64	-5,7	36,42	36,94	-1,43
7	0	-1,41	12,30	12,90	-4,9	30,42	31,91	-4,90
8	0	1,41	12,59	12,90	-2,5	31,72	31,91	-0,60
9	0	0	12,20	12,90	-5,7	25,17	24,32	3,38
10	0	0	13,54	12,90	4,7	23,34	24,32	-4,20
11	0	0	12,38	12,90	-4,2	25,40	24,32	4,25
12	0	0	13,14	12,90	1,8	25,78	24,32	5,66

Erro relativo (%) = ((valor experimental – valor previsto)/valor experimental)x100

Por meio das curvas de contorno (Figuras 8, 9, 10 e 11) geradas pelos modelos reparametrizados (equações 23, 24, 25 e 26) pode-se observar as regiões em que a vazão da água e a posição do jato d'água maximiza o coeficiente de transferência de oxigênio.

Figura 8 – Curvas de contorno para KLa em função da vazão e da posição do jato de água no tanque horizontal com 1 tubo de Venturi

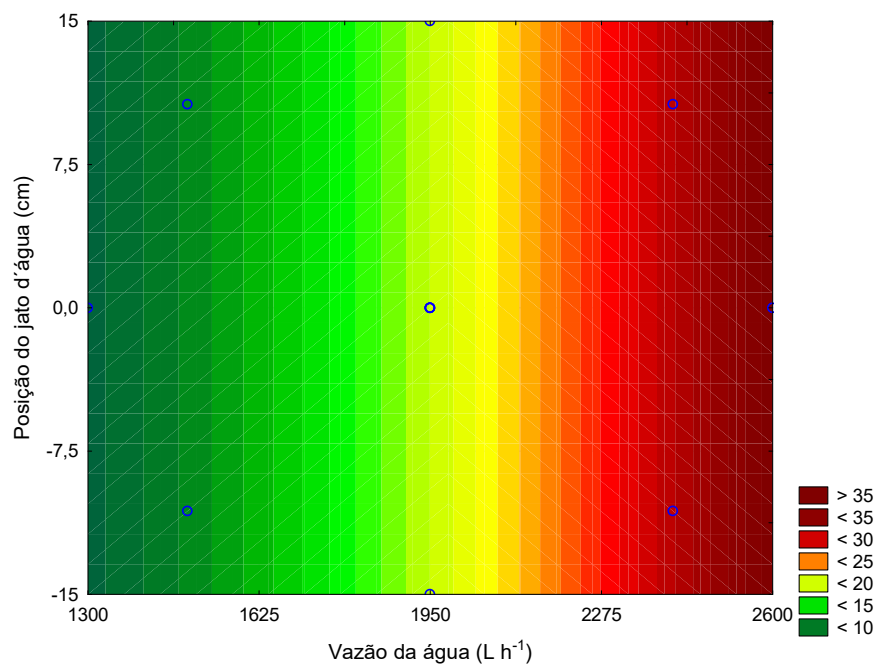


Figura 9 - Curvas de contorno para KLa em função da vazão e da posição do jato de água no tanque horizontal com 2 tubos de Venturi

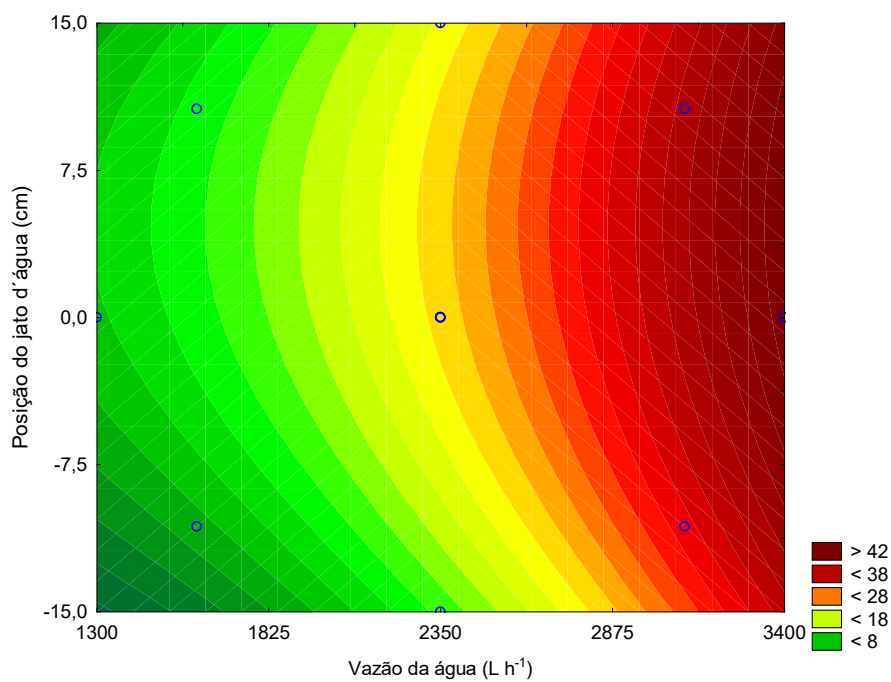


Figura 10 - Curvas de contorno para KLa em função da vazão e da posição do jato de água no tanque vertical com 1 tubo de Venturi

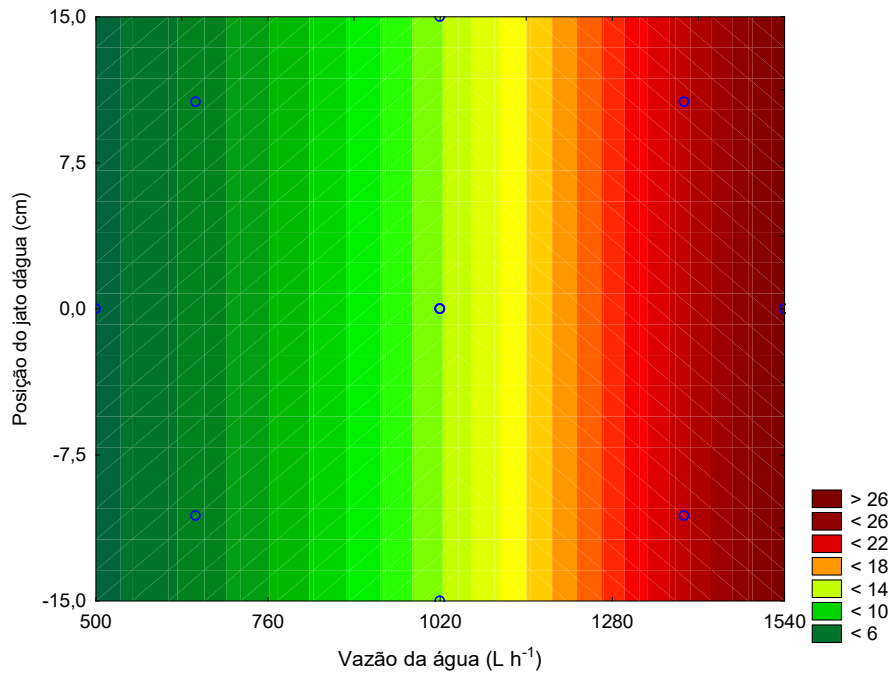
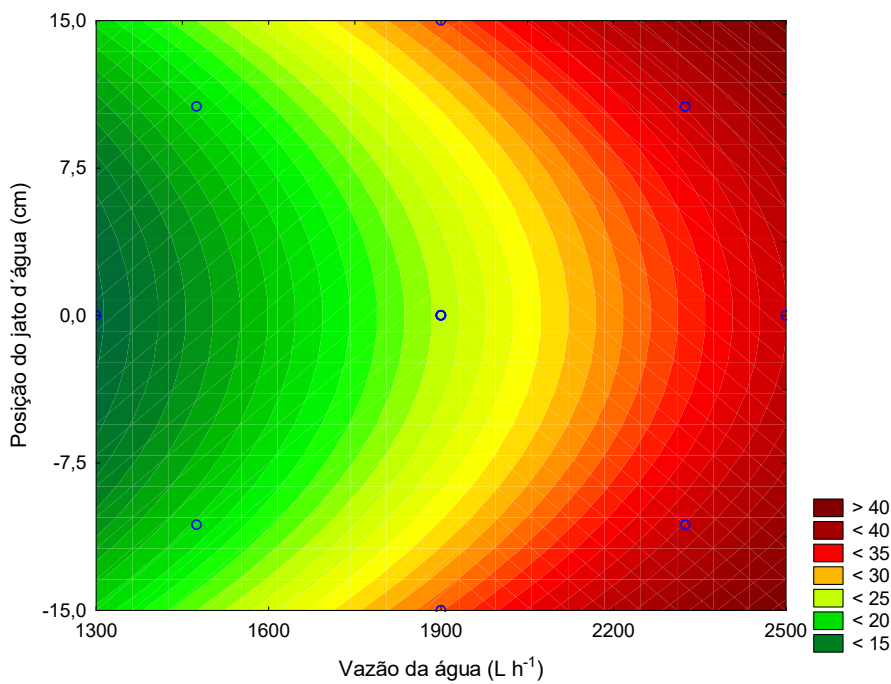


Figura 11 - Curvas de contorno para KLa em função da vazão e da posição do jato de água no tanque vertical com 2 tubos de Venturi



Nas Tabelas 9 e 10 são apresentados os dados da validação dos modelos, testados para a vazão máxima e variação das posições da saída dos tubos.

Observa-se, de maneira geral, que os modelos podem descrever satisfatoriamente os dados experimentais.

Tabela 9 - Validação dos modelos para o tanque horizontal

Ensaio	Variável		Sistema					
	X ₁	X ₂	TH1V			TH2V		
			KLa Experimental (h ⁻¹)	KLa Previsto (h ⁻¹)	Erro relativo (%)	KLa Experimental (h ⁻¹)	KLa Previsto (h ⁻¹)	Erro relativo (%)
1	1,41	-1,41	31,36	36,63	-16,8	26,38	36,93	-40,0
2	1,41	-1	36,51	36,63	-0,3	35,16	41,17	-17,1
3	1,41	0	37,28	36,63	1,7	48,92	47,07	3,8
4	1,41	1	33,04	36,63	-10,9	46,65	46,69	-0,1
5	1,41	1,41	39,11	36,63	6,3	41,37	44,72	-8,1

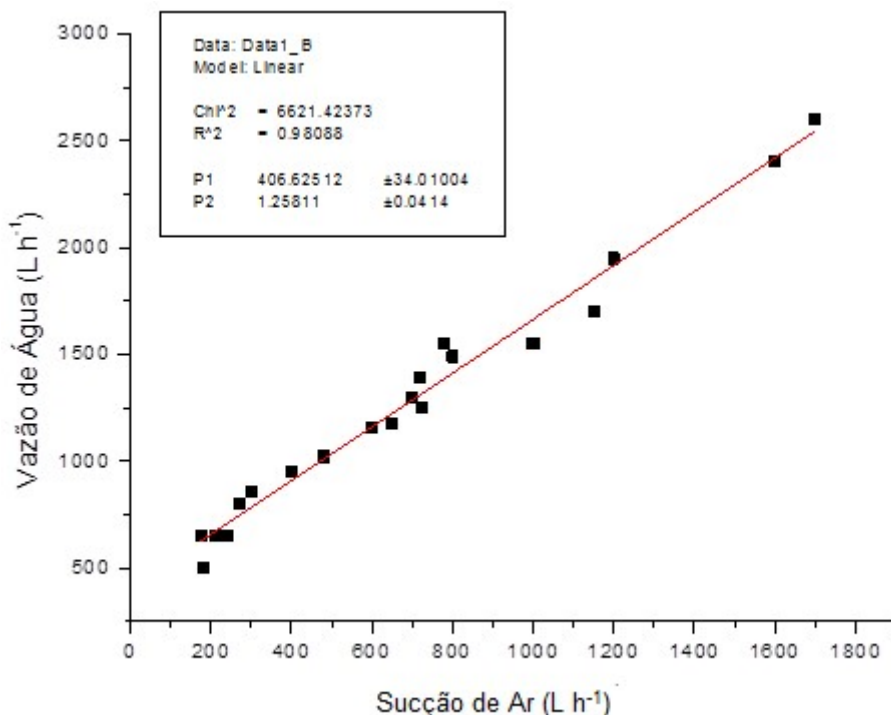
Tabela 10 - Validação dos modelos para o tanque vertical

Ensaio	Variável		Sistema					
	X ₁	X ₂	TV1V			TV2V		
			KLa Experimental (h ⁻¹)	KLa Previsto (h ⁻¹)	Erro relativo (%)	KLa Experimental (h ⁻¹)	KLa Previsto (h ⁻¹)	Erro relativo (%)
1	1,41	-1,41	25,07	27,64	-10,3	48,06	44,53	7,3
2	1,41	-1	27,99	27,64	1,2	38,85	40,76	-4,9
3	1,41	0	26,16	27,64	-5,7	36,42	36,94	-1,4
4	1,41	1	23,82	27,64	-16,0	41,18	40,76	1,0
5	1,41	1,41	23,85	27,64	-15,9	52,60	44,53	15,3

5.2 Avaliação do efeito da vazão de água

De maneira geral, observa-se que a vazão da água influenciou mais acentuadamente os valores de KLa, com aumento da transferência com o incremento da vazão do líquido. Este fato pode estar relacionado com o aumento da vazão de ar injetada na água com a elevação da vazão da água, como pode ser verificado na Figura 12.

Figura 12 – Relação entre a vazão de água e a vazão de ar aspirado



A Figura 12 foi construída medindo-se os valores das vazões de água e vazões de ar nos respectivos rotâmetros conectados a um único tubo de Venturi (metade das vazões de água e de ar quando foram utilizados 2 tubos de Venturi).

Observa-se uma relação linear válida para a faixa de vazão de água na faixa de 200 L h⁻¹ a 1800 L h⁻¹. A inclinação da reta revela que o incremento de ar é cerca de 25% maior que o aumento da vazão de água. Desta forma, o maior volume de ar propicia, possivelmente, aumento da área de interface entre o ar e a água, facilitando a transferência do oxigênio do meio gasoso para o meio líquido.

Pode-se inferir também, que a aspiração de ar começa com vazão em torno de 400 L h⁻¹.

Tomando-se os valores totais de vazão de ar em função da vazão de água, foi construída a Figura 13. Observa-se que a proporção de vazão de ar em relação a vazão de água tem crescimento mais acentuado na faixa mais baixa, atingindo um limite (cerca de 65%) para as vazões mais altas. Pode-se inferir que acima de 1500 L h⁻¹, o incremento de ar é menos intenso. Experimentos conduzidos por Piccin et al. (2009) apontaram valor máximo de 50% da relação vazão de ar pela vazão da água, quando o número de Reynolds na garganta do Venturi foi próximo

de 70000. Para números de Reynolds superiores ou inferiores a esse valor, a proporção de ar diminuía. Comportamento semelhante foi verificado por Baylar et al. 2010, para valores do número de Reynolds entre 50.000 e 100.000 resultaram em vazões de ar máximas de 50% da vazão da água. Nas condições operacionais estudadas, conforme Figura 14, para as vazões da água entre 1500 L h⁻¹ e 2600 L h⁻¹, correspondendo a números de Reynolds na seção restrita entre 70000 e 122670 os valores medidos permaneceram na faixa de 65%, sendo portanto superiores aos valores descritos na literatura, conforme Figura 13.

Figura 13 - Dados experimentais da relação vazão de ar pela vazão de água em função da vazão de água (■) e linha de tendência (—)

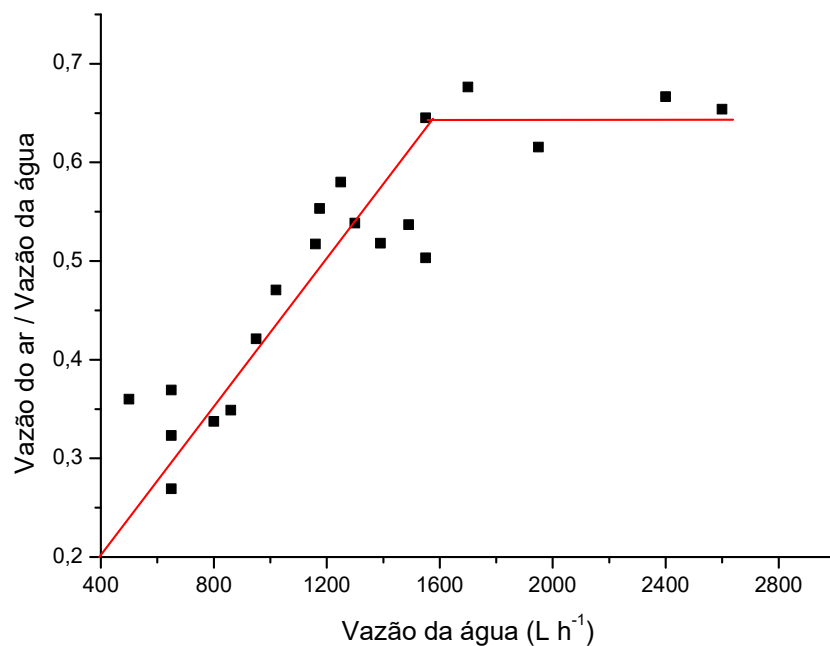
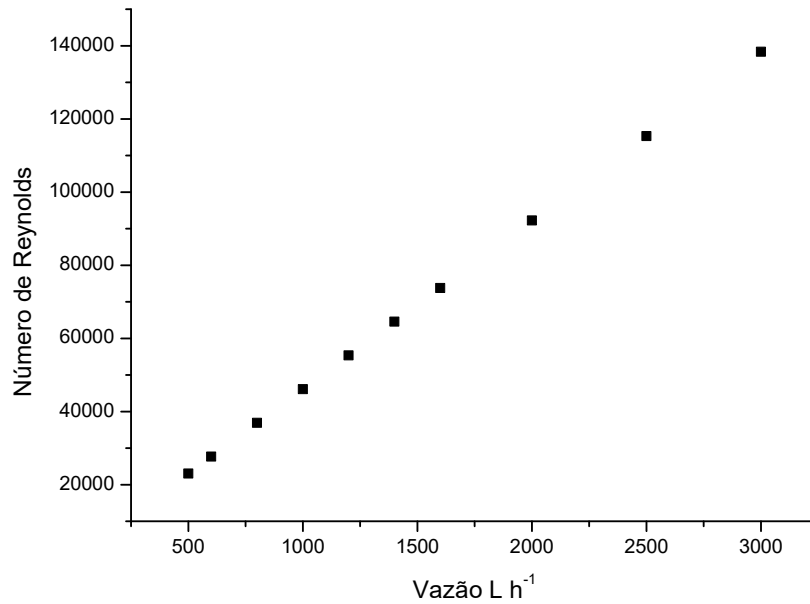
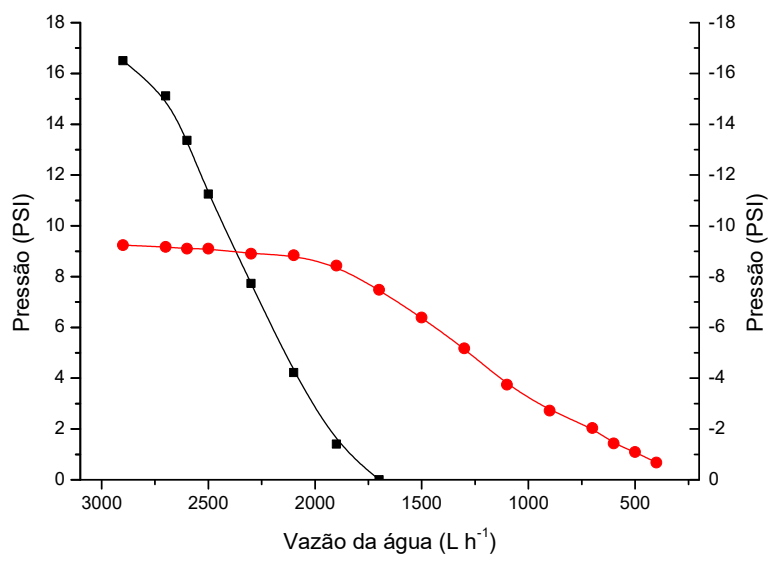


Figura 14 - Número de Reynolds conforme vazão de cada teste



Este fato, possivelmente, pode ser explicado pelo comportamento das pressões no tubo de Venturi. Na Figura 15 são apresentadas as variações das pressões medidas no manômetro e vacuômetro. Constata-se que para vazões de água mais altas, a pressão negativa se mantém aproximadamente constante, enquanto que a pressão na entrada do tubo de Venturi, se reduz rapidamente, atingindo a pressão atmosférica na vazão próxima de 1500 L h⁻¹. Possivelmente, isso resulta em maior aspiração de ar. Abaixo deste valor, a pressão negativa diminui gradativamente, até atingir a pressão atmosférica em vazão da água inferior a 400 L h⁻¹, quando cessa a aspiração de ar.

