UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS

Curso de Pós-Graduação em
Tecnologia Bioquímico-Farmacêutica
Área de Tecnologia de Fermentações

INFLUÊNCIA DE VAZÃO EXPONENCIALMENTE DECRESCENTE
DO MOSTO DE MELAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO
PROCESSO DESCONTÍNUO ALIMENTADO DE
FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA

JOÃO CARLOS MONTEIRO DE CARVALHO

Dissertação para obtenção do grau de
MESTRE

Orientador:

Prof. Dr. EUGÊNIO AQUARONE

São Paulo
1989

Aos meus pais

À Cristina

Às minhas irmãs

Aos meus tios

A G R A D E C I M E N T O S

— Ao Professor Dr. Eugênio Aquarone, pela amizade e orientação neste trabalho.

— Aos Professores Dr. Sunao Sato, Dr. Orlando Zaccanaro Júnior e Dr. Milton Leôncio Brazzach, pelo apoio e sugestões.

— Ao Professor Dr. Walter Borzani, pelo estímulo, sugestões e críticas.

— Aos Farmacêuticos Kleber A. Almeida, Oneida H.R. Rende e Yovanna N.L. Bates e aos Técnicos Dante A. Moraes e Nilton M. Bloisi pela colaboração na parte experimental do trabalho. Ao Magno M.T. de Assis e à Candida C. Maciel pelo cuidado com o laboratório.

— Aos Docentes e Funcionários do Departamento de Tecnologia Bioquímico-Farmacêutica, pelo incentivo e trabalho administrativo.

— A Yvone de Abreu pelo trabalho datilográfico.

— A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio financeiro.

— A Usina Estêr (Cosmópolis-SP), pela doação do melão utilizado nos experimentos.

— Ao Cassiano Pereira Nunes pelo trabalho gráfico.

R E S U M O

Estudou-se o processo descontínuo alimentado de fermentação alcoólica, utilizando-se mosto de melaço de cana-de-açúcar e Saccharomyces cerevisiae na forma de fermento prensado.

Foram analisados a influência da vazão de alimentação exponencialmente decrescente e do tempo de enchimento do fermentador no comportamento do sistema, considerando os seguintes parâmetros:

- produtividade em etanol e em células,
- rendimento em etanol e
- razão de crescimento celular.

A B S T R A C T

The fed-batch ethanol fermentation of sugar-cane blackstrap molasses by the action of Saccharomyces cerevisiae (pressed yeast) was studied.

The influence of exponentially decreasing feeding rates and of the fermentor filling up time on the system behavior was analysed considering the following parameters:

- ethanol and cell productivities,
- ethanol yield and
- cell growth ratio.

N O M E N C L A T U R A

- ART = açúcares redutores totais, calculados como glicose.
- c = constante de integração indefinida.
- E = concentração de etanol no meio isento de leveduras (g/L).
- F = vazão de alimentação da dorna em um instante t (L/h).
- F₀ = vazão inicial de alimentação da dorna (L/h).
- g = aceleração da gravidade.
- K = constante de adição (h^{-1})
- M_e = massa total de etanol produzida (g).
- M_{ef} = massa total de etanol produzida até o fim da fermentação (g).
- M'_{ef} = massa total de etanol produzida até o final da fase de enchimento da dorna (g).
- M_S = massa de ART (g).
- M_{Sa} = massa total de ART adicionada à dorna até o final da fase de enchimento da dorna (g).
- M_{Sc} = massa total de ART consumida (g).
- M_{Sr} = massa total de ART residual na dorna (g).
- M_X = massa total de células secas (g).

- M_{X0} = massa total de células secas no início da fermentação.
- M_{Xf} = massa total de células secas no final da fermentação.
- M'_{Xf} = massa total de células secas no final da fase de enchimento.
- N = normalidade da solução de $K_2Cr_2O_7$.
- P_e = produtividade em etanol no final da fermentação (g/L.h).
- $\bar{P}_e$ = produtividade média em etanol no final da fermentação (g/L.l).
- P'_e = produtividade em etanol no final da fase de enchimento da dorna (g/L.h).
- $\bar{P}'_e$ = produtividade média em etanol no final da fase de enchimento da dorna (g/L.h).
- P_X = produtividade em células no final da fermentação (g/L.h).
- $\bar{P}_X$ = produtividade média em células no final da fermentação (g/L.h).
- P'_X = produtividade em células no final da fase de enchimento da dorna (g/L.h).
- $\bar{P}'_X$ = produtividade média em células no final da fase de enchimento da dorna (g/L.h).
- q.s.p. = quantidade suficiente para.
- r = coeficiente de correlação linear (método dos mínimos quadrados).

- R_X = razão de crescimento celular no final da fermentação (%).
- $\bar{R}_X$ = razão de crescimento celular média no final da fermentação (%).
- R'_X = razão de crescimento celular no final da fase de enchimento da dorna (%).
- $\bar{R}'_X$ = razão de crescimento celular média no final da fase de enchimento da dorna (%).
- S = concentração de ART no meio isento de leveduras (g/L).
- S_0 = concentração de ART no mosto de alimentação (g/L).
- t = tempo (h).
- V = volume da solução de $K_2Cr_2O_7$ (ml).
- V_a = volume da solução de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra (ml).
- V_{ad} = volume de mosto adicionado à dorna até um instante t .
- V_b = volume da solução de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação do branco (ml).
- V_d = volume de meio na dorna (L).
- V_f = volume final de meio na dorna (L).
- V_X = fração do volume de meio ocupado pelas células (%).
- V_0 = volume de inóculo (3,0 L).
- X = concentração celular em base seca (g/L).
- Δ = diferença relativa entre duas grandezas (valor esperado e valor obtido) (%).

- Δt = intervalo de tempo.
- $\Delta \bar{P}_e$ = aumento relativo de $\bar{P}_e$ (%).
- η = rendimento em etanol (%).
- θ = tempo total de fermentação (h).
- θ' = tempo de alimentação da dorna (h).
- δ = desvio padrão
- 11,5 = equivalente-grama do álcool etílico na reação com $K_2Cr_2O_7$.
- 0,511 = relação estequiométrica da transformação de glicose em etanol.

S U M Á R I O

Pág.

RESUMO	IV
ABSTRACT	V
NOMENCLATURA	VI
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3. MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 - Matéria-prima	19
3.2 - Inóculo	20
3.3 - Equipamento	20
3.4 - Tratamento das amostras	22
3.4.1 - Tratamento das amostras	23
3.4.2 - Técnicas analíticas	23
3.4.2.1 - Medida do valor do pH	23
3.4.2.2 - Medida da acidez total	25
3.4.2.3 - Determinação da concentra- ção celular	25
3.4.2.4 - Determinação da porcenta- gem de células mortas	25
3.4.2.5 - Determinação do volume ocu- pado pelas células no meio...	26
3.4.2.6 - Determinação da concentra- ção de ART	26
3.4.2.7 - Determinação da concentra- ção de etanol	29

3.5 - Métodos de cálculo	30
3.5.1 - Cálculo das massas de ART e η_{an} na dorna	31
3.5.2 - Cálculo da massa de ART consumida pela levedura	31
3.5.3 - Cálculo do rendimento	31
3.5.4 - Cálculo da produtividade em η_{an}	31
3.5.5 - Cálculo da produtividade em células	32
3.5.6 - Cálculo da razão de crescimento celular	32
4. RESULTADOS	33
4.1 - Experimentos do grupo I ($\Theta^1=7h$; $K=0$)	35
4.1.1 - Experimento nº 1	36
4.1.2 - Experimento nº 2	38
4.1.3 - Experimento nº 3	40
4.1.4 - Experimento nº 4	42
4.1.5 - Experimento nº 5	44
4.1.6 - Apresentação dos resultados obtidos no grupo I de experimentos	46
4.1.7 - Comentários preliminares	46
4.2 - Experimentos do grupo II ($\Theta^1=7h$; $K=0,2h^{-1}$)	48
4.2.1 - Experimento nº 6	49
4.2.2 - Experimento nº 7	51

Continuação	Pág.
4.2.3 - Experimento nº 8	53
4.2.4 - Experimento nº 9	55
4.2.5 - Experimento nº 10	57
4.2.6 - Apresentação dos resultados obtidos no grupo II de expe rimentos	59
4.2.7 - Comentários preliminares	59
4.3 - Experimentos do grupo III ($\Theta' = 7h; K = 0,4h^{-1}$) .	61
4.3.1 - Experimento nº 11	62
4.3.2 - Experimento nº 12	64
4.3.3 - Experimento nº 13	66
4.3.4 - Experimento nº 14	68
4.3.5 - Experimento nº 15	70
4.3.6 - Apresentação dos resultados obti dos no grupo III de experimentos..	72
4.3.7 - Comentários preliminares	72
4.4 - Experimentos do grupo IV ($\Theta' = 7h; K = 0,6 h^{-1}$)	74
4.4.1 - Experimento nº 16	75
4.4.2 - Experimento nº 17	77
4.4.3 - Experimento nº 18	79
4.4.4 - Experimento nº 19	81
4.4.5 - Experimento nº 20	83
4.4.6 - Apresentação dos resultados obti dos no grupo IV de experimentos...	85
4.4.7 - Comentários preliminares	85

4.5 - Experimentos do grupo V ($\Theta'=5h;K=0$)	87
4.5.1 - Experimento nº 21	88
4.5.2 - Experimento nº 22	90
4.5.3 - Experimento nº 23	92
4.5.4 - Experimento nº 24	94
4.5.5 - Experimento nº 25	96
4.5.6 - Apresentação dos resultados obti- dos no grupo V de experimentos ...	98
4.5.7 - Comentários preliminares	98
4.6 - Experimentos do grupo VI ($\Theta'=5h;K=0,2h^{-1}$) ..	100
4.6.1 - Experimento nº 26	101
4.6.2 - Experimento nº 27	103
4.6.3 - Experimento nº 28	105
4.6.4 - Experimento nº 29	107
4.6.5 - Experimento nº 30	109
4.6.6 - Apresentação dos resultados obti- dos no grupo VI de experimentos...	111
4.6.7 - Comentários preliminares	111
4.7 - Experimentos do grupo VII ($\Theta'=5h;K=0,4h^{-1}$) .	113
4.7.1 - Experimento nº 31	114
4.7.2 - Experimento nº 32	116
4.7.3 - Experimento nº 33	118
4.7.4 - Experimento nº 34	120
4.7.5 - Experimento nº 35	122
4.7.6 - Apresentação dos resultados obti- dos no grupo VII de experimentos..	124
4.7.7 - Comentários preliminares	124

4.8 - Experimentos do grupo VIII ($\Theta'=5h; K=0,6h^{-1}$) .	126
4.8.1 - Experimento nº 36	127
4.8.2 - Experimento nº 37	129
4.8.3 - Experimento nº 38	131
4.8.4 - Experimento nº 39	133
4.8.5 - Experimento nº 40	135
4.8.6 - Apresentação dos resultados obti- dos no grupo VIII de experimentos...	137
4.8.7 - Comentários preliminares	137
4.9 - Experimentos do grupo IX ($\Theta'=5h; K=0,8h^{-1}$) ..	139
4.9.1 - Experimento nº 41	140
4.9.2 - Experimento nº 42	142
4.9.3 - Experimento nº 43	144
4.9.4 - Experimento nº 44	146
4.9.5 - Experimento nº 45	148
4.9.6 - Apresentação dos resultados obti- dos no grupo IX de experimento	150
4.9.7 - Comentários preliminares	150
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	152
5.1 - Introdução	152
5.2 - Produção de etanol	155
5.2.1 - Produtividade em etanol	155
5.2.1.1 - Produtividades em etanol em função da constante de adi- ção (K)	155

Continuação

Pág.

5.2.1.2 - Produtividades em etanol em função do tempo de enchimen- to da dorna (Θ')	160
5.2.2 - Rendimento em etanol	163
5.2.2.1 - Rendimento em etanol em fun- ção da constante de adição (K) e da produtividade média em etanol ($\bar{P}_e$)	163
5.2.2.2 - Rendimento em etanol em fun- ção do tempo de enchimento da dorna (Θ')	167
5.3 - Produção de células	169
5.3.1 - Razão de crescimento celular	169
5.3.1.1 - Razão de crescimento celular em função da constante de adição (K)	169
5.3.1.2 - Razão de crescimento celular em função do tempo de enchi- mento da dorna (Θ')	175
5.3.2 - Produtividade em células	178
5.3.2.1 - Produtividade em células em função da constante de adição (K)	178
5.3.2.2 - Produtividade em células em função do tempo de enchimento da dorna (Θ')	185

Continuação

Pág.

5.4 - Correlação entre produção de etanol e crescimento celular	188
5.5 - Comparação de produtividades em etanol <u>en</u> tre vazão linearmente decrescente e vazão exponencialmente decrescente	193
6. CONCLUSÕES	195
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	198
8. APÊNDICE I	214
Técnica utilizada no enchimento da dorna nos experimentos com vazão de alimentação cons- tante	
9. APÊNDICE II	217
Técnica utilizada no enchimento da dorna nos experimentos com vazão de alimentação expo- nencialmente decrescente	

1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem tradição no uso de etanol como combustível desde a década de 20, quando o melaço e os excedentes da produção de cana eram convertidos para etanol anidro pelas próprias usinas produtoras de açúcar, em destilarias anexas, e vendidas ao governo para serem adicionados à gasolina. Porém esta adição sempre foi irregular, pois quanto maior o excedente, maior a proporção de etanol na gasolina e quando não havia excedente, ou ainda nas entre-safras, o teor de etanol era nulo (37).

A crise do petróleo, na década de 70, levou à implantação em 1975 do Programa Nacional do Alcool (PRO-ALCOOL) com o objetivo de substituir a maior parte possível dos combustíveis derivados do petróleo por etanol obtido a partir de cana-de-açúcar. Foram criadas inúmeras destilarias autônomas e passou-se a ter uma maior constância na proporção de etanol na gasolina, além de ser introduzido no mercado o etanol hidratado combustível. Isso levou a um grande aumento da produção nacional de etanol, como pode ser observado na tabela 1.1 (34).

No cenário econômico de 1986, houve uma queda substancial do preço do barril de petróleo, o que levou a generalizados questionamentos dos programas energéticos alternativos. O PROALCOOL deparou-se com uma fase

TABELA 1.1 - Evolução da produção de etanol no Brasil(34)

Safrá	Produção Total (anidro + hidratado) (m ³)
1970/71	637238
1972/73	680972
1974/75	624985
1976/77	664022
1978/79	2.490603
1980/81	3.706375
1982/83	5.823339
1984/85	9.251552
1986/87	10.506712
1988/89	11.713271
1989/90	13.301200*

* = estimativa

crítica em que o etanol passou a ser mais caro que a gasolina. No momento atual a comparação direta entre os preços dos combustíveis líquidos e etanol é desvantajosa. Mas certamente é errônea a utilização de referencial imediato e comparação direta. Deve-se dar um tratamento adequado aos custos e benefícios do Programa Nacional do Ál-cool. Apesar das particularidades de cada país, deve-se considerar: a) custo social de substituição de importações e/ou incremento de exportações; b) custo social de poluição ambiental; c) benefício regulador do mercado internacional de açúcar (70).

O etanol na forma anidra substitui com vantagens os aditivos do tipo "chumbo tetraetila" no tocante ao rendimento, sem os inconvenientes da poluição ambiental (7, 19, 70) e na forma hidratada, utilizado como combustível, é comprovadamente menos tóxico que a gasolina (7).

Além de ser menos poluente, o etanol é uma fonte de energia proveniente de matéria-prima renovável, o que contribui positivamente para o escolhermos como combustível.

Seria difícil manter a utilização do etanol hidratado como combustível se não houvesse perspectivas de que a obtenção de etanol por processo fermentativo venha a se tornar auto-suficiente. Mas sabemos que o custo da produção de etanol tem diminuído seja pelo aumento do rendimento e produtividade da fermentação, seja pelo melhor aproveitamento da matéria-prima e separação do etanol. Nes

se sentido, há alguns trabalhos avaliando a questão da evolução da produção de etanol no Brasil (5, 6).

