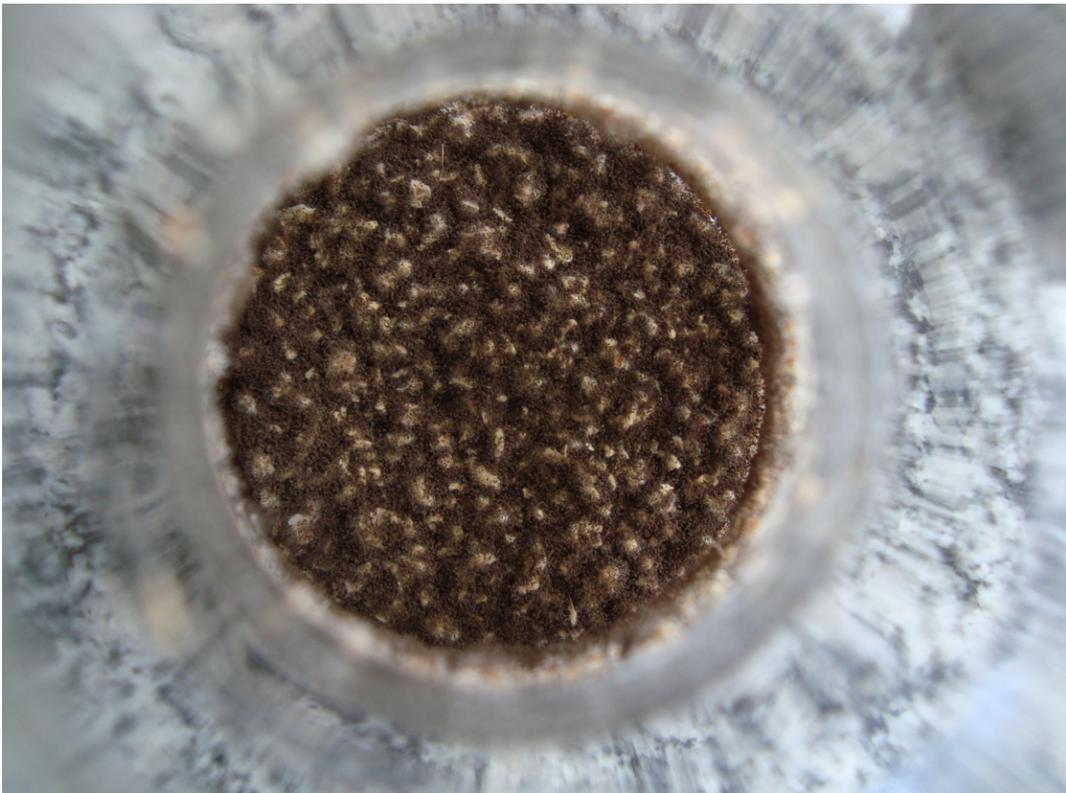


Automação de reatores de fermentação sólida para produção de enzimas



ISSN 1518-7179

Setembro, 2009

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Instrumentação Agropecuária
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 48

Automação de reatores de fermentação sólida para produção de enzimas

Victor Bertucci-Neto
Rafael Frederico Fonseca
Cristiane Sanchez Farinas
Sonia Couri

Embrapa Instrumentação Agropecuária
São Carlos, SP
2009

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Instrumentação Agropecuária

Rua XV de Novembro, 1452
Caixa Postal 741
CEP 13560-970 - São Carlos-SP
Fone: (16) 2107 2800
Fax: (16) 2107 2902
www.cnpdia.embrapa.br
E-mail: sac@cnpdia.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso
Membros: Dra. Débora Marcondes Bastos Pereira Milori,
Dr. João de Mendonça Naime,
Dr. Washington Luiz de Barros Melo
Valéria de Fátima Cardoso
Membro Suplente: Dr. Paulo Sérgio de Paula Herrmann Junior

Supervisor editorial: Dr. Victor Bertucci Neto
Normalização bibliográfica: Valéria de Fátima Cardoso
Tratamento de ilustrações: Valentim Monzane
Capa: Cristiane Sanchez Farinas
Editoração eletrônica: Manoela Campos

1ª edição

1ª impressão (2009): tiragem 300

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**CIP-Brasil. Catalogação-na-publicação.
Embrapa Instrumentação Agropecuária**

-
- B552a Bertucci_Neto, Victor
Automação de reatores de fermentação sólida para produção de enzimas. /
Victor Bertucci-Neto, Rafael Frederico Fonseca, Cristiane Sanchez Farinas,
Sonia Couri. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2009.
17 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos,
ISSN 1518-7179; 48).
1. Automação. 2. Fermentação. 3. Sólido. 4. Instrumentação. 5. Enzimas.
I. Fonseca, Rafael Frederico. II. Farinas, Cristiane Sanchez. III. Couri, Sonia.
IV. Título. V. Série.