Figura 15 - Dados de pressão medida pelo manômetro na entrada (■) e pelo vacuômetro na seção restrita (●) do tubo de Venturi.



A variações dos valores de KLa com as vazões da água são apresentados nas Figuras 16, 17, 18 e 19.

Figura 16 - Variação do valor do KLa em 01 tubo venturi em tanque horizontal em função da vazão do líquido para posição do jato (■) 15 cm abaixo da superfície (●) 10,6 cm abaixo da superfície (▲) na superfície (▼) 10,6 cm acima da superfície e (◆) 15 cm acima da superfície.

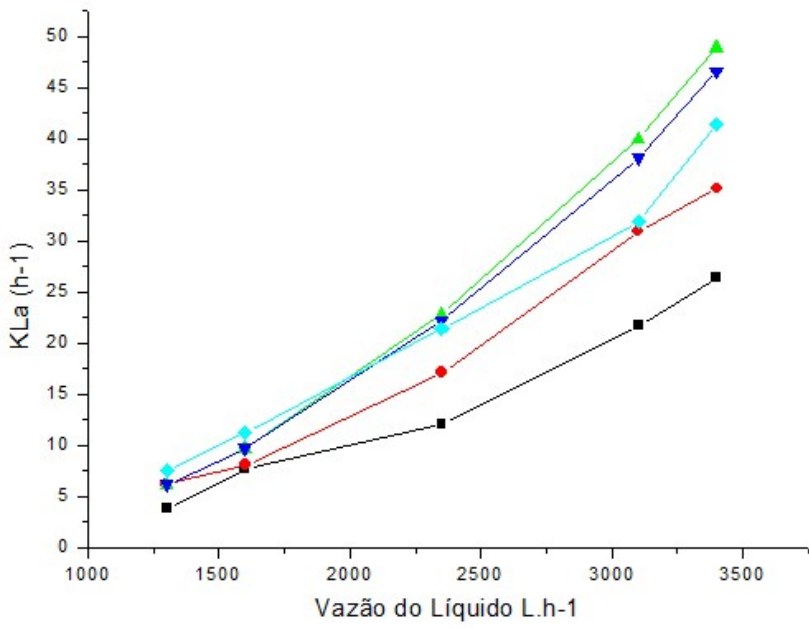


Figura 17 - Variação do valor do KLa em O2 tubo venturi em tanque horizontal em função da vazão do líquido para posição do jato (■) 15 cm abaixo da superfície (●) 10,6 cm abaixo da superfície (▲) na superfície (▼) 10,6 cm acima da superfície e (◆) 15 cm acima da superfície.

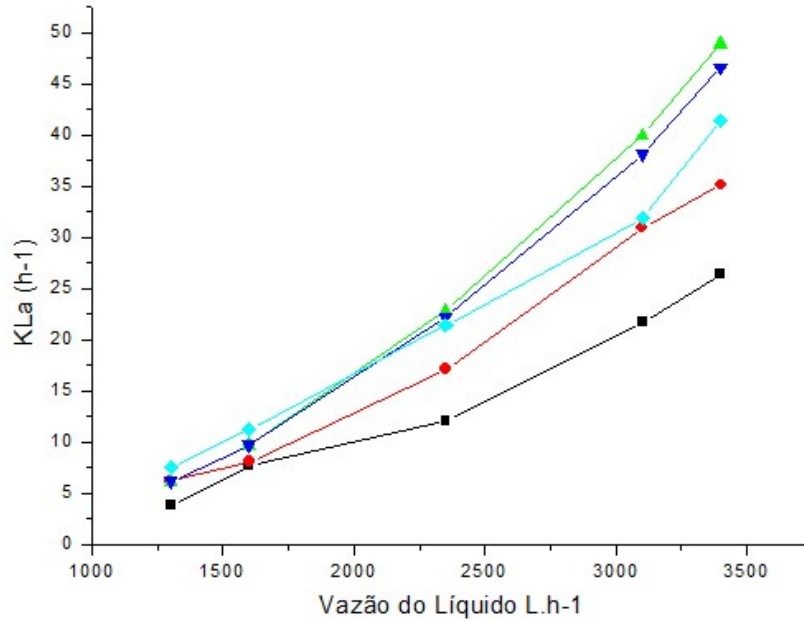


Figura 18 - Variação do valor do KLa em O1 tubo venturi em tanque vertical em função da vazão do líquido para posição do jato (■) 15 cm abaixo da superfície (●) 10,6 cm abaixo da superfície (▲) na superfície (▼) 10,6 cm acima da superfície e (◆) 15 cm acima da superfície..

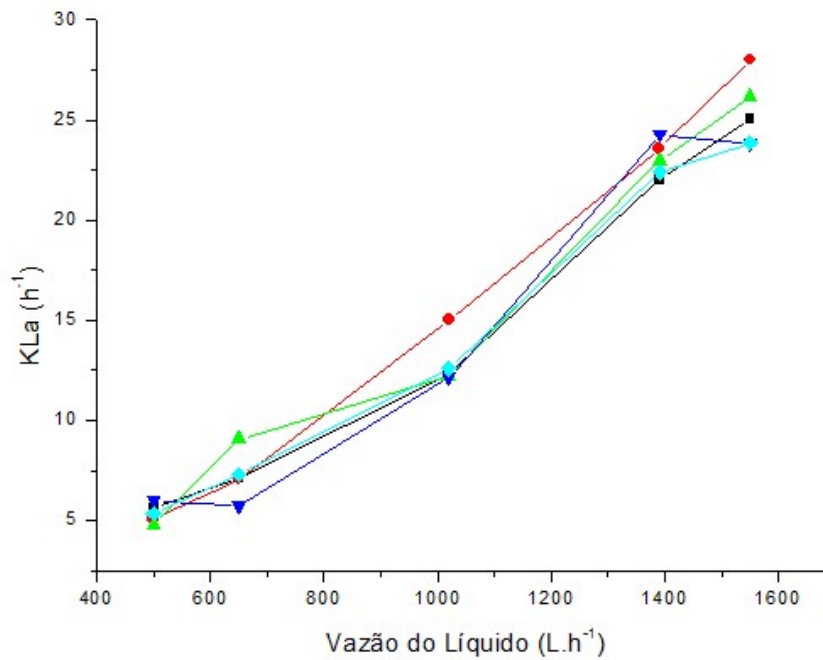
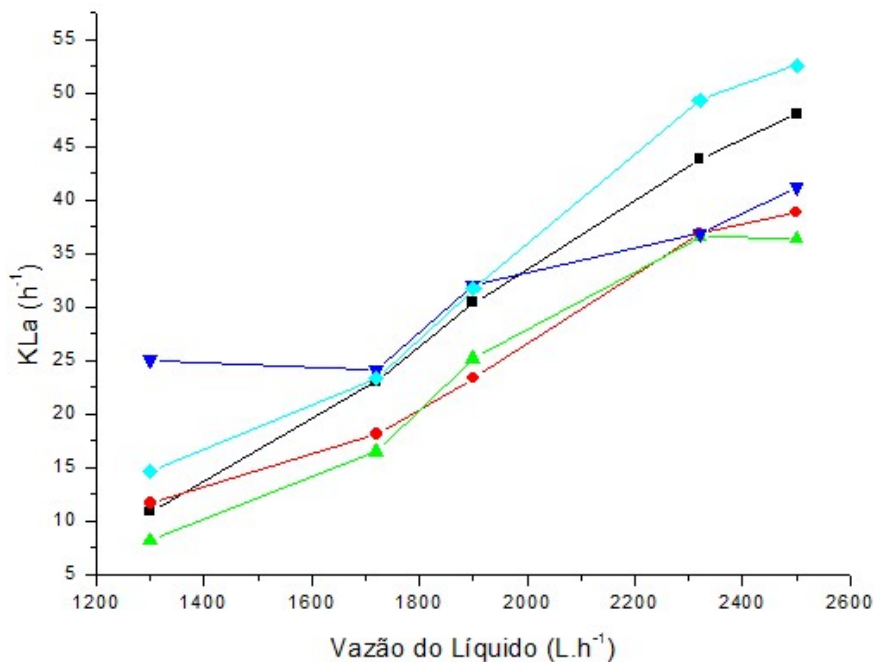


Figura 19 - Variação do valor do KLa em O₂ tubo venturi em tanque vertical em em função da vazão do líquido para posição do jato (■) 15 cm abaixo da superfície (●) 10,6 cm abaixo da superfície (▲) na superfície (▼) 10,6 cm acima da superfície e (◆) 15 cm acima da superfície.



Considerando que os sistemas horizontal e vertical operaram com diferentes volumes de água a ser oxigenada (100 L e 63 L, respectivamente) vazões das bombas, buscou-se comparar a transferência de oxigênio por meio do parâmetro volume de ar injetado por minuto pelo volume de água presente nos tanques (VVM). Nas Figuras 20, 21, 22 e 23 são apresentados os resultados para a posição do jato 15 cm acima da superfície da água.

Figura 20 -Dados experimentais da relação volume de ar pelo volume de água por minuto em função do K_La (■) e modelo linear ajustado (—) para o tanque vertical com 01 tubo de Venturi e jato 15 cm acima da superfície.

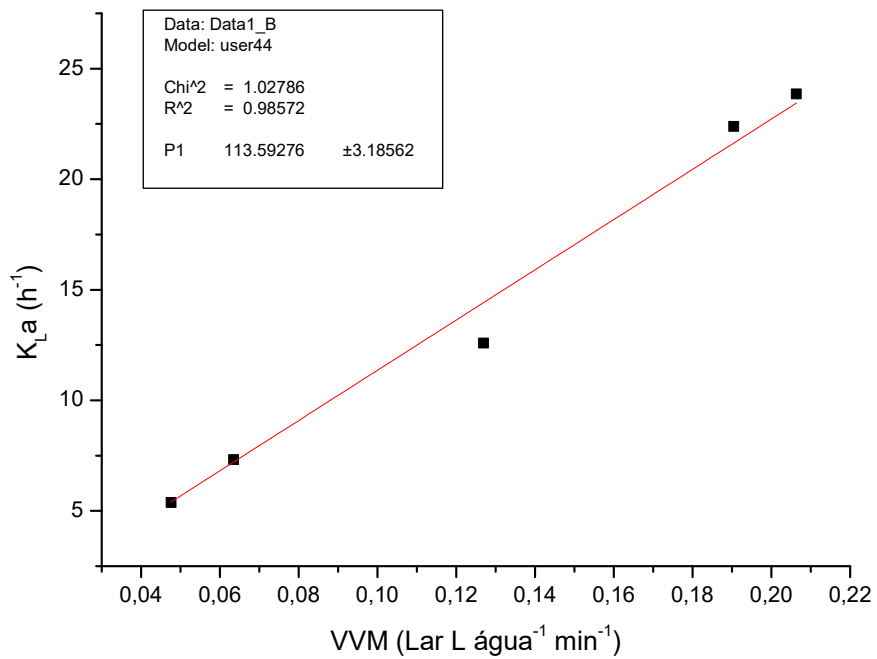


Figura 21 - Dados experimentais da relação volume de ar pelo volume de água por minuto em função do K_La (■) e modelo linear ajustado (—) para o tanque vertical com 02 tubos de Venturi e jato 15 cm acima da superfície.

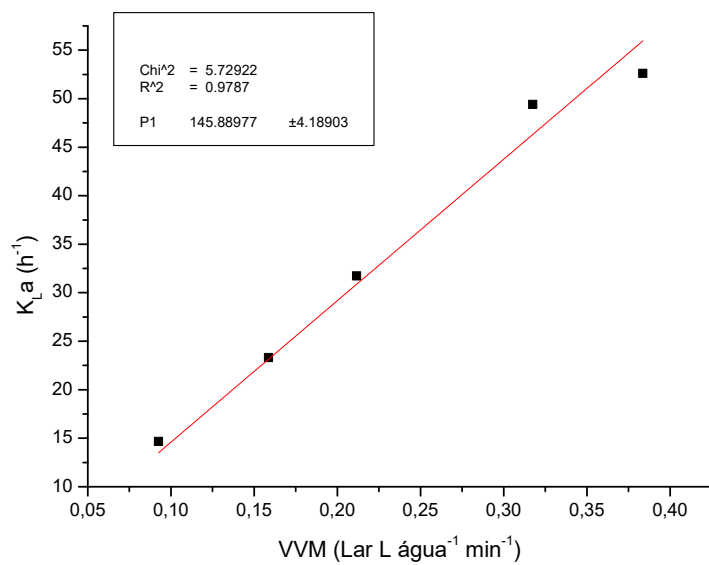


Figura 22- Dados experimentais da relação volume de ar pelo volume de água por minuto em função do K_La (■) e modelo linear ajustado (—) para o tanque horizontal com 01 tubo de Venturi e jato 15 cm acima da superfície.

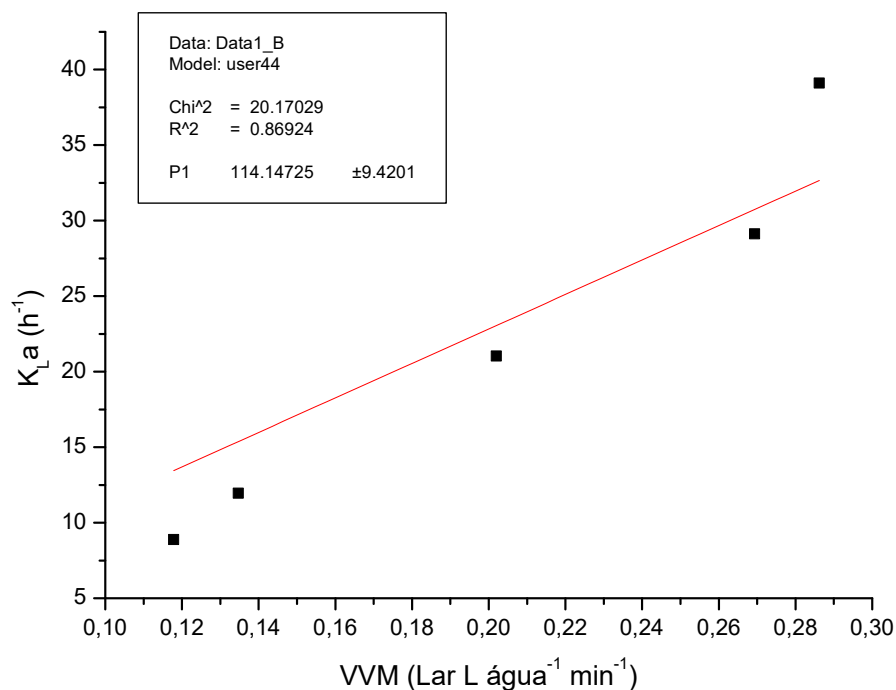
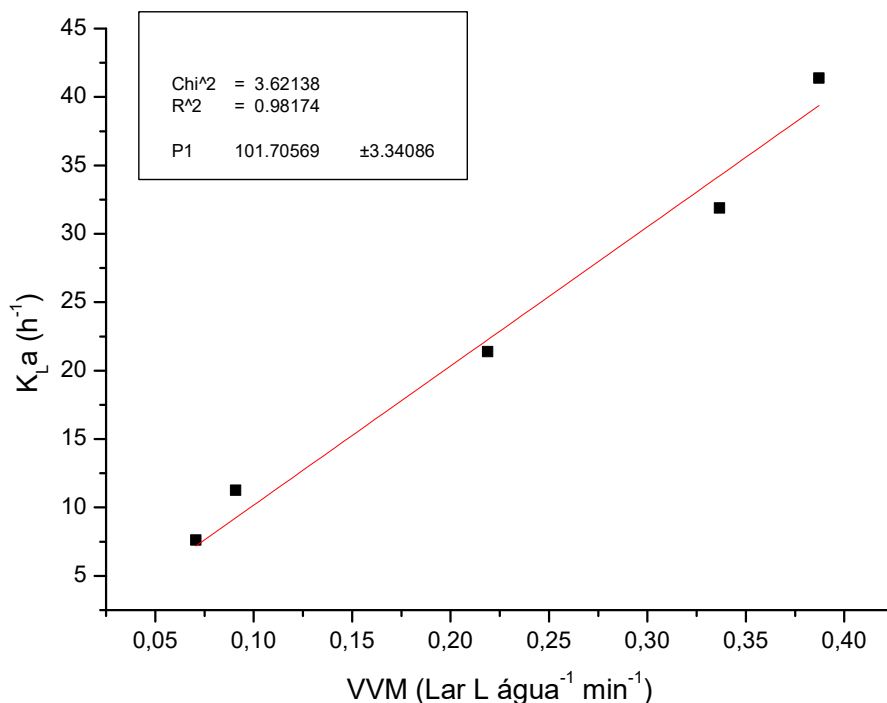


Figura 23 - Dados experimentais da relação volume de ar pelo volume de água por minuto em função do K_La (■) e modelo linear ajustado (—) para o tanque horizontal com 02 tubo de Venturi e jato 15 cm acima da superfície.