A produção de etanol no Brasil concentra-se basicamente na utilização de matérias-primas açucaradas, como o melaço e a cana-de-açúcar (84). No entanto há a possibilidade de utilização de matérias-primas tradicionalmente não utilizadas para a produção de etanol, como culturas complementares à cana-de-açúcar ou sua substituição em determinadas regiões (85).

Há trabalhos que procuram dar subsídios para adoção de processos que utilizem matérias-primas alternativas tais como mandioca (11, 75, 77, 84, 90), batata doce (75), sorgo sacarino (10, 56, 75), milho (61), enquanto que outros tem abordado de forma geral essa questão (19 20, 67, 85).

SERRA (85) apresenta uma tabela com as matérias-primas cana-de-açúcar, sorgo sacarino, batata doce, mandioca e milho, mostrando a composição, produtividade e rendimento (de fermentação) em etanol de cada uma delas e conclui que, quando se observa o rendimento em etanol por hectare por mês, verifica-se que o sorgo sacarino apresenta um elevado índice e que batata doce e a cana-de-açúcar se sobressaem. A mandioca apresenta um índice mais baixo em relação a outras culturas. Diz que "o sorgo sacarino se mostra como uma planta que precisa ser pesquisada no Brasil, devido às promissoras características tecnológicas que apresenta sua industrialização. Por outro lado, embo

ra a mandioca não apresente índices de rendimentos tão elevados, deve-se lembrar que sua potencialidade quanto a produtividade (toneladas/hectare) e utilização integral da planta são problemas ainda pouco estudados e difundidos no Brasil". Acrescenta que a utilização da mandioca se justifica pelo fato de ser uma cultura que poderá atuar no sentido de melhorar a alimentação e facilitar a fixação do homem em determinadas áreas do território nacional.

ARAÚJO et alii (10), comentam que o trabalho com sorgo apresenta como vantagem ponderável o aproveitamento do equipamento das usinas de açúcar no período de entre-safra da cana-de-açúcar, estendendo-se a produção de álcool aos doze meses do ano, com manutenção de equipe de operação.

O presente trabalho foi realizado com melação de cana-de-açúcar por ser um dos substratos mais comumente utilizados e por facilidade de conservação no laboratório.

Em fermentação alcoólica utiliza-se o Saccharomyces cerevisiae (92), embora haja estudos procurando utilizar bactérias e fungos. Tem-se a intenção de utilizar tanto bactérias termófilas como mesófilas, embora estas, e especificamente Zymomonas mobilis tenha sido a mais estudada, até o momento (46, 48, 52, 53, 55, 80).

No presente trabalho, utilizou-se levedura proveniente de fermento prensado, por ter aplicação bastante difundida em usinas de álcool, devido à sua resistência

à contaminações e condições adversas, possuir boa atividade fermentativa, possibilidade de se trabalhar com concentrações elevadas, facilidade de separação a possibilitar tratamento ácido para diminuir o número de contaminantes.

No Brasil, praticamente todo etanol é produzido pelo processo descontínuo de fermentação. Há algumas décadas o processo utilizado era o de cortes, que BORZANI (13) assim o descreve: "*Inicia-se o trabalho inoculando-se uma dorna (que será chamada de dorna A) com pé-de-cuba; quando a fermentação atinge um estado apropriado passa-se parte do conteúdo do fermentador A para um fermentador vazio (que será chamado de dorna B) e, em seguida enchem-se as duas dornas com o meio a fermentar. Essa operação recebe o nome de corte*".

A partir do final da década de 60, começou-se a utilizar mais intensamente o processo de fermentação pelo método de "Melle-Boinot", que desde então passou a ser a principal técnica difundida e adotada em escala industrial. Neste processo, uma vez terminada a fermentação do conteúdo do tanque de fermentação, o vinho resultante é centrifugado, obtendo-se uma suspensão de células altamente concentrada (leite de lêvedo). A suspensão é, então, enviada para tanques de tratamento onde é diluída com água e tratada com ácido sulfúrico até pH próximo de 2,5 e após (2-3) horas, sob agitação, é reutilizada como inóculo (4, 78, 92).

Outros processos para fermentação alcoólica têm sido estudados principalmente em escala laboratorial

e ou piloto: processo contínuo (41, 73, 82), processo semi-contínuo (83, 97), processo utilizando leveduras floculantes (51, 69), processo sob pressão reduzida (17, 79), processo com extração por solventes (96) e processo com fermentação direta da cana (81).

Atualmente, há algumas instalações industriais produzindo etanol por processo contínuo. Entretanto, como vimos o processo conhecido por "Melle-Boinot" é utilizado na grande maioria das destilarias nacionais.

A necessidade de aumento de produção de etanol levou a um aumento da capacidade das dornas de fermentação. Com isso, devido a limitações com bombeamento e problemas de intensa formação de espuma, houve uma restrição da vazão de alimentação de mosto às dornas (vazão de enchimento das dornas), levando ao aparecimento de uma nova variável, o tempo de enchimento da dorna. Este passou a ser importante, pois boa parte da fermentação ocorre durante a alimentação da dorna e como consequência disto o processo não mais se comporta como descontínuo clássico, mas como descontínuo alimentado.

Devido às limitações de enchimento da dorna, esta é alimentada principalmente por meios de regras empíricas, sendo que as principais são: a) regular a vazão de alimentação, de forma a manter, na dorna, a concentração de açúcares redutores totais próxima à metade da concentração do mosto de alimentação (23) ou, b) regular as vazões de "leite de lêvedo" e de mosto para manter uma concentração de açúcares de $(5 - 6)^{\circ}$ Brix no mosto de fer-

mentação (33).

Vários trabalhos publicados têm contribuído para o conhecimento do processo descontínuo alimentado de produção de etanol, incluindo trabalhos com vazões de enchimento constantes e variáveis. Vazões decrescentes mostraram-se mais vantajosas tanto no aspecto operacional, limitando a formação de espuma quando as dornas estão praticamente cheias, como no aspecto do metabolismo microbiano, diminuindo o efeito sinérgico de inibição por açúcar e etanol.

O objetivo desta dissertação é contribuir ao estudo de vazões de enchimento variáveis de dorna, analisando o comportamento do sistema frente as vazões exponencialmente decrescentes e obter subsídios para posteriores estudos cinéticos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Processo descontínuo alimentado é definido como sendo aquele em que o fermentador é continuamente alimentado com substrato sem que haja saída de meio em fermentação, a não ser no final desta (22, 76, 100). Como consequência, este tipo de operação leva ao aumento contínuo do volume de meio em fermentação na dorna. Terminada a fermentação, a descarga pode ser efetuada total ou parcialmente, sendo neste último caso denominado processo descontínuo alimentado cíclico (76).

WHITE (98), verificou que a melhor forma de alimentação da dorna em processo fermentativo para produção de leveduras é a exponencial.

PIRT (76) afirmou que "talvez a aplicação mais importante do processo descontínuo alimentado será no controle de metabólitos secundários ou na formação de produtos não ligados ao crescimento celular"

JONES & ANTHONY (35) argumentam que a flexibilidade do processo descontínuo alimentado tem sido um dos maiores fatores que determinam a utilização deste em escala industrial. Adicionalmente, DUNN & MOR (22) citam que os processos contínuo e descontínuo alimentado têm aplicações equivalentes em pesquisa na área de bio-engenharia.

O controle da velocidade de adição de substrato ao fermentador é um meio de se evitar os mecanismos de repressão por substrato ou por produto excretado (21, 74). Portanto, o substrato e o produto exercem efeitos marcantes no controle do metabolismo celular determinando as vias metabólicas a serem seguidas. Nesse sentido, há trabalhos na literatura visando a utilização do processo descontínuo alimentado, principalmente para produção de microorganismos (3, 18, 35, 74), aminoácidos (39, 72) e antibióticos (86, 89).

AIBA et alii (3) citam que no cultivo de Saccharomyces cerevisiae crescendo em aerobiose com glicose como substrato, quando a concentração deste atinge 70 mg/L, a glicose tende a ser parcialmente desviada para a produção de etanol e CO₂. Isto diminuiria o fator de conversão de substrato em células. Por outro lado, com concentrações de substrato muito baixas tem-se que a velocidade de crescimento do microorganismo diminui sensivelmente. Daí a importância da vazão de alimentação de substrato na produção de levedura de panificação.

KISHIMOTO et alii (39) estudando a produção de ácido glutâmico por processo descontínuo alimentado, com Brevibacterium divaricatum e etanol como substrato, trabalharam com vazão de alimentação de forma a manter a concentração de etanol constante na dorna. Verificaram que a ação inibitória de etanol era crescente com

o aumento de sua concentração, mas que era em concentrações mais elevadas que se conseguia maiores velocidades na produção de ácido glutâmico. Sugeriram, então, que a produção de ácido glutâmico fosse realizada em dois passos: Inicialmente (até aproximadamente 20 horas de cultivo) mantendo concentrações mais baixas de etanol (por volta de 5%) para rápida produção de células, e num segundo passo elevar a concentração de etanol (aproximadamente 35%) para aumentar a produção de ácido glutâmico.

SOLTERO et alii (86), trabalhando com produção de penicilina por Penicillium chrysogenum Q-176 em meio sintético, verificaram que poder-se-ia substituir a lactose por glicose ou sacarose continuamente adicionados ao meio em fermentação, pois estes levaram a maiores rendimentos em penicilina. Nas condições empregadas por eles, as velocidades ótimas de adição de glicose e sacarose para produção de penicilina foram 0,30 g/L.h e 0,36 g/L.h, respectivamente.

O termo cultura por processo descontínuo alimentado foi introduzido por YOSHIDA et alii (100). O estudo teórico desse processo foi complementado por PIRT (76) e DUNN & MOR (22).

YOSHIDA et alii (100) analisaram o processo descontínuo alimentado para o caso em que a velocidade de alimentação de substrato é constante. Por balanço material chegaram a uma equação onde mostram que a variação de massa de substrato no sistema é dada por uma parcela de suprimento e outra de demanda, representadas

pela adição de substrato e consumo deste para o crescimento celular, respectivamente.

PIRT (76) faz uma análise teórica da obtenção do regime semi-estacionário, onde a velocidade específica de crescimento é igual à vazão específica de alimentação da dorna. Como consequência, em regime semi-estacionário a velocidade específica de crescimento decresce gradualmente à medida que se enche a dorna.

Com respeito à bioquímica da fermentação alcoólica temos que considerar os fenômenos de inibição, sendo os mais importantes os efeitos do etanol, do substrato e das células:

a) Efeito do etanol

Um dos fatores principais que causam baixa produção de etanol por leveduras parece ser o efeito inibitório do etanol. Este efeito tem sido examinado por diversos trabalhos de pesquisa. Nestes, incluem-se estudos a respeito do efeito do etanol no crescimento celular (2, 26, 71); no consumo de açúcares (16, 26, 27) e na viabilidade celular (63, 64).

NAGODAWITHANA & STEINKRAUS (64) acompanharam o efeito inibidor do etanol pela perda de atividade da álcool-desidrogenase, sugerindo que a inibição se situaria a nível dessa enzima, enquanto que NAVARRO (66) concluiu que a enzima mais significativamente inibida é a hexoquinase.

Há divergências a respeito da inibição pelo etanol, depender ou não de sua origem. Alguns autores (64, 71) observaram que o etanol produzido. Esta observação era apoiada pelo fato da concentração intracelular de etanol ser maior que a extracelular, devido à resistência de difusão (65). Por outro lado, GUIJARRO & LAGUNAS (29), na tentativa de elucidar o mecanismo de transporte do etanol através da membrana, realizaram um experimento para medir quantitativamente o acúmulo intracelular de etanol. Chegaram à conclusão que não ocorre acúmulo de etanol e que este permeia a membrana celular por simples difusão.

Estudos cinéticos que abordaram o efeito inibitório do etanol no crescimento celular chegaram a diferentes conclusões. Alguns relataram que a capacidade de inibição era uma função hiperbólica da concentração de etanol (1, 26). Outros concluíram que era linear (32, 47), exponencial (60, 62) ou funções mais complexas (12).

Esta heterogeneidade nas conclusões pode estar ligada a vários fatores: grau de inibição de álcoois (49, 50), efeito da temperatura na velocidade de produção de etanol (64), composição lipídica da membrana citoplasmática (30, 57), presença de oxigênio molecular (31, 45, 63), espécie de microorganismos (36), concentração inicial de células com que se trabalha (95), entre outros.

b) Efeito do Substrato

As vantagens de se trabalhar com concentrações elevadas de açúcares fermentescíveis no mosto de alimentação incluem redução de água de diluição, supressão de contaminantes osmossensíveis e redução dos custos de destilação, enquanto a concentração de etanol não se tornar inibitória. Altas concentrações de substrato são, no entanto, inibitórias à fermentação (36).

Muitos pesquisadores concordam, de um modo geral, que a inibição pelo substrato começa a ser significativa para valores superiores a 100 g/L em fermentações com Saccharomyces cerevisiae e glicose como substrato (16, 27, 58, 59).

CONVERTI et alii (16), trabalharam com Saccharomyces cerevisiae e glicose como fonte de carbono. Medindo as velocidades iniciais de consumo de substrato, verificaram que se obtinha um aumento dos valores das velocidades máximas quando a concentração inicial de substrato se situava entre (50 a 100) g/L. Também verificaram que quando a concentração inicial de substrato era superior a 100 g/L, ocorria uma mistura de inibição competitiva e não competitiva, evidenciada pelo decréscimo da velocidade máxima e da constante de Michaelis-Menten.

c) Efeito das Células

A vantagem de se trabalhar com concentrações celulares mais elevadas está na redução do tempo de fermentação. No entanto, há alguns trabalhos evidenciando que concentração celular elevada no inóculo inibe seu próprio crescimento.

GHOSE & TYAGT (25), estudando o crescimento de Saccharomyces cerevisiae NRRL-Y 132 em fermentação alcoólica de bagaço de cana hidrolizado em processo descontínuo, verificaram que o crescimento celular diminui com o aumento da concentração inicial de células, sendo que para concentrações celulares iniciais iguais ou superiores a 21,0 g/L (massa seca) não havia crescimento celular. Estes autores explicaram tal comportamento através do conceito de energia de manutenção (76), pois com o aumento da massa celular inicial no fermentador crescem as necessidades relativas à manutenção e os nutrientes disponíveis são consumidos para atender esta finalidade.

STREHIANO et alii (88), trabalhando com fermentação alcoólica por processo descontínuo e com diferentes níveis de inóculo, encontraram que as velocidades máximas de crescimento decresceram hiperbolicamente com o aumento da concentração do inóculo, enquanto que o rendimento em etanol não mudou para diferentes concentrações de inóculo. Sugerem que o álcool não é o único inibidor do crescimento microbiano, pois concluem que há inibidores presentes no inóculo.

O primeiro trabalho realizado, tendo como objetivo estudar o processo descontínuo alimentado para produção de etanol, foi publicado por ENDO & INOUE (23). Trabalharam com meio sintético e com glicose como substrato na concentração de 10 g/L, condições essas bastante diferentes das adotadas industrialmente. Posteriormente foram realizados trabalhos onde se procurou essa aproximação (28, 40, 42, 43, 44, 68, 93, 94).

Alguns trabalhos (28, 40, 42, 68) procuraram verificar a influência dos fatores: concentração celular no inóculo (9,5 g/L ~ 122,3g/L em massa seca), concentração de açúcares redutores totais no mosto de alimentação (151,7 g/L ~ 330,9 g/L), e vazão de alimentação (0,36 L/h ~ 2,04 L/h), correspondente a tempo de enchimento de 15 h a 3 h, respectivamente, na produtividade e rendimento em etanol na fermentação alcoólica por processo descontínuo alimentado. A velocidade de alimentação de açúcar variou de 50 a 600 g/h. Concluíram, de forma geral, que para uma dada concentração de açúcar e uma dada vazão de alimentação a produtividade em etanol atingiu um valor máximo quando a massa de células no inóculo foi igual ou maior a um valor crítico. Observaram uma correlação do tipo da equação de Monod entre a máxima produtividade em etanol e a velocidade de adição de açúcar. Quando esta foi menor que aproximadamente 200 g/h, a produtividade máxima em etanol praticamente não foi afetada pela concentração do mosto, mas se maior, concentrações mais altas de açúcar no mosto de alimentação levaram a produtividade em etanol mais baixas. O rendimento em etanol praticamente não foi afetado pelas condições expe-

rimentais.