CDD 21 ED 660.2815

© Embrapa 2009

Autores

Victor Bertucci-Neto

Engenharia Elétrica, Dr.,
Pesquisador, Embrapa Instrumentação Agropecuária,
C.P. 741, 13560-970,
São Carlos (SP),
victor@cnpdia.embrapa.br

Rafael Frederico Fonseca

Engenharia Elétrica, bolsista,
Embrapa Instrumentação Agropecuária,
C.P. 741, CEP 13560-970,
São Carlos (SP),
rfrederico@gmail.com

Cristiane Sanchez Farinas

Engenharia Química, Dra., Pesquisadora,
Embrapa Instrumentação Agropecuária,
C.P. 741, CEP 13560-970,
São Carlos (SP),
cristiane@cnpdia.embrapa.br

Sonia Couri

Biologia, Dra., Pesquisadora,
Embrapa Agroindústria de Alimentos
Av. das Américas, 29501 - Guaratiba.
Rio de Janeiro, RJ - Brasil - CEP 23020-470
scoury@ctaa.embrapa.br

Apresentação

A celulose é a matéria prima de origem orgânica mais abundante no planeta e é fonte renovável de energia que pode ser utilizada na produção de etanol a partir da matriz lignocelulósica. Essa rota é considerada a mais promissora para aumentar a produção de etanol de forma sustentável. Por sua vez, o desenvolvimento da fermentação sólida tem recebido cada vez mais atenção, não só de pesquisadores, mas também da indústria, devido à maior produtividade de enzimas hidrolíticas, do menor custo, menor produção de dejetos e menor uso de água, quando comparada à fermentação submersa. No estado atual do desenvolvimento dessa tecnologia, faz-se necessário o desenvolvimento de biorreatores em escala industrial, tanto quanto os sistemas que controlam o ambiente microbiano. Este trabalho apresenta uma contribuição da Embrapa Instrumentação Agropecuária visando à automação desses reatores.

Álvaro Macedo da Silva
Chefe Geral

Sumário

Introdução	9
Fermentação Sólida para Produção de Enzimas	10
Automação de Reatores de Fermentação Sólida	10
Conclusões	15
Referências	15

Automação de reatores de fermentação sólida para produção de enzimas

Victor Bertucci-Neto
Rafael Frederico Fonseca
Cristiane Sanchez Farinas
Sonia Couri

Introdução

Na natureza, a principal função dos fungos é a produção de enzimas hidrolíticas para a quebra de moléculas de origem orgânica em outras menores, que podem ser absorvidas na forma de alimento por esses microorganismos. Essa capacidade dos fungos é explorada, hoje em dia, em vários processos industriais na produção de metabólitos utilizados nas indústrias alimentícias, farmacêuticas, agropecuária e, mais recentemente, na produção de combustíveis renováveis (NAGEL, 2002).

Na maioria dos processos já existentes, a fermentação submersa (FS) é a que tem sido usada, podendo ser descrita como o crescimento microbiano em meio nutriente líquido. Esses processos têm sido muito utilizados pela maior facilidade de controle das variáveis internas do biorreator: temperatura do meio durante a fermentação, pH, aeração (oxigênio dissolvido). Na indústria farmacêutica, por exemplo, a produção de antibióticos necessita de um controle preciso dessas variáveis, para manter o padrão de qualidade e a produtividade desejada. Por sua vez, a base industrial voltada para muitos produtos relacionados à fermentação é química, ou seja, foi adaptada a experiência existente em grandes plantas industriais para fermentação submersa.

Os processos de fermentação sólida (FES) têm sido usados há muito tempo nos países orientais para a produção doméstica de derivados de produtos agrícolas (DURAND, 2003). Nos últimos tempos, esses processos têm obtido maior destaque também nos países ocidentais devido à possibilidade de produção de produtos industriais a partir de matérias primas de origem orgânica, tais como a celulose do bagaço de cana, do farelo de trigo, entre outros resíduos agro-industriais (BERTUCCI et al., 2009).

Os processos de FES podem ser descritos como o crescimento de microorganismos em substratos sólidos sem excesso de água. Esses processos são vantajosos com relação aos de FS devido à possibilidade de utilização de resíduos agro-industriais sólidos, pela menor produção de dejetos, menor uso de água, maior produtividade e menor custo na produção de metabólitos por quantidade produzida (SARGANTANIS et al., 1993). Apesar dessas vantagens, a FES ainda não é aplicada em escala industrial devido à dificuldade de controle e monitoração das variáveis durante o processo. Isso ocorre devido à ausência de água livre no processo, a baixa condutividade térmica dos substratos sólidos e a baixa capacidade térmica do ar, que limitam a remoção de calor produzida pelo crescimento fúngico (WEBER et al., 1999). Existem poucas informações sobre instrumentação e automação aplicadas a processos de FES.

