



Anais do XXXIV COBENGE. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, Setembro de 2006.  
ISBN 85-7515-371-4

## WEBLABS EM ENGENHARIA QUÍMICA: DESENVOLVIMENTO, IMPLEMENTAÇÃO E OPERAÇÃO REMOTA DE EXPERIMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA VIA INTERNET

**Antonio José Gonçalves Cruz** – ajgcruz@power.ufscar.br  
**Athos Américo Biselli de Lourenço** – athosbiselli@yahoo.com.br  
**Charles Dayan Farias de Jesus** – cdfcdf2@yahoo.com.br  
**Daniel Seino Ferreira** – japaseino@yahoo.com.br  
**Denise Sturlini** – denisesturlini@yahoo.com.br  
**Roberto de Campos Giordano** – roberto@power.ufscar.br  
Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química  
Rodovia Washington Luis (SP 310), km 235, CP 676  
CEP 13565-905 – São Carlos – São Paulo

**Resumo:** *Este trabalho descreve o desenvolvimento, implementação e operação de WebLab para realização de experimentos de transferência de massa em reator de bancada tipo tanque agitado e aerado. O primeiro experimento utiliza o método do sulfito modificado para a determinação do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio ( $k_L a$ ) em diferentes condições de agitação e aeração. O segundo experimento calcula valores de  $k_L a$  durante uma fermentação através do método de grau na velocidade de agitação. Empregou-se como estudo de caso cultivo da levedura de panificação, *Saccharomyces cerevisiae*, realizado em meio contendo glicose como principal fonte de carbono e energia. Ambos os experimentos foram automatizados e operados remotamente através da internet e mostraram-se adequados para serem utilizados como laboratório de acesso remoto com agendamento prévio de data e horário de realização do experimento.*

**Palavras-chave:** *Automação, Ensino a distância, Experimento didático, WebLab, Transferência de Massa.*

### 1. INTRODUÇÃO

A partir do início da década de noventa é possível observar a crescente utilização da Internet nos campos da educação, pesquisa e treinamento. E desde então, no processo de uso experimental desta nova tecnologia, professores, profissionais e estudantes confrontam-se com temas relacionados às novas formas de pesquisar, estabelecer comunicação, colaborar e disponibilizar informação.

Já com as tecnologias associadas à Internet mais estabelecidas, a atenção se volta para a exploração do potencial da Web e é crescente a pressão para justificar sua utilização nos meios de ensino e de pesquisa de modo a atingir os níveis de confiança e de qualidade esperados.

Neste contexto, muitas instituições educacionais estão engajadas no desenvolvimento de estratégias e estruturas para implementar e utilizar o aprendizado eletrônico (*e-learning*) como uma abordagem complementar aos tradicionais métodos de treinamento e educação. Uma das primeiras instituições a investir neste campo foi o Massachusetts Institute of Technology (MIT) através de projetos como OpenCourseWare e mais recentemente MIT ICampus (<http://icampus.mit.edu>), todos voltados para o ensino superior.

No Brasil, particularmente no estado de São Paulo, a FAPESP vem fomentando pesquisas neste campo através de seu programa TIDIA (Tecnologia da Informação no Desenvolvimento da Internet Avançada), o qual se desdobra em três projetos: **Aprendizado eletrônico**, o qual visa o desenvolvimento e ferramentas de suporte e apoio ao ensino e aprendizagem; **KyaTera**, que tem como objetivo o estabelecimento de uma rede de fibras ópticas destinadas à pesquisa, desenvolvimento e demonstrações de tecnologia para aplicação da Internet avançada; e **Incubadora virtual**, que consiste de um espaço para criação cooperativa de conteúdos digitais abertos. Dentro do projeto KyaTera estão sendo desenvolvidos os WebLabs.

Um WebLab pode ser definido como um laboratório de qualquer ciência experimental que pode ser remotamente acessado e controlado através da Internet.

Os WebLabs podem ser utilizados nas três formas de aprendizado citada por Shin et al. (2002), a saber: aprendizado assíncrono, através da realização do experimento pelo estudante sem o acompanhamento do professor; aprendizado síncrono, no qual durante a realização do experimento utiliza-se um ambiente que promova a interação entre o estudante e o instrutor e a colaboração entre grupos.

Neste trabalho descreve-se o desenvolvimento, implementação e operação de WebLab utilizado para realização de experimentos para determinação do coeficiente volumétrico de transferência de massa ( $k_{La}$ ) empregando duas metodologias distintas: no primeiro o  $k_{La}$  é determinado com base no método do sulfito modificado em diferentes condições de agitação e aeração. No segundo utiliza-se método degrau na velocidade de agitação para se obter o valor de  $k_{La}$  durante cultivo aeróbio da levedura de panificação *Saccharomyces cerevisiae*.

## 2. PRÁTICA EXPERIMENTAL

Há muitos anos os estudantes do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos realizam prática experimental envolvendo cálculo do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio em tanque cilíndrico (reator de mistura) aerado empregando método do sulfito. Este experimento faz parte de um conjunto de experimentos da disciplina Engenharia Bioquímica.