Em trabalho posterior, BORZANI (14), relacionando velocidade de produção de etanol (g/h) e velocidade de adição de açúcar (g/h) em processo descontínuo alimentado para produção de etanol com vazão constante, mostra que é possível avaliar o máximo valor de vazão de alimentação que deve ser usado de forma a obter um meio completamente fermentado no fim da fase de enchimento.

AQUARONE et alii (9) realizaram estudos do processo descontínuo alimentado para produção de etanol, utilizando diversos tipos de alimentação: vazão constante e vazão variável (linear decrescente e exponencial crescente). Observaram um aumento da produtividade em etanol quando utilizaram uma vazão de alimentação linearmente decrescente com o tempo. Esses resultados foram confirmados mais tarde (43). De fato, KRAUTER et alii (44) concluíram que aumentou-se a produtividade em etanol aproximadamente em 10% quando se utilizou vazões de alimentação linearmente decrescentes ao invés de vazões de alimentação constantes em processo descontínuo alimentado para produção de etanol.

VASCONCELOS & VALDMAN (93), trabalhando com mosto de caldo de cana-de-açúcar em escala piloto e utilizando vários perfis de vazão de alimentação de mosto à dorna, verificaram que nos perfis decrescentes obtinham-se maiores produtividades em etanol, tanto no final da fase de enchimento como nas produtividades finais do pro

cesso. Trabalhando em escala industrial, VASCONCELOS & VILELA FILHO (94) ressaltaram a importância do perfil da vazão de alimentação na produtividade e na eficiência do processo fermentativo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - MATÉRIA-PRIMA

Utilizou-se melaço de cana-de-açúcar em todos os ensaios. Foi recebido da Usina Estêr (Cosmópolis) e armazenado em tambores de 200 L, sendo o lote de melaço suficiente para a realização de todos os experimentos. Não se obteve nenhuma informação adicional a respeito do melaço, sendo verificado apenas seus aspectos qualitativos (como aparência e odor) e teor em ART, que variou de (70 a 85)% em massa.

3.1.1 - Mosto

A preparação do mosto consistia em sua prévia clarificação e posterior diluição e suplementação adequadas. A clarificação foi realizada com diluição do melaço com água destilada, em partes iguais, adição de 1,5 g de fosfato de sódio monobásico como agente floculante em cada litro da solução de melaço diluído e posterior aquecimento a 121°C por 10 minutos. Após o aquecimento foi mantido em repouso, no mínimo, por 48 horas para a sedimentação de material em suspensão. O melaço clarificado foi, então, sifonado e diluído com água destilada de forma a obter-se aproximadamente 230 g/L em ART (42). Acertou-se o valor de pH do mosto na faixa de 4,5 - 5,0 (36), pela adição de ácido sulfúrico concentrado ou de

solução de hidróxido de sódio 4,0 normal. Suplementou-se com uréia a 0,5 g/L (54) e adicionou-se penicilina V ácido ao mosto na concentração de 500 UI/L (8), uma vez que permanecia exposto ao meio ambiente no decorrer do experimento.

3.2 - INÓCULO

Os experimentos foram realizados utilizando-se como inóculo fermento prensado comercial, suspenso em água destilada. Por motivos operacionais, o volume de inóculo foi fixado em 3,0 L, suficiente para que o agitador do fermentador fosse atingido. Na impossibilidade de obter informações a respeito de data de fabricação do fermento, nível de contaminantes e das condições de armazenamento, verificava-se apenas suas aparência (textura e cor), odor e porcentagem de células mortas (15).

3.3 - EQUIPAMENTO

A figura 3.1 mostra, esquematicamente, o equipamento utilizado nos experimentos. Consiste de um fermentador do tipo "Microferm" fabricado pela New Brunswick Scientific Co. Inc., com dorna de vidro de 14 litros de capacidade nominal, com controles de temperatura e de frequência do agitador.

FIGURA 3.1 - Esquema simplificado do sistema utilizado nos experimentos (medidas em mm).

- A - Tanque de armazenamento do mosto
- B - Cilindro graduado
- C - Dorna de vidro de 14 L
- D - Entrada do mosto de alimentação
- E - Turbina de 6 pás
- F - Chicanas

3.4 - DESCRIÇÃO DE UM EXPERIMENTO TÍPICO

Em todos os experimentos, fixaram-se os seguintes parâmetros:

- a) temperatura de fermentação = $(32 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ (99);
- b) frequência do agitador = 200 rpm (200 min^{-1}); A finalidade foi promover uma melhor homogeneização na dorna;
- c) concentração de ART no mosto de alimentação: aproximadamente 230 g/L (42);
- d) massa de fermento no inóculo aproximadamente 550g (massa úmida) (42,43);
- e) pH do mosto de alimentação igual 4,5 a 5,0 (36);
- f) concentração de uréia no mosto de alimentação = 0,5 g/L (54);
- g) concentração de penicilina V ácida no mosto de alimentação = 500 UI/L (8);
- h) volume de inóculo = 3,0 L
- i) volume de mosto adicionado = 7,0 L

No dia anterior ao experimento ligava-se o equipamento para que logo no início daquele, o banho já apresentasse a temperatura desejada. No dia do experi-

mento, preparava-se a suspensão de levedura e adicionava-se à dorna. Acionava-se a agitação para homogeneização e retirava-se uma amostra de 10 mL para determinação da concentração celular. Em seguida, iniciava-se a adição de mosto à dorna, sendo 7,0 L o volume total de mosto adicionado, cuja vazão de alimentação era previamente escolhida. Pelo fato de não dispormos de bomba de alimentação era feita periodicamente como descrita nos apêndices I e II. A fermentação foi acompanhada por amostragens horárias. Após o término do enchimento, as amostras deixavam de ser retiradas quando se obtinha o mesmo valor da concentração de etanol em duas amostragens consecutivas. O tempo de fermentação a que correspondeu ao primeiro valor constante da concentração de etanol foi considerado tempo final de fermentação.

3.4.1 - Tratamento das amostras

Um volume de aproximadamente 25 mL de amostra era retirado de hora em hora e tratado como nos mostra o fluxograma 3.1.

3.4.2 - Técnicas analíticas

3.4.2.1 - Medida do valor do pH

O valor do pH foi medido apenas no mosto de alimentação e no meio final de fermentação. Foi medido em potenciômetro "Procyon" modelo pHN-4.

FLUXOGRAMA 3.1 - Esquema do tratamento das amostras.

3.4.2.2 - Medida da acidez total

Foi medida no mosto de alimentação e no meio final de fermentação. Permite-nos a verificação da ocorrência de contaminação por bactérias produtoras de ácidos. Quando se utiliza uréia como fonte de nitrogênio, o valor de acidez total final até duas vezes maior que a inicial pode ser considerada como normal(73). A acidez foi expressa em acidez sulfúrica total.

3.4.2.3 - Determinação da concentração celular

Uma amostra de 5,0 mL foi filtrada em membrana Millipore^R (diâmetro médio dos poros = 1,2 μ m) previamente pesada e lavada com 10 mL de água destilada. Após a lavagem foi submetida à secagem em estufa a (105-110) °C até peso constante, o que era conseguido aproximadamente após 3 horas. O resultado foi expresso em gramas de matéria seca por litro de amostra.

3.4.2.4 - Determinação da porcentagem de células mortas

Esta determinação foi realizada na suspensão inicial de leveduras e no meio final de fermentação. O método baseia-se na coloração azul que adquirem as células mortas em contato com a solução de Funk-Kühles (91). Uma suspensão de leveduras, convenientemen-

te diluída é colocada em contato na proporção 1:1 com a solução de Funk-Kühles por vinte minutos. Em seguida, conta-se em microscópio um determinado número de células em campos escolhidos ao acaso. A partir daí calcula-se a porcentagem de células mortas em relação ao número total de células.

A composição da solução de Funk-Kühles é a seguinte:

Azul de metileno	200	mg/L
Na ₂ HPO ₄	71	mg/L
KH ₂ PO ₄	27,2	g/L

3.4.2.5 - Determinação do volume ocupado pelas células no meio

O volume ocupado pelas células foi determinado pela centrifugação de 12 mL de meio de fermentação em tubo cônico graduado a 3500 min⁻¹ (1440Xg) por quinze minutos à temperatura de (-5 a 0)°C.

3.4.2.6 - Determinação da concentração de ART

A determinação da concentração de ART foi realizada pelo método de SOMOGYI (87), precedido da hidrólise da sacarose contida na fase líquida do meio de fermentação (amostra). A hidrólise foi realizada pela técnica de FALCONE & MARQUES (24). Em balão volumétrico

co, adicionou-se 5,0 mL da fase líquida do meio de fermentação e 25 mL de solução de ácido clorídrico 1,3 normal. Deixou-se em banho de água a aproximadamente 65°C por 15 minutos. Após resfriamento à temperatura ambiente, acertou-se o valor do pH com solução de hidróxido de sódio 6,0 normal, utilizando-se uma solução de fenolftaleína a 10 g/L como indicador e completou-se o volume. Diluiu-se, a amostra, convenientemente para a determinação da concentração de ART pelo método de SOMOGYI, descrito resumidamente a seguir:

a) Soluções reagentes

Solução I

NaHCO ₃	16,0	g
NaKC ₂ H ₄ O ₆ (tartarato de sódio e potássio	12,0	g
Na ₂ CO ₃	24,0	g
Na ₂ SO ₄	144,0	g
Água destilada q.s.p.	800,0	mL

Solução II

Na ₂ SO ₄	36,0	g
CuSO ₄ .5H ₂ O	4,0	g
Água destilada q.s.p.	200,0	mL

Soluções SomogyiSolução III

$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	heptamolibdato de amônia.	25,0g
H_2SO_4 (d = 1,84 g/mL)	.....	21,0mL
$\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	hidrogeno-arseniato de sódio..	3,0g
Água destilada q.s.p.	.....	500,0mL

As soluções devem ser guardadas em frascos escuros, à temperatura de 30°C , por um período mínimo de 30 horas para, então, serem calibradas a partir de soluções de glicose de concentrações conhecidas (20 a 200 mg/L).

b) Doseamento

Em tubo de Follin-Wu contendo as soluções I e II na proporção 4:1, preparada no momento do uso, coloca-se 1,0 mL da amostra convenientemente diluída. Leva-se ao banho em água fervente por 10 minutos e retira-se colocando em banho de água e gelo. Após o resfriamento, adiciona-se 2,0 mL da solução III e agita-se para a expulsão dos gases formados. Completa-se o volume de 25 mL com água destilada. Uma prova em branco é preparada simultaneamente utilizando-se água destilada. Com o branco acertase o 100% na escala de transmitância do espectrofotômetro.

Os resultados foram expressos em gramas de ART por litro de amostra. As determinações foram efetua-

das em espectrofotômetro marca Procyon SC90, em comprimento de onda igual a 540 nm.

3.4.2.7 - Determinação da concentração de etanol

A concentração de etanol foi determinada por uma adaptação do método do microdicromato(38).

Destilou-se em um microdestilador, com arraste a vapor, 1,0 mL de fase líquida do meio de fermentação (amostra), recolhendo aproximadamente 30 mL do destilado em erlenmeyer contendo 20,0 mL de solução de dicromato de concentração rigorosamente conhecida e em excesso. A seguir tampou-se o erlenmeyer e levou-se a banho de água a aproximadamente 65°C por 20 minutos para que se completasse a oxidação do etanol. Decorrido os 20 minutos, retirou-se o erlenmeyer do banho e deixou-se esfriar até temperatura ambiente, para então ser titulado com solução de sulfato ferroso amoniacal, utilizando ortofenantrolina como indicador. Fez-se uma prova em branco utilizando água destilada em vez do destilado, para determinar o poder redutor do sulfato ferroso amoniacal.

A concentração de etanol na amostra era obtida pela expressão:

$$E(g/L) = 11,5 \cdot V \cdot N \cdot (1 - V_a/V_b)$$

Seguem-se a composição das soluções reagentes e indicador utilizados.

Solução I: Solução de sulfato ferroso amoniacal

$\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	.....	135,1 g
H_2SO_4 (d = 1,84 g/mL)	.....	30,0 mL
Água destilada q.s.p.	.....	1000,0 mL

Solução II: Solução de dicromato de potássio

$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	.....	33,7 g
H_2SO_4 (d = 1,84 g/mL)	.....	325,0 mL
Água destilada q.s.p.	.....	1000,0 mL

Solução III: Solução de ortofenantrolina

$\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	.....	1,485 g
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	.....	0,695 g
Água destilada q.s.p.	.....	100,0 mL

3.5 - MÉTODOS DE CÁLCULO

Por trabalhar-se com um sistema onde a variação de concentração é dada por uma variável, que é a variação de volume, além da variação de massa (produzida ou consumida), substituiu-se as concentrações por massas totais para um melhor acompanhamento do processo fermentativo.

3.5.1 - Cálculo das massas de ART e etanol na dorna

Num determinado instante a massa de etanol na dorna (M_e) é dada por:

$$M_e = E \cdot V_d \cdot \left(1 - \frac{V_X}{100}\right) \quad (g)$$

Analogamente, num determinado instante a massa de ART residual na dorna (M_{Sr}) é dada por:

$$M_{Sr} = S \cdot V_d \cdot \left(1 - \frac{V_X}{100}\right) \quad (g)$$

3.5.2 - Num determinado instante a massa de ART consumida pela levedura (M_{Sc}) é dada por:

$$M_{Sc} = M_{Sa} - M_{Sr} \quad (g)$$

3.5.3 - Cálculo do rendimento

O rendimento em etanol, no término da fermentação, é expresso por:

$$\eta = \frac{M_{ef}}{0,511 \cdot M_{Saf}} \cdot 100 \quad (\%)$$

3.5.4 - Cálculo da Produtividade em etanol

A produtividade em etanol no final da fermentação (P_e) é dada por:

$$P_e = \frac{M_{ef}}{\Theta \cdot V_f} \quad (g/L.h)$$

e no final de alimentação da dorna (P'_e):

$$P'_e = \frac{M'_{ef}}{\theta' \cdot V_f} \quad (\text{g/L.h})$$

3.5.5 - Cálculo da Produtividade em células

Analogamente, a produtividade em células, no final da fermentação (P_X) é dada por:

$$P_X = \frac{M_{Xf} - M_{Xo}}{\theta \cdot V_f} \quad (\text{g/L.h})$$

e no final de alimentação da dorna (P'_X):

$$P'_X = \frac{M'_{Xf} - M_{Xo}}{\theta' \cdot V_f} \quad (\text{g/L.h})$$

3.5.6 - Cálculo da razão de crescimento celular

Calcula-se a razão do crescimento celular no final da fermentação (R_X), por:

$$R_X = \frac{M_{Xf} - M_{Xo}}{M_{Xo}} \cdot 100 \quad (\%)$$

e no final de alimentação da dorna (R'_X)

$$R'_X = \frac{M'_{Xf} - M_{Xo}}{M_{Xo}} \cdot 100 \quad (\%)$$

4. R E S U L T A D O S

Os experimentos dividem-se em 9 grupos, cada grupo caracterizado pelo tempo de enchimento (θ') e valor da constante de adição (K), como pode ser visto na tabela 4.1.

Os valores obtidos de E, S, X, V_X e V_d de cada experimento são apresentados em tabela, enquanto que as massas calculadas de ART, etanol e células são apresentadas em tabela e gráfico.

Os valores de porcentagem de células mortas, acidez total e pH não são apresentados para cada experimento, uma vez que se mantiveram nos seguintes intervalos:

porcentagem de células mortas < 6%

acidez total = 1,5 a 3,0g H_2SO_4/L

pH = 3,8 a 4,8.