Observa-se que foi possível ajustar linhas de tendência lineares entre os valores de KLa e VVM. Pode-se constatar também, de maneira geral, que o tanque vertical possibilitou melhor transferência de oxigênio. Comparando-se os tanques vertical e horizontal com 1 tubo de Venturi, pode-se verificar comportamentos semelhantes, com valores de KLa em torno de 25 h^{-1} , para 0,22 VVM. Já para os sistemas com 2 tubos de Venturi em paralelo, o tanque vertical apresentou desempenho superior, com KLa de 58 h^{-1} e 40 h^{-1} para 0,40 VVM. Como hipótese, pode-se inferir que o tanque vertical apresenta melhores condições de mistura da água, enquanto que no tanque horizontal a posição da sonda de oxigênio dissolvido (Figura 5) no lado oposto a entrada da água pode ter interferido nas medidas do KLa.

5.3 Avaliação da posição do jato de água

Conforme a Tabela 5, a posição do jato de água não resultou em efeito significativo nos sistemas com 1 tubo de Venturi, conforme pode-se constatar nas Figuras 8 e 10. Nos tanques com 2 tubos de Venturi, instalados em paralelo, a posição dos jatos influenciou significativamente os resultados de transferência de oxigênio. Uma hipótese é que a maior área e/ou tempo de contato entre o ar e a água, quando as tubulações ficaram posicionadas 15 cm acima ou abaixo da superfície da água, propiciaram um incremento adicional de oxigênio na água. No caso do tanque horizontal, possivelmente, a maior vazão pode ter acelerado a homogeneização do tanque e resultado nos melhores valores de KLa quando o jato foi adicionado na superfície da água.

Nas Figuras 24, 25, 26 e 27 são apresentadas as variações do KLa em função da posição de entrada do jato da água. Observa-se que no tanque horizontal, que os melhores valores de KLa são obtidos quando o jato é introduzido na superfície da água, principalmente nas vazões mais elevadas. Este fato pode estar relacionado com a posição da sonda medidora de OD, localizada na extremidade oposta da entrada e saída da água, gerando zonas mais estagnadas e curtos circuitos. Possivelmente, nestas circunstâncias, a água é melhor misturada no tanque, resultando em melhor desempenho de reaeração.

No caso do tanque vertical, o aumento do KLa pode estar relacionado com a ampliação da área de contato líquido ar com o aumento da vazão da água quando são utilizados 2 tubos de Venturi.

Figura 24 - Variação do valor do KLa em função da posição do jato para vazão do líquido (■) 1300 L h⁻¹ (●) 1500 L h⁻¹ (▲) 1950 L h⁻¹ (▼) 2400 L h⁻¹ e (◆) 2600 L h⁻¹ no tanque horizontal com 1 tubo de Venturi

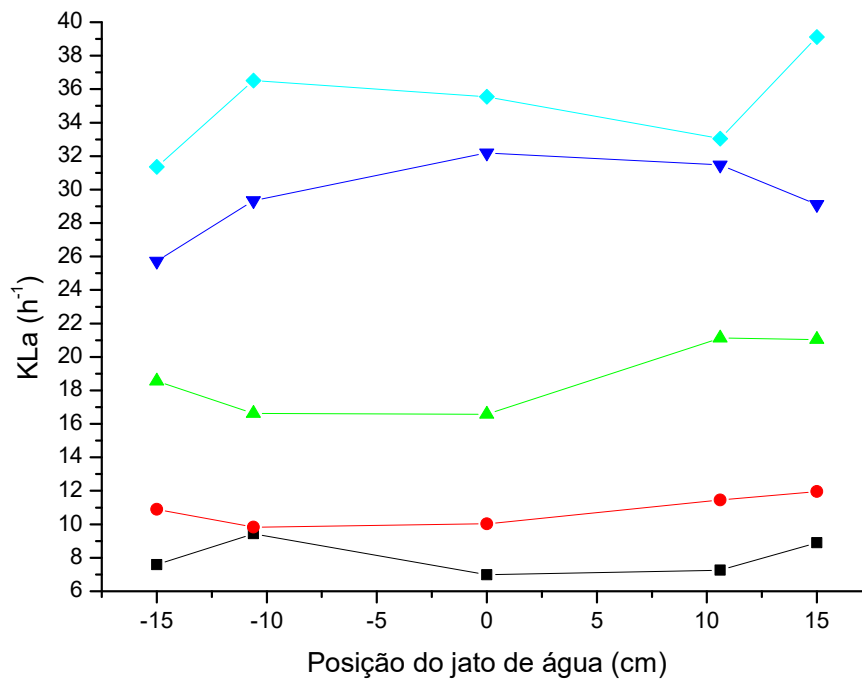


Figura 25 - Variação do valor do KLa em função da posição do jato para vazão do líquido (■) 1300 L h⁻¹ (●) 1600 L h⁻¹ (▲) 2350 L h⁻¹ (▼) 3100 L h⁻¹ e (◆) 3400 L h⁻¹ no tanque horizontal com 2 tubos de Venturi

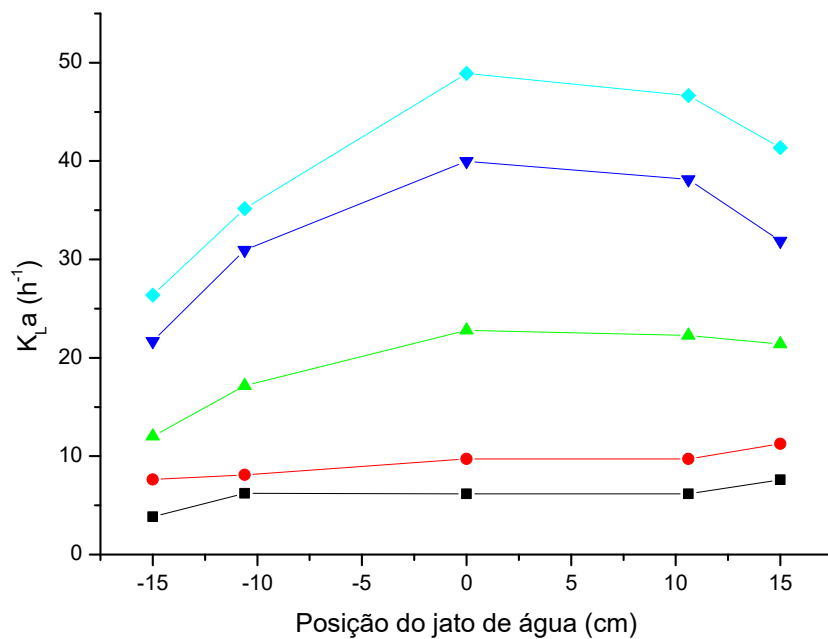


Figura 26 - Variação do valor do KLa em função da posição do jato para vazão do líquido (■) 500 L h⁻¹ (●) 650 L h⁻¹ (▲) 1020 L h⁻¹ (▼) 1390 L h⁻¹ e (◆) 1550 L h⁻¹ no tanque vertical com 1 tubo de Venturi

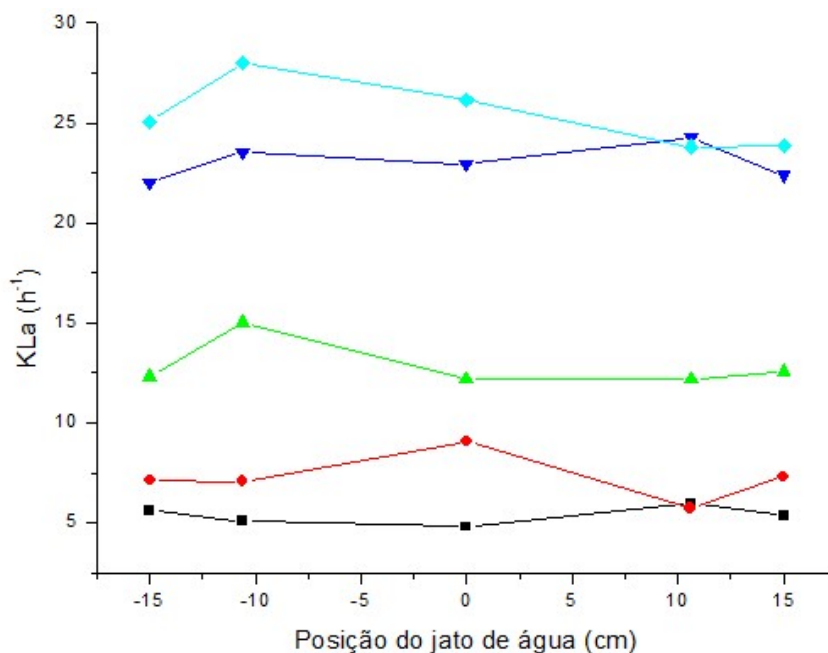
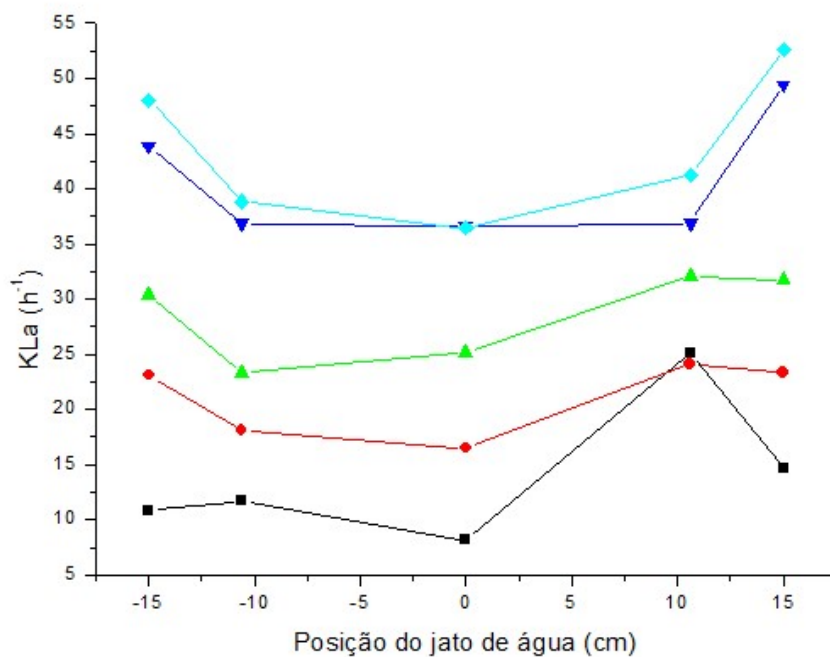


Figura 27 - Variação do valor do KLa em função da posição do jato para vazão do líquido (■) 1300 L h⁻¹ (●) 1720 L h⁻¹ (▲) 1900 L h⁻¹ (▼) 2320 L h⁻¹ e (◆) 2500 L h⁻¹ no tanque horizontal com 2 tubos de Venturi



5.4 Determinação das eficiências de oxigenação - EO

A Tabela 11 apresenta as estimativas das eficiências de oxigenação (EO) obtidas por meio dos resultados de KLa (Tabela 4) e equações 21, 22 e 23.

Tabela 11 – Condições experimentais (valores codificados) e valores estimados obtidos das eficiências de oxigenação para as condições operacionais

Ensaio	Vazão da água	Posição do jato	EO (kg O ₂ kW ⁻¹ h ⁻¹)			
			TH1V	TH2V	TV1V	TV2V
1	-1	-1	0,34	0,70	1,34	1,00
2	1	-1	0,22	0,50	0,62	0,80
3	-1	1	0,40	0,84	1,07	1,33
4	1	1	0,23	0,61	0,64	0,80
5	-1,41	0	0,34	0,90	1,86	0,76
6	1,41	0	0,21	0,64	0,53	0,64
7	0	-1,41	0,30	0,40	0,77	1,13
8	0	1,41	0,34	0,72	0,79	1,18
9	0	0	0,26	0,77	0,77	0,94
10	0	0	0,31	0,77	0,85	0,87
11	0	0	0,30	0,78	0,78	0,94
12	0	0	0,31	0,75	0,83	0,96

Conforme Tabela 11 foram obtidos elevados resultados de eficiência de oxigenação, próximos aos observados aos aeradores comerciais. Conforme Muller et al, (2002) uma maneira de avaliar a performance de um aerador é pela eficiência da transferência de oxigênio, sendo que aeradores de superfície possuem valores entre 0,4 a 2,4 kgO₂ kW⁻¹ h⁻¹ quando em condições padrão. Aeradores por ar difuso, que geram pequenas bolhas de ar para aumentar a transferência de oxigênio, valores entre 1,22 até 4,65 kgO₂ kW⁻¹ h⁻¹. Porém, possuem maior desvantagem em relação a manutenção, já que ficam abaixo da superfície podendo causar interrupção no processo.

Conforme Metcalf & Eddy (2016), aeradores mecânicos apresentam valores típicos de taxa de transferência de oxigênio padrão variando entre 1,0 e 2,0 kgO₂ kW⁻¹ h⁻¹.

De maneira geral, constata-se na Tabela 11 que, os maiores valores de EO foram obtidos nas vazões mais baixas, exceto para o tanque vertical com 1 tubo de Venturi.

O efeito das variáveis independentes (vazão da água e posição do jato d'água) sobre a variável dependente, eficiência de oxigenação (EO) foi avaliada por meio do software Statistica®. Os fatores significativos, ao nível de confiança de 95% (p-valor < 0,05), estão na Tabela 12.

Tabela 12 - Efeito das variáveis independentes para a variável resposta eficiência de oxigenação

Ensaio	Fatores	Efeito	Erro padrão	T	p-valor	Estimativa por intervalo (95%)	
						Limite inferior	Limite superior
TH1V	Média	0,30	0,01	25,91	<0,0001	0,27	0,32
	Vazão água (L)	-0,12	0,02	-7,36	0,0003	-0,16	-0,08
	Vazão água (Q)	-0,02	0,02	-1,11	0,3082	-0,06	0,02
	Posição jato (L)	0,03	0,02	1,97	0,0970	-0,01	0,07
	Posição jato (Q)	0,03	0,02	1,39	0,2137	-0,02	0,07
	Interação	-0,03	0,02	-1,10	0,3144	-0,08	0,03
TH2V	Média	0,77	0,02	48,02	<0,0001	0,73	0,81
	Vazão água (L)	-0,20	0,02	-8,82	0,0001	-0,26	-0,14
	Vazão água (Q)	0,00	0,03	0,06	0,9530	-0,06	0,06
	Posição jato (L)	0,18	0,02	7,77	0,0002	0,12	0,23
	Posição jato (Q)	-0,21	0,03	-8,26	0,0002	-0,27	-0,15
	Interação	-0,01	0,03	-0,47	0,6554	-0,09	0,06
TV1V	Média	0,81	0,06	13,06	<0,0001	0,66	0,96
	Vazão água (L)	-0,76	0,09	-8,66	0,0001	-0,97	-0,54
	Vazão água (Q)	0,35	0,10	3,60	0,0113	0,11	0,59
	Posição jato (L)	-0,06	0,09	-0,63	0,5489	-0,27	0,16
	Posição jato (Q)	-0,06	0,10	-0,65	0,5410	-0,30	0,18
	Interação	0,15	0,12	1,17	0,2855	-0,16	0,45
TV2V	Média	0,93	0,05	18,85	<0,0001	0,81	1,05
	Vazão água (L)	-0,23	0,07	-3,24	0,0178	-0,40	-0,05
	Vazão água (Q)	-0,20	0,08	-2,57	0,0422	-0,39	-0,01
	Posição jato (L)	0,10	0,07	1,44	0,1997	-0,07	0,27
	Posição jato (Q)	0,26	0,08	3,29	0,0167	0,07	0,45
	Interação	-0,17	0,10	-1,68	0,1446	-0,41	0,08

As variáveis não significativas ao nível de confiança de 95% foram excluídas, gerando modelos reparametrizados simplificados para as variáveis codificadas. As equações 27, 28, 29 e 30 representam os valores de EO em função da vazão da água (X_1) e posição do jato de água (X_2).

No tanque horizontal com um tubo de Venturi foi obtida a equação reparametrizada abaixo.

$$EO \text{ (kgO}_2 \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}) = 0,2967 - 0,0593 X_1 \quad (27)$$

No tanque horizontal com dois tubos de Venturi foi obtida a equação seguinte:

$$EO \text{ (kgO}_2 \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}) = 0,7681 - 0,0999 X_1 + 0,0879 X_2 - 0,1050 X_2^2 \quad (28)$$

No tanque vertical com um e com dois tubos de Venturi foram obtidas as equações reparametrizadas abaixo respectivamente:

$$EO \text{ (kgO}_2 \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}) = 0,7824 - 0,3793 X_1 + 0,1832 X_1^2 \quad (29)$$

$$EO \text{ (kgO}_2 \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}) = 0,8474 - 0,1127 X_1 + 0,1482 X_2^2 \quad (30)$$

Observa-se que a vazão de água teve efeito significativo ao nível de confiança de 95% em todos os sistemas testados, enquanto o efeito da posição do jato de água só influenciou os sistemas com 2 tubos de Venturi em paralelo tanto no tanque vertical quanto no tanque horizontal

A Tabela 13, da análise de variância (ANOVA), ao nível de 95% de confiança, indicam que os modelos se ajustam satisfatoriamente aos valores experimentais, exceto para o sistema TV2V em que, embora validado estatisticamente, explica apenas 59,23% das variações, e o $F_{\text{calculado}}$ é apenas ligeiramente acima do F_{tabelado} . Assim, as previsões desse modelo devem ser avaliadas com cautela.