A importância desta prática experimental reside no fato de que em alguns casos a agitação representa a etapa controladora do processo, e, portanto, esses sistemas devem ser adequadamente dimensionados para levar a um bom desempenho do mesmo. Nestes bioreatores, a agitação e a aeração têm como finalidade promover a mistura e transferência de massa (oxigênio) da fase gasosa para a fase líquida de forma eficiente, transferência esta que pode ser quantificada pelo coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio ( $k_{La}$ ).

Recentemente implementou-se no mesmo kit didático experimento para determinação de  $k_{La}$  durante um cultivo celular. Como estudo de caso foi utilizado o cultivo da levedura de panificação, *Saccharomyces cerevisiae*, empregando-se o método do degrau na velocidade de agitação para determinação do  $k_{La}$  (Badino Jr et al., 2004).

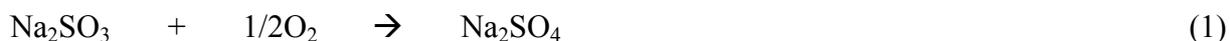
## 2.1 Fundamentação teórica dos experimentos

### *Experimento 1 – Método do Sulfito Modificado*

Esta é uma metodologia clássica empregada para determinação do coeficiente volumétrico de transferência de massa ( $k_L a$ ). Foi originalmente proposta por Cooper et al., (1944) e baseia-se na reação de oxidação de sulfito de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) na presença de cobre ou cobalto como catalisador. Como a reação de oxidação é de ordem zero, a etapa controladora do processo é a velocidade de transferência de oxigênio ( $N_{\text{O}_2}$ ). Neste método, o meio reacional é agitado e aerado por um período de tempo conhecido e, a partir da estequiometria da reação de oxidação determinam-se as velocidades de consumo do  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  e do oxigênio e, portanto, a velocidade de transferência de oxigênio ( $N_{\text{O}_2}$ ).

Para uma dada condição de agitação ( $N$ ) e aeração ( $Q$ ) de um volume reacional ( $V$ ) conhecido de um fluido à pressão e temperaturas conhecidas, é inicialmente adicionado sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) como catalisador de modo a se ter uma concentração inicial de 0,7 g/L (4,4 mM) no sistema. Após a dissolução do catalisador no sistema, adiciona-se uma determinada massa de sulfito de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) de modo a se obter uma concentração inicial no sistema de 10,83 g/L (0,086 M). A concentração de oxigênio dissolvido ( $C$ ), medida por um eletrodo acoplado ao analisador de  $\text{O}_2$  é registrada até todo o sulfito de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) ser oxidado a sulfato ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). As concentrações de  $\text{CuSO}_4$  e  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  utilizadas neste trabalho foram as mesmas de Villaça et al. (2000).

A estequiometria da reação entre o sulfito de sódio e o oxigênio é apresentada pela equação (1).



A quantidade de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  adicionada é suficiente para manter a concentração de oxigênio dissolvido em zero durante um período de tempo ( $\Delta t$ ), necessário para o completo consumo do  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ . Como a velocidade de reação é muito maior que a de transferência de  $\text{O}_2$  através da interface gás-líquido, o processo é controlado pela transferência de massa. O comportamento da concentração de oxigênio dissolvido na fase líquida ( $C$ ) em um ensaio típico é ilustrado pela Figura 1.

A velocidade de transferência de  $\text{O}_2$  ( $N_{\text{O}_2}$ ) é dada pela equação (2).

$$N_{\text{O}_2} = \frac{0,5 C_{\text{Na}_2\text{SO}_3}}{\Delta t} \quad (2)$$

onde:  $C_{\text{Na}_2\text{SO}_3}$  é a concentração molar de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  adicionados ao reator;

$\Delta t$  é o tempo necessário para todo o  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ser oxidado a  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (tempo da reação).

O coeficiente volumétrico de transferência de  $\text{O}_2$  ( $k_L a$ ) é então calculado pela equação (3).

$$k_L a = \frac{N_{\text{O}_2}}{C^* - C} \quad (3)$$

onde:  $C$  é a concentração de  $\text{O}_2$  na fase líquida (medida pelo eletrodo) durante a reação;

$C^*$  é a concentração de saturação de  $O_2$  na fase líquida ou a concentração na fase líquida em equilíbrio com a pressão parcial de  $O_2$  na fase gasosa ( $p_{O_2}$ ).

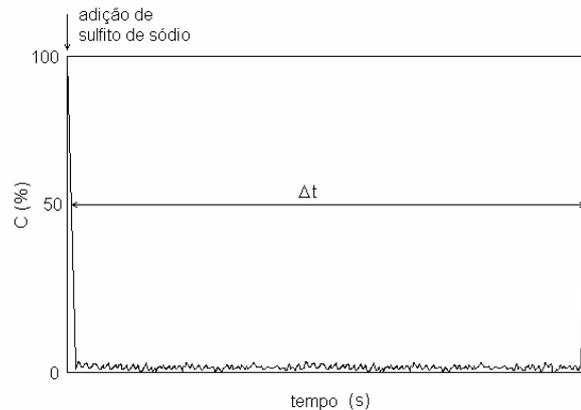


Figura 1. Ensaio característico para a determinação da velocidade de transferência de  $O_2$  ( $N_{O_2}$ ).