Para um melhor acompanhamento do trabalho, após cada grupo de experimentos é apresentada uma tabela com os resultados: rendimentos, produtividades (em etanol e em células), razões de crescimento celular e tempos de fermentação. Também são feitos comentários preliminares analisando as figuras do respectivo grupo de experimentos.

TABELA 4.1 - Experimentos realizados *

Grupo	θ (h)	K (h^{-1})	Nº dos Experimentos
I	7	0	1 ao 5
II	7	0,2	6 ao 10
III	7	0,4	11 ao 15
IV	7	0,6	16 ao 20
V	5	0	21 ao 25
VI	5	0,2	26 ao 30
VII	5	0,4	31 ao 35
VIII	5	0,6	36 ao 40
IX	5	0,8	41 ao 45

* Partindo-se da equação $F = F_0 \cdot e^{-K \cdot t}$, onde F_0 é a vazão de alimentação inicial (L/h) e K é a constante de adição (h^{-1}), temos:

Se $K = 0$, $F = F_0$ (Vazão constante de alimentação - Apêndice I).

Se $K > 0$, $F = F_0 \cdot e^{-K \cdot t}$ (Vazão exponencialmente decrescente de alimentação - Apêndice II).

4.1 - EXPERIMENTOS DO GRUPO I

$$\theta' = 7h; \quad K = 0$$

4.1.1 - Experimento nº 1

Condições experimentais:

$$S_O = 231,2 \text{ g/L } (\Delta = 0,5\%); F = 1,00 \text{ L/h}$$

TABELA 4.2 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 1

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	51,4	-	-	154,2	-	-	-	-
1	4,0	17,0	44,7	8,2	21,6	178,8	231,2	27,2	204,0	71,7
2	5,0	14,0	40,1	7,1	31,4	200,5	462,4	30,5	431,9	135,0
3	6,0	12,5	36,0	8,5	42,9	216,0	693,6	44,6	649,0	225,2
4	7,0	10,0	32,5	13,2	49,4	227,5	924,8	83,2	841,6	311,2
5	8,0	8,0	30,3	14,2	54,1	242,4	1156,0	104,5	1051,5	398,2
6	9,0	8,0	28,3	16,4	56,9	254,7	1387,2	135,8	1251,4	471,1
7	10,0	8,0	24,4	18,4	59,5	244,0	1618,4	169,3	1449,1	547,4
8	10,0	8,0	24,8	7,9	67,0	248,0	1618,4	72,7	1545,7	616,4
9	10,0	8,0	25,5	8,0	64,5	255,0	1618,4	73,6	1544,8	593,4
10	10,0	7,0	26,5	6,6	67,8	250,0	1618,4	61,4	1557,0	630,5

FIGURA 4.1 - Resultados em massa do experimento n° 1
 $S_0 = 231,2$ g/L; $\theta' = 7$ h; $K = 0$

4.1.2 - Experimento nº 2

Condições experimentais:

$S_O = 236,5 \text{ g/L}$ ($\Delta = 2,8\%$); $F = 1,00 \text{ L/h}$

TABELA 4.3 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 2

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	49,2	-	-	147,6	-	-	-	-
1	4,0	16,7	38,8	11,2	19,7	155,2	236,5	37,3	199,2	65,6
2	5,0	12,5	33,9	9,8	30,0	169,5	473,0	42,9	430,1	131,3
3	6,0	10,0	31,3	16,4	39,5	187,8	709,5	88,6	620,9	213,3
4	7,0	10,8	28,9	20,2	42,1	202,3	946,0	126,1	819,9	262,9
5	8,0	9,2	26,1	19,1	47,0	208,8	1182,5	138,7	1043,8	341,4
6	9,0	8,3	24,4	21,8	48,5	219,6	1419,0	179,9	1239,1	400,3
7	10,0	7,5	25,5	19,8	57,6	255,0	1655,5	183,2	1472,3	532,8
8	10,0	7,3	24,5	2,3	65,2	245,0	1655,5	21,3	1634,2	604,4
9	10,0	7,5	24,5	7,0	65,2	245,0	1655,5	64,8	1590,7	603,1

FIGURA 4.2 - Resultados em massa do experimento nº 2
 $S_0 = 236,5$ g/L; $\theta' = 7$ h; $K = 0$

4.1.3 - Experimento nº 3

Condições experimentais:

$$S_O = 210,4 \text{ g/L} \quad (\Delta = -8,5\%); \quad F = 1,00 \text{ L/h}$$

TABELA 4.4 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 3

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	53,7	-	-	161,1	-	-	-	-
1	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	5,0	14,2	36,1	7,9	34,2	180,5	420,8	33,9	386,9	146,7
3	6,0	10,0	28,9	11,5	45,3	173,4	631,2	62,1	569,1	244,6
4	7,0	8,8	26,1	10,9	48,1	182,7	841,6	69,6	772,0	307,1
5	8,0	7,9	24,9	17,7	50,6	199,2	1052,0	130,4	921,6	372,8
6	9,0	7,5	23,5	19,8	55,2	211,5	1262,4	164,8	1097,6	459,5
7	10,0	7,5	23,0	20,5	60,5	230,0	1472,8	189,6	1283,2	559,6
8	10,0	7,5	23,7	6,9	67,7	237,0	1472,8	63,8	1409,0	626,2
9	10,0	7,5	24,1	3,6	67,7	241,0	1472,8	33,3	1349,5	626,2

FIGURA 4.3 - Resultados em massa do experimento nº 3
 $S_0 = 210, 4 \text{ g/L}$; $e' = 7\text{h}$; $K = 0$

4.1.4 - Experimento nº 4

Condições experimentais:

$$S_O = 229,6 \text{ g/L} \quad (\Delta = -0,2\%); \quad F = 1,00 \text{ L/h}$$

TABELA 4.5 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 4

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	H _e (g)
0	3,0	-	53,1	-	-	159,3	-	-	-	-
1	4,0	-	36,0	11,4	20,3	144,0	229,6	38,4	191,2	68,4
2	5,0	15,8	36,2	16,7	33,8	181,0	459,2	72,4	386,8	146,5
3	6,0	13,3	32,8	18,7	43,2	196,8	688,8	100,1	588,7	231,2
4	7,0	10,8	30,2	22,5	51,5	211,4	918,4	143,6	774,8	328,8
5	8,0	8,8	27,4	23,6	54,5	219,2	1148,0	173,1	974,9	399,8
6	9,0	8,3	25,7	26,1	57,9	231,3	1377,6	217,3	1160,3	482,0
7	10,0	7,5	23,6	27,9	60,2	236,0	1607,2	258,1	1349,1	556,9
8	10,0	7,5	24,6	9,4	66,9	246,0	1607,2	87,0	1520,2	618,8
9	10,0	7,5	25,7	5,6	62,8	257,0	1607,2	51,8	1556,0	580,9

FIGURA 4.4 - Resultados em massa do experimento nº 4
 $S_0 = 229,6$ g/L; $\theta' = 7$ h; $K = 0$

4.1.5 - Experimento nº 5

Condições experimentais:

$$S_O = 229,6 \text{ g/L} \quad (\Delta = -0,2\%); \quad F = 1,00 \text{ L/h}$$

TABELA 4.6 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 5

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	53,2	-	-	159,6	-	-	-	-
1	4,0	14,1	42,0	20,6	21,8	168,0	229,6	70,8	158,8	74,9
2	5,0	11,7	34,1	18,7	31,6	170,5	459,2	82,6	376,6	139,5
3	6,0	10,0	30,3	22,1	40,5	181,8	688,8	119,3	569,5	218,7
4	7,0	8,3	28,6	21,3	46,6	200,2	918,4	136,7	782,0	299,1
5	8,0	7,5	25,5	25,7	53,9	204,0	1148,0	190,2	957,8	398,9
6	9,0	7,1	24,7	20,4	59,7	222,3	1377,6	170,6	1207,0	499,2
7	10,0	7,1	24,3	7,7	62,9	243,0	1607,2	71,5	1535,7	584,3
8	10,0	7,1	20,2	7,1	67,5	202,0	1607,2	66,0	1541,2	627,1
9	10,0	7,1	25,3	4,9	68,3	253,0	1607,2	45,5	1561,7	634,5
10	10,0	7,1	25,7	5,0	67,9	257,0	1607,2	46,5	1560,7	630,8

FIGURA 4.5 - Resultados em massa do experimento nº 5
 $S_0 = 229,6$ g/L; $\theta' = 7$ h; $K = 0$

4.1.6 - Apresentação dos resultados obtidos no grupo I de experimentos

TABELA 4.7 - Resultados obtidos nos experimentos do grupo I

Nº do experimento	θ (h)	P'_e (g/L.h)	P_e	η (%)	P'_X (g/L.h)	P_X	R'_X (%)	R_X (%)
1	8,0	7,8	7,7	74,2	1,4	1,2	62,3	62,3
2	8,0	7,6	7,5	71,4	1,3	1,2	62,2	65,5
3	8,0	8,0	7,8	83,2	1,0	0,9	42,9	46,0
4	7,5	8,0	8,0	73,0	1,2	1,1	50,9	54,1
5	8,0	8,3	7,9	76,8	1,1	1,2	50,0	59,4

4.1.7 - Comentários preliminares

A análise das figuras deste grupo de experimentos levaram às seguintes considerações:

- a) O aumento da massa de etanol foi constante desde o início da fermentação até próximo ao final desta, praticamente em todos os experimentos.
- b) No decorrer da fase de enchimento houve aumento da diferença entre massa de ART adicionada e consumida, tendo a massa de ART residual na dorna seu valor máximo no final da fase de enchimento ou em tempo bem próximo deste.

- c) Após o início da fermentação começou a ocorrer aumento da biomassa e, geralmente, por volta de 7 a 8 horas esta tendeu a estabilizar-se.

4.2 - EXPERIMENTOS DO GRUPO II

$$\theta' = 7h; \quad K = 0,2 \text{ h}^{-1}$$

4.2.1 - Experimento nº 6

Condições experimentais:

$$S_0 = 210,4 \text{ g/L} \quad (\Delta = -8,5\%); \quad F = 1,86 \cdot e^{-0,2 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.8 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 6

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _c (g)
0	3,0	-	53,5	-	-	160,5	-	-	-	-
1	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	6,1	12,5	29,9	76,1	31,2	182,4	652,2	406,2	246,0	166,5
3	7,2	9,2	25,6	38,0	32,7	184,4	883,7	248,1	635,6	213,8
4	8,1	7,5	22,2	26,1	41,1	179,9	1073,0	195,5	877,5	307,9
5	8,9	7,9	23,5	12,7	53,3	209,1	1241,4	104,1	1137,3	436,9
6	9,5	7,5	24,7	10,8	62,4	234,6	1367,6	94,9	1272,7	548,4
7	10,0	7,5	24,4	6,9	65,8	244,0	1472,8	63,8	1409,0	608,7
8	10,0	7,5	25,2	5,4	68,1	252,0	1472,8	50,0	1422,8	629,9
9	10,0	7,5	24,5	4,9	68,1	245,0	1472,8	45,3	1427,5	629,9

FIGURA 4.6 - Resultados em massa do experimento nº 6
 $S_0 = 210,4 \text{ g/L}$; $\theta' = 7 \text{ h}$; $K = 0,2 \text{ h}^{-1}$

4.2.2 - Experimento nº 7

Condições experimentais:

$$S_0 = 204,7 \text{ g/L } (\Delta = -11,0\%); \quad F = 1,86 \cdot e^{-0,2 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.9 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 7

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _c (g)
0	3,0	-	51,7	-	-	155,1	-	-	-	-
1	4,7	15,0	36,3	30,8	19,4	170,6	348,0	123,0	225,0	77,5
2	6,1	10,0	28,5	35,4	25,7	173,8	634,6	194,4	440,2	141,1
3	7,2	10,0	28,2	35,6	39,9	203,1	859,7	230,7	629,0	258,6
4	8,1	8,0	30,0	27,3	41,9	243,0	1044,0	203,4	813,3	312,2
5	8,9	8,0	24,3	11,9	51,4	216,2	1207,7	97,4	1110,3	420,8
6	9,5	8,0	25,0	13,7	58,9	237,6	1330,6	119,7	1210,9	514,7
7	10,0	7,5	23,8	6,7	65,2	238,0	1432,9	62,0	1370,9	603,1
8	10,0	7,0	24,4	6,2	64,7	244,0	1432,9	57,7	1375,2	601,7
9	10,0	7,0	25,1	6,4	63,9	251,0	1432,9	59,5	1373,4	594,3
10	10,0	7,0	24,1	5,9	64,3	241,0	1432,9	54,9	1378,0	598,0

FIGURA 4.7 - Resultados em massa do experimento nº 7
 $S_0 = 204,7 \text{ g/L}$; $\theta' = 7\text{h}$; $K = 0,2\text{h}^{-1}$

4.2.3 - Experimento nº 8

Condições experimentais:

$$S_O = 236,9 \text{ g/L } (\Delta = 3,0\%); \quad F = 1,86 \cdot e^{-0,2 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.10 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 8

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	54,2	-	-	162,6	-	-	-	-
1	4,7	14,0	36,0	46,2	19,2	169,2	402,7	186,7	216,0	77,6
2	6,7	11,0	29,9	46,3	31,5	182,4	639,6	251,3	388,3	171,0
3	7,2	10,0	28,9	32,7	41,4	208,1	995,0	211,9	783,1	268,3
4	8,1	9,0	26,8	25,8	45,7	217,1	1208,2	190,1	1018,1	336,9
5	8,9	8,0	27,7	20,5	59,2	246,5	1397,7	167,9	1229,8	484,7
6	9,5	8,0	27,0	9,9	61,5	256,5	1539,9	86,5	1453,4	537,5
7	10,0	8,0	23,1	6,8	64,4	231,0	1658,3	62,6	1595,7	592,5
8	10,0	8,0	24,6	6,0	67,0	246,0	1658,3	55,2	1603,1	616,4
9	10,0	8,0	24,0	5,6	66,7	240,0	1658,3	51,5	1606,8	613,6
10	10,0	8,0	23,9	5,5	66,7	239,0	1658,3	50,6	1607,7	613,6

FIGURA 4.8 - Resultados em massa do experimento nº 8
 $S_0 = 236,9 \text{ g/L}$; $\theta' = 7\text{h}$; $K = 0,2 \text{ h}^{-1}$

4.2.4 - Experimento nº 9

Condições experimentais:

$$S_O = 236,5 \text{ g/L } (\Delta = 2,8\%); \quad F = 1,86 \cdot e^{-0,2 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.11 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 9

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	49,7	-	-	149,1	-	-	-	-
1	4,7	14,2	34,5	44,7	18,6	162,2	402,1	180,3	221,8	75,0
2	6,1	10,8	28,8	43,0	23,7	175,7	733,2	233,9	499,3	148,6
3	7,2	11,7	26,6	37,7	37,6	191,6	993,3	214,3	779,0	239,0
4	8,1	9,2	24,9	36,9	40,9	201,7	1206,2	211,4	994,8	300,9
5	8,9	10,0	24,4	24,7	47,8	217,1	1395,4	197,9	1197,5	382,9
6	9,5	9,2	24,4	13,0	56,1	231,8	1537,3	112,1	1425,2	483,9
7	10,0	7,5	24,2	3,8	59,9	242,0	1655,5	35,2	1620,3	554,1
8	10,0	7,4	25,2	4,2	65,6	252,0	1655,5	38,9	1616,6	607,5
9	10,0	7,5	25,4	7,0	62,9	254,0	1655,5	64,8	1590,9	581,8

FIGURA 4.9 - Resultados em massa do experimento nº 9
 $S_0 = 236,5 \text{ g/L}$; $\theta' = 7\text{h}$; $K = 0,2\text{h}^{-1}$

4.2.5 - Experimento nº 10

Condições experimentais:

$$S_O = 229,6 \text{ g/L } (\Delta = -0,2\%); \quad F = 1,86 \cdot e^{-0,2 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.12 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 10

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _c (g)
0	3,0	-	53,6	-	-	160,8	-	-	-	-
1	4,7	13,3	35,3	49,5	18,4	165,9	390,3	201,7	188,6	75,0
2	6,1	10,4	28,1	58,5	29,7	171,4	711,8	319,7	392,1	162,4
3	7,2	9,2	27,0	50,8	38,3	194,4	964,3	332,6	631,7	250,3
4	8,1	7,9	26,8	42,4	48,1	217,1	1171,0	316,3	854,7	358,8
5	8,9	7,5	26,2	29,5	56,8	232,4	1354,6	242,8	1111,8	467,6
6	9,5	7,5	24,9	23,0	60,2	236,5	1492,4	202,1	1290,3	529,1
7	10,0	7,5	26,0	15,0	63,2	260,0	1607,2	138,8	1468,4	584,6
8	10,0	7,5	26,9	5,7	69,6	269,0	1607,2	52,7	1554,4	643,8
9	10,0	7,5	25,8	5,9	67,7	258,0	1607,2	54,6	1552,6	626,2

FIGURA 4.10 - Resultados em massa do experimento nº 10
 $S_0 = 229,6 \text{ g/L}$; $\theta' = 7\text{h}$; $K = 0,2\text{h}^{-1}$

4.2.6 - Apresentação dos resultados obtidos no grupo
II de experimentos

TABELA 4.13 - Resultados obtidos nos experimentos do grupo II

Nº do experimento	θ (h)	P'_e (g/L.h)	P_e	η (%)	P'_X (g/L.h)	P_X	R'_X (%)	R_X (%)
6	7,5	8,7	8,4	83,7	1,2	1,2	52,2	55,3
7	7,0	8,6	8,6	81,8	1,3	1,3	58,1	58,1
8	7,0	8,7	8,7	71,9	1,2	1,2	50,3	50,3
9	8,0	7,9	7,4	70,3	1,4	1,3	64,4	71,1
10	7,5	8,4	8,5	77,3	1,3	1,2	58,4	58,4

4.2.7 - Comentários preliminares

A análise das figuras deste grupo de experimentos levaram às seguintes conclusões:

- a) A produção de etanol manteve-se constante por praticamente toda a fase de enchimento.
- b) As maiores diferenças entre massa de ART adicionada e massa de ART consumida ocorreram por volta de 2 a 3 horas de fermentação.