Tabela 13 - Análise de Variância para a resposta Eficiência de Oxigenação

Ensaio	Fonte de variação		Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fcalculado	Ftabelado	R ² (%)
	TH1V	Regressão		0,0281	1	0,0281	36,09	4,96 ²
Resíduos		0,0078	10	0,00078				
Total		0,0359	11					
TH2V	Regressão		0,2140	3	0,07134	89,74	4,07	97,11
	Resíduos		0,0064	8	0,00079			
	Total		0,2204					
TV1V	Regressão		1,3691	2	0,6845	49,13	4,26 ³	91,61
	Resíduos		0,1254	9	0,0139			
	Total		1,4945					
TV2V	Regressão		0,2463	2	0,1232	6,54	4,26	59,23
	Resíduos		0,1696	9	0,0188			
	Total		0,4159					

¹ Fcalculado ²F tabelado 1;1;10;0,05 = 4,96 ³F tabelado 2;9;0,05 = 4,26

A qualidade dos ajustes pode ser inferida também, pela análise das Tabelas 14 e 15, nas quais pode-se constatar erros relativos aceitáveis nos valores mais elevados para EO.

Tabela 14 - Valores da Eficiência de Oxigenação experimentais, previstos pelo modelo e erro relativo para o tanque horizontal

Ensaio	Variável		Sistema					
	X ₁	X ₂	TH1V			TH2V		
			EO (kgO ₂ kW ⁻¹ h ⁻¹) Experimental	EO (kgO ₂ kW ⁻¹ h ⁻¹) Previsto	Erro relativo (%)	EO (kgO ₂ kW ⁻¹ h ⁻¹) Experimental	EO (kgO ₂ kW ⁻¹ h ⁻¹) Previsto	Erro relativo (%)
1	-1	-1	0,34	0,36	-4,7	0,7	0,68	3,6
2	1	-1	0,22	0,24	-7,9	0,5	0,48	4,9
3	-1	1	0,4	0,36	11,0	0,84	0,85	-1,3
4	1	1	0,23	0,24	-3,2	0,61	0,65	-6,7
5	-1,41	0	0,34	0,38	-11,9	0,90	0,91	-1,0
6	1,41	0	0,21	0,21	-1,5	0,64	0,63	1,9
7	0	-1,41	0,30	0,30	1,10	0,40	0,44	-8,8
8	0	1,41	0,34	0,30	12,4	0,72	0,68	5,1
9	0	0	0,26	0,30	-14,1	0,77	0,77	0,0
10	0	0	0,31	0,30	4,3	0,77	0,77	0,0
11	0	0	0,30	0,30	1,1	0,78	0,77	1,0
12	0	0	0,31	0,30	4,3	0,75	0,77	-2,4

Tabela 15 - Valores da Eficiência de Oxigenação experimentais, previstos pelo modelo e erro relativo para o tanque vertical

Ensaio	Variável		Sistema					
	X ₁	X ₂	TV1V			TV2V		
			EO (kgO ₂ kW ⁻¹ h ⁻¹)		Erro relativo (%)	EO (kgO ₂ kW ⁻¹ h ⁻¹)		Erro relativo (%)
			Experimental	Previsto		Experimental	Previsto	
1	-1	-1	1,34	1,34	-0,4	1	1,11	-10,8
2	1	-1	0,62	0,59	5,4	0,8	0,88	-10,4
3	-1	1	1,07	1,34	-25,7	1,33	1,11	16,7
4	1	1	0,64	0,59	8,4	0,8	0,88	-10,4
5	-1,41	0	1,86	1,68	9,6	0,76	1,01	-32,4
6	1,41	0	0,53	0,61	-15,4	0,64	0,69	-7,6
7	0	-1,41	0,77	0,78	-1,6	1,13	1,14	-1,1
8	0	1,41	0,79	0,78	1,0	1,18	1,14	3,2
9	0	0	0,77	0,78	-1,6	0,94	0,85	9,9
10	0	0	0,85	0,78	8,0	0,87	0,85	2,6
11	0	0	0,78	0,78	-0,3	0,94	0,85	9,9
12	0	0	0,83	0,78	5,7	0,96	0,85	11,7

Foram realizados ensaios visando validar os modelos matemáticos obtidos. As Tabelas 16 e 17 resumem os dados dos ensaios realizados com vazões mínimas de ar e posições do jato de água.

Tabela 16 - Tabela Valores experimentais e previstos de eficiência de oxigenação em função dos valores codificados de vazão da água (X₁) e posição do jato (X₂) para o tanque horizontal com 1 e 2 tubos de Venturi

Ensaio	Variável		Sistema					
	X ₁	X ₂	TH1V			TH2V		
			EO (kgO ₂ kW ⁻¹ h ⁻¹)		Erro relativo (%)	EO (kgO ₂ kW ⁻¹ h ⁻¹)		Erro relativo (%)
			Experimental	Previsto		Experimental	Previsto	
1	-1,41	-1,41	0,37	0,38	-1,9	0,56	0,58	-2,1
2	-1,41	-1	0,46	0,38	18,0	0,91	0,72	21,5
3	-1,41	0	0,34	0,38	-10,6	0,90	0,91	-0,6
4	-1,41	1	0,36	0,38	-6,6	0,90	0,89	1,3
5	-1,41	1,41	0,44	0,38	13,0	1,12	0,82	26,1

Tabela 17 - Tabela Valores experimentais e previstos de eficiência de oxigenação em função dos valores codificados de vazão da água (X1) e posição do jato (X2) para o tanque vertical com 1 e 2 tubos de Venturi

Ensaio	Variável		Sistema					
	X ₁	X ₂	TV1V			TV2V		
			EO (kgO ₂ kW ⁻¹ h ⁻¹)		Erro relativo (%)	EO (kgO ₂ kW ⁻¹ h ⁻¹)		Erro relativo (%)
			Experimental	Previsto		Experimental	Previsto	
1	-1,41	-1,41	2,17	1,68	22,5	1,01	1,30	-28,5
2	-1,41	-1	1,96	1,68	14,2	1,09	1,15	-5,7
3	-1,41	0	1,86	1,68	9,4	0,76	1,01	-32,3
4	-1,41	1	2,31	1,68	27,2	2,34	1,15	50,6
5	-1,41	1,41	2,08	1,68	19,0	1,37	1,30	5,0

Considerando-se a validade dos modelos matemáticos reparametrizados simplificados, validados pela ANOVA, pode-se representa-los graficamente por meio das curvas de contorno (Figuras 28, 29 30 e 31). De maneira geral, comparando-se com as Figuras 8,9,10 e 11 e curvas de contorno de EO pode-se observar que as regiões de maior eficiência de oxigenação correspondem as de menor valores de KLa.

Figura 28 - Curvas de contorno para EO em função da vazão e da posição do jato de água no tanque horizontal com 1 tubo de Venturi

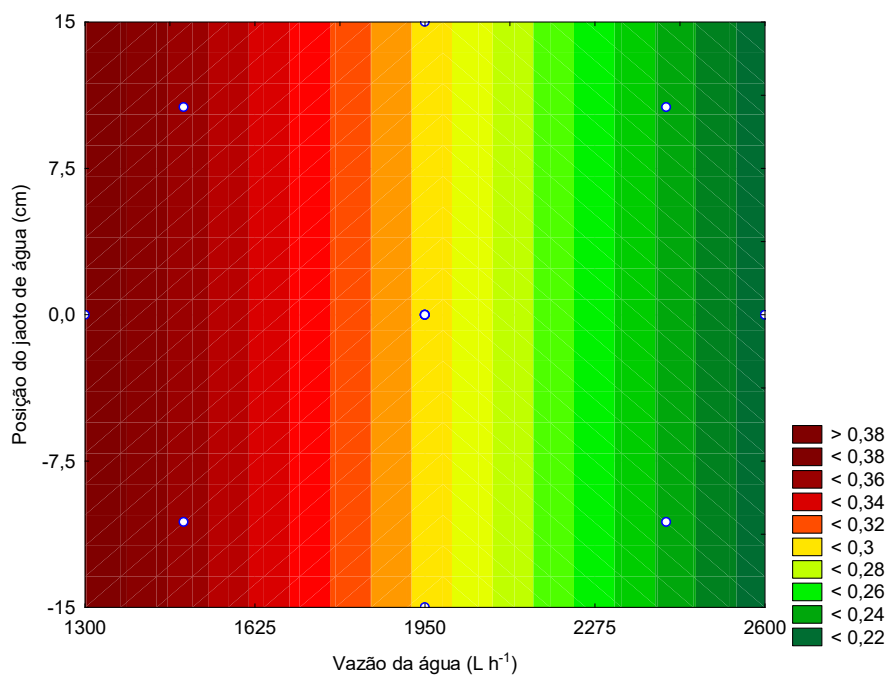


Figura 29 - Curvas de contorno para EO em função da vazão e da posição do jato de água no tanque horizontal com 2 tubo de Venturi

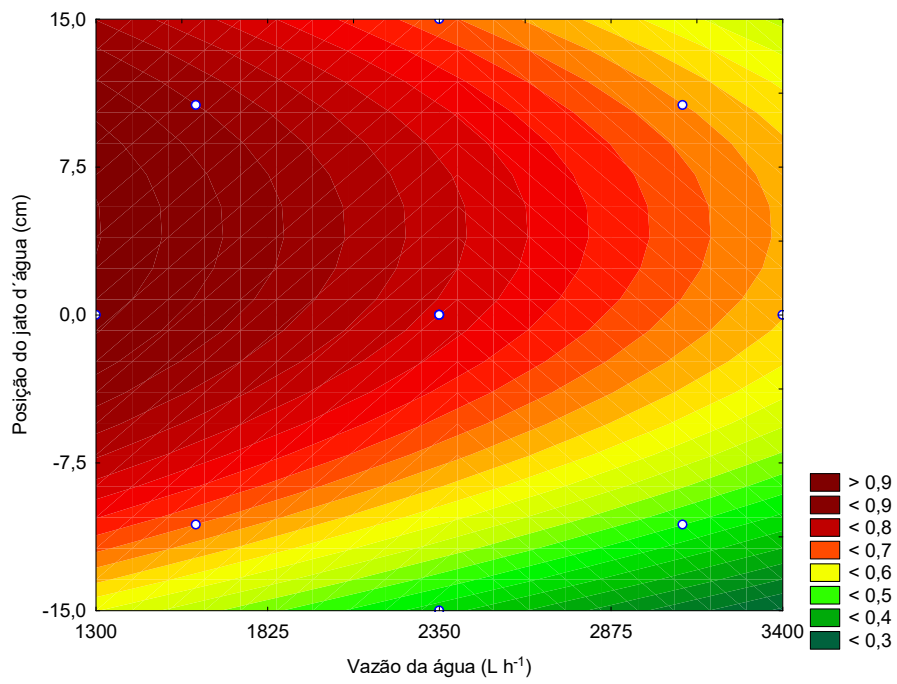


Figura 30 - Curvas de contorno para EO em função da vazão e da posição do jato de água no tanque vertical com 1 tubo de Venturi

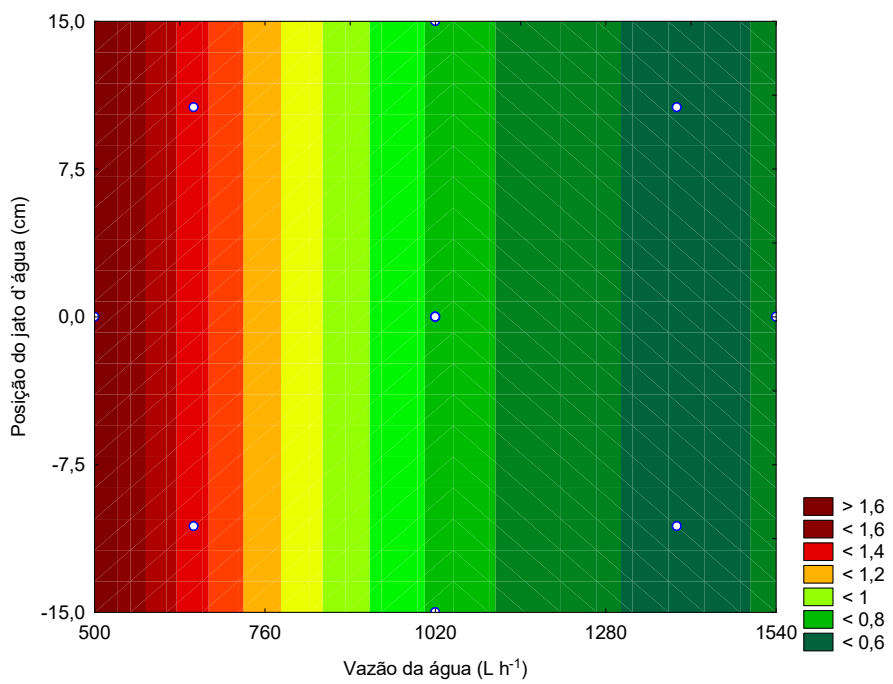
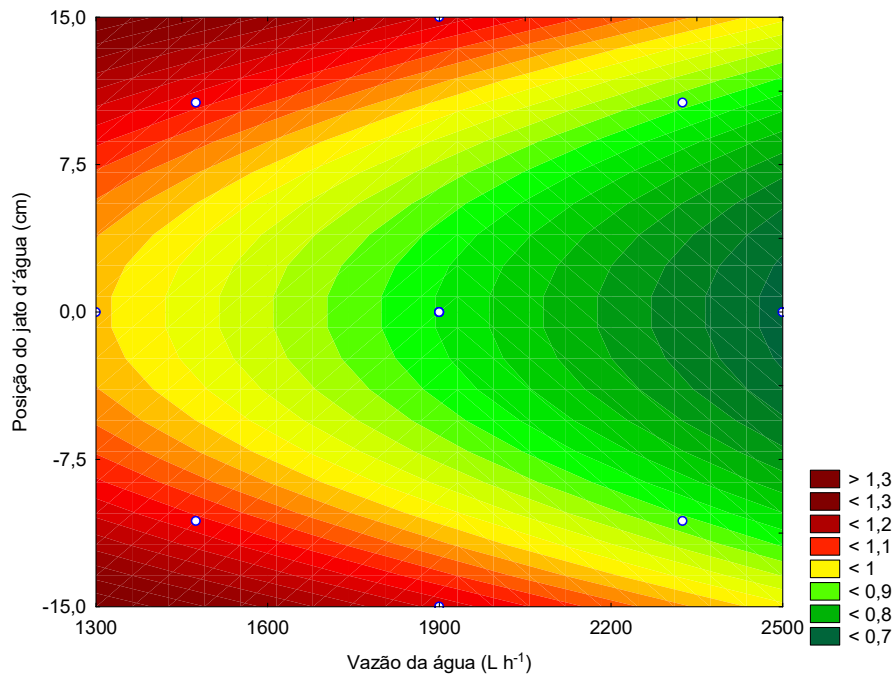
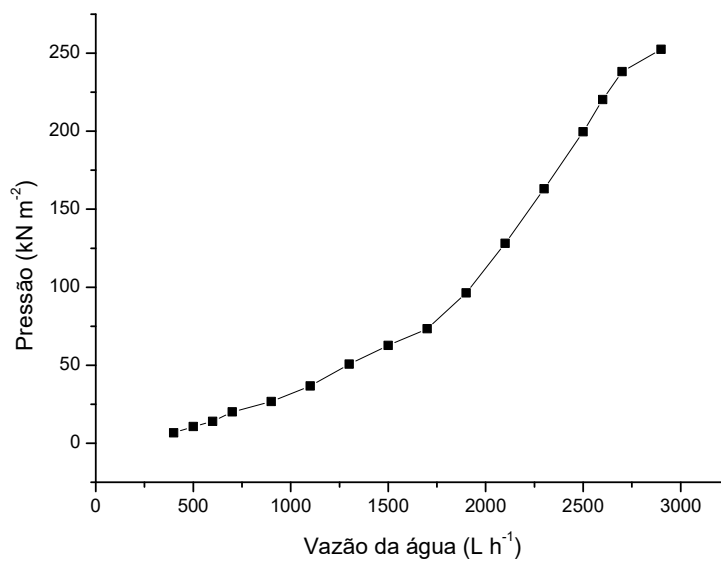


Figura 31 -Curvas de contorno para EO em função da vazão e da posição do jato de água no tanque vertical com 2 tubo de Venturi



Este fenômeno pode ser explicado pela elevada energia consumida para gerar altos valores de KLa. A Figura 32 apresenta os valores medidos da pressão na entrada do tubo de Venturi em função da vazão da água. Observa-se que a pressão aumenta exponencialmente com a vazão da água enquanto os valores de KLa seguem tendência linear (Figuras 20, 21, 22 e 23).

Figura 32 - Relação entre pressão na entrada do tubo e vazão de água



O comportamento da variação do $K_L a$ e da EO com a densidade de potência, para o jato localizado 15 cm acima da superfície da água é apresentado nas Figuras 33, 34, 35 e 36.

Figura 33 - Dados experimentais para $K_L a$ (■) e eficiência de oxigenação (□) e ajuste aos modelos de potência para tanque horizontal com 01 tubo de Venturi e entrada de água a 15 cm acima da superfície da água.