### **Experimento 2 – Método Degrau na Velocidade de Agitação**

O coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio ( $k_L a$ ) pode ser calculado durante cultivo de microrganismo empregando método proposto por Mignone e Ertola (1984), o qual tem como princípio a aplicação de um de grau na velocidade de agitação durante o cultivo.

Assumindo que o processo é realizado em tanque agitado de mistura perfeita, o balanço para o oxigênio dissolvido na fase líquida durante um cultivo aeróbio em batelada é expresso pela equação (4):

$$\frac{dC}{dt} = \underbrace{k_L a (C^* - C)}_{OTR} - \underbrace{Q_{O_2} C_x}_{OUR} \quad (4)$$

onde: OTR é a taxa de transferência de oxigênio para a fase líquida;

OUR é a velocidade de consumo de oxigênio pela população de microrganismos.

Mantendo-se o meio de cultivo sob condição de aeração e agitação constante, pode-se assumir que para pequenos intervalos de tempo tem-se um estado estacionário, denominado de período I ( $Q_1$ , vazão de ar;  $N_1$ , velocidade de agitação). Neste período temos uma concentração de oxigênio dissolvido denominada  $C_1$  e um coeficiente de transferência de oxigênio  $(k_L a)_1$ , Figura 2.

Alterando-se a velocidade de agitação para  $N_2$  ( $N_2 > N_1$ ), produz-se um estado transiente denominado de período II na Figura 2. A concentração de oxigênio dissolvido varia até alcançar o valor  $C_2$  (novo estado estacionário; período III). Este período é caracterizado por outro valor de  $(k_L a)_2$ , Figura 2. Cada um desses períodos pode ser descrito pelas seguintes equações:

#### **Período I (estado estacionário):**

$$\frac{dC}{dt} = (k_L a)_1 (C^* - C_1) - Q_{O_2} C_x = 0 \quad (5)$$

#### **Período II (estado transiente):**

$$\frac{dC}{dt} = (k_L a)_2 (C^* - C) - Q_{O_2} C_x \quad (6)$$

**Período III (novo estado estacionário):**

$$\frac{dC}{dt} = (k_L a)_2 (C^* - C_2) - Q_{O_2} C_x = 0 \quad (7)$$

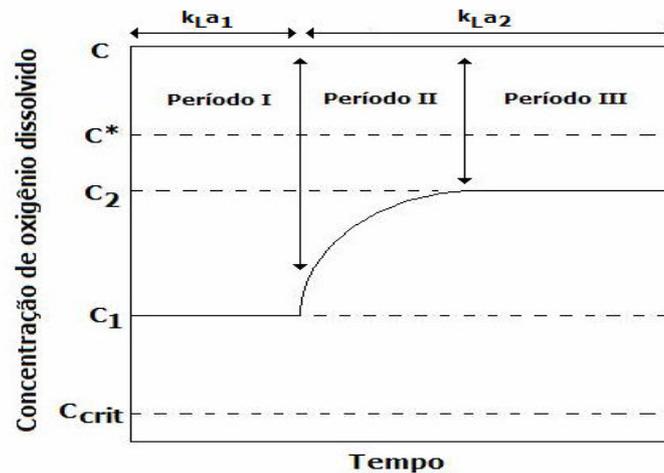


Figura 2. Variação da concentração de oxigênio dissolvido após um degrau na velocidade de agitação de  $N_1$  para  $N_2$  ( $N_2 > N_1$ ).

Como hipótese assume-se que a concentração de oxigênio dissolvida não atinja o valor crítico (abaixo do qual o metabolismo do microrganismo é alterado) e que por pequenos intervalos de tempo a velocidade de consumo de oxigênio ( $Q_{O_2} \cdot C_x$ ) permanece constante.

A partir da equação (7) tem-se:

$$Q_{O_2} C_x = (k_L a)_2 (C^* - C_2) \quad (8)$$

Substituindo a equação (8) na equação (6) resulta:

$$\frac{dC}{dt} = (k_L a)_2 (C_2 - C) \quad (9)$$

A equação (9) pode ser integrada a partir de  $t=0$ , onde  $C=C_1$  até  $t=t$ , produzindo:

$$C = C_2 - (C_2 - C_1) e^{-(k_L a)_2 t} \quad (10)$$

Definindo um adimensional de concentração dado por  $(\bar{C} = \frac{C - C_1}{C_2 - C_1})$ , pode-se reescrever a equação (10) obtendo-se:

$$\bar{C} = 1 - e^{-(k_L a)_2 t} \quad (11)$$

A equação (11) descreve a variação da concentração de oxigênio na fase líquida. Esta equação, contudo, não leva em conta o tempo de resposta do eletrodo utilizado e nem o atraso

na medida devido às características da membrana utilizada no sensor. Ambos os fenômenos podem ser descritos por cinéticas de primeira ordem (equações 12 e 13, respectivamente).