Por sua vez, processos de FES são capazes de usar como substratos resíduos da agricultura para produzir substâncias de alto valor agregado, sendo comparativamente mais compensadores em relação ao custo e produtividade, conforme mostrado por Zhuang et al. (2007). Quando comparadas à produção de enzimas chamadas Celulases, capazes de

transformar a celulose das plantas em açúcares que serão transformados em Etanol (este é o processo de produção de Etanol em segunda Geração) por processos de FES, verifica-se uma diminuição de custo de quase três vezes em relação aos processos de FS. É interessante observar que a produção de Celulases por FS é bastante conhecida e estudada em escala industrial, o que não ocorre no caso da produção por FES. Desta forma, existe a possibilidade de aumentar a eficiência de produção e baixar ainda mais os custos.

Fermentação Sólida para Produção de Enzimas

Os comentários feitos aqui sobre as Celulases não são acaso. A celulose é a matéria prima de origem orgânica mais abundante no planeta, é fonte renovável de energia que pode ser utilizada na produção de etanol a partir da matriz lignocelulósica. Essa rota é considerada a mais promissora para aumentar a produção de etanol de forma sustentável (KNAUF e MONIRUZZAMAN, 2004). Desta forma, produzindo-se Celulases com custo acessível tem-se um processo de produção de Etanol a partir de resíduos da agricultura, como por exemplo, bagaço de cana-de-açúcar, e palha, que possuem cerca de 80% da energia da planta.

Os estudos de caracterização desses processos são feitos com base nas propostas de biorreatores já existentes, tais como: os de coluna, bandeja, e tambor rotativo (DURAND, 2003). Para cada um desses são necessários instrumentação e controle específicos, dados pela variabilidade espacial existente nas fermentações em cada uma das configurações. Para o fungo *Rhizopus oligosporus*, crescendo em farelo de soja, foi observado um gradiente de temperatura de $3^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ (WEBER et al., 1999), o que prejudica o crescimento fúngico e podendo inclusive causar a morte microbiana.

Nos últimos anos, a grande maioria dos artigos publicados em FES está relacionada com a escala de laboratório (DURAND, 2003), sendo que poucos trataram do escalonamento do processo. A utilização de biorreatores em escala industrial diminuiria consideravelmente os custos da produção das enzimas hidrolíticas, porém esse escalonamento esbarra em alguns entraves tecnológicos, principalmente a remoção de calor e a retenção de água no substrato (NAGEL et al., 2001). A remoção de calor durante os processos de FES tem sido feita tipicamente através da condução térmica das paredes do biorreator ou do resfriamento por evaporação de água, dependendo do tipo do biorreator. Desde a década de 1990 tem havido um considerável avanço no sentido de se entender muitos dos fenômenos envolvidos nos processos de FES. Significativas melhorias no entendimento em como projetar, operar e escalonar processos de FES têm como base a aplicação de técnicas de modelagem para descrever os fenômenos biológicos e de transporte no sistema (MITCHELL et al., 2000). A modelagem passa pelo estudo de fenômenos físicos e biológicos em constante interação, em micro e macro escalas.

A aeração dos biorreatores de FES é considerada um fator crítico na produtividade do processo. Além de prover O_2 aos microorganismos, também retira o CO_2 produzido, entre outros elementos voláteis expelidos durante a fermentação. A taxa de aeração também pode ser aplicada, de maneira integrada ao controle da umidade relativa e da temperatura do ar passante, ao controle da temperatura durante a fermentação (CASTAÑEDA et al., 1992).

Para cada tipo de biorreator a aeração e a remoção de calor são feitas de modo particular, podendo ser citados alguns tipos já existentes:

- Escala de bancada.

- O biorreator construído em colunas é um dos mais utilizados, este é projetado para pequenas quantidades de substrato, alguns gramas, e serve para estudar o comportamento dos processos com relação ao substrato e o microorganismo utilizado, além do metabólito produzido. A remoção de calor é feita através da parede do mesmo, que está imersa em um banho controlado por termostato com a temperatura desejada pelo usuário. A aeração é feita pela parte inferior da coluna.

- Os biorreatores construídos em tambor rotativo e pás misturadoras horizontais servem para estudo do calor gerado pelo crescimento fúngico em quantidades maiores de substrato, variando de alguns a muitos quilogramas. A aeração é feita através de um cilindro central, que distribui o ar no interior do biorreator, e a cultura recebe troca gases com o meio pela contínua agitação do substrato. A remoção de calor pode ser feita através da aplicação de borrifos de água na cultura e pela convecção do ar interno.

- Escala piloto e industrial

Para os reatores de escala piloto e industrial a remoção de calor se torna crítica devido à grande quantidade de substrato sólido utilizada. O desenvolvimento desses biorreatores tem sido em partes a aplicação em larga escala da tecnologia já utilizada pelas civilizações antigas.