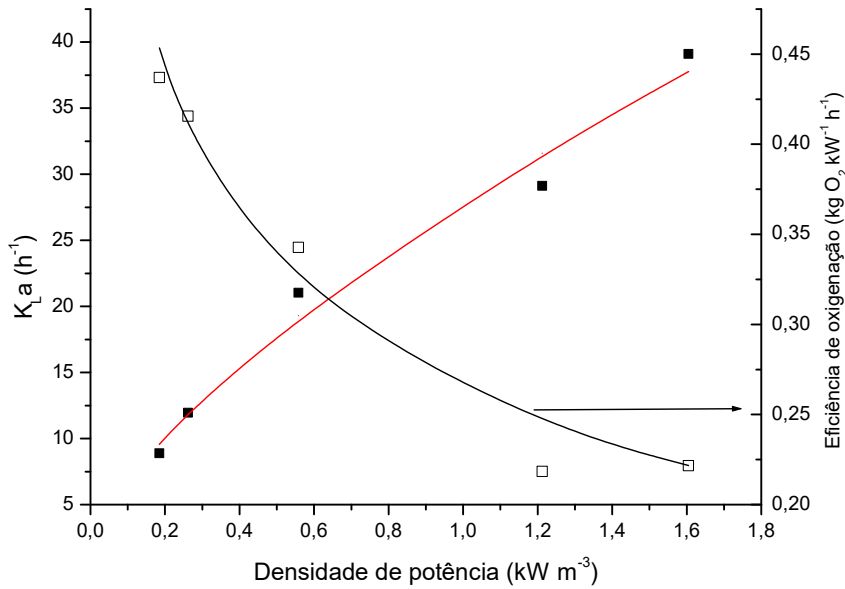


Figura 34 - Dados experimentais para $K_L a$ (■) e eficiência de oxigenação (□) e ajuste aos modelos de potência para tanque horizontal com 02 tubo de Venturi e entrada de água a 15 cm acima da superfície da água.

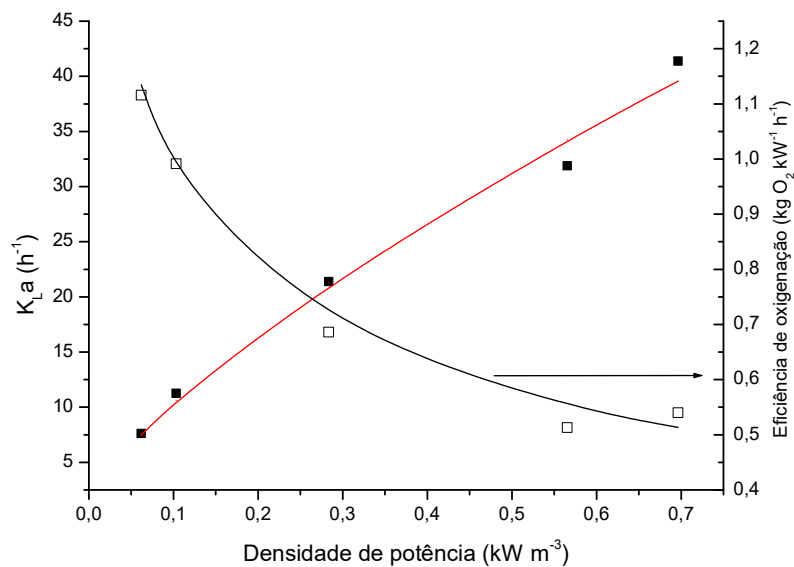


Figura 35 -Dados experimentais para K_La (■) eficiência de oxigenação (□) e ajuste aos modelos de potência para o tanque vertical com 01 tubo de Venturi e entrada de água a 15 cm acima da superfície da água.

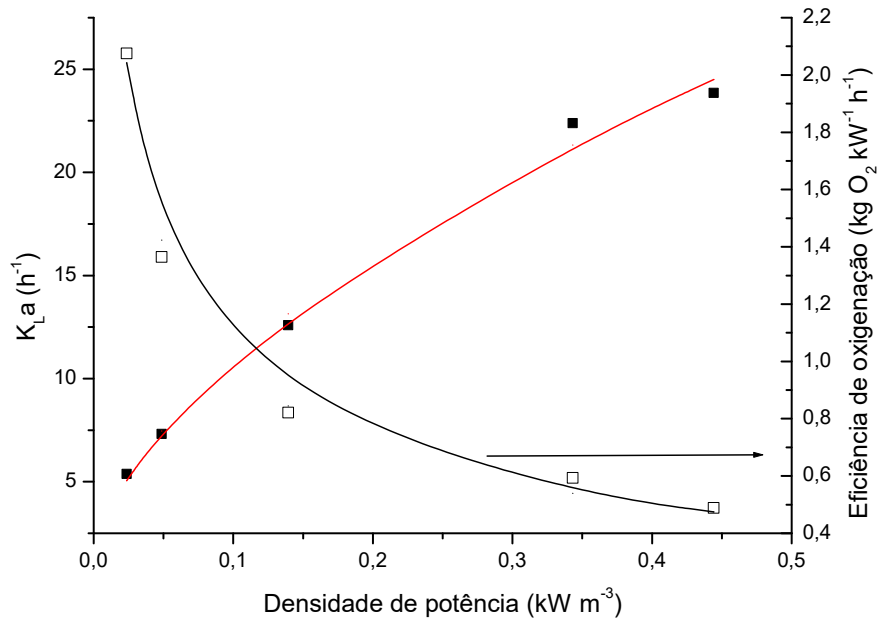
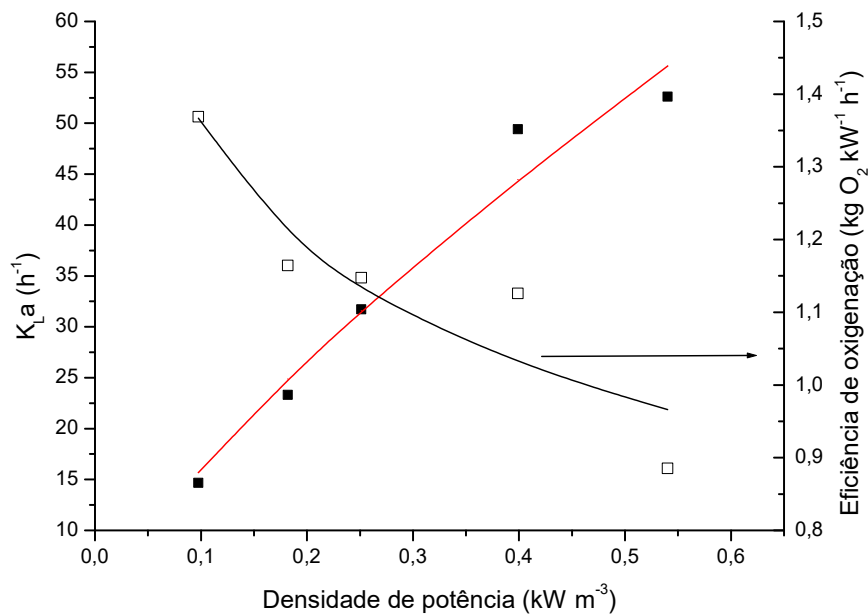


Figura 36 - Dados experimentais para K_La (■) e eficiência de oxigenação (□) e ajuste aos modelos de potência para tanque vertical com 02 tubo de Venturi e entrada de água a 15 cm acima da superfície da água.



Observa-se comportamento semelhante em todos os sistemas testados, podendo-se representar o aumento do KLa e o decréscimo da eficiência de oxigenação por ajustes a modelos do tipo potência, conforme equação 32 que foi obtida por meio de representação matemática das Figuras 33, 34, 35 e 36

$$KLa=EO=a\left(\frac{P}{V}\right)^b \quad (32)$$

Sendo:

EO = Eficiência de oxigênio

$\frac{P}{V}$ = Densidade de Potência (Potência (em kW/ Volume em m³)).

A Tabela 18 sumariza os valores dos coeficientes de ajuste para o modelo de potência.

Tabela 18 - Coeficientes de ajuste ao modelo do tipo potência para KLa e EO para os tanques horizontal e vertical com 1 e 2 tubos de Venturi associados em paralelo

Sistema	KLa		Eficiência de oxigenação	
	a	b	a	B
V1V	39,9199	0,5381	0,3173	-0,4968
V2V	87,7275	0,7395	0,8528	-0,2026
H1V	27,9607	0,6353	0,2593	-0,3312
H2V	50,7508	0,6888	0,4561	-0,3278

A análise dos valores dos coeficientes b, permitem verificar que o tanque vertical proporcionou desempenho ligeiramente superior ao horizontal. Também, a utilização de 2 tubos de Venturi proporciona maior incremento do KLa e menor decréscimo da eficiência de oxigenação. Este fato pode ser explicado pela menor perda de carga quando são utilizados 2 tubos de Venturi em paralelo, com os consequentes aumentos das vazões de água e de ar. Além disso, a vazão total é dividida nas duas linhas tendo-se menor altura manométrica e redução na potência consumida.

Possivelmente, a instalação de um maior número de tubos de Venturi permitiria uma melhor oxigenação com menor consumo de energia.

6 CONCLUSÕES

Com bases nos resultados obtidos, pode-se concluir que a utilização de tubos de Venturi pode se constituir numa alternativa para a oxigenação das águas;

- Nas faixas de valores testadas, a vazão da água teve maior influência nos resultados que a posição de entrada do jato de água. Além disso, a vazão de ar injetado foi proporcional a vazão da água bombeada;

- Para as mesmas condições de densidade de potência (DP) e volume de ar injetado por minuto pelo volume de líquido (VVM), o tanque vertical apresentou desempenho ligeiramente superior ao horizontal;

- Foi possível obter eficiência de oxigenação de até $2,0 \text{ kg O}_2 \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ no tanque vertical operado com 1 tubo de Venturi e vazão de água de 500 L h^{-1} ;

- Os modelos matemáticos obtidos representaram satisfatoriamente os dados experimentais.

7 SUGESTÕES

- Testar o sistema de aeração por tubos de Venturi em um sistema de tratamento de esgotos;
- Testar o uso de maior número de tubos de Venturi associados em paralelo, buscando minimizar o consumo de energia.

REFERÊNCIAS

ASLAN, S.; MILLER, L.; DAHAD, M. Ammonium oxidation via nitrite accumulation under limited oxygen concentration in sequencing batch reactors. **Bioresource Technology** v. 100p. 659–664, 2009.

BAGATUR, T. Technical note: Minimal conditions for venturi aeration of water flows. **Water Management**, v.158, p.127-130, 2005.

BAUER, W.G., FRERICKSON, A. G. & Tsuchiya, H. M.. Mass transfer characteristics of a venturi liquid-gas contactor. *I & EC Process Design and Development*. 2 (3):178-187, 1963.

BAYLAR, A.; UNSAL, M.; OZKAN, F.; Determination of the optimal location of the air hole in venturi aerators. **CLEAN – Soil- Air Water**, v. 35, n. 3, p. 246-249, 2007.

BAYLAR, A.; OZKAN, F.; UNSAL, M.; On the use of venturi tubes in aeration. **CLEAN-Soil - Air Water**, v. 35, n. 2, p. 183-185, 2007.

BAYLAR, A.; UNSAL, M.; OZKAN, F. Hydraulic structures in water aeration processes. **Water, Air and Soil Pollution**, v.210, p. 87-100, 2010. (a)

BAYLAR, A.; UNSAL, M.; OZKAN, F. Effect of Air Inlet Hole Diameter of Venturi Tube on Air Injection Rate KSCE **Journal of Civil Engineering** 14(4):489-492, 2010. (b)

BAYLAR, A.; OZKAN, F.; UNSAL, M.; Using venturi tubes in two-phase aeration processes. In: **International Sustainable Water and Wastewater Management Symposium**, Konya, Turkey, 2010 (c)

BAYLAR, A.; OZKAN, F.; Applications of venturi principle to water aeration systems. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 6, No. 4, p. 341-357, 2006.

BAYLAR, A.; EMIROGLU, M. E.; Air entrainment and oxygen transfer in a venturi. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water & Maritime Engineering**, v. 156, n. WM3, p. 249-255, 2003.

BAYLAR, A.; AYDIN, M. C.; UNSAL, M.; OZKAN, F. ; Numerical modeling of venturi flows for determining air injection rates using fluent V6.2.; **Mathematical and Computational Applications**, v. 14, n. 2, p. 97-108, 2009.

BAYLAR, A.; OZKAN, F.; OZTURK, M..; Influence of venturi cone angles on jet aerations systems. **Water Management**, v. 158, p. 9-16, 2005.

BOON, A.G. Oxygen transfer in the activated sludge process. In: MATTOCK, G. **New processes of waste water treatment and recovery**. London: Ellis Horwood,, p. 17-33, 1978.

BRATER, E.; KING, H.; LINDELL, J.; WEI, C.; **Handbook of Hydraulics**. EUA: MCGRAW-HILL PROFESSI, ed.7, 1996.

CHISTI, M.Y. **Airlift bioreactors**. New York: Elsevier Science Publishers Ltda, 1989.

COX, B. A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers. **The Science Of The Total Environment**,[s.l.], v. 314-316, p.303-334, 2003.

DONG, C., ZHU, J., Wu, X. & Miller, C. F. Aeration efficiency influenced by venturi aerator arrangement, liquid flow rate and depth of diffusing pipes. **Environmental Technology**. 33 (11): 1-10, 2012.

FEITOSA FILHO, J.C.; BOTREL, T.A.; PINTO, J.M. **Variabilidade na distribuição de ar na água utilizando um sistema com tubulações e emissores submersos e um injetor tipo Venturi**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 27, 1998. Poços de Caldas. Anais... Lavras: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. v.1, p.76-78, 1998.

FEITOSA FILHO, J.C.; MEDIEROS, J.F.; BOTREL, T.A.; PINTO, J.M. Avaliação de Venturi funcionando com água como fluido motriz e o ar como fluido succionado com descarga submersa. **Irriga**, Botucatu, v.2, n.2, p. 68-75, 1997.

GORDIYCHUK, A.; SVANERA, M.; BENINI, S.; PESIO, P. Size distribution and Sauter mean diameter of micro bubbles for a Venturi type bubble generator. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.70, p. 51-60, 2016.

GULLIVER, J. S.; THENE, J. R.; RINDELS, A. J. Indexing gas transfer in self-aerated flows. **Journal of Environmental Engineering ASCE**, 116(3), 503–523, 1991.

JACKSON, M. L. & Collins, W.D. Scale up of a venturi aerator. **I & EC Process Design and Development**. 3 (4): 386-393, 1964.

JIANLONG, W.; NING, Y. Partial nitrification under limited dissolved oxygen conditions. **Process Biochemistry**, v. 39, p. 1223–1229, 2004.

KADZINGA, F. Venturi aeration of bioreactor. 2015. 79p. Tese (Mestrado em Ciências de Engenharia). Universidade da Cidade do Cabo. Africa do Sul, 2015.

KRAYZELOVA, L. et al. Microaeration for hydrogen sulfide removal during anaerobic treatment: a review. **Environmental Science Biotechnology**. 14. P703-725, 2015.

LEWIS, W.K.; WHITMAN, W.G. Principles of gas absorption-absorption. **Industrial and Engineering Chemistry**, 16(12): p.1215-1220, 1924.

MCKEOGH E. J. and ERVINE D. A. Air entrainment rate and diffusion pattern of plunging liquid jets. **Chemical Engineering Science**, 36, p1161–1172, 1981.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recurso**. 5. ed. Porto Alegre: Mcgraw-hill, 2016.

MUELLER, J.A.; BOYLE, W.C.; PÖPEL, H.J. **Aeration: principles and practice**. New York: CRC Press, 2002.

OZKAN F.; KAYA T.; BAYLAR A. Study of the influence of venturi weir type on air bubble entrainment. **Scientific Research and Essay**, 4(11): p1184-1193, 2009.

PICCIN, J. S.; RISSINI, A.L.; KOCH, M.M.; BRIÃO, V. B.; HEMKEMEIER, M. Otimização de sistema de autoaspiração de ar tipo Venturi para tratamento de água ferruginosa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - Pb, v.14, n. 5, p.531-537, 2009.

POPEL, I. H. J. **Delft University Of Technology**. 2. ed. Holanda: Delft University Of Technology, 1974.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 2ª edição. São Carlos. SP. 519 p. 1999.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos: uma estratégia sequencial de planejamentos**, Campinas, SP, Casa do Pão Editora, 2005.

RODRIGUEZ G., DORADO, A. D., BONSFILLS, A., SANAHUJA, R., Gabriel. D. & Gamisans, X.. Optimization of oxygen transfer through venturi-based systems applied to the biological sweetening of biogas. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**. 87 (6): 854-860, 2012.

SHIAU, C.C. Oxygen transfer in bubble and bubbleless aeration system, Tese (Doutorado), University of Wollongong, Department of civil and Mining Engineering, 1995.

SILVA FILHO, H. A.; SANTOS, E. V. M. S.; HAANDEL, A.C.V. Análise da influência de fatores intervenientes na transferência de oxigênio dissolvido em sistemas de lodo ativado. **Ciência e Engenharia**, v.23(2), p.49-55, 2014.