$$\frac{d\bar{C}_F}{dt} = \frac{\bar{C} - \bar{C}_F}{\tau_F} \quad (12)$$

$$\frac{d\bar{C}_E}{dt} = \frac{\bar{C}_F - \bar{C}_E}{\tau_E} \quad (13)$$

onde:  $\bar{C}_F$  é o adimensional da concentração de oxigênio na película da membrana  
 $\bar{C}_E$  é o adimensional da concentração de oxigênio dissolvido lida pelo sensor  
 $\tau_F$  é o tempo de resposta na película de líquido  
 $\tau_E$  é o tempo de resposta do eletrodo

Combinando as equações (11), (12) e (13), resulta na equação (14).

$$1 - \bar{C}_E = \frac{\left(\frac{1}{k_L a}\right)^2}{\left(\frac{1}{k_L a} - \tau_F\right)\left(\frac{1}{k_L a} - \tau_E\right)} e^{(-k_L a t)} + \frac{\tau_F^2}{\left(\tau_F - \frac{1}{k_L a}\right)(\tau_F - \tau_E)} e^{\left(\frac{-t}{\tau_F}\right)} + \frac{\tau_E^2}{(\tau_E - \tau_F)\left(\tau_E - \frac{1}{k_L a}\right)} e^{\left(\frac{-t}{\tau_E}\right)} \quad (14)$$

A área abaixo da curva de resposta do eletrodo  $(1 - \bar{C}_E)$  ao longo do tempo é dada pela equação (15).

$$A_1 = \int_0^{\infty} (1 - \bar{C}_E) dt = \frac{1}{(k_L a)_2} + \tau_E + \tau_F \quad (15)$$

Os valores das constantes  $\tau_F$  e  $\tau_E$  são determinados através de ensaio degrau na concentração de oxigênio no meio reacional sem a presença do microrganismo. A área abaixo desta curva ( $A_{1E}$ ) é dada pela equação (16):

$$A_{1E} = \int_0^{\infty} (1 - \bar{C}_E) dt = \tau_E + \tau_F \quad (16)$$

A diferença entre as áreas  $A_1$  e  $A_{1E}$  produz:

$$A_1 - A_{1E} = \frac{1}{(k_L a)_2} \quad (17)$$

Dessa forma, este método fornece um procedimento para calcular o valor de  $(k_L a)_2$  após uma alteração no valor da velocidade de agitação ( $N_2$ ).

Fica evidente que ao se retornar para a velocidade de agitação  $N_1$ , o valor de  $(k_L a)_1$  pode ser obtido de maneira análoga. A partir das equações (5) e (7) obtém-se:

$$(k_L a)_1 = \frac{(k_L a)_2 (C^* - C_2)}{(C^* - C_1)} \quad (18)$$

## 2.2 Automação dos experimentos

A escolha deste experimento para ser implementado como um WebLab fez-se em função da importância deste tópico na formação profissional do engenheiro químico, item já mencionado anteriormente. O conjunto experimental montado no laboratório é composto por um (bio)reator (tipo tanque agitado e aerado, 2 litros de volume útil) e acessórios (motor, medidor/transmissor de oxigênio dissolvido, medidor de vazão mássica, medidor/transmissor de temperatura). A Figura 3 apresenta um diagrama ilustrativo do aparato experimental.

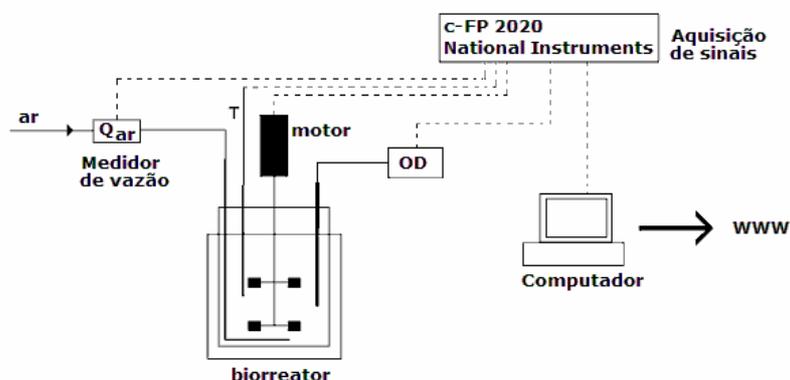


Figura 3: Representação esquemática do aparato experimental montado no laboratório (WebLab implementado).

Os sinais analógicos (4-20mA) dos valores medidos pelos sensores de oxigênio dissolvido e temperatura, módulo de controle da velocidade de agitação e medidor/contralador de vazão, são transferidos ao sistema de aquisição de dados (c-FP 2020, National Instruments). O módulo de aquisição de dados comunica-se com um computador via rede local utilizando protocolo TCP-IP. A programação foi feita utilizando o programa LabVIEW (versão 7.1). O computador conecta-se à internet através de rede local.