- O biorreator do tipo Koji é provavelmente o mais antigo e também o mais simples. São construídos em bandejas empilhadas, com no máximo 15cm de substrato em cada uma, sendo colocados em ambientes climatizados, com ou sem aeração forçada.

- Outros biorreatores utilizam misturadores para maximizar a exposição do substrato ao ar termostatizado. Normalmente são tambores rotativos ou em leitos mixados. Para o controle do fluxo, umidade relativa e da temperatura do ar algumas estratégias podem ser assumidas. Sendo que qualquer controle das mesmas deve ser baseado na entalpia do processo.

- Para o biorreator em colunas, Castañeda et al. (1992) utilizaram um borbulhador conectado à entrada da coluna de fermentação. A temperatura do ar que passa no mesmo é mesma da temperatura do banho onde estão imersas as colunas e a umidade relativa do ar que entra nas colunas é sempre saturada (100%).

- Nagel et al. (2001) sugerem a utilização de um controlador de fluxo de vapor para controlar a umidade relativa do ar que alimenta um biorreator do tipo tambor rotativo. Esse sistema é constituído por um controlador de fluxo de massa, para o fluxo de ar; um controlador de fluxo de líquido, para o controle da umidade relativa; e um vaporizador de temperatura controlada.

Sargantanis et al. (1993) adotaram o controle da umidade relativa através da divisão de uma linha de ar em duas e posteriormente na soma dessas; uma para a secagem do ar e a para outra para a umidificação até a saturação. A umidade relativa final é a soma das duas, com fluxo estabelecido por controladores de fluxo de massa.

Neste último caso, a temperatura do ar que vai para o biorreator depende da temperatura do ar que entra no sistema, da temperatura do umidificador e do secador, do comprimento da linha de alimentação e da temperatura externa ao sistema.

O pequeno número de trabalhos relacionados à instrumentação e automação de processos de FES mostra a grande lacuna existente na área. Apesar de existirem alguns trabalhos

voltados ao desenvolvimento de novos sensores e técnicas de medidas diretas e indiretas de parâmetros da FES não existem produtos comercializados para medida de crescimento de biomassa, por exemplo. Outra dificuldade é a medida de pH e umidade no meio sólido. E, por sua vez, também são poucos trabalhos relacionando técnicas clássicas, ou modernas de Sistema de Controle, com modelagem física, ou Identificação de Sistemas, juntamente com processos de FES. Este é um vasto campo a ser estudado e mais bem entendido. Bellon-Maurel et al. (2003) apresentaram uma revisão sobre as técnicas de medidas e sensores usados em processos de FES mostrando que o monitoramento requer as medidas de parâmetros ambientais (temperatura, pH, conteúdo e atividade de água), a as do ciclo de carbono (biomassa, concentração de substrato, e CO_2). Entretanto, dada a complexidade e heterogeneidade do meio sólido, estas variáveis não são facilmente acessíveis e mensuráveis. Em geral, métodos diretos de medida de temperatura, pH, e conteúdo de água são usados com sensores clássicos, o que não ocorre em métodos de medida de biomassa, por exemplo.

Ryoo et al. (1991) aplicaram um algoritmo de controle adaptativo a um reator do tipo *balance*. Os conteúdos da biomassa e da matéria seca total foram estimados pela medida da evolução da concentração de CO_2 por meio de um Filtro de Kalman Estendido. O controle adaptativo *on-line* foi usado para fazer estimativas e variar as proporções de ar seco e úmido misturados para alimentar o reator, de forma a controlar a temperatura do leite. Continuando este trabalho, Sargantanis e Karim (1994) usaram o modelo de operação descrito no trabalho de 1993 para fornecer dados de fermentação simulada para o algoritmo de controle. Erros aleatórios foram adicionados ao modelo de predições para simular os erros que aparecem no processo real. As duas variáveis usadas para simular prontamente as variáveis em um sistema real foram a evolução da taxa de CO_2 e o peso total de matéria seca no reator. Estes dados foram convertidos para estimar o conteúdo de biomassa e o total de matéria seca com um Filtro Estendido de Kalman. Um algoritmo de controle foi usado então para variar o fluxo de ar seco e de ar úmido misturados e a taxa de abastecimento de água no meio para controlar a temperatura. Estas investigações mostraram que, embora a temperatura possa ser efetivamente controlada dentro de um reator de balanço usando um algoritmo SISO (*Single Input and Single Output*) isto é, variando a taxa de ar seco em resposta direta à temperatura medida, o controle de umidade do meio é melhor quando se usa um algoritmo MIMO (*Multi Input and Multi Output*), ou seja, variando-se também a taxa de abastecimento de água ao meio em resposta direta ao peso de matéria seca. Agosin et al. (1997) usaram um reator com agitação, em escala de 50 Kg, com medidas *on-line* de temperatura do meio de fermentação, e do ar de entrada e de saída, além das medidas de umidade do ar de entrada, da concentração de CO_2 do ar de saída, e da queda de pressão sobre o reator. O *setpoint* da temperatura do ar de entrada foi controlado por um algoritmo com histerese, sendo o valor manualmente reduzido durante o período de grande geração de calor. A temperatura do leite foi controlada pela manipulação do *setpoint* de umidade do ar de entrada de acordo com um controle em cascata com um algoritmo PID (Proporcional + Integral + Derivativo), baseado nas medidas de temperatura do meio. Por sua vez, a umidade do ar de entrada foi controlada por meio de um algoritmo *on-off* de controle do vapor na linha de vapor de água. Fernandez et al. (1996) caracterizaram a resposta da temperatura do ar de entrada e da umidade relativa devido a mudanças em diferentes *setpoints*. Usando o mesmo esquema de controle liga-desliga eles obtiveram uma resposta bastante oscilatória no comportamento da temperatura e umidade do ar de entrada; no entanto, um resultado satisfatório foi obtido no controle de temperatura do meio.