- c) Após 1 a 2 horas de fermentação começou a ocorrer aumento mais acentuado da biomassa e por volta de 7 a 8 horas, esta tendeu a estabilizar-se, com exceção do experimento nº 8, em que a biomassa estabilizou-se com 6 horas de fermentação.

4.3 - EXPERIMENTOS DO GRUPO III

$$\theta' = 7h; \quad K = 0,4 \text{ h}^{-1}$$

4.3.1 - Experimento nº 11

Condições experimentais:

$$S_0 = 231,2 \text{ g/L } (\Delta = 0,5\%); \quad F = 2,98 \cdot e^{-0,4 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.14 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 11

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	52,8	-	-	158,4	-	-	-	-
1	5,5	11,0	31,9	78,8	17,4	175,5	578,0	385,7	192,3	85,2
2	7,1	9,0	26,6	67,3	29,8	188,9	947,9	434,8	513,1	192,5
3	8,2	10,0	25,7	45,5	38,7	210,7	1202,2	293,6	908,6	285,7
4	9,0	9,0	26,2	31,1	47,2	235,8	1387,2	254,7	1132,5	386,5
5	9,4	8,5	27,2	28,4	56,7	255,7	1479,7	244,3	1235,4	487,7
6	9,8	8,0	27,9	16,2	63,8	273,5	1572,2	146,1	1426,1	575,2
7	10,0	8,0	27,3	7,8	68,9	273,0	1618,4	71,8	1546,6	633,9
8	10,0	8,0	27,2	6,6	68,5	272,0	1618,4	60,7	1557,7	630,2
9	10,0	8,0	26,4	7,3	66,9	264,0	1618,4	67,2	1551,2	615,5
10	10,0	8,0	26,2	5,3	68,7	262,0	1618,4	48,8	1569,6	632,0

FIGURA 4.11 - Resultados em massa do experimento nº 11
 $S_0 = 231,2 \text{ g/L}$; $\theta' = 7\text{h}$; $K = 0,4\text{h}^{-1}$

4.3.2 - Experimento nº 12

Condições experimentais:

$$S_O = 204,7 \text{ g/L } (\Delta = -11,0\%); \quad F = 2,98 \cdot e^{-0,4 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.15 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 12

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	51,0	-	-	153,0	-	-	-	-
1	5,5	13,0	40,2	55,0	17,9	221,1	511,8	263,2	248,6	85,6
2	7,1	8,5	24,7	55,0	28,3	175,4	839,3	357,3	482,0	183,9
3	8,2	9,0	25,0	45,7	37,6	205,0	1064,4	341,0	723,4	280,6
4	9,0	8,0	24,9	38,2	48,1	224,1	1228,2	316,3	911,9	398,3
5	9,4	7,5	25,1	21,4	53,0	235,9	1310,1	186,1	1124,0	460,8
6	9,8	8,0	24,6	9,7	61,5	241,1	1392,0	87,5	1304,5	554,5
7	10,0	7,5	22,9	5,0	64,1	229,0	1432,9	46,3	1386,6	592,9
8	10,0	7,0	26,8	5,6	65,0	268,0	1432,9	52,1	1380,8	604,5
9	10,0	7,0	25,8	5,8	59,8	258,0	1432,9	53,9	1379,0	556,1
10	10,0	7,0	25,0	5,3	65,0	250,0	1432,9	49,3	1383,6	604,5

FIGURA 4.12 - Resultados em massa do experimento nº 12
 $S_0 = 204,7 \text{ g/L}$; $\theta' = 7\text{h}$; $K = 0,4\text{h}^{-1}$

4.3.3 - Experimento nº 13

Condições experimentais:

$$S_0 = 210,4 \text{ g/L } (\Delta = -8,5\%); \quad F = 2,98 \cdot e^{-0,4 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.16 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 13

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	53,2	-	-	159,6	-	-	-	-
1	5,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	7,1	10,0	25,8	58,2	25,5	183,2	862,6	371,9	490,7	162,9
3	8,2	8,3	22,1	52,4	28,9	181,2	1094,1	394,0	700,1	217,3
4	9,0	7,1	22,0	35,4	39,2	198,0	1262,4	295,9	966,5	327,7
5	9,4	7,9	23,0	14,4	49,8	216,2	1346,6	124,7	1221,9	431,2
6	9,8	7,5	24,6	12,3	61,2	241,1	1451,8	111,5	1340,3	554,7
7	10,0	7,5	24,6	6,2	67,3	246,0	1472,8	57,4	1415,4	622,5
8	10,0	7,5	25,5	5,2	68,1	255,0	1472,8	48,1	1424,7	629,9
9	10,0	7,5	25,2	4,4	68,5	252,0	1472,8	40,7	1432,1	633,6

FIGURA 4.13 - Resultados em massa do experimento nº 13
 $S_0 = 210,4 \text{ g/L}$; $\theta' = 7\text{h}$; $K = 0,4\text{h}^{-1}$

4.3.4 - Experimento nº 14

Condições experimentais:

$$S_O = 236,9 \text{ g/L } (\Delta = 3,0\%); \quad F = 2,98 \cdot e^{-0,4 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em l/h})$$

TABELA 4.17 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 14

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _c (g)
0	3,0	-	54,2	-	-	162,6	-	-	-	-
1	5,5	13,0	29,5	82,3	16,7	162,3	592,3	393,8	198,5	79,9
2	7,1	10,0	25,5	79,1	26,9	181,1	971,3	505,4	465,9	171,9
3	8,2	10,0	25,4	61,7	39,3	208,2	1231,9	455,3	776,6	290,0
4	9,0	8,0	24,6	32,0	48,6	221,4	1421,4	265,0	1156,4	402,4
5	9,4	8,0	25,9	22,3	55,7	243,5	1516,2	192,9	1323,3	481,7
6	9,8	8,0	27,5	12,8	62,9	269,6	1634,6	115,4	1519,2	567,1
7	10,0	8,0	23,7	5,3	66,3	237,0	1658,3	48,8	1609,5	610,0
8	10,0	8,0	23,8	4,4	65,9	238,0	1658,3	40,5	1617,8	606,3
9	10,0	8,0	26,4	4,9	66,7	264,0	1658,3	45,1	1613,2	613,6
10	10,0	8,0	26,6	6,0	67,0	266,0	1658,3	55,2	1603,1	616,4

FIGURA 4.14 - Resultados em massa do experimento nº14
 $S_0 = 236,9 \text{ g/L}$; $\theta' = 7\text{h}$; $K = 0,4\text{h}^{-1}$

4.3.5 - Experimento nº 15

Condições experimentais:

$$S_0 = 236,5 \text{ g/L } (\Delta = 2,8\%); \quad F = 2,98 \cdot e^{-0,4 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.18 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 15

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	49,6	-	-	148,8	-	-	-	-
1	5,5	12,05	29,6	70,4	16,7	162,8	591,3	338,8	252,5	80,4
2	7,1	10,8	25,7	96,2	25,0	182,5	969,7	609,3	360,4	158,3
3	8,2	11,7	24,3	49,1	35,7	199,3	1229,8	355,5	874,3	258,5
4	9,0	9,2	24,1	50,1	39,4	216,9	1419,0	409,4	1009,6	322,0
5	9,4	9,2	24,1	28,2	50,0	226,5	1513,6	240,7	1272,9	426,8
6	9,8	8,3	25,1	13,8	56,1	246,0	1631,9	124,1	1507,8	504,1
7	10,0	7,7	26,1	7,0	64,6	261,0	1655,5	64,6	1590,9	596,3
8	10,0	7,5	25,4	3,8	65,6	254,0	1655,5	35,2	1620,3	606,8
9	10,0	7,5	25,4	-	-	254,0	1655,5	-	-	-

FIGURA 4.15 - Resultados em massa do experimento nº 15
 $S_0 = 236,5 \text{ g/L}$; $\theta' = 7\text{h}$; $K = 0,4 \text{ h}^{-1}$

4.3.6 - Apresentação dos resultados obtidos no grupo
III de experimentos

TABELA 4.19 - Resultados obtidos nos experimentos do grupo
III

Nº do experimento	θ (h)	P'_e (g/L.h)	P_e	η (%)	P'_X (g/L.h)	P_X	R'_X (%)	R_X (%)
11	7,0	9,0	9,0	75,9	1,7	1,7	74,1	74,1
12	7,0	8,4	8,4	80,5	1,5	1,5	66,7	66,7
13	7,0	9,0	9,0	83,5	1,4	1,4	59,4	59,4
14	7,0	8,7	8,7	72,2	1,4	1,4	59,5	59,5
15	7,0	8,6	8,6	71,1	1,6	1,6	74,5	74,5

4.3.7 - Comentários preliminares

A análise das figuras deste grupo de experimentos levaram às seguintes conclusões:

- a) A produção de etanol foi constante desde o início da fase de enchimento até 6 a 7 horas da mesma. Conseguiu-se, neste grupo de experimentos, que se atingisse o final da fermentação no final da fase de enchimento da dorna.

- b) As maiores diferenças entre massa de ART adicionada e consumida ocorreram por volta de 2 horas de fermentação. Essas diferenças foram mais acentuadas que as do grupo II de experimentos.
- c) As curvas de acompanhamento de biomassa mostram que após 6 horas de fermentação a massa celular tendeu a estabilizar ou mesmo decrescer . (Experimento nº 11).

4.4 - EXPERIMENTOS DO GRUPO IV

$$\theta' = 7h; \quad K = 0,6 \, h^{-1}$$

4.4.1 - Experimento nº 16

Condições experimentais:

$$S_O = 236,9 \text{ g/L } (\Delta = 3,0\%); \quad F = 4,26 \cdot e^{-0,6 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.20 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 16

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{SA} (g)	M _{SR} (g)	M _{SC} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	54,2	-	-	162,6	-	-	-	-
1	6,2	10,0	26,1	97,5	14,9	161,8	758,1	544,0	214,1	83,2
2	8,0	9,0	23,0	99,8	27,2	184,0	1137,1	726,5	410,6	198,0
3	8,9	9,0	23,8	67,3	37,9	211,8	1397,7	545,1	852,6	307,0
4	9,5	8,0	25,3	39,4	48,6	240,3	1539,9	344,3	1195,6	424,8
5	9,8	8,0	26,7	22,0	58,0	261,6	1610,9	198,3	1412,6	523,0
6	9,9	8,0	27,6	10,0	65,2	273,2	1634,6	91,1	1543,5	593,8
7	10,0	8,0	23,8	6,0	67,0	238,0	1658,3	55,2	1603,1	616,4
8	10,0	8,0	24,1	5,6	65,9	241,0	1658,3	51,5	1606,8	606,3
9	10,0	8,0	27,2	5,1	66,7	272,0	1658,3	46,9	1611,4	613,6
10	10,0	8,0	26,8	5,8	67,0	268,0	1658,3	53,4	1604,9	616,4

FIGURA 4.16 - Resultados em massa do experimento nº 16
 $S_0 = 236,9$ g/L; $\theta' = 7$ h; $K = 0,6$ h $^{-1}$

4.4.2 - Experimento nº 17

Condições experimentais:

$$S_O = 204,7 \text{ g/L } (\Delta = -11,0\%); F = 4,26 \cdot e^{-0,6 \cdot t} \text{ (t em h e F em L/h)}$$

TABELA 4.21 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 17

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	51,7	-	-	155,1	-	-	-	-
1	6,2	12,0	25,8	81,2	14,5	159,9	655,0	443,0	212,0	79,1
2	7,8	11,0	21,9	74,7	30,5	175,2	982,6	531,9	450,7	217,1
3	8,9	8,0	23,0	70,2	35,8	204,7	1207,7	574,8	632,9	293,1
4	9,5	8,0	24,0	48,7	45,1	228,0	1330,6	425,6	905,0	394,2
5	9,8	8,0	24,2	26,7	55,1	237,2	1392,0	240,7	1151,3	496,7
6	9,9	8,0	23,8	13,1	60,7	237,7	1412,4	119,3	1293,1	552,8
7	10,0	8,0	23,8	5,7	64,4	238,0	1432,9	52,4	1380,5	592,5
8	10,0	7,0	25,6	5,7	63,5	256,0	1432,9	53,0	1379,9	590,6
9	10,0	7,0	25,8	5,7	64,3	258,0	1432,9	53,0	1379,9	598,0
10	10,0	7,0	27,3	5,6	63,9	273,0	1432,9	52,1	1380,8	594,3

FIGURA 4.17 - Resultados em massa do experimento nº 17
 $S_0 = 204,7 \text{ g/L}$; $\theta' = 7\text{h}$; $K = 0,6\text{h}^{-1}$

4.4.3 - Experimento nº 18

Condições experimentais:

$$S_O = 229,6 \text{ g/L } (\Delta = -0,2\%); \quad F = 4,26 \cdot e^{-0,6 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.22 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 18

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	52,5	-	-	157,5	-	-	-	-
1	6,2	8,8	25,4	91,1	15,7	157,4	734,7	515,1	219,6	88,3
2	8,0	8,3	21,6	99,5	23,6	172,8	1102,1	656,6	445,5	173,1
3	8,9	7,5	21,7	69,0	34,0	193,1	1354,6	568,1	786,5	279,9
4	9,5	7,5	22,8	40,8	45,1	216,6	1492,4	358,5	1133,9	396,3
5	9,8	7,5	24,5	33,0	55,8	240,1	1561,3	299,1	1262,2	505,8
6	9,9	7,5	26,3	13,1	63,9	260,3	1584,2	120,0	1464,2	585,2
7	10,0	7,5	26,8	6,2	67,5	268,0	1607,2	57,4	1549,8	624,1
8	10,0	7,5	25,0	5,9	69,8	250,0	1607,2	54,6	1552,6	645,7
9	10,0	7,5	27,4	5,9	67,1	274,0	1607,2	54,6	1552,6	620,7

FIGURA 4.18 - Resultados em massa do experimento nº 18
 $S_0 = 229,6 \text{ g/L}$; $\theta' = 7\text{h}$; $K = 0,6\text{h}^{-1}$