## 2.3 Desenvolvimento da interface de visualização no programa LabVIEW

A interface para visualização do experimento no computador foi programada utilizando o programa LabVIEW (National Instruments, versão 7.0). Na construção das telas do sistema buscou-se reproduzir um ambiente amigável com o usuário.

### Descrição do Experimento 1

A Figura 4 apresenta a primeira tela do experimento de determinação de  $k_L a$  pelo método sulfito modificado. Nesta primeira tela o usuário visualiza uma breve descrição do método experimental, e preenche os campos referentes à:

- nome para o arquivo onde os dados serão armazenados no formato texto (arquivo ASCII);
- intervalo de aquisição das medidas (0,5 s; 1 s, 5 s, 10 s, 30 s, 60 s);

- condições experimentais (velocidade de agitação e vazão de ar);

Após o preenchimento destes campos, o usuário deve clicar no botão <OK1>, que ajusta as condições adotadas no sistema e produz a mudança de cor da barra de *status* à direita deste botão (de vermelho para laranja). A partir deste momento, o usuário não tem mais permissão para realizar alterações nas condições experimentais. Ele ficará aguardando que um operador (técnico de laboratório) adicione os reagentes (sulfato de cobre e sulfito de sódio) e clique novamente no mesmo botão, agora denominado de <OK2>, Figura 5.



Figura 4. Primeira tela apresentada ao usuário. Nesta tela definem-se o nome do arquivo para gravação dos dados experimentais, o intervalo de aquisição e o valor das variáveis velocidade de agitação e vazão de ar.

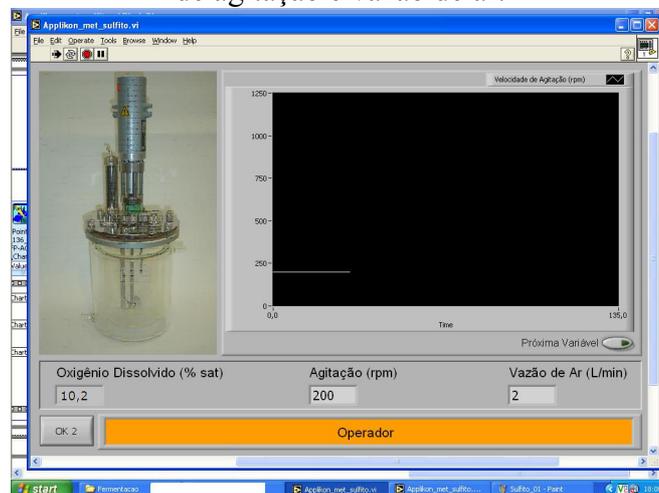


Figura 5. Segunda tela. Neste momento o usuário não tem mais permissão para alterar as condições experimentais e aguarda que o operador clique no botão <OK2>.

Após a adição do catalisador e do reagente o operador (técnico de laboratório) clica no botão <OK2> e o experimento tem início (Figura 6). Nesse momento a barra de *status* altera-se de laranja para verde.

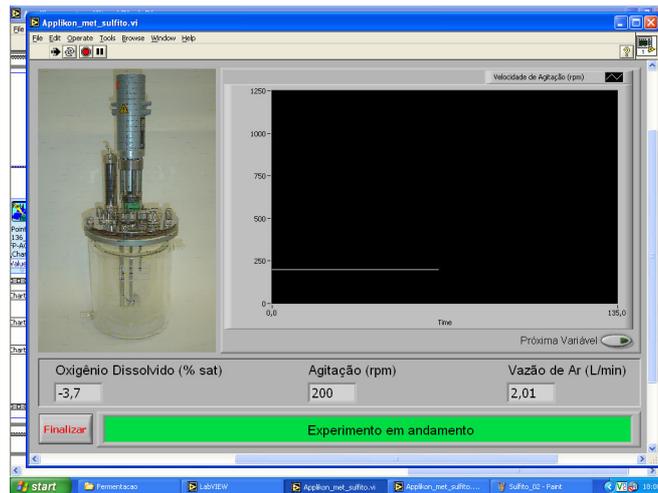


Figura 6. Terceira tela implementada no LabVIEW. Nesta tela o usuário acompanha o valor da variável oxigênio dissolvido, que permanecerá zero até que todo o  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  seja consumido pela reação.

### Descrição do Experimento 2

A Figura 7 mostra a primeira tela do experimento de determinação de  $k_{La}$  pelo método degrau na velocidade de agitação. Novamente na primeira tela o usuário visualiza uma breve descrição do método experimental, e preenche os campos referentes à:

- nome para o arquivo onde os dados serão armazenados (arquivo ASCII);
- intervalo de aquisição das medidas (0,5 s; 1 s, 5 s, 10 s, 30 s, 60 s);
- condições experimentais (velocidade de agitação e vazão de ar);



Figura 7. Primeira tela do experimento de determinação de  $k_{La}$  pelo método degrau na velocidade de agitação.