Uma das características de processos com arraste de calor por meio de resfriamento evaporativo em meio sólido é que a umidade do meio tende a diminuir muito, ou seja, o

conteúdo de água do meio diminui e isso pode diminuir a produção de biomassa. Nagel (2002) usou um reator do tipo tambor com agitação, de 60 litros, com instrumentação e automação de forma que um estimador PI indicava a diminuição do conteúdo de água do meio. Após certo valor crítico, pequenos volumes de água eram borrifados no meio de fermentação sendo procedidos por um período de agitação do tambor para homogeneizar.

Em resumo ao que foi discutido até aqui, os processos de FES são objeto de estudos para produção em várias áreas (fármacos, enzimas em geral, por exemplo), mas carecem de resultados aplicáveis em grande escala. O diminuto número de trabalhos voltados à instrumentação e automação desses processos chama atenção, principalmente devido ao grande avanço existente na integração entre as áreas de *software*, *hardware* e sensores. Por sua vez, as técnicas de Sistemas de Controle aplicadas nesses processos são parcamente descritas e acredita-se que uma grande contribuição pode ser feita na área com conseqüente aumento de eficiência.

O Brasil, com sua enorme diversidade biológica, possui microrganismos que ainda deverão ser estudados e catalogados conforme sua caracterização. Uma das maneiras de caracterizar a atuação de diferentes fungos é através de FES por meio de curvas de crescimento cinético, as quais indicam a produção de vários grupos de enzimas para cada espécie estudada, como por exemplo, o que foi descrito por Durand (2003). Conhecendo-se a atuação de cada espécie na presença de diferentes substratos e condições de operação em umidade e temperatura possibilita a classificação segundo as características para cada aplicação, ou produto desejado. A etapa posterior à escolha de cada processo caracterizado é a de escalonamento e estudo de viabilidade comercial do processo.

Automação de Reatores de Fermentação Sólida

No Laboratório de Agroenergia da Embrapa Instrumentação Agropecuária, há um reator de FES em contínuo desenvolvimento tecnológico dotado de um sistema de controle de fluxo e umidade do ar. Esses parâmetros são comandados pelo usuário, que estabelece para a entrada do biorreator o fluxo de ar passante e a umidade relativa. O princípio de funcionamento do sistema é manter uma razão entre fluxo de ar seco com outro de ar saturado com água de forma a obter um fluxo de ar constante com umidade também constante, conforme a necessidade do operador. Conforme mostra o diagrama na Figura 1, o sistema é composto de uma entrada de ar saturado de água e outra de ar seco.