4.4.4 - Experimento nº 19

Condições experimentais:

$$S_O = 229,6 \text{ g/L } (\Delta = -0,2\%); \quad F = 4,26 \cdot e^{-0,6 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.23 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 19

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	53,8	-	-	161,4	-	-	-	-
1	6,2	10,0	25,5	97,3	13,5	158,1	734,7	542,9	191,8	75,4
2	8,0	9,2	23,5	84,0	25,9	188,0	1102,1	610,2	491,9	188,1
3	8,9	8,3	23,4	74,0	33,5	208,3	1354,6	604,0	750,6	273,4
4	9,5	7,5	24,4	56,8	46,6	231,8	1492,4	499,1	993,3	409,5
5	9,8	7,5	25,7	33,9	56,4	251,9	1561,3	307,3	1254,0	511,3
6	9,9	7,5	26,8	15,5	56,0	265,3	1584,2	142,9	1442,2	513,8
7	10,0	7,5	27,4	4,8	67,3	274,0	1607,2	44,4	1562,8	622,5
8	10,0	7,5	27,1	6,2	66,2	271,0	1607,2	57,4	1549,8	612,4
9	10,0	7,5	26,2	3,7	68,0	262,0	1607,2	34,2	1573,0	629,0

FIGURA 4.19 - Resultados em massa do experimento nº 19
 $S_0 = 229,6 \text{ g/L}$; $\theta' = 7\text{h}$; $K = 0,6 \text{ h}^{-1}$

4.4.5 - Experimento nº 20

Condições experimentais:

$$S_0 = 229,6 \text{ g/L } (\Delta = -0,2\%); F = 4,26 \cdot e^{-0,6 \cdot t} \text{ (t em h e F em L/h)}$$

TABELA 4.24 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 20

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	52,1	-	-	156,3	-	-	-	-
1	6,2	8,8	24,6	89,8	13,6	152,6	734,7	507,8	226,9	76,9
2	8,0	8,3	22,1	87,1	22,8	176,8	1102,1	639,0	463,1	167,2
3	8,9	7,5	20,6	67,2	32,8	183,4	1354,6	553,2	801,4	270,0
4	9,5	7,5	22,5	52,3	45,5	213,8	1492,4	459,6	1302,8	399,8
5	9,8	7,5	24,4	33,9	55,1	239,1	1561,3	307,3	1254,0	499,4
6	9,9	7,5	26,5	13,1	56,6	262,6	1584,2	118,1	1466,1	510,5
7	10,0	7,5	27,0	2,4	67,5	270,0	1607,2	22,2	1585,0	624,4
8	10,0	7,5	20,1	6,0	67,5	201,0	1607,2	55,5	1551,7	624,4
9	10,0	7,5	27,5	5,4	67,9	275,0	1607,2	50,0	1557,2	628,1

FIGURA 4.20 - Resultados em massa do experimento nº 20
 $S_0 = 229,6 \text{ g/L}$; $e' = 7\text{h}$; $K = 0,6\text{h}^{-1}$

4.4.6 - Apresentação dos resultados obtidos no grupo IV de experimentos

TABELA 4.25 - Resultados obtidos nos experimentos do grupo IV

Nº do experimento	θ (h)	P'_e (g/L.h)	P_e	η (%)	P'_X (g/L.h)	P_X	R'_X (%)	R_X (%)
16	7,0	8,8	8,8	72,4	1,5	1,5	65,6	65,6
17	7,0	8,5	8,5	81,1	1,3	1,4	58,1	64,5
18	7,0	9,0	9,0	76,7	1,7	1,7	74,1	74,1
19	7,0	8,9	8,9	75,7	1,6	1,6	67,7	67,7
20	7,0	8,9	8,9	76,2	1,7	1,7	76,3	76,3

4.4.7 - Comentários preliminares

A análise das figuras deste grupo de experimentos levaram às seguintes conclusões:

- a) A produção de etanol foi praticamente constante no intervalo de tempo de (1 - 5) horas. Nos experimentos nºs 18 e 20 houve um aumento da velocidade de etanol dos instantes iniciais para o intervalo de tempo de (1 - 5) horas. Como nos experimentos do grupo III, as fermentações terminaram no final da fase de enchimento da dorna.

- b) As curvas de massa de ART tiveram um comportamento similar às aquelas do grupo III de experimentos, mas neste chegou-se a maiores massas de ART residuais na dorna.
- c) As curvas de acompanhamento de biomassa mostram que após 6 a 7 horas de fermentação a massa celular tendeu a estabilizar ou mesmo decrescer. (Experimento nº19)

4.5 - EXPERIMENTOS DO GRUPO V

$$\Theta' = 5h; \quad K = 0$$

4.5.1 - Experimento nº 21

Condições experimentais:

$$S_O = 204,7 \text{ g/L } (\Delta = -11,0\%); \quad F = 1,40 \text{ L/h}$$

TABELA 4.26 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 21

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	52,0	-	-	156,0	-	-	-	-
1	4,4	10,0	37,0	25,7	14,3	162,8	286,6	101,8	184,8	56,6
2	5,8	12,5	29,5	34,9	24,0	171,1	573,2	177,1	396,1	121,8
3	7,2	9,2	25,8	44,2	29,0	185,8	859,7	289,0	570,7	189,6
4	8,6	9,2	23,5	41,0	32,0	202,1	1146,3	320,2	826,1	249,9
5	10,0	8,3	21,2	37,9	39,7	212,0	1432,9	347,5	1085,4	364,0
6	10,0	7,5	22,5	13,2	52,7	225,0	1432,9	122,1	1310,8	487,5
7	10,0	7,5	22,3	5,7	59,4	223,0	1432,9	52,7	1380,2	549,5
8	10,0	7,5	23,3	4,5	59,4	233,0	1432,9	41,6	1391,3	549,5
9	10,0	7,5	23,2	4,5	63,0	232,0	1432,9	41,6	1391,3	582,8
10	10,0	7,5	23,1	6,4	59,4	231,0	1432,9	59,2	1373,7	549,5

FIGURA 4.21 - Resultados em massa do experimento nº 21
 $S_0 = 204,7$ g/L; $\theta' = 5$ h; $K = 0$

4.5.2 - Experimento nº 22

Condições experimentais:

$S_O = 204,8 \text{ g/L}$ ($\Delta = -11,0\%$); $F = 1,40 \text{ L/h}$

TABELA 4.27 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 22

t (h)	V_d (L)	V_X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M_X (g)	M_{Sa} (g)	M_{Sr} (g)	M_{Sc} (g)	M_e (g)
0	3,0	-	55,6	-	-	166,8	-	-	-	-
1	4,4	14,2	37,6	21,2	23,6	165,4	286,7	80,0	206,7	89,1
2	5,8	12,5	31,2	30,4	30,8	181,0	573,4	154,3	419,1	156,3
3	7,2	9,6	27,2	34,5	34,6	195,8	860,2	224,6	635,6	225,2
4	8,6	8,8	24,7	40,4	45,6	212,4	1146,9	316,9	830,0	357,6
5	10,0	7,9	22,6	42,9	49,8	226,0	1433,6	395,1	1038,5	458,7
6	10,0	7,3	24,5	17,7	60,9	245,0	1433,6	164,1	1269,5	564,5
7	10,0	7,5	25,4	5,0	65,4	254,0	1433,6	46,3	1387,3	605,0
8	10,0	7,5	25,3	5,4	65,4	253,0	1433,6	50,0	1383,6	605,0
9	10,0	7,5	25,4	5,0	65,4	254,0	1433,6	46,3	1387,3	605,0

FIGURA 4.22 - Resultados em massa do experimento nº 22
 $S_0 = 204,8$ g/L; $\theta' = 5$ h; $K = 0$

4.5.3 - Experimento nº 23

Condições experimentais:

$S_O = 228,9 \text{ g/L}$ ($\Delta = -0,5\%$); $F = 1,40 \text{ L/h}$

TABELA 4.28 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 23

t (h)	V_d (L)	V_X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M_X (g)	M_{Sa} (g)	M_{Sr} (g)	M_{Sc} (g)	M_e (g)
0	3,0	-	53,0	-	-	159,0	-	-	-	-
1	4,4	15,4	29,0	23,8	12,6	127,6	320,5	88,6	231,9	46,9
2	5,8	11,3	32,9	45,2	19,9	190,8	640,9	232,5	408,4	102,4
3	7,2	9,2	27,7	51,1	34,1	199,4	961,4	334,1	627,3	222,9
4	8,6	8,3	25,0	45,5	42,3	215,0	1281,8	358,8	923,0	333,6
5	10,0	7,5	22,6	38,2	47,1	226,0	1602,3	353,4	1248,9	435,7
6	10,0	7,5	24,4	22,0	55,4	244,0	1602,3	203,5	1398,8	512,5
7	10,0	7,5	23,6	5,9	63,0	236,0	1602,3	54,6	1547,7	582,8
8	10,0	7,5	26,6	6,2	62,6	266,0	1602,3	57,4	1544,9	579,1
9	10,0	7,5	26,1	6,4	63,3	261,0	1602,3	59,2	1543,1	585,5

FIGURA 4.23 - Resultados em massa do experimento nº 23
 $S_0 = 228,9$ g/L; $\theta' = 5$ h; $K = 0$

4.5.4 - Experimento nº 24

Condições experimentais:

$S_O = 229,5 \text{ g/L}$ ($\Delta = -0,2\%$); $F = 1,40 \text{ L/h}$

TABELA 4.29 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 24

t (h)	V_d (L)	V_X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M_X (g)	M_{Sa} (g)	M_{Sr} (g)	M_{Sc} (g)	M_e (g)
0	3,0	-	52,6	-	-	157,8	-	-	-	-
1	4,4	15,0	38,4	28,2	20,6	169,0	321,3	105,5	215,8	77,0
2	5,8	12,1	30,6	38,9	33,3	177,5	642,6	198,3	444,3	169,8
3	7,2	10,0	27,4	51,5	37,7	197,3	963,9	333,7	630,2	244,3
4	8,6	8,3	23,4	47,0	44,8	201,2	1285,2	370,7	914,5	353,3
5	10,0	8,3	20,9	49,8	48,8	209,0	1606,5	456,7	1149,8	447,5
6	10,0	7,5	23,1	18,1	59,5	231,0	1606,5	167,4	1439,1	550,4
7	10,0	7,5	24,1	8,2	68,2	241,0	1606,5	75,9	1530,6	630,9
8	10,0	7,5	24,2	5,5	67,8	242,0	1606,5	50,9	1555,6	627,2
9	10,0	7,5	24,9	6,4	67,8	249,0	1606,5	59,2	1547,3	627,2

FIGURA 4.24 - Resultados em massa do experimento nº 24
 $S_0 = 229,5$ g/L; $\theta' = 5$ h; $K = 0$

4.5.5 - Experimento nº 25

Condições experimentais:

$$S_O = 233,5 \text{ g/L} \quad (\Delta = 1,5\%); \quad F = 1,40 \text{ L/h}$$

TABELA 4.30 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 25

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	58,6	-	-	175,8	-	-	-	-
1	4,4	12,5	40,8	21,9	19,8	179,5	326,9	84,5	242,4	76,2
2	5,8	11,7	31,9	38,9	31,3	185,0	653,8	199,2	454,6	160,3
3	7,2	10,8	27,0	45,6	37,8	194,4	980,7	292,9	687,8	242,8
4	8,6	9,2	26,4	37,1	50,5	227,0	1307,6	289,7	1017,9	394,3
5	10,0	8,3	23,9	27,1	49,4	239,0	1634,5	250,3	1384,2	453,0
6	10,0	8,3	23,9	18,6	56,6	239,0	1634,5	170,6	1463,9	519,0
7	10,0	8,3	27,8	6,8	65,8	278,0	1634,5	62,4	1572,1	603,4
8	10,0	7,5	25,4	5,9	66,2	254,0	1634,5	54,6	1579,9	612,4
9	10,0	8,3	26,2	5,9	67,0	262,0	1634,5	54,1	1580,4	614,4

FIGURA 4.25 - Resultados em assa do experimento nº 25
 $S_0 = 233,5 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0$

4.5.6 - Apresentação dos resultados obtidos no grupo
V de experimentos

TABELA 4.31 - Resultados obtidos nos experimentos do grupo V

Nº do experimento	θ (h)	P'_e (g/L.h)	P_e	η (%)	P'_X (g/L.h)	P_X	R'_X (%)	R_X (%)
21	7,0	7,3	8,0	76,2	1,2	1,0	37,8	44,2
22	7,0	9,2	8,6	82,6	1,2	1,3	34,7	52,7
23	7,0	8,7	8,3	71,1	1,4	1,4	44,7	60,4
24	7,0	9,0	9,0	76,5	1,2	1,2	39,2	55,1
25	7,0	9,1	8,7	73,0	1,3	1,2	36,4	47,7

4.5.7 - Comentários preliminares

A análise das figuras deste grupo de experimentos levaram às seguintes conclusões:

- As curvas de produção de etanol não apresentaram comportamento tão próximo ao linear como nos experimentos dos grupos anteriores.
- No decorrer da fase de enchimento houve aumento da diferença entre massa de ART adicionada e consumida, tendo a massa de ART residual na dorna seu valor máximo no fi-

nal da fase de enchimento ou em tempo bem próximo.

- c) As curvas de acompanhamento de biomassa mostram que após 6 a 7 horas de fermentação a massa celular tendeu a estabilizar.

4.6 - EXPERIMENTOS DO GRUPO VI

$$\Theta' = 5h; \quad K = 0,2 h^{-1}$$

4.6.1 - Experimento nº 26

Condições experimentais:

$$S_O = 204,7 \text{ g/L } (\Delta = -11,0\%); \quad F = 2,21 \cdot e^{-0,2 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.32 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 26

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	47,0	-	-	141,0	-	-	-	-
1	5,0	13,3	32,6	77,9	11,8	163,0	409,4	337,7	71,7	51,2
2	6,7	10,8	26,3	52,5	23,3	176,2	757,4	313,7	443,7	139,2
3	8,0	9,2	24,6	45,4	29,0	196,8	1023,5	329,8	693,7	210,7
4	9,1	8,3	24,0	42,0	34,7	218,4	1248,7	350,5	898,2	289,6
5	10,0	8,3	23,1	25,0	44,6	231,0	1432,9	229,3	1203,6	409,0
6	10,0	7,5	23,1	7,4	55,5	231,0	1432,9	68,5	1364,4	513,4
7	10,0	7,5	22,9	4,8	59,0	229,0	1432,9	44,4	1388,5	545,8
8	10,0	7,5	24,1	4,7	57,8	241,0	1432,9	43,5	1389,5	534,7
9	10,0	7,5	24,0	4,9	59,4	240,0	1432,9	45,3	1387,6	549,5
10	10,0	7,5	24,1	4,8	-	241,0	1432,9	44,4	1388,5	-

FIGURA 4.26 - Resultados em massa do experimento nº 26
 $S_0 = 204,7 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,2\text{h}^{-1}$

4.6.2 - Experimento nº 27

Condições experimentais:

$$S_O = 220,0 \text{ g/L } (\Delta = -4,3\%); \quad F = 2,21 \cdot e^{-0,2 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.33 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 27

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	52,1	-	-	156,3	-	-	-	-
1	5,0	13,5	34,1	50,0	18,0	170,5	440,0	216,3	223,7	77,8
2	6,7	11,5	29,3	47,7	33,1	196,3	814,0	265,1	548,9	196,3
3	8,0	9,0	27,2	37,0	42,5	217,6	1100,0	269,4	830,6	309,4
4	9,1	10,0	26,5	33,4	46,5	241,2	1342,0	273,5	1068,5	380,8
5	10,0	8,0	25,0	22,5	53,1	250,0	1540,0	207,0	1333,0	488,5
6	10,0	8,0	26,8	-	57,5	268,0	1540,0	-	-	529,0
7	10,0	7,5	25,1	6,0	60,5	251,0	1540,0	55,5	1484,5	559,6
8	10,0	7,5	26,0	5,3	60,1	260,0	1540,0	49,0	1491,0	555,9
9	10,0	7,5	24,9	6,3	63,0	249,0	1540,0	58,3	1481,7	582,8
10	10,0	7,5	25,2	6,1	62,7	252,0	1540,0	56,4	1483,6	580,0