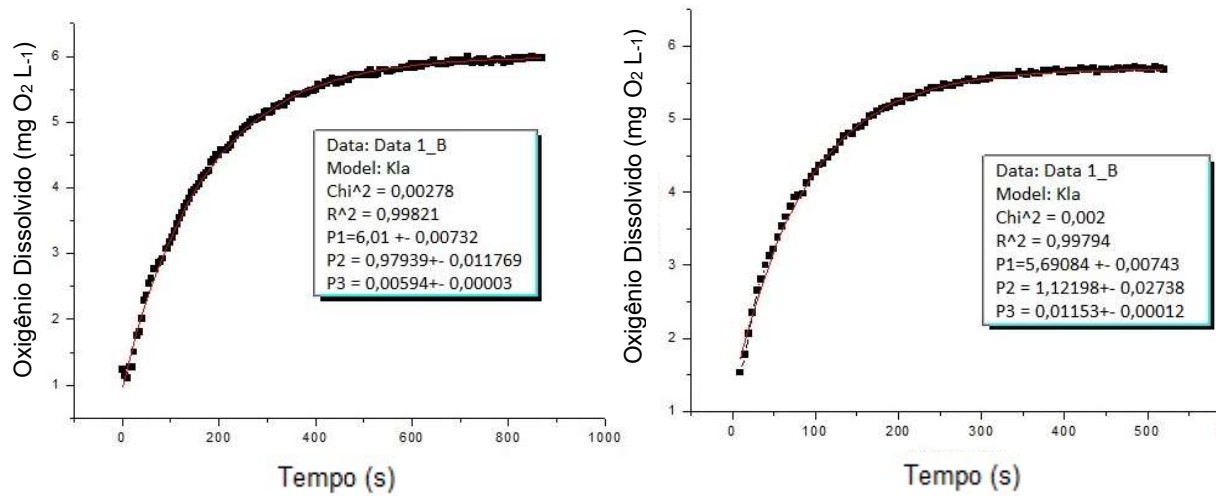
VON SPERLING, M.V.; VAN HAANDEL, A.C.; JORDÃO, E.P.; CAMPOS, J.R.; CYBIS, L.F.; AISSE, M.M.; ALÉM SOBRINHO, P. **Pós-tratamento de efluente de reatores anaeróbios por sistema de lodos ativados**. In: CHERNICHARO, C.A.L. Pós tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Belo Horizonte, MG. Cap. 5, p.279- 331. 2001.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Água Residuárias: Princípios Básicos do Tratamento de Esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

APÊNDICE

Tanque Vertical - 2 Tubos de Venturi

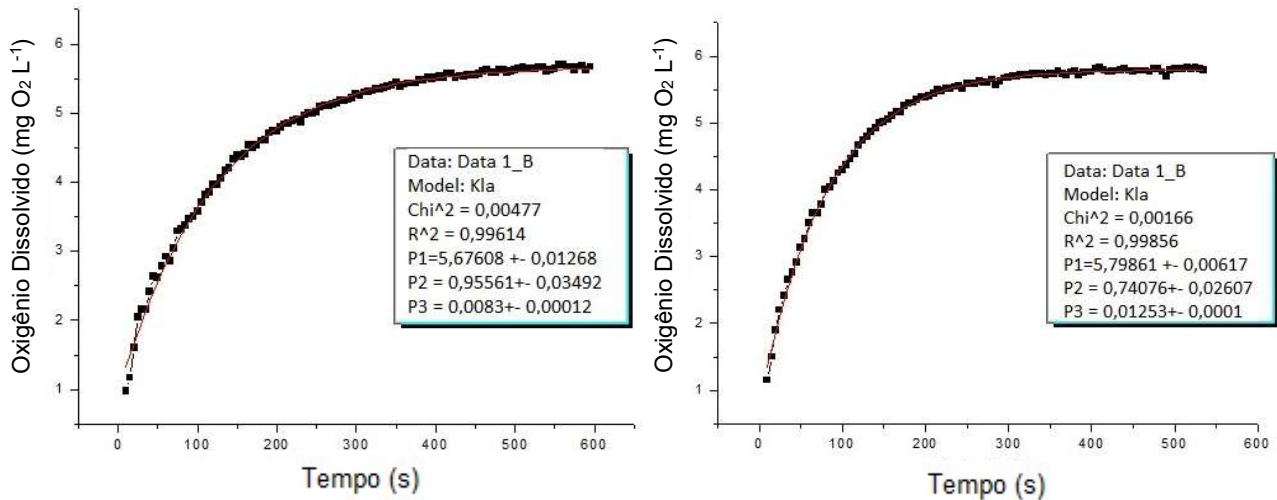
Figura 37– (a) $Q = 1720 \text{ Lh}^{-1}$ e 10,6cm abaixo (-;-1) (b) $Q = 2320 \text{ Lh}^{-1}$ e 10,6cm abaixo (+;-1)



T = 27°C , $KLa_{20^\circ} = 18,11 \text{ h}^{-1}$

T = 25°C , $KLa_{20^\circ} = 36,86 \text{ h}^{-1}$

Figura 38 – (a) $Q = 1720 \text{ Lh}^{-1}$ e 10,6cm acima (-;+1) e (b) $Q = 2320 \text{ Lh}^{-1}$ e 10,6cm acima (+;+1)

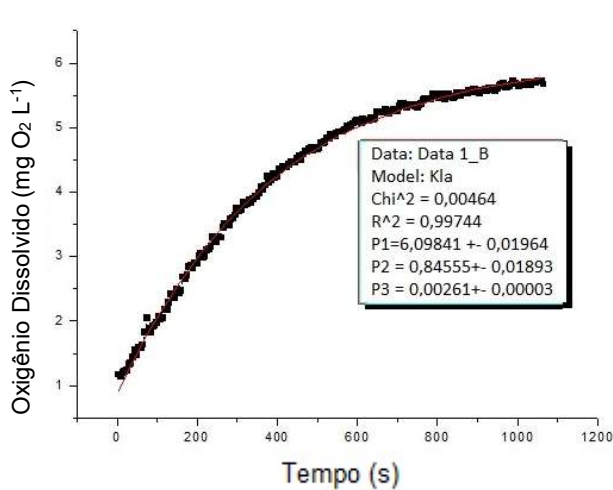


T = 29°C , $KLa_{20^\circ} = 24,14 \text{ h}^{-1}$

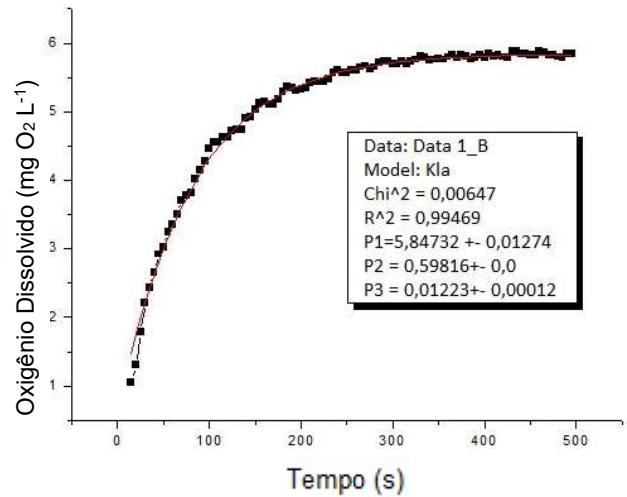
T = 28,5°C , $KLa_{20^\circ} = 36,87 \text{ h}^{-1}$

Figura 39 –(a)Q 1300 Lh⁻¹ e superfície (-1,41;0) e

(b) Q 2500 Lh⁻¹ e superfície (+1,41;0)

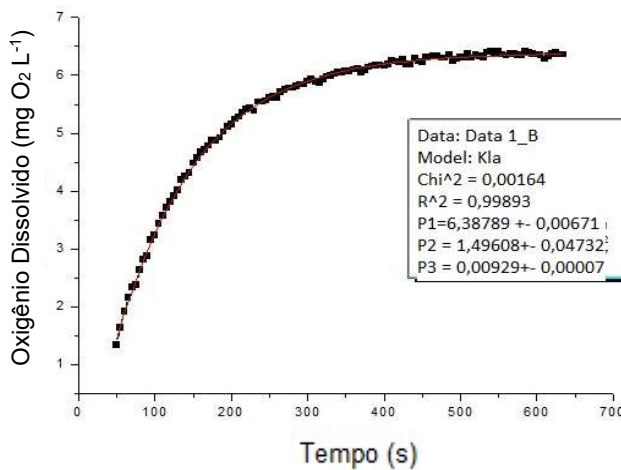


T = 26°C , KLa_{20°} = 8,15 h⁻¹

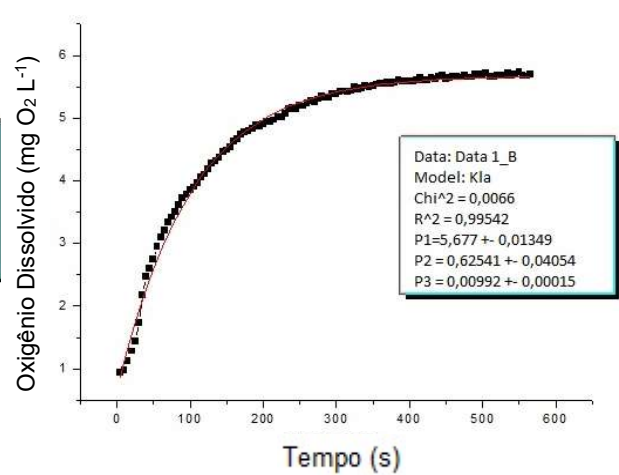


T = 28°C , KLa_{20°} =36,42 h⁻¹

Figura 40 – (a) Q 1900 Lh⁻¹ e 15cm abaixo (0;-1,41) e (b) Q 1900 Lh⁻¹ e 15cm Acima (0;+1,41)

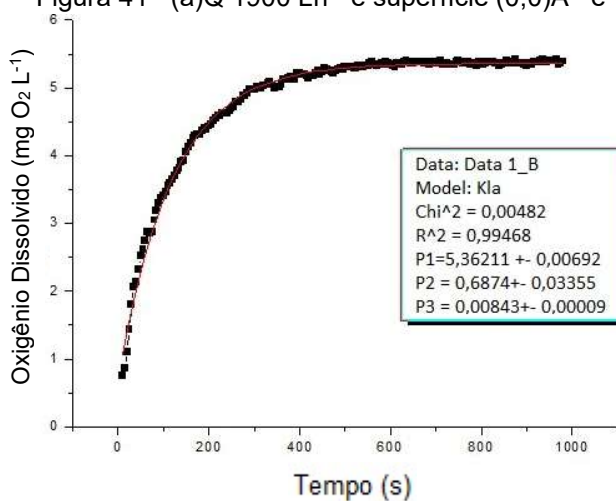


T = 24°C , KLa_{20°} = 30,42 h⁻¹

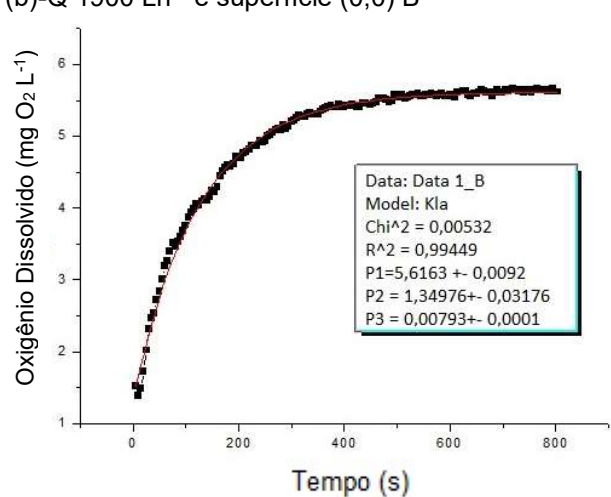


T = 24°C , KLa_{20°} = 31,72 h⁻¹

Figura 41 –(a)Q 1900 Lh⁻¹ e superfície (0;0)A e (b)-Q 1900 Lh⁻¹ e superfície (0;0) B

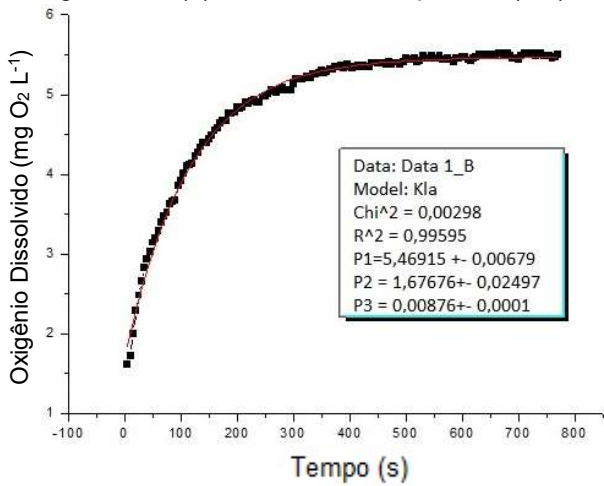


T = 28°C , KLa_{20°} = 25,17 h⁻¹



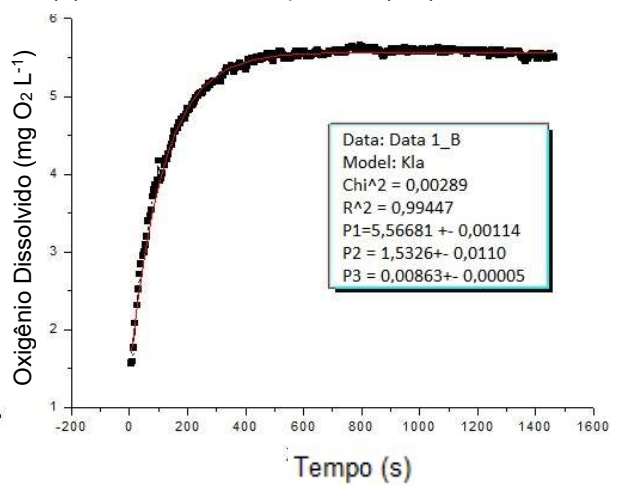
T = 28°C , KLa_{20°} = 23,34 h⁻¹

Figura 42 – (a) Q 1900 Lh⁻¹ e superfície (0;0) C



T = 28,5°C , KLa_{20°} = 25,40 h⁻¹

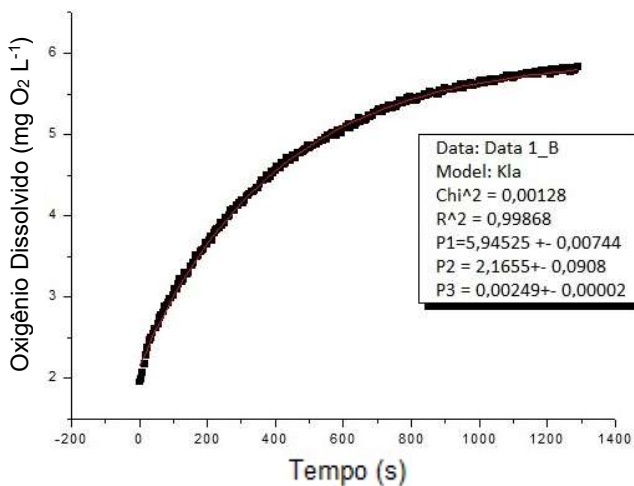
e (b) Q 1900 Lh⁻¹ e superfície (0;0) D



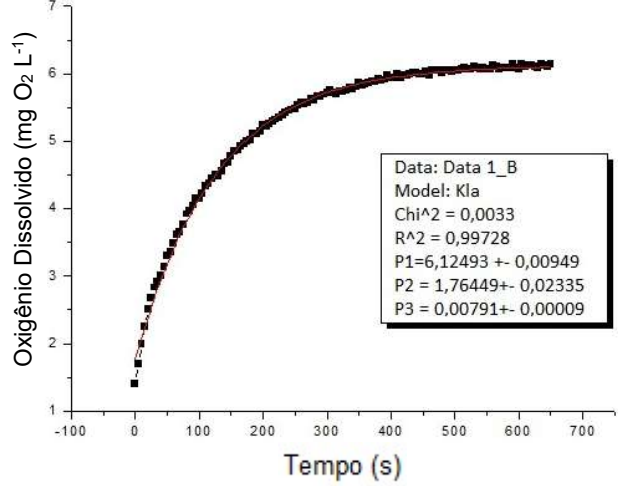
T = 28°C , KLa_{20°} = 25,78 h⁻¹

Tanque Vertical - 1 Tubo de Venturi

Figura 43 – (a) Q 650 Lh⁻¹ e 10,6 cm abaixo(-1;-1) e (b) Q 1390 Lh⁻¹ e 10,6 cm abaixo(+1;-1)

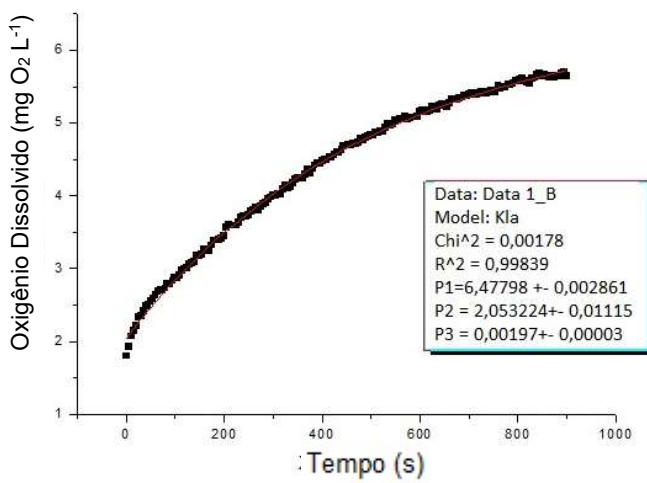


T = 30,0°C , KLa_{20°} = 7,07 h⁻¹

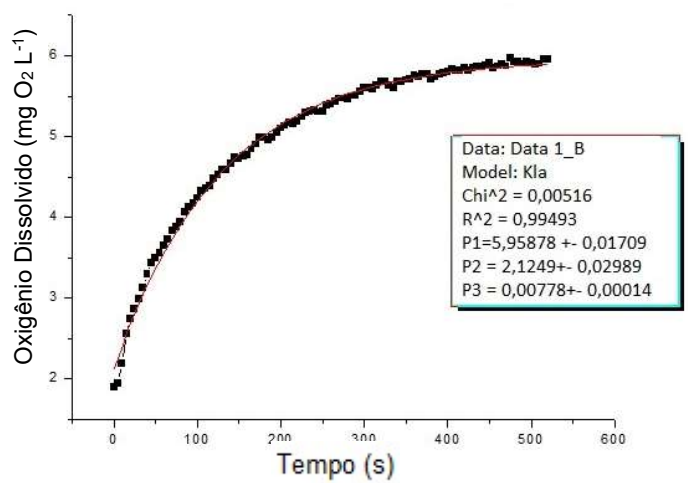


T = 28,0°C , KLa_{20°} = 23,55 h⁻¹

Figura 44–(a)Q650 Lh⁻¹ e 10,6cm acima(1;+1) e (b)Q 1390 Lh⁻¹ e 10,6 cm acima(+1;+1)



T = 29,0 , KLa_{20°} = 5,73 h⁻¹



T = 26,0°C , KLa_{20°} = 24,29 h⁻¹

Figura 45 –(a)Q 500 Lh⁻¹ e Superfície(1,41;0) e (b)Q 1550 Lh⁻¹ e superfície(+1,41;0))