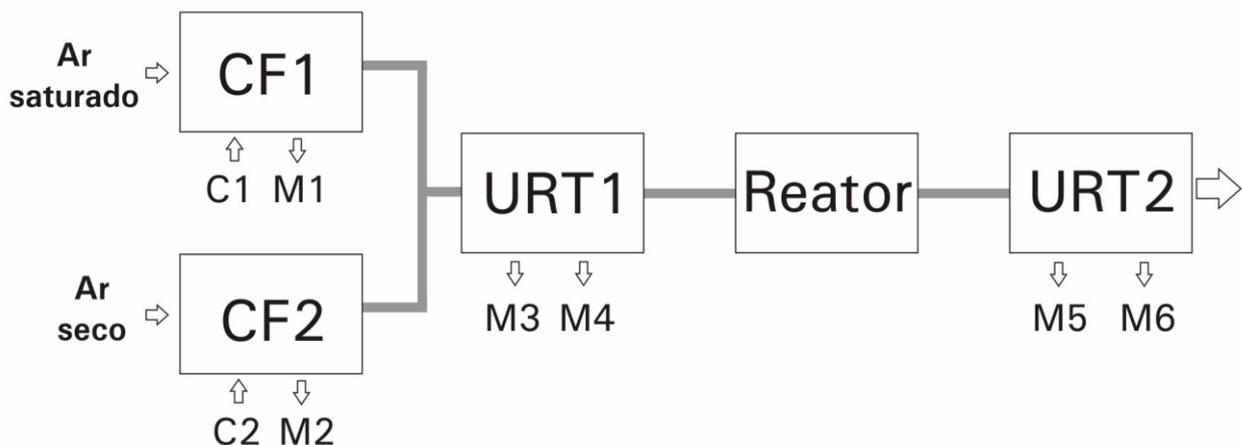
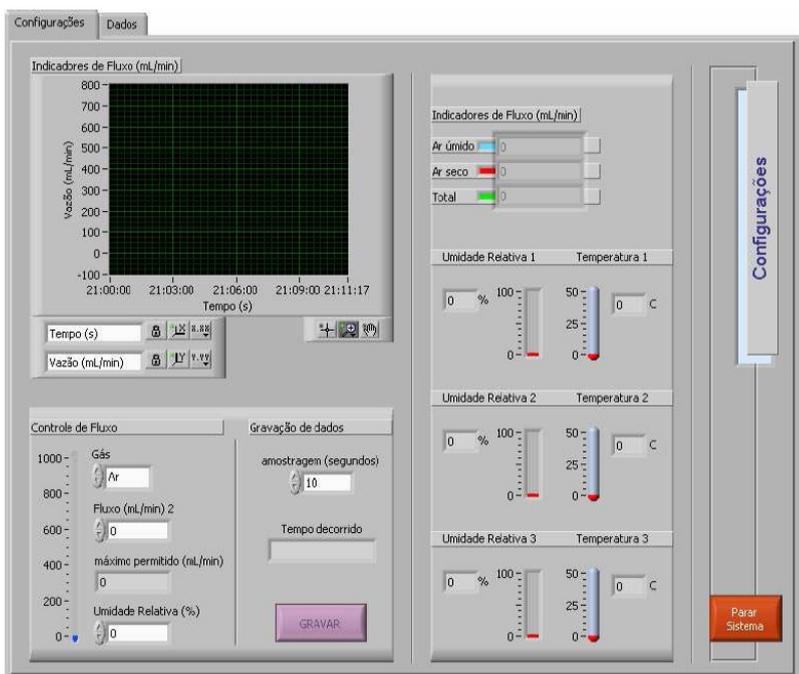


Fig. 1. Diagrama em blocos do sistema de controle de fluxo de ar.

Cada uma dessas linhas de entrada possui um controlador de fluxo de massa (CF1 e CF2) que são comandados por sinais elétricos entre 0 e 5 VDC, através dos sinais de comando C1 e C2. Os controladores possuem saída de medida de fluxo indicadas por M1, e M2. As duas tubulações de ar seco e úmido são ligadas entre si para fazer a mistura ajustada pelos comandos. Um conjunto sensor mede a umidade relativa e a temperatura do ar resultantes dessa mistura, indicados por URT1. Um segundo conjunto sensor mede a umidade e a temperatura resultantes do ar de saída do reator. As medidas de temperatura e umidade de cada conjunto sensor são dadas por M3, M4, M5, e M6.

Nos experimentos foram usados sensores do tipo estado sólido de fluxo, de umidade, de pressão relativa (para a linha de alimentação de ar), e de temperatura. Para efetuar o controle de fluxo de massa em linha foram usados dois controladores sendo um deles para a linha de ar saturado, e outro para a linha de ar seco. O sensor de umidade usado também possui um resistor de platina para medida de temperatura. Desta forma, a expressão matemática indicada pelo fabricante para cálculo da umidade em função da diferença de potencial elétrico entre os terminais do sensor também inclui a compensação de temperatura. Foram usados três sensores de fluxo alimentados em corrente contínua com $10 \pm 0,02$ volts, com saída entre 0 a 5 volts, para um fluxo entre 0 a 1000 mililitro/minuto. Os controladores de fluxo de massa controlam o fluxo de ar entre 0 e 1 litro/minuto, conforme o comando via sinal de corrente contínua entre 0 e 5 volts. As medidas são armazenadas através de uma placa de aquisição de dados, a qual possui, entre outras características, 16 canais de entradas analógicas (ou oito entradas diferenciais) e dois canais de saídas analógicas para acionamento externo. Cada canal de entrada, ou de saída, usado no sistema para medida de um sensor, ou de acionamento de um controlador, é configurado individualmente de acordo com as características específicas. A seqüência de medidas, armazenamento de dados, desenhos de gráficos em tempo real, e acionamento dos controladores de fluxo de massa, é feita com auxílio de um pacote de programação por interface gráfica, chamado *LabView*, da *National Instruments*. Este pacote permite o desenvolvimento de instrumentos virtuais que fazem interface com placas de aquisição de



dados, a exemplo do que foi usado no sistema. Na Figura 2 vê-se a interface gráfica de um instrumento virtual desenvolvido no trabalho usado para aquisição e armazenamento de dados, e acionamento dos controladores de fluxo de massa. O programa desenvolvido possibilita o uso de até 32 sensores, com conversão de dados de voltagem para as unidades desejadas. As medidas e acionamentos são feitas em intervalos de tempo escolhidos pelo operador, bastando para isto acionar o botão de amostragem de dados.