Após o preenchimento destes campos, o usuário deve clicar no botão <OK1>, que ajusta as condições adotadas no sistema e produz a mudança de cor da barra de status à direita deste botão (de vermelho para amarelo). Ele ficará aguardando que um operador (técnico de laboratório) insira o inóculo no biorreator (adição de 10% do volume contendo levedura de panificação, *Saccharomyces cerevisiae*) e clique novamente no mesmo botão, agora denominado de <OK2>, Figura 8.

Após a inoculação do biorreator com a levedura, o técnico clica no botão <OK2> e surge a tela 3 (Figura 9). A partir deste momento o controle do experimento retorna ao usuário, que realizará alterações nas variáveis operacionais (velocidade de agitação e vazão de ar) de forma a obter os dados experimentais.

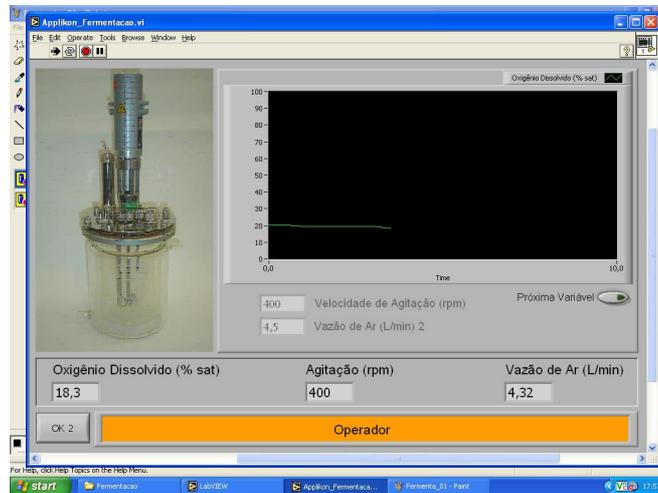


Figura 8. Segunda tela implementada. Nesse momento, o usuário não tem permissão para realizar alterações no processo e aguarda o início do experimento.

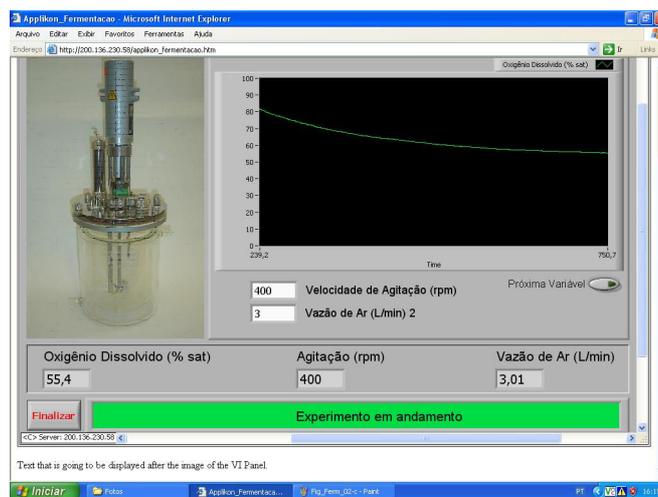


Figura 9. Terceira tela do experimento de determinação de  $k_L a$  pelo método degrau na velocidade de agitação. Através desta tela o usuário realiza alterações nas variáveis operacionais do sistema e acompanha o resultado desta no sistema.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 10 (A) apresenta uma fotografia mostrando o aparato experimental (WebLab) montado no Laboratório de Desenvolvimento e Automação de Bioprocessos (LaDABio) do DEQ/UFSCar. O acesso remoto ao experimento pelos estudantes que o implementaram foi realizado a partir do Laboratório de Simulação (Figura 10 (B)). Os dados experimentais apresentados neste trabalho foram todos obtidos através da realização dos experimentos pela Internet.