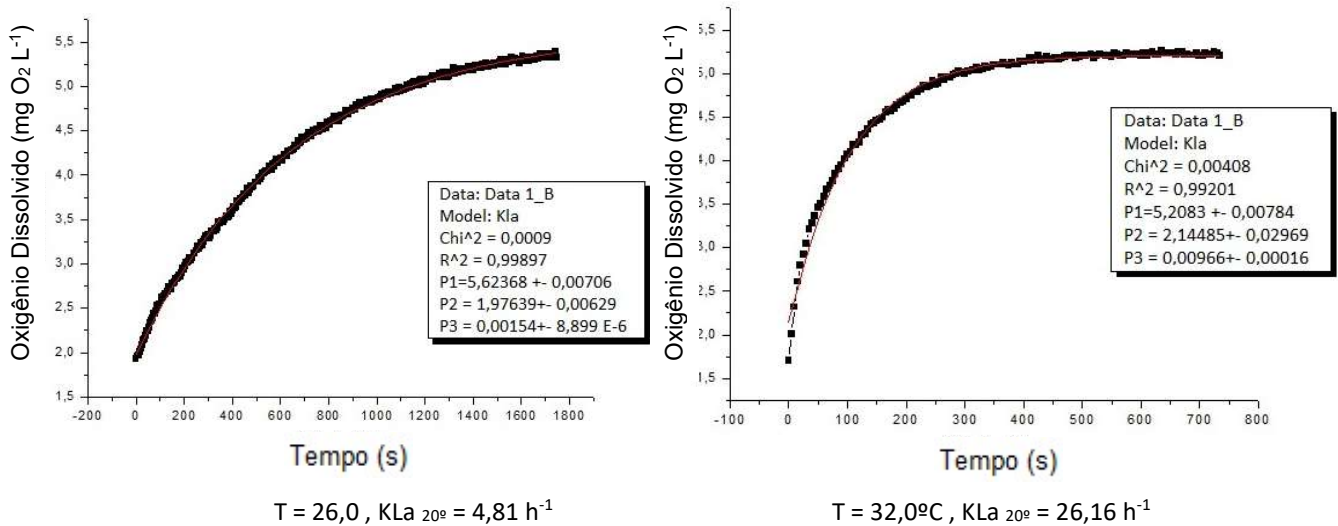


Figura 46 – (a)Q 1020 Lh⁻¹ e 15 cm abaixo (0;-1,41) e (b)Q 1020 Lh⁻¹ e 15cm acima(0;+1,41)

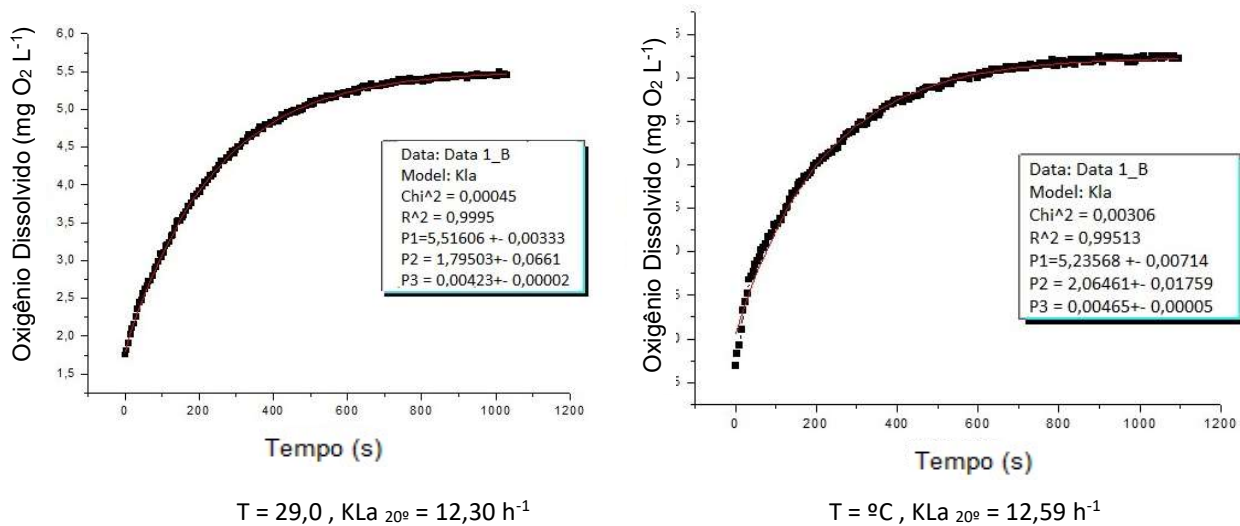


Figura 47 – (a) Q 1020 Lh⁻¹ e Superfície (0;0) A e (b) Q 1020 Lh⁻¹ e Superfície (0;0) B

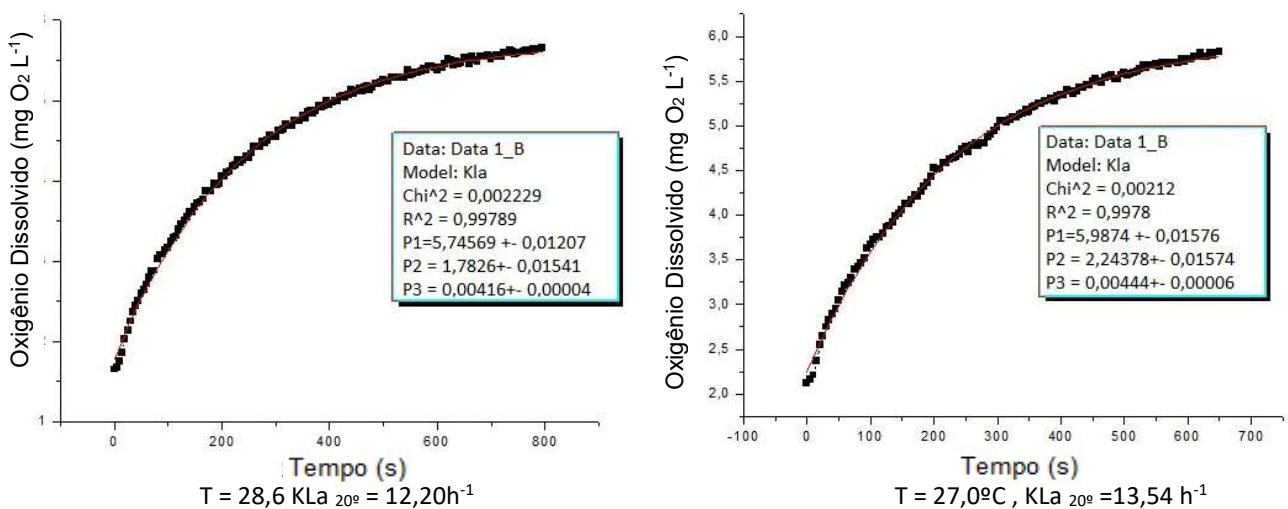
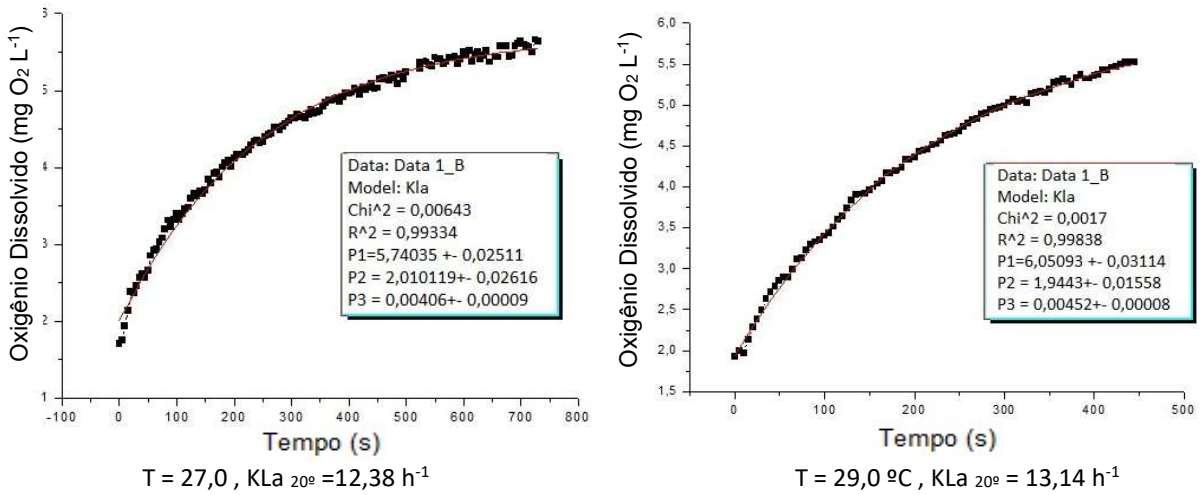


Figura 48 – (a) Q 1020 Lh⁻¹ e Superfície (0;0) C e (b)Q 1020 Lh⁻¹ e Superfície (0;0) D



8.3 Tanque Horizontal -1 Tubo de Venturi

Figura 49 – (a) Q 1490 Lh⁻¹ e 10,6 cm abaixo (-1;-1) e (b)Q 2410 Lh⁻¹ e 10,6 cm abaixo (1;-1)

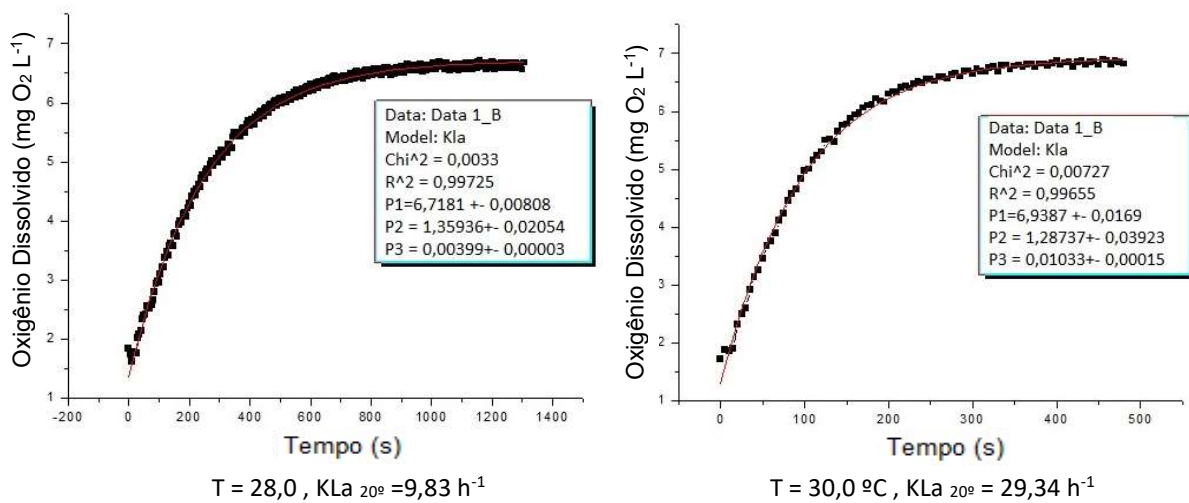


Figura 50–(a)Q 1490 Lh⁻¹ e 10,6cm acima (-1;+1) e (b)Q 2410 Lh⁻¹ e 10,6cm acima (1;1)

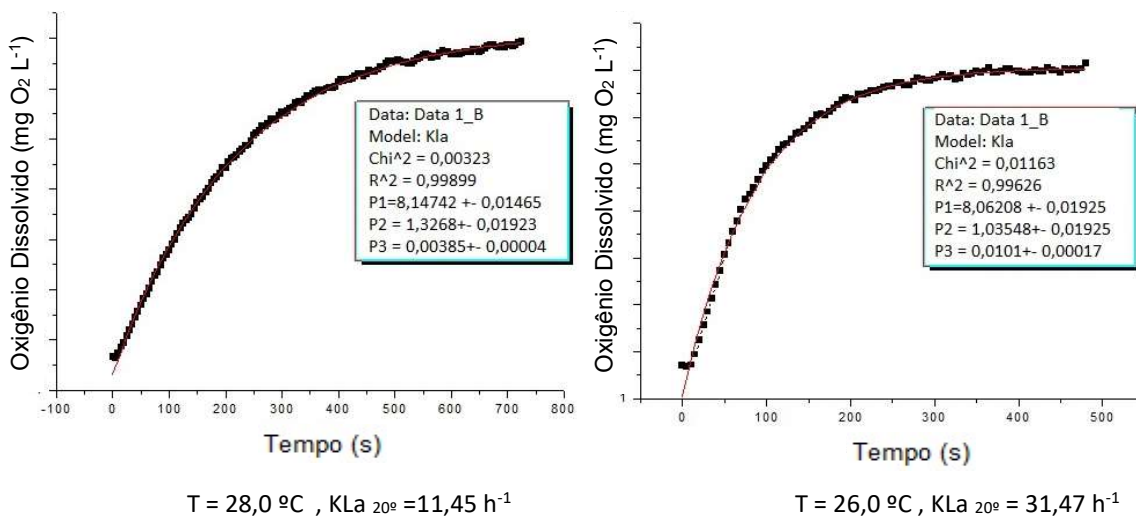


Figura 51 – (a) Q 1300 Lh⁻¹ e superfície (-1,41;0) e (b) Q 2600 Lh⁻¹ e superfície (+1,41;0)

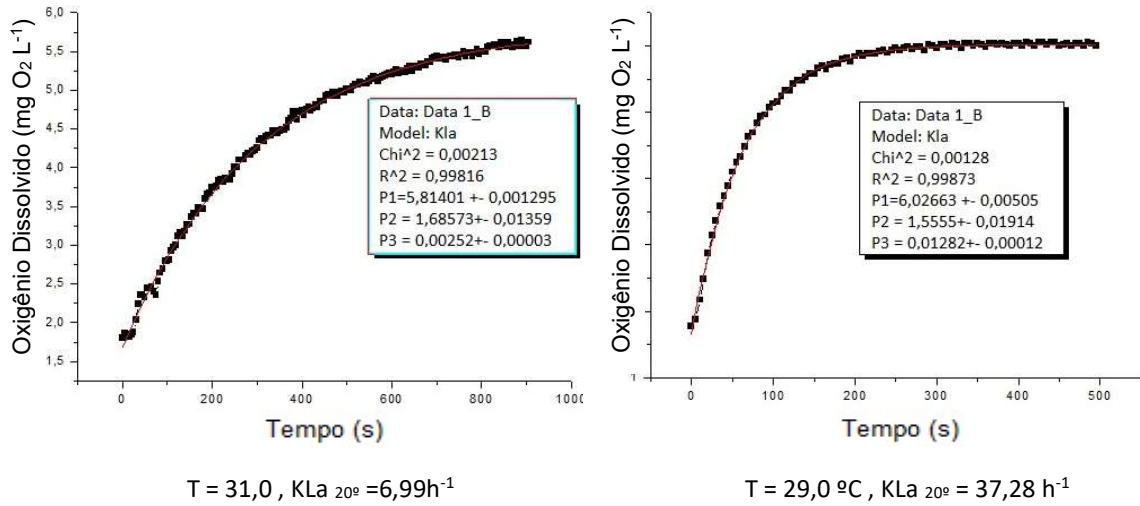


Figura 52-(a)Q 1950 Lh⁻¹ e 15,6cm abaixo (0;-1,41) e (b)Q1950 Lh⁻¹ h e 15,6cm acima (0;+1,41)

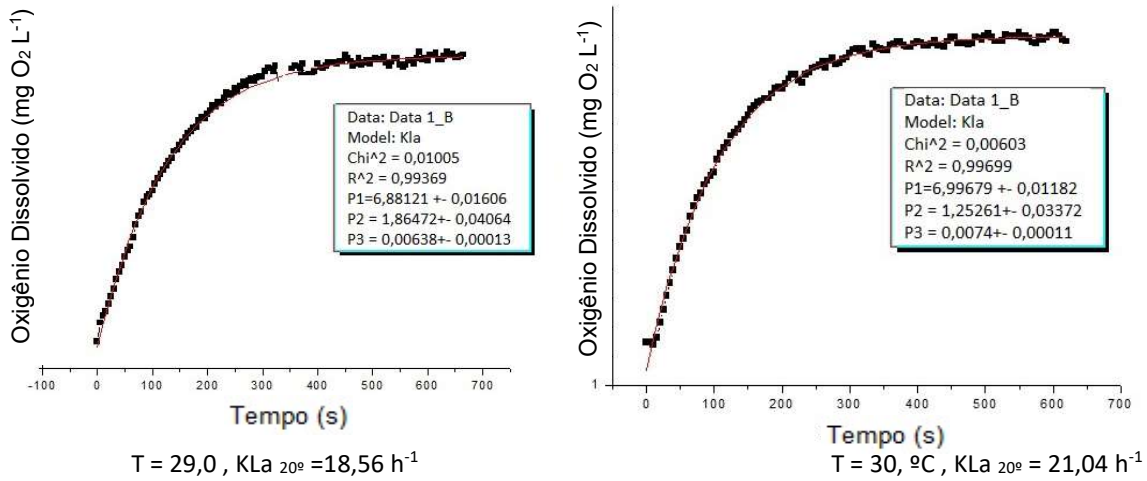


Figura 53 - (a)Q 1950 Lh⁻¹ e superfície (0;0) A e (b) Q 1950 Lh⁻¹ e superfície (0;0) B