Fig. 2. Detalhe do instrumento virtual desenvolvido para o sistema de aquisição de dados e controle de fluxo de ar.

O sistema foi posto em funcionamento de forma que um fluxo de ar totalmente seco promovesse a secagem de um substrato composto de farelo de trigo, com massa igual a 2,45 gramas, previamente secado em estufa, durante várias horas. O substrato foi colocado em uma coluna de vidro imersa em um banho com água, de forma a simular um reator de fermentação sólida. Em seguida foi ajustado o fluxo de ar seco e úmido para garantir a umidade do ar de entrada com umidade relativa igual a 80%. Foram medidos e armazenados os parâmetros M1 a M6, com amostragem de 1 segundo cada canal. Na Figura 3 observa-se o resultado do comportamento do degrau de umidade do ar de entrada da coluna, UR1, e da umidade relativa do ar de saída da coluna, UR2. Observa-se, como esperado, a concentração de umidade em função do tempo no substrato previamente seco, tendendo ao valor ajustado pelo controle. Como não houve atividade biológica considerável no meio (o substrato não foi inoculado), as temperaturas do ar de entrada e saída (T_e e T_s , respectivamente) se equipararam. Dessa forma, a temperatura do ar variou principalmente devido à variação do ar de entrada do compressor de ar, ao longo do tempo. O ajuste de umidade em 80% do experimento foi iniciado às 17h30min e durou cerca de 750 minutos.

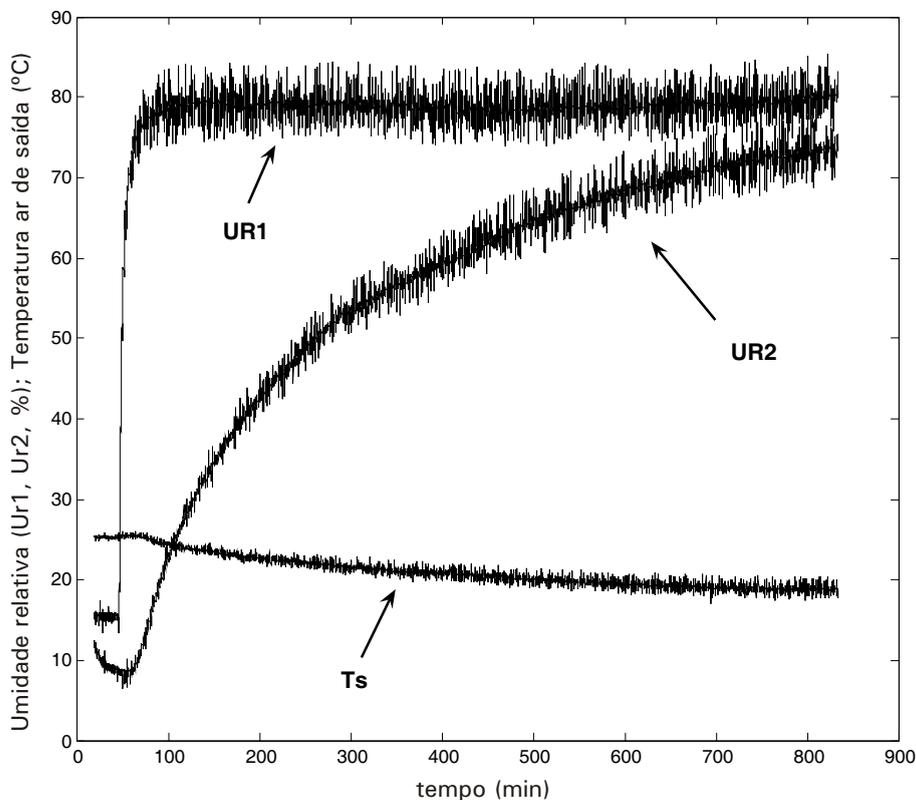


Fig. 3. Degrau de umidade de 80% (UR1) em substrato e resposta de saída (UR2), com medida de temperatura de do ar de saída (T_s).