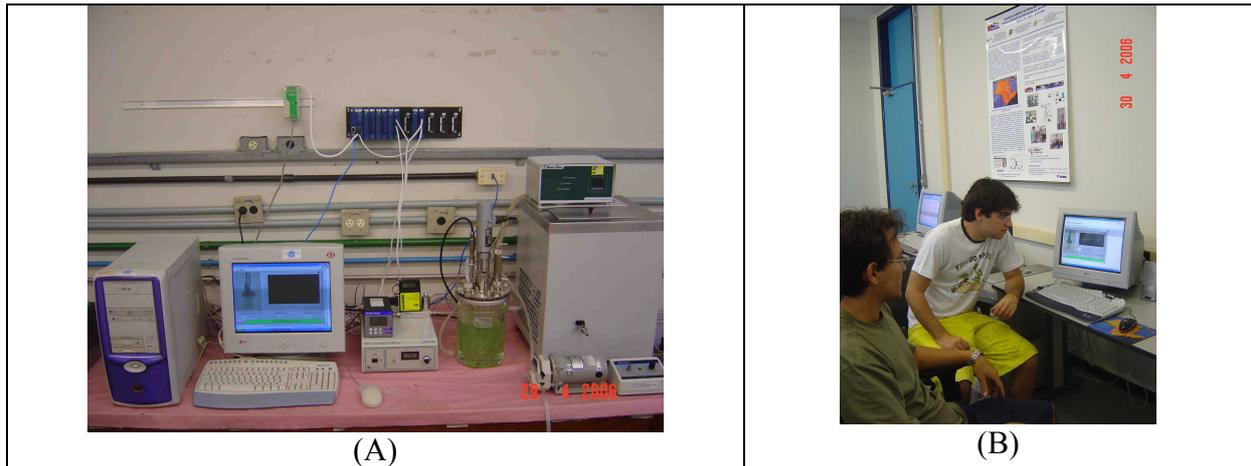


Figura 10: (A) Fotografia ilustrando o aparato experimental montado no LaDABio; (B) Os estudantes Athon A. B. de Lourenço e Daniel S. Ferreira acessam remotamente o WebLab a partir do Laboratório de Simulação do DEQ/UFSCar. O experimento encontra-se fisicamente instalado no LaDABio.

### ***Método do Sulfito Modificado***

A Figura 11 mostra o gráfico construído a partir dos valores experimentais obtidos a partir do arquivo de dados (experimento realizado empregando velocidade de agitação de 800 rpm e vazão de ar de 3,0 L/min). Neste experimento, a partir do valor do intervalo de tempo ( $\Delta t=2.283$  s) em que a concentração de oxigênio ficou zero (ou próxima a zero) calcula-se empregando as equações (2) e (3) o valor do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (neste experimento o valor obtido foi de  $0,085$  s<sup>-1</sup>).

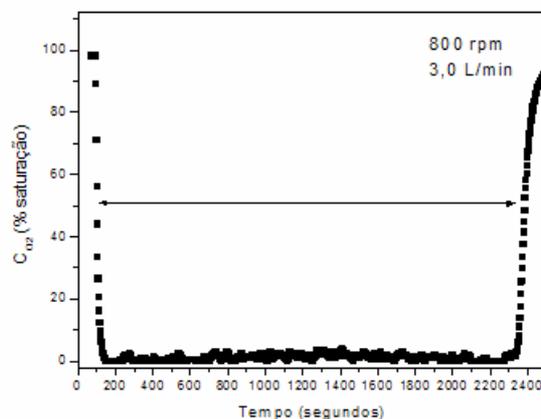


Figura 11: Perfil da concentração de oxigênio dissolvido ao longo de um experimento de determinação de  $k_{L,a}$  empregando o método do sulfito modificado.

### ***Método Degrau na Velocidade de Agitação***

A Figura 12 apresenta o valor adimensional da concentração de oxigênio dissolvido lido pelo eletrodo de oxigênio dissolvido (resposta a um ensaio degrau realizado na seguinte condição operacional: velocidade de agitação de 400 rpm e vazão de ar de 2,0 L/min). O gráfico foi construído após a realização do experimento utilizando as informações gravadas no arquivo de dados obtido durante o experimento.

Na faixa em que os experimentos foram realizados considerou-se a resistência devida ao filme de líquido que cobre a membrana do eletrodo desprezível, de forma que  $\tau_F = 0$ . O tempo de resposta do eletrodo utilizado foi determinado em ensaio degrau sendo seu valor  $\tau_E = 15,1$  segundos (área  $A_{1E}$  abaixo da curva na Figura 12).

A Figura 13 mostra curvas obtidas da resposta do eletrodo (adimensionalizada) após degraus na velocidade de agitação: (A) 400 a 600 rpm e (B) 350 a 500 rpm.

As áreas ( $A_1$ ) abaixo dos gráficos das Figuras 13 (A) e (B) fornecem, respectivamente 68,3 s e 75,3 s. Dessa forma, empregando a equação (17) obtém-se os valores de  $k_L a$  nas duas condições experimentais: (A)  $0,0188 \text{ s}^{-1}$  (600 rpm e 3,0 L/min) e (B)  $0,0166 \text{ s}^{-1}$  (500 rpm e 3,0 L/min).

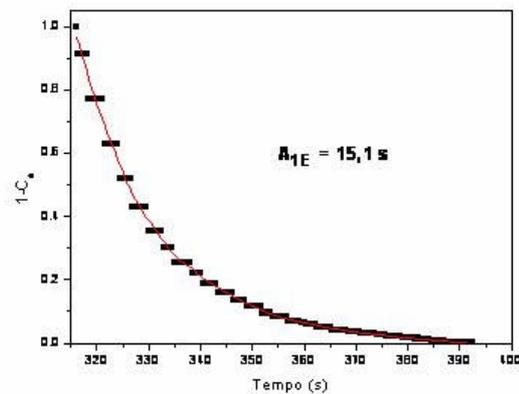


Figura 12. Resposta do eletrodo a um ensaio degrau realizado a 400 rpm e 2,0 L/min em meio sem células.