FIGURA 4.27 - Resultados em massa do experimento nº 27
 $S_0 = 220,0 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,2\text{h}^{-1}$

4.6.3 - Experimento nº 28

Condições experimentais:

$$S_O = 229,5 \text{ g/L } (\Delta = -0,2\%); \quad F = 2,21 \cdot e^{-0,2 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.34 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 28

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	53,5	-	-	160,5	-	-	-	-
1	5,0	13,3	33,3	54,3	20,2	166,5	459,0	235,4	223,6	87,5
2	6,7	10,8	26,9	60,8	31,7	180,2	849,2	363,4	485,8	189,4
3	8,0	9,2	24,5	61,1	36,9	196,0	1147,5	443,8	703,7	268,0
4	9,1	8,3	24,3	52,4	47,2	221,1	1400,4	437,3	962,7	393,9
5	10,0	8,3	22,7	36,7	51,2	227,0	1606,5	336,5	1270,0	469,5
6	10,0	7,5	24,0	16,4	59,3	240,0	1606,5	151,7	1454,8	548,5
7	10,0	8,3	25,0	9,7	68,3	250,0	1606,5	88,9	1517,6	629,1
8	10,0	8,3	25,0	5,5	67,8	250,0	1606,5	50,4	1556,1	621,7
9	10,0	7,5	25,1	6,2	68,2	251,0	1606,5	57,4	1549,1	630,9

FIGURA 4.28 - Resultados em massa do experimento nº 28
 $S_0 = 229,5 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,2\text{h}^{-1}$

4.6.4 - Experimento nº 29

Condições experimentais:

$$S_o = 220,0 \text{ g/L} \quad (\Delta = -4,3\%); \quad F = 2,21 \cdot e^{-0,2 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.35 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 29

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sr} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	51,8	-	-	155,4	-	-	-	-
1	5,0	13,5	31,0	59,1	15,4	159,5	440,0	255,6	184,4	66,6
2	6,7	11,0	25,2	64,2	24,7	168,9	814,0	382,9	431,1	147,3
3	8,0	11,0	23,8	65,9	33,9	190,4	1100,0	469,2	630,8	241,4
4	9,1	9,0	23,2	50,7	41,0	211,1	1342,0	419,8	922,2	340,3
5	10,0	8,0	21,9	43,9	47,9	219,0	1540,0	403,9	1136,1	440,7
6	10,0	7,0	24,8	21,0	58,2	248,0	1540,0	195,3	1344,7	541,3
7	10,0	7,5	23,4	10,3	63,1	234,0	1540,0	95,3	1444,7	583,7
8	10,0	7,5	22,2	6,3	64,0	222,0	1540,0	58,3	1481,7	592,0
9	10,0	7,5	23,9	6,6	64,0	239,0	1540,0	61,1	1478,9	592,0
10	10,0	7,5	22,8	5,9	63,6	228,0	1540,0	54,6	1485,4	588,3

FIGURA 4.29 - Resultados em massa do experimento nº 29
 $S_0 = 220,0 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,2\text{h}^{-1}$

4.6.5 - Experimento nº 30

Condições experimentais:

$$S_O = 209,0 \text{ g/L } (\Delta = -9,1\%); \quad F = 2,21 \cdot e^{0,2 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.36 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 30

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	52,2	-	-	156,6	-	-	-	-
1	5,0	11,7	25,3	34,5	21,6	126,5	418,0	152,3	265,7	95,4
2	6,7	10,8	27,3	58,9	20,5	182,9	773,3	352,0	421,3	122,5
3	8,0	9,2	23,6	53,9	38,8	188,8	1045,0	391,5	653,5	281,8
4	9,1	8,3	23,0	47,6	44,4	209,3	1274,9	397,2	877,7	370,5
5	10,0	7,5	23,7	40,3	49,7	237,0	1463,0	372,8	1090,2	459,7
6	10,0	7,5	25,5	7,4	57,9	255,0	1463,0	68,5	1394,5	535,6
7	10,0	7,5	24,7	6,1	66,5	247,0	1463,0	56,4	1406,6	615,1
8	10,0	7,5	25,1	6,2	63,6	251,0	1463,0	57,4	1405,6	588,3
9	10,0	7,5	25,2	5,6	63,7	252,0	1463,0	51,8	1411,2	589,2

FIGURA 4.30 - Resultados em massa do experimento nº 30
 $S_0 = 209,0 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,2\text{h}^{-1}$

4.6.6 - Apresentação dos resultados obtidos no grupo VI de experimentos

TABELA 4.37 - Resultados obtidos nos experimentos do grupo VI

Nº do experimento	θ (h)	P'_e (g/L.h)	P_e	η (%)	P'_X (g/L.h)	P_X	R'_X (%)	R_X (%)
26	6,5	8,2	8,4	74,2	1,8	1,4	63,1	66,7
27	6,5	9,8	8,8	77,8	1,9	1,5	60,3	66,7
28	7,0	9,4	9,0	76,4	1,4	1,3	42,9	55,3
29	7,0	8,8	8,4	74,8	1,4	1,0	45,2	45,2
30	7,0	9,2	8,5	79,9	1,6	1,1	49,7	59,2

4.6.7 - Comentários preliminares

A análise das figuras deste grupo de experimentos levaram às seguintes conclusões:

- a) As curvas de produção de etanol mostraram comportamento linear durante a maior parte da fermentação.
- b) As maiores diferenças entre massa de ART adicionada e consumida ocorreram no intervalo de 3 a 4 horas de fermentação.

- c) As curvas de produção de biomassa mostraram que o crescimento celular cessou após 5 a 6 horas de fermentação.

4.7 - EXPERIMENTOS DO GRUPO VII

$$\Theta' = 5h; \quad K = 0,4 h^{-1}$$

4.7.1 - Experimento nº 31

Condições experimentais:

$$S_O = 220,0 \text{ g/L } (\Delta = -4,3\%); \quad F = 3,24 \cdot e^{-0,4 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.38 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 31

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	52,1	-	-	156,3	-	-	-	-
1	5,7	12,5	30,4	67,3	15,2	173,3	594,0	335,7	258,3	75,8
2	7,5	11,0	25,1	70,1	29,7	188,2	990,0	467,9	522,1	198,3
3	8,7	10,0	25,0	56,7	40,5	217,5	1254,0	443,9	810,1	317,2
4	9,5	9,0	25,6	40,4	46,9	243,2	1430,0	349,3	1080,7	403,7
5	10,0	8,5	26,1	20,1	53,1	261,0	1540,0	183,9	1356,1	485,9
6	10,0	8,5	26,7	-	59,4	267,0	1540,0	-	-	543,5
7	10,0	8,0	27,3	6,4	60,8	273,0	1540,0	58,9	1481,1	559,4
8	10,0	7,5	26,8	5,8	61,2	268,0	1540,0	53,7	1486,3	566,1
9	10,0	7,5	25,2	7,1	63,0	252,0	1540,0	65,7	1474,3	582,8
10	10,0	7,5	25,6	6,0	62,7	256,0	1540,0	55,5	1484,5	580,0

FIGURA 4.31 - Resultados em massa do experimento nº 31
 $S_0 = 220,0 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,4\text{h}^{-1}$

4.7.2 - Experimento nº 32

Condições experimentais:

$$S_O = 229,5 \text{ g/L} \quad (\Delta = -0,2\%); \quad F = 3,24 \cdot e^{-0,4 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.39 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 32

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	51,6	-	-	154,8	-	-	-	-
1	5,7	12,5	29,4	76,7	18,2	167,6	619,7	382,5	237,2	90,8
2	7,5	10,0	24,2	77,5	28,2	181,5	1032,8	523,1	509,7	190,3
3	8,7	8,8	22,1	70,4	34,1	192,3	1308,2	558,6	749,6	270,5
4	9,5	8,3	23,2	55,1	46,4	220,4	1491,8	480,0	1011,8	404,2
5	10,0	8,3	22,2	42,3	52,7	226,0	1606,5	387,9	1218,6	483,3
6	10,0	7,5	25,2	14,5	61,7	252,0	1606,5	134,1	1472,4	570,7
7	10,0	8,3	25,3	6,1	68,6	253,0	1606,5	55,9	1550,6	629,1
8	10,0	8,3	25,5	6,0	67,8	255,0	1606,5	55,0	1551,5	621,7
9	10,0	7,9	25,2	8,2	68,2	252,0	1606,5	75,5	1531,0	628,1

FIGURA 4.32 - Resultados em massa do experimento nº 32
 $S_0 = 229,5 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,4\text{h}^{-1}$

4.7.3 - Experimento nº 33

Condições experimentais:

$$S_O = 220,0 \text{ g/L } (\Delta = -4,3\%); \quad F = 3,24 \cdot e^{-0,4 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.40 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 33

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	51,4	-	-	154,2	-	-	-	-
1	5,7	12,0	26,8	74,0	13,2	152,8	594,0	371,2	222,8	66,2
2	7,5	10,0	22,3	85,3	24,4	167,3	990,0	575,8	414,2	164,7
3	8,7	10,0	22,2	73,1	33,5	193,2	1254,0	572,3	681,7	262,3
4	9,5	10,0	22,6	57,8	41,0	214,7	1430,0	494,2	935,8	351,4
5	10,0	10,0	22,3	41,5	49,4	223,0	1540,0	373,5	1166,5	444,6
6	10,0	7,0	25,9	17,0	59,4	259,0	1540,0	158,1	1381,9	552,4
7	10,0	7,5	23,8	7,1	64,0	238,0	1540,0	65,7	1474,3	592,0
8	10,0	7,5	23,7	6,3	64,0	237,0	1540,0	58,3	1481,7	592,0
9	10,0	7,5	23,0	6,4	63,6	230,0	1540,0	59,2	1480,8	588,3
10	10,0	7,5	22,5	6,3	64,0	225,0	1540,0	58,3	1481,7	592,0

FIGURA 4.33 - Resultados em massa do experimento nº 33
 $S_0 = 220,0$ g/L; $\theta' = 5$ h; $K = 0,4$ h $^{-1}$

4.7.4 - Experimento nº 34

Condições experimentais:

$$S_O = 204,7 \text{ g/L } (\Delta = -11,0\%); F = 3,24 \cdot e^{-0,4 \cdot t} \text{ (t em h e F em L/h)}$$

TABELA 4.41 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 34

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	50,7	-	-	152,1	-	-	-	-
1	5,7	11,7	28,8	65,9	9,5	164,2	552,7	331,6	221,1	47,0
2	7,5	13,3	23,9	70,2	20,6	179,3	921,2	456,4	464,8	133,9
3	8,7	8,3	22,8	48,7	27,5	198,3	1166,8	388,5	778,3	219,4
4	9,5	7,5	22,7	44,2	33,7	215,6	1330,6	410,6	920,0	313,0
5	10,0	7,5	23,8	9,2	46,1	238,0	1432,9	85,1	1347,8	426,4
6	10,0	7,5	24,9	9,5	56,7	249,0	1432,9	87,9	1345,0	524,5
7	10,0	7,5	24,3	4,8	59,4	243,0	1432,9	44,4	1388,5	549,5
8	10,0	7,5	24,6	7,6	66,9	246,0	1432,9	70,3	1362,6	618,8
9	10,0	8,3	24,4	5,0	59,4	244,0	1432,9	45,9	1387,0	544,7
10	10,0	7,5	25,0	6,5	57,5	250,0	1432,9	60,1	1372,8	531,9

FIGURA 4.34 - Resultados em massa do experimento nº 34
 $S_0 = 204,7 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,4\text{h}^{-1}$

4.7.5 - Experimento nº 35

Condições experimentais:

$$S_0 = 233,5 \text{ g/L } (\Delta = 1,5\%); F = 3,24 \cdot e^{-0,4 \cdot t} \text{ (t em h e F em L/h)}$$

TABELA 4.42 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 35

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	57,1	-		171,3	-	-	-	-
1	5,7	10,4	31,9	71,1	14,8	181,9	630,5	363,1	267,4	75,6
2	7,5	10,0	26,0	66,0	28,2	195,0	1050,8	445,5	605,3	190,3
3	8,7	10,0	23,4	69,2	37,0	203,5	1331,0	541,8	789,2	289,5
4	9,5	9,1	25,3	41,5	51,2	240,3	1517,8	358,4	1159,4	442,2
5	10,0	8,3	26,2	24,4	53,0	262,0	1634,5	223,7	1410,8	486,0
6	10,0	8,3	26,0	7,4	59,0	260,0	1634,5	67,9	1566,6	541,0
7	10,0	8,3	27,8	5,2	65,8	278,0	1634,5	47,7	1586,8	603,4
8	10,0	8,3	27,1	4,2	64,6	271,0	1634,5	38,5	1596,0	592,4
9	10,0	8,3	27,3	5,8	66,2	273,0	1634,5	53,2	1581,3	607,1

FIGURA 4.35 - Resultados em massa do experimento nº 35
 $S_0 = 233,5 \text{ g/L}$; $\theta' = 5 \text{ h}$; $K = 0,4 \text{ h}^{-1}$

4.7.6 - Apresentação dos resultados obtidos no grupo VII de experimentos

TABELA 4.43 - Resultados obtidos nos experimentos do grupo VII

Nº do experimento	θ (h)	P'_e (g/L.h)	P_e	η (%)	P'_X (g/L.h)	P_X	R'_X (%)	R_X (%)
31	6,5	9,7	8,8	72,7	2,1	1,9	66,7	73,1
32	6,5	9,7	9,6	76,3	1,5	1,4	48,4	61,3
33	6,5	8,9	9,1	75,1	1,6	1,3	52,6	59,1
34	6,5	8,5	8,6	76,6	1,7	1,5	54,6	64,5
35	6,5	9,7	9,2	72,0	1,7	1,5	49,1	60,8

4.7.7 - Comentários preliminares

A análise das figuras deste grupo de experimentos levaram às seguintes conclusões:

- a) As curvas de produção de etanol mostraram comportamento linear durante a maior parte da fermentação. Em alguns experimentos, a velocidade de produção de etanol nos instantes iniciais foi menor que no período de 1 a 5 horas.

- b) As maiores diferenças entre a massa de ART adicionada e consumida ocorreram no intervalo de 2 a 3 horas de fermentação.
- c) As curvas de produção de biomassa com o tempo mostrou uma tendência à estabilização após 6 horas de fermentação.