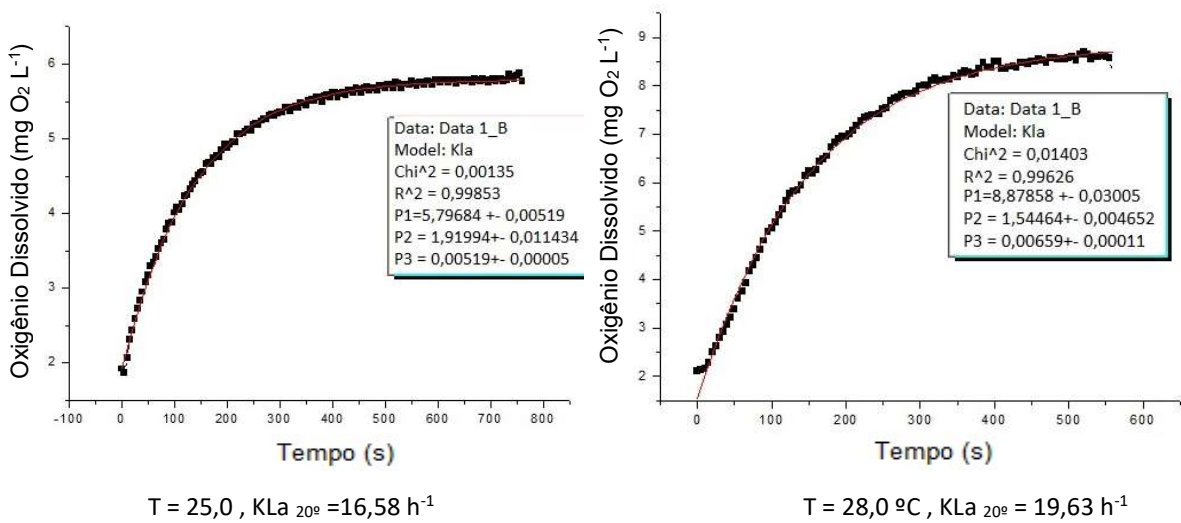
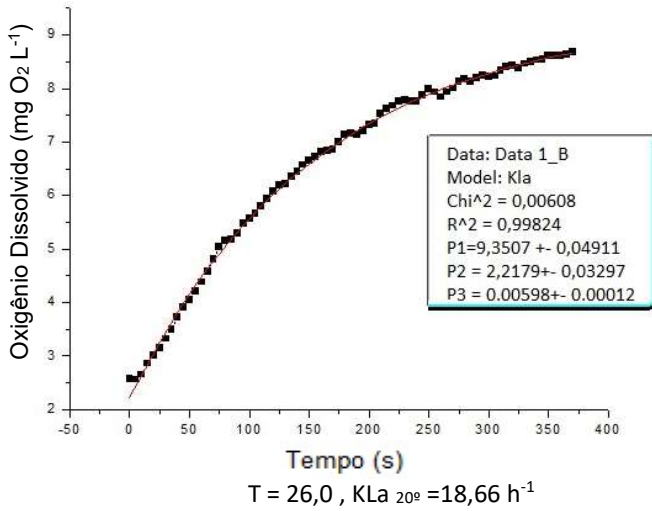
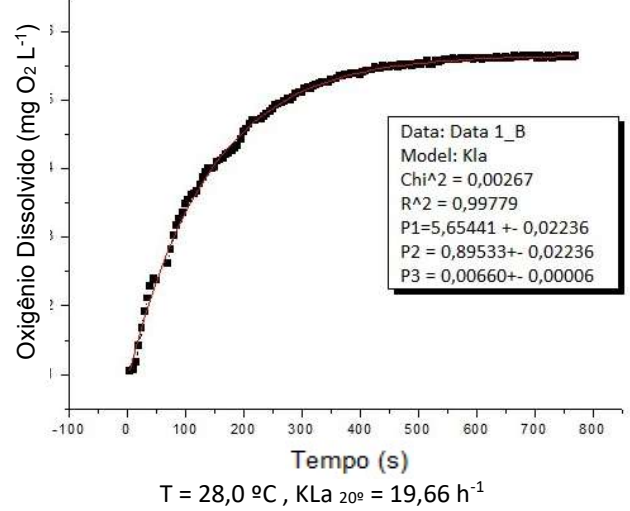


Figura 54-(a) Q 1950 Lh⁻¹ e superfície (0;0) C e



(b) Q 1950 Lh⁻¹ e superfície (0;0) D



Tanque Horizontal - 2 Tubo de Venturi

Figura 55 – (a) Q 1600 Lh⁻¹ e 10,6 cm abaixo (-1;-1) e (b) Q 3100 Lh⁻¹ e 10,6 cm abaixo (+1;-1)

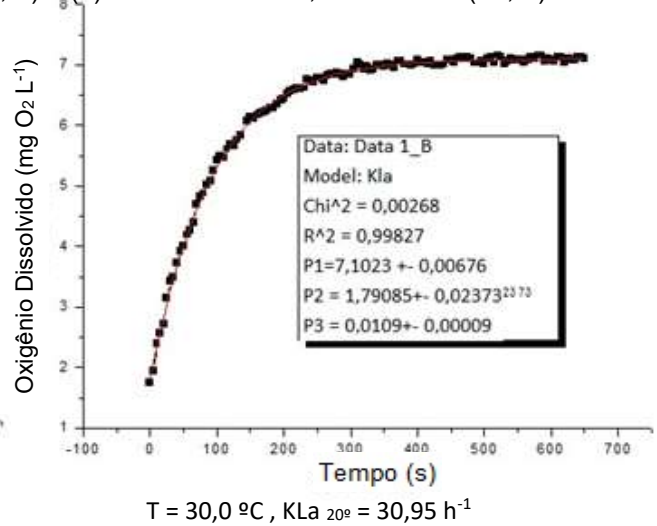
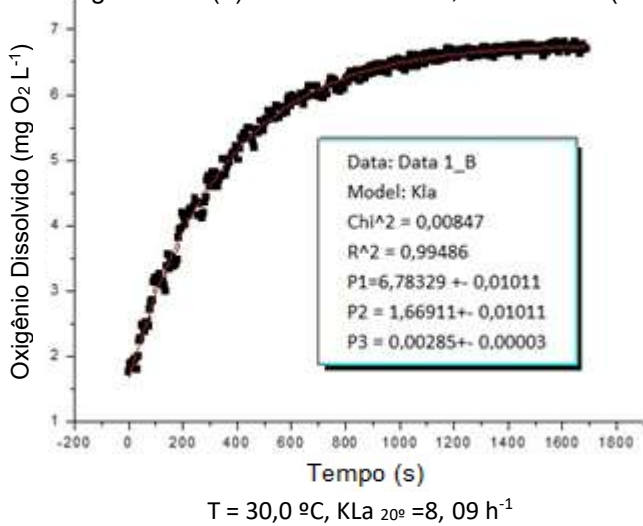


Figura 56-(a) Q 1600 Lh⁻¹ e 10,6cm acima (-1;+1) e (b) Q 3100 Lh⁻¹ e 10,6cm acima (+1;+1)

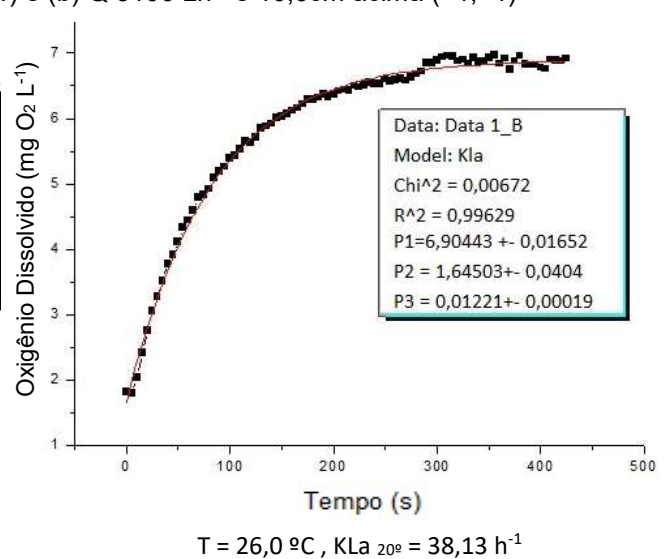
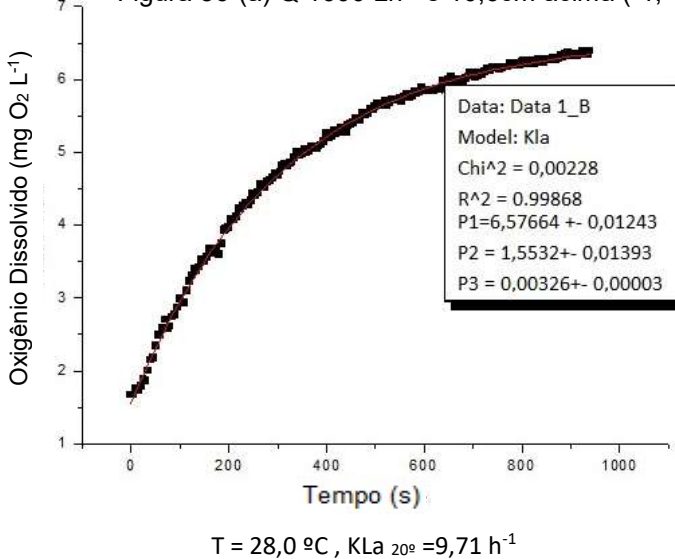
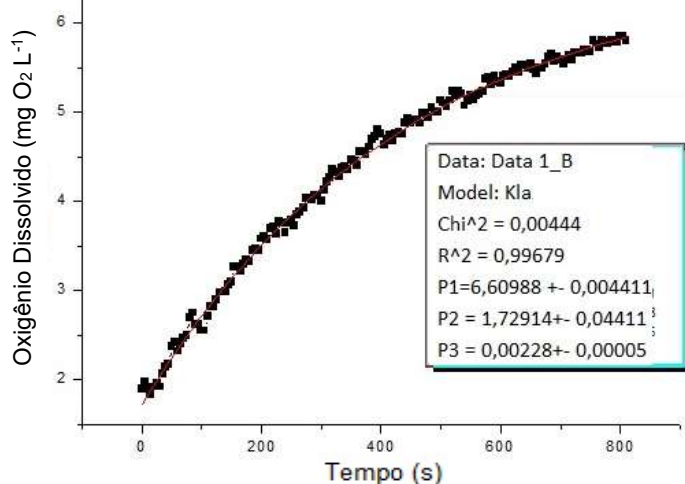
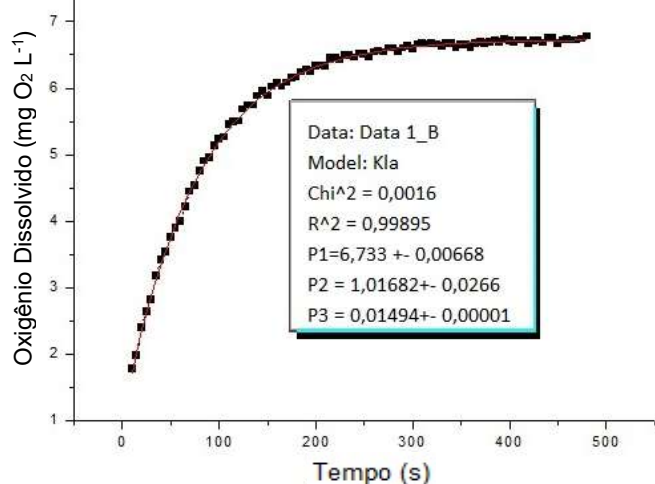


Figura 57-(a) Q 1300 Lh⁻¹ e superfície (-1,41;0) e (b) Q 3100 Lh⁻¹ e superfície (+1,41;0)

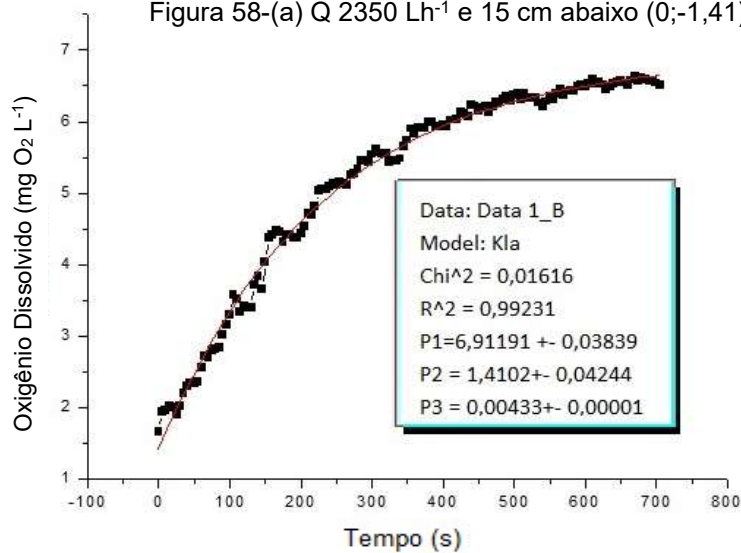


T = 28,0 °C, $KLa_{20^\circ} = 6,16 \text{ h}^{-1}$

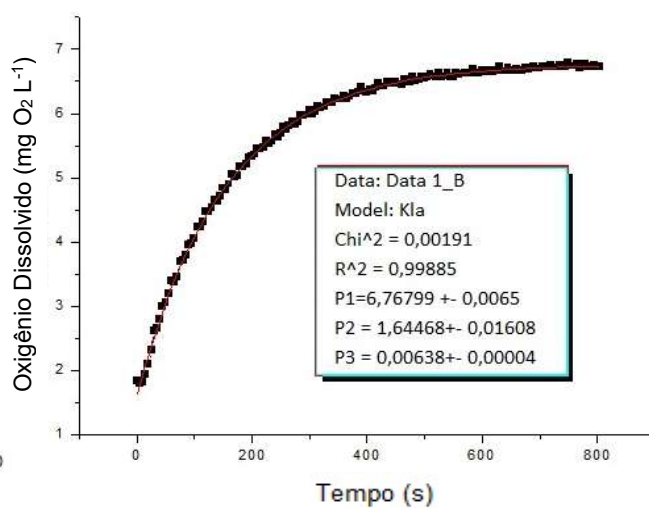


T = 26,0 °C, $KLa_{20^\circ} = 48,92 \text{ h}^{-1}$

Figura 58-(a) Q 2350 Lh⁻¹ e 15 cm abaixo (0;-1,41) e (b) Q 2350 Lh⁻¹ e 15 cm acima (0;+1,41)

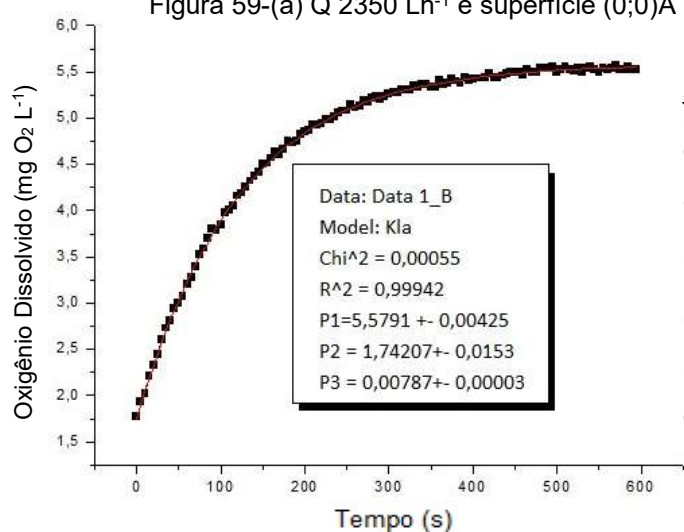


T = 31,0 °C, $KLa_{20^\circ} = 12,01 \text{ h}^{-1}$

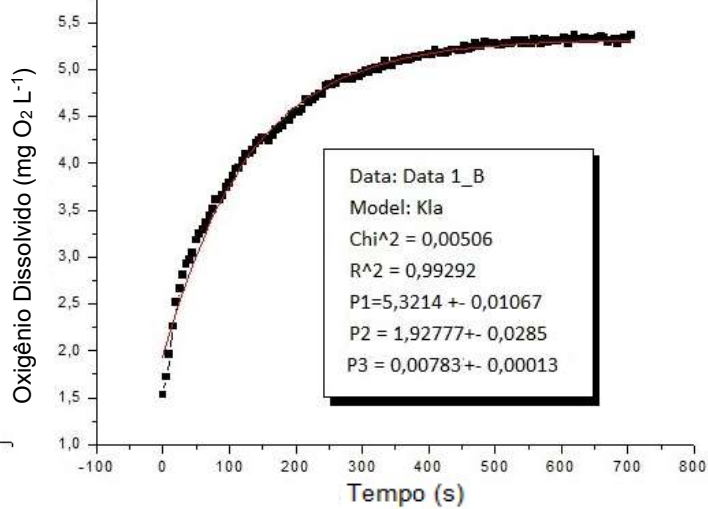


T = 23,0 °C, $KLa_{20^\circ} = 21,39 \text{ h}^{-1}$

Figura 59-(a) Q 2350 Lh⁻¹ e superfície (0;0)A e (b) Q 2350 Lh⁻¹ e superfície (0;0)B

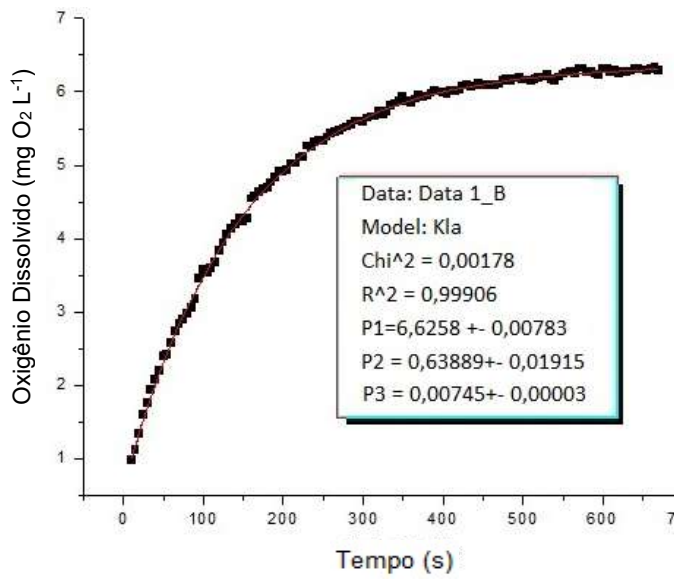


T = 29,0 °C, $KLa_{20^\circ} = 22,79 \text{ h}^{-1}$

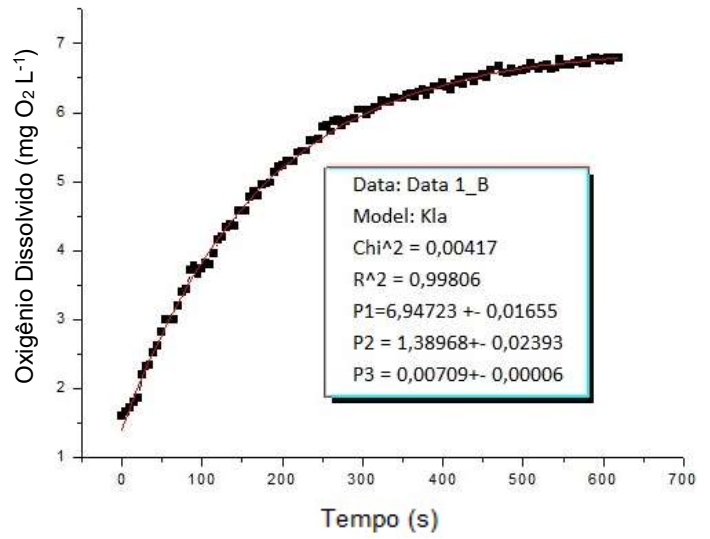


T = 29,0 °C, $KLa_{20^\circ} = 22,77 \text{ h}^{-1}$

Figura 60-(a) Q 2350 Lh⁻¹ e superfície (0;0)C e (b) - Q 2350 Lh⁻¹ e superfície (0;0)D



T = 26,0 °C, KLa_{20°} = 23,26 h⁻¹



T = 26,0 °C, KLa_{20°} = 22,15 h⁻¹