Conclusões

O sistema que está em desenvolvimento permite versatilidade suficiente para trabalhar em diferentes faixas de fluxo e pode manter com bastante fidelidade o que for comandado pelo operador. Entretanto, o ajuste de umidade depende das variações da temperatura e da umidade do ar entregue pelo compressor. Uma maneira de contornar essa situação é garantir que essas variáveis se mantenham constantes em uma faixa restrita, ou implementar uma malha de controle a mais no programa para que o sistema possa comandar pequenos desvios de umidade desejada aumentando ou diminuindo os fluxos de

ar seco e ar úmido. Entretanto, com os resultados obtidos também é possível modelar a resposta a degrau de umidade referente à massa de substrato utilizada, aproximando-a de um sistema de primeira ordem com atraso de tempo. Dessa forma será possível realizar experimentos de fermentação sólida de forma a investigar as melhores faixas de operação em relação à umidade, temperatura, e fluxo de ar, as quais determinam as maiores taxas de produção de enzimas de interesse ao trabalho.

Referências

AGOSIN, E.; PEREZ-CORREA, R.; FERNANDEZ, M.; SOLAR, I.; CHIANG, L. An aseptic pilot bioreactor for solid substrate cultivation processes. In: WISE, D. L. (Ed.). **Global Environmental Biotechnology**. Dordrecht: Kluwer, 1997. p. 233-43.

BELLON-MAUREL, V.; ORLIAC, O.; CHRISTEN, P. Sensors and measurements in solid state fermentation: a review. **Process Biochemistry**, London, v. 38, p. 881-896, 2003.

BERTUCCI-NETO, V.; FONSECA, R. F.; FRANCISCO, R. A.; FARINAS, C. S.; COURI, S. Controle automático de fluxo e ajuste de umidade do ar de alimentação em reatores de fermentação sólida. In: SIMPOSIO NACIONAL DE BIOPROCESSOS - SINAFERM, 17., 2009, Natal. [Anais...] Natal: UFRN, 2009. 1 Pen Drive.

CASTAÑEDA, G. S.; HERNÁNDEZ, M. R. T.; LONSANE, B. K.; NAVARRO, J. M.; ROUSOS, S.; DUFOUR, D.; RAIMBAULT, M. On-line Automated Monitoring and Control Systems for CO₂ and O₂ in Aerobic and Anaerobic Solid-State Fermentations. **Process Biochemistry**, London, v. 29, p. 13-24, 1992.

DURAND, A. Bioreactor Designs for Solid State Fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 13, p. 113-125, 2003.

FERNANDEZ, M.; PEREZ-CORREA, J. R.; SOLAR, I.; AGOSIN, E. Automation of a solid substrate cultivation pilot reactor. **Bioprocess Engineering**, New York, v. 16, p. 14, 1996.

KNAUF, M.; MONIRUZZAMAN, M. Lignocellulosic biomass processing: a perspective. **International Sugar Journal**, Glamorgan, v. 106, p. 147-150, 2004.

MITCHELL, D. A.; KRIEGER, N.; STUART, D. M.; PANDEY, A. New developments in solid-state fermentation II. Rational approaches to the design, operation and scale-up of bioreactors. **Process Biochemistry**, London, v. 35, p. 1211-1225, 2000.

NAGEL, F. J. I. **Process Control of Solid-State Fermentation, simultaneous control of temperature and moisture content**. 2002. PhD (Thesis) - University of Wageningen, Wageningen.

NAGEL, F. J. I.; TAMBPER, J.; BAKKER, M. S. N.; RINZEMA, A. Temperature Control In A Continuously Mixed Bioreactor For Solid-State Fermentation. **Biotechnology & Bioengineering**, New York, v. 72, p. 219-230, 2001.

RYOO, D.; MURPHY, V. G.; KARIM, M. N.; TENDERDY, R. P. Evaporative temperature and moisture control in a rocking reactor for solid substrate fermentation. **Biotechnology Techniques**, Kew, v. 5, p. 19-24, 1991.

SARGANTANIS, J.; KARIM, M. N.; MURPHY, V. G.; RYOO, D. Effect Of Operating Conditions On Solid Substrate Fermentation. **Biotechnology & Bioengineering**, New York, v. 42, p. 149-158, 1993.

SARGANTANIS, J. G.; KARIM, M. N. Multivariable iterative extended kalman filter based adaptive control: case study of solid substrate fermentation. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 33, p. 878-88, 1994.

WEBER, F. J.; TRAMPER, J.; RINZEMA, A. A Simplified Material and Energy Balance Approach for Process Development and Scale-Up of *Coniothyrium minutans* Conidia Production by Solid-State Cultivation in a Packed-Bed Reactor. **Biotechnology & Bioengineering**, New York, v. 65, p. 447-458, 1999.

ZHUANG, J.; MARCHANT, M. A.; NOKES, S.; STROBEL, H. Economic Analysis of Cellulase Production Methods for Bio-ethanol. **Applied Engineering in Agriculture**, St Joseph, v. 23, n. 5, p. 679-687, 2007.



Embrapa Instrumentação Agropecuária

**Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