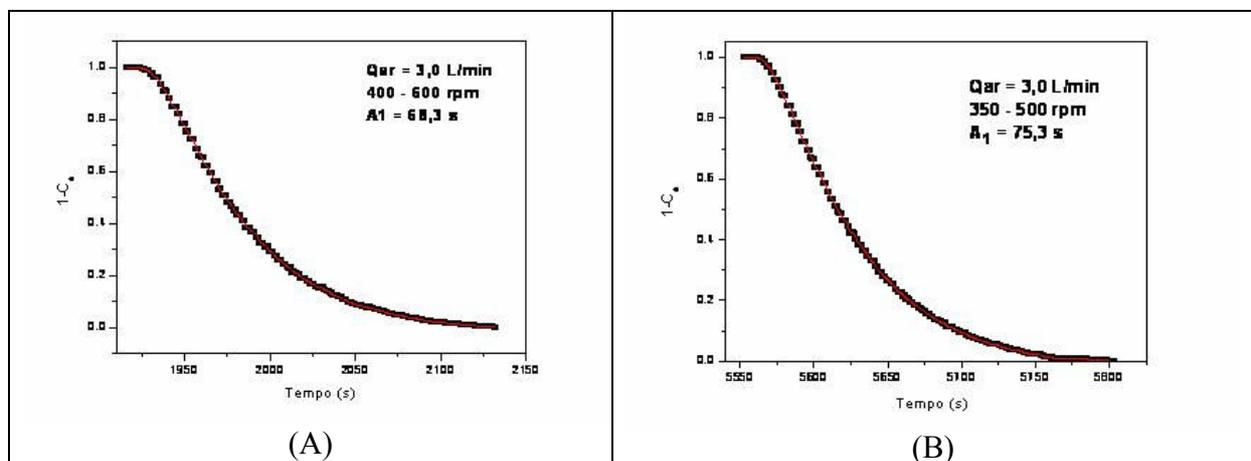


Figura 13: Resposta do eletrodo após degraus na velocidade de agitação: (A) 400-600 rpm; (B) 350-500 rpm;  $Q_{ar} = 3,0 \text{ L/min}$  mantida constante nos dois ensaios degraus.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se o desenvolvimento, implementação e operação remota de WebLab onde se realizam dois experimentos de transferência de massa.

Os WebLabs proporcionam aos estudantes a aquisição de experiência em laboratório a qualquer tempo e possibilita a realização de seus experimentos e relatórios de qualquer local

onde se tenha acesso à Internet. Além disso, a implantação de WebLabs possibilita o compartilhamento de experimentos por diferentes instituições de ensino, permitindo que os estudantes possam ter uma formação mais homogênea (nem todos laboratórios dispõem do mesmo conjunto de práticas experimentais). Os WebLabs permitem que os estudantes entrem em contato com uma nova modalidade de ensino, proporcionando o contato com ferramentas que são comuns hoje na indústria.

O experimento implementado mostrou-se adequado para ser operado a distância, e está disponível para acesso dos demais laboratórios participantes do projeto KyaTera, e posteriormente à comunidade acadêmica.

### ***Agradecimentos***

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo auxílio financeiro para realização deste projeto (Processo 03/08155-1). A.A.B.L agradece a bolsa de Iniciação Científica (FAPESP, Processo 04/16055-0).

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BADINO JR., A.C., ALMEIDA, P.I.F, CRUZ, A.J.G. **Agitation and Aeration: an Automated Didactic Experiment.** Chemical Engineering Education, Flórida, Estados Unidos, v. 38, n. 2, p. 100-1007, 2004.

COOPER, C.M., FERNSTROM, G.A., MILLER, S.A. **Performance of agitated gas-liquid contactors.** Ind. Eng. Chem., v.36, n.6, p.504-09, 1944.

MIGNONE, C.F., ERTOLA, R.J. **Measurement of oxygen transfer coefficient under growth conditions by dynamic model moment analysis.** Journal of Chemical Technology and Biotechnology, v. 34-B, p. 121-126, 1984.

SHIN, D., YOON, E. S., LEE, K. Y., LEE, E. S., **A web-based, interactive virtual laboratory system for unit operations and process systems engineering education: issues, design and implementation.** Computers and Chemical Engineering, **26**: 319-330, 2002.

VILLAÇA, P.R., BADINO JR., A.C., FACCIOTI, M.C.R., SCHIMIDELL, W. **Determination of power consumption and volumetric oxygen transfer coefficient in bioreactor.** Bioprocess Engineering, v. 22, p. 261-265, 2000.

## **WEBLABS IN CHEMICAL ENGINEERING: DESIGN, IMPLEMENTATION AND INTERNET REMOTE OPERATION OF MASS TRANSFER EXPERIMENTS**

***Abstract:*** This work describes the design, implementation and internet remote operation of WebLab for mass transfer experiments in a bench scale reactor (agitated and aerated). The first experiment is based on modified sulfite method to determine the volumetric oxygen mass transfer coefficient ( $k_L a$ ) in different agitated and aerated conditions. The second one calculates the  $k_L a$  based on a step change in stirrer speed during Bakers yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) cultivation. Both experiments were automated and remotely operated by Internet and were adequately to be used as laboratory of remote access with previously scheduling of date and hour.

***Key-words:*** Automation, Distance education, Didactic experiment, WebLab, Mass transfer.