4.8 - EXPERIMENTOS DO GRUPO VIII

$$\theta' = 5h; \quad K = 0,6 h^{-1}$$

4.8.1 - Experimento nº 36

Condições experimentais:

$$S_O = 228,9 \text{ g/L } (\Delta = -0,5\%); \quad F = 4,42 \cdot e^{-0,6 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.44 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 36

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	53,5	-	-	160,5	-	-	-	-
1	6,3	10,4	27,1	92,1	13,5	170,8	755,4	519,4	235,6	76,2
2	8,2	8,8	20,4	99,7	21,5	167,3	1190,3	745,6	444,7	160,8
3	9,2	7,9	22,4	72,5	32,8	206,1	1419,3	614,3	805,0	277,9
4	9,7	7,9	24,8	53,9	44,1	240,6	1533,6	481,5	1052,1	394,0
5	10,0	7,9	26,7	28,5	51,8	267,0	1602,3	262,5	1339,8	477,1
6	10,0	7,9	25,8	11,7	60,5	258,0	1602,3	107,8	1494,5	557,2
7	10,0	7,9	25,7	5,2	63,3	257,0	1602,3	47,9	1554,4	583,0
8	10,0	7,9	27,7	4,7	62,6	277,0	1602,3	43,3	1559,0	576,5
9	10,0	7,9	27,8	6,4	60,1	278,0	1602,3	58,9	1543,4	553,5

FIGURA 4.36 - Resultados em massa do experimento nº 36
 $S_0 = 228,9 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,6\text{h}^{-1}$

4.8.2 - Experimento nº 37

Condições experimentais:

$$S_O = 228,9 \text{ g/L } (\Delta = -0,5\%); \quad F = 4,42 \cdot e^{-0,6 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.45 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 37

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	53,3	-	-	159,9	-	-	-	-
1	6,3	10,4	25,3	86,3	14,6	159,4	755,4	487,2	268,2	82,4
2	8,2	8,8	22,7	95,1	23,3	186,1	1190,3	711,2	479,2	174,3
3	9,2	7,9	21,9	76,0	29,2	201,5	1419,2	644,0	775,2	247,4
4	9,7	7,9	25,1	53,9	43,4	243,5	1533,6	481,5	1052,1	387,7
5	10,0	7,9	26,0	19,4	57,3	260,0	1602,3	178,7	1423,6	527,7
6	10,0	7,9	27,8	10,5	62,7	278,0	1602,3	96,7	1505,6	577,5
7	10,0	7,9	27,6	5,8	62,2	276,0	1602,3	53,4	1548,9	572,9
8	10,0	7,9	27,0	5,9	65,8	270,0	1602,3	54,3	1548,0	606,0
9	10,0	7,9	27,4	6,1	62,6	274,0	1602,3	56,2	1546,1	576,5

FIGURA 4.37 - Resultados em massa do experimento nº 37
 $S_0 = 228,9$ g/L; $\theta' = 5$ h; $K = 0,6$ h⁻¹

4.8.3 - Experimento nº 38

Condições experimentais:

$$S_O = 204,8 \text{ g/L } (\Delta = -11,0\%); \quad F = 4,42 \cdot e^{-0,6 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.46 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 38

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	54,3	-	-	162,9	-	-	-	-
1	6,3	10,8	27,3	59,8	19,0	172,0	675,8	336,0	339,8	106,8
2	8,2	9,2	22,5	66,9	24,7	184,5	1065,0	498,1	566,9	183,9
3	9,2	7,5	22,2	46,7	36,1	204,2	1269,8	397,5	872,3	307,2
4	9,7	7,9	24,5	47,6	45,3	237,7	1372,2	425,2	947,0	404,7
5	10,0	7,9	25,0	26,7	52,5	250,0	1433,6	245,9	1187,7	483,5
6	10,0	7,5	26,3	7,5	65,4	263,0	1433,6	69,4	1364,2	605,0
7	10,0	7,5	28,5	3,8	65,8	285,0	1433,6	35,2	1398,4	608,7
8	10,0	7,5	26,1	3,7	66,2	261,0	1433,6	34,2	1399,4	612,4
9	10,0	7,5	25,9	4,4	65,8	259,0	1433,6	40,7	1392,9	608,7

FIGURA 4.38 - Resultados em massa do experimento nº 38
 $S_0 = 204,8 \text{ g/L}$; $e' = 5h$; $K = 0,6h^{-1}$

4.8.4 - Experimento nº 39

Condições experimentais:

$$S_O = 204,8 \text{ g/L } (\Delta = -11,0\%); \quad F = 4,42 \cdot e^{-0,6 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.47 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 39

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	55,4	-	-	166,2	-	-	-	-
1	6,3	10,8	26,0	77,9	16,9	163,8	675,8	437,8	238,0	95,0
2	8,2	8,8	22,3	85,8	24,0	182,8	1065,0	641,6	423,4	179,5
3	9,2	7,9	21,8	64,7	35,0	200,6	1269,8	548,2	721,6	296,6
4	9,7	7,9	24,0	49,1	45,3	232,8	1372,2	438,2	934,0	404,7
5	10,0	7,9	24,7	28,5	52,1	247,0	1433,6	262,5	1171,1	479,8
6	10,0	7,5	27,1	6,9	64,3	271,0	1433,6	63,8	1369,8	594,8
7	10,0	7,5	25,9	4,3	65,4	259,0	1433,6	39,8	1393,8	605,0
8	10,0	7,5	26,0	3,2	65,4	260,0	1433,6	29,6	1404,0	605,0
9	10,0	7,5	26,3	4,6	65,8	263,0	1433,6	42,6	1391,0	608,7

FIGURA 4.39 - Resultados em massa do experimento nº 39
 $S_0 = 204,8 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,6\text{h}^{-1}$

4.8.5 - Experimento nº 40

Condições experimentais:

$$S_O = 220,0 \text{ g/L } (\Delta = -4,3\%); \quad F = 4,42 \cdot e^{-0,6 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.48 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 40

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	52,0	-	-	156,0	-	-	-	-
1	6,3	11,0	24,8	102,4	12,4	156,2	726,0	574,2	151,8	69,5
2	8,2	10,0	20,9	100,1	23,2	171,3	1144,0	738,7	405,3	171,2
3	9,2	10,0	22,0	75,0	33,1	202,4	1364,0	621,0	743,0	274,1
4	9,7	10,0	22,9	49,1	43,4	222,1	1474,0	428,6	1045,4	378,9
5	10,0	9,0	23,6	33,0	51,3	236,0	1540,0	300,3	1239,7	466,8
6	10,0	7,5	26,1	13,6	60,2	261,0	1540,0	125,8	1414,2	556,9
7	10,0	7,5	26,8	6,2	65,5	268,0	1540,0	57,4	1482,6	605,9
8	10,0	7,5	26,2	6,4	64,0	262,0	1540,0	59,2	1480,8	592,0
9	10,0	7,5	22,5	6,6	63,6	225,0	1540,0	70,3	1469,7	588,3
10	10,0	7,5	24,8	4,9	64,0	248,0	1540,0	45,3	1494,7	592,0

FIGURA 4.40 - Resultados em massa do experimento nº 40
 $S_0 = 220,0 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,6 \text{ h}^{-1}$

4.8.6 - Apresentação dos resultados obtidos no grupo VIII de experimentos

TABELA 4.49 - Resultados obtidos nos experimentos do grupo VIII

Nº do experimento	θ (h)	P'_e (g/L.h)	P_e	η (%)	P'_X (g/L.h)	P_X	R'_X (%)	R_X (%)
36	6,0	9,5	9,5	69,7	2,0	1,7	61,5	67,7
37	6,0	10,6	9,7	71,2	2,0	1,9	62,5	71,9
38	6,0	9,7	10,1	83,1	1,8	1,8	56,4	65,6
39	6,0	9,6	10,1	82,4	1,8	1,7	53,6	59,6
40	6,5	11,9	9,1	75,6	1,6	1,7	50,6	69,9

4.8.7 - Comentários preliminares

A análise das figuras deste grupo de experimentos levaram às seguintes conclusões:

- As curvas de produção de etanol com o tempo mostraram comportamento linear durante a maior parte da fermentação.
- As curvas de massa de ART tiveram um comportamento similar às aquelas do grupo VII de experimentos, mas neste grupo chegou-se a maiores massas de ART residuais na

dorna.

- c) As curvas de acompanhamento de biomassa mostraram que houve crescimento celular e que após 6 horas de fermentação a massa celular tendeu a estabilizar ou mesmo decrescer.

4.9 - EXPERIMENTOS DO GRUPO IX

$$\theta' = 5h; \quad K = 0,8h^{-1}$$

4.9.1 - Experimento nº 41

Condições experimentais:

$$S_O = 209,0 \text{ g/L } (\Delta = -9,1\%); \quad F = 5,70 \cdot e^{-0,8 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.50 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 41

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	48,2	-	-	144,6	-	-	-	-
1	6,9	10,8	29,6	101,3	15,3	204,2	815,1	623,5	191,6	94,2
2	8,7	9,2	20,4	60,5	25,1	177,5	1191,3	477,9	713,4	198,3
3	9,5	8,3	20,4	71,8	35,3	193,8	1358,5	625,5	733,0	307,5
4	9,8	8,3	22,1	47,6	42,7	216,6	1421,2	427,8	993,4	383,7
5	10,0	8,3	23,1	33,3	48,3	231,0	1463,0	305,4	1157,6	442,9
6	10,0	8,3	25,8	7,8	62,0	258,0	1463,0	71,5	1391,5	568,5
7	10,0	8,3	24,1	5,6	63,0	241,0	1463,0	51,4	1411,6	577,7
8	10,0	8,3	25,9	5,4	64,1	259,0	1463,0	49,5	1413,5	587,8
9	10,0	8,3	25,3	5,4	63,7	253,0	1463,0	49,5	1413,5	584,1

FIGURA 4.41 - Resultados em massa do experimento nº 41
 $S_0 = 209,0 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,8\text{h}^{-1}$

4.9.2 - Experimento nº 42

Condições experimentais:

$$S_O = 209,0 \text{ g/L} \quad (\Delta = -9,1\%); \quad F = 5,70 \cdot e^{-0,8t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.51 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 42

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	53,6	-	-	160,8	-	-	-	-
1	6,9	10,8	25,8	101,3	16,0	178,0	815,1	623,5	191,6	98,5
2	8,7	9,2	19,9	66,9	24,4	173,1	1191,3	528,5	662,8	192,8
3	9,5	8,3	21,9	67,6	34,9	208,1	1358,5	588,9	769,6	304,0
4	9,8	8,3	21,0	48,3	43,0	205,8	1421,2	434,1	987,1	386,4
5	10,0	8,3	24,1	34,3	48,6	241,0	1463,0	314,5	1148,5	445,7
6	10,0	8,3	25,4	7,8	62,3	254,0	1463,0	71,5	1391,5	571,3
7	10,0	8,3	25,3	5,3	64,1	253,0	1463,0	48,6	1414,4	587,8
8	10,0	8,3	25,2	4,8	62,7	252,0	1463,0	44,0	1419,0	575,0
9	10,0	8,3	25,3	5,2	63,7	253,0	1463,0	47,7	1415,3	584,1

FIGURA 4.42 - Resultados em massa do experimento nº 42
 $S_0 = 209,0 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,8\text{h}^{-1}$

4.9.3 - Experimento nº 43

Condições experimentais:

$$S_O = 212,2 \text{ g/L} \quad (\Delta = -7,7\%); \quad F = 5,70 \cdot e^{-0,8 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.52 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 43

t	V _d	V _X	X	S	E	M _X	M _{Sa}	M _{Sr}	M _{Sc}	M _e
(h)	(L)	(%)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
0	3,0	-	49,4	-	-	148,2	-	-	-	-
1	6,9	10,0	24,8	105,4	14,5	171,2	827,6	654,5	173,1	90,0
2	8,7	8,3	22,1	93,1	22,2	192,3	1209,5	742,7	466,8	177,1
3	9,5	7,5	21,7	84,2	32,0	206,2	1379,3	739,9	639,4	281,2
4	9,8	7,9	23,8	70,1	41,4	233,2	1443,0	632,7	810,3	373,7
5	10,0	8,3	27,1	37,5	51,6	271,0	1485,4	343,9	1141,5	473,2
6	10,0	8,3	26,7	13,4	60,1	267,0	1485,4	122,9	1362,5	551,1
7	10,0	8,3	27,2	6,1	64,4	272,0	1485,4	55,9	1429,5	590,5
8	10,0	8,3	25,6	5,5	64,8	256,0	1485,4	50,4	1435,0	594,2
9	10,0	8,3	27,1	6,1	64,4	271,0	1485,4	55,9	1429,5	590,5

FIGURA 4.43 - Resultados em massa do experimento nº 43
 $S_0 = 212,2 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,8 \text{ h}^{-1}$

4.9.4 - Experimento nº 44

Condições experimentais:

$$S_O = 212,2 \text{ g/L } (\Delta = -7,7\%); \quad F = 5,70 \cdot e^{-0,8 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.53 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 44

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	53,5	-	-	160,5	-	-	-	-
1	6,9	10,0	26,3	111,0	14,1	181,5	827,6	689,3	138,3	87,6
2	8,7	8,3	22,9	95,6	21,3	199,2	1209,5	762,7	446,8	169,9
3	9,5	7,5	22,3	85,4	32,0	211,9	1379,3	750,5	628,8	281,2
4	9,8	7,9	23,9	64,3	41,8	234,2	1443,0	580,4	862,6	377,3
5	10,0	8,3	26,9	35,2	52,0	269,0	1485,4	322,8	1162,6	476,8
6	10,0	8,3	26,9	10,2	62,2	269,0	1485,4	93,5	1391,9	570,4
7	10,0	8,3	25,4	5,7	65,2	254,0	1485,4	52,3	1433,1	597,9
8	10,0	8,3	27,4	5,6	63,1	274,0	1485,4	51,4	1434,0	578,6
9	10,0	8,3	25,8	5,7	64,4	258,0	1485,4	52,3	1433,1	590,5

FIGURA 4.44 - Resultados em massa do experimento nº 44
 $S_0 = 212,2 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,8 \text{ h}^{-1}$

4.9.5 - Experimento nº 45

Condições experimentais

$$S_O = 212,2 \text{ g/L} \quad (\Delta = -7,7\%); \quad F = 5,70 - e^{-0,8 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.54 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 45

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	51,6	-	-	154,8	-	-	-	-
1	6,9	10,0	25,1	107,7	14,1	173,2	827,6	668,8	158,8	87,6
2	8,7	8,3	23,0	99,7	21,3	200,1	1209,5	795,4	414,1	169,9
3	9,5	7,5	22,1	81,8	30,7	210,0	1379,3	718,8	660,5	269,8
4	9,8	7,9	23,8	66,2	41,4	233,2	1443,0	597,5	845,5	373,7
5	10,0	8,3	26,7	39,7	52,0	267,0	1485,4	364,0	1121,4	476,8
6	10,0	8,3	27,1	19,4	58,4	271,0	1485,4	177,9	1307,5	535,5
7	10,0	8,3	28,0	5,6	64,0	280,0	1485,4	51,4	1434,0	586,9
8	10,0	8,3	25,6	5,4	64,0	256,0	1485,4	49,5	1435,9	586,9
9	10,0	8,3	26,0	6,2	64,4	260,0	1485,4	56,9	1428,5	590,5

FIGURA 4.45 - Resultados em massa do experimento nº 45
 $S_0 = 212,2 \text{ g/L}$; $\theta' = 5\text{h}$; $K = 0,8 \text{ h}^{-1}$

4.9.6 - Apresentação dos resultados obtidos no grupo IX de experimentos

TABELA 4.55 - Resultados obtidos nos experimentos do grupo IX

Nº do experimento	θ (h)	P'_e (g/L.h)	P_e	η (%)	P'_X (g/L.h)	P_X	R'_X (%)	R_X (%)
41	6,0	8,9	9,7	77,5	1,7	1,8	58,6	72,4
42	6,0	8,9	9,7	77,5	1,6	1,6	50,0	59,4
43	6,5	9,5	9,1	78,0	2,2	1,8	73,3	80,0
44	6,0	9,5	9,7	77,0	2,0	1,8	62,5	68,8
45	7,0	9,5	8,4	77,5	2,1	1,6	67,7	74,2

4.9.7 - Comentários preliminares

A análise das figuras deste grupo de experimentos levaram às seguintes conclusões:

- a) As curvas de produção de etanol com o tempo mostraram comportamento linear por praticamente toda a fermentação.
- b) As maiores diferenças entre massa de ART adicionada e consumida ocorreram no intervalo de 1 a 3 horas de fer-

mentação. Em média, este grupo de experimentos apresentou a maior massa de ART residual na aorta no instante correspondente à máxima massa de ART residual.

- c) As curvas de acompanhamento de biomassa mostraram que houve crescimento celular e que após 5 a 6 horas de fermentação a massa celular tendeu a estabilizar.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como finalidade examinar e interpretar os resultados apresentados no capítulo anterior, utilizando-se, basicamente as produtividades em etanol e em células para analisar o comportamento do sistema. Deste modo convém destacar três aspectos inerentes à obtenção desses resultados:

- a) A forma utilizada na determinação do final da fermentação, uma vez que este foi determinado com auxílio do gráfico que relaciona massa de etanol em função do tempo (item 3.4);
- b) O método utilizado na determinação da concentração celular (item 3.4.2.3);
- c) A determinação do volume celular (V_X), visto que o método empregado (item 3.4.2.5) não permitiu a separação completa das duas fases (sobrenadante e sedimento).

Para facilitar apresentou-se nas tabelas 5.1 e 5.2 os resultados obtidos nos grupos de experimentos de I a IV e de V a IX, respectivamente, uma vez que irão ser utilizados os valores médios para a discussão desses resultados.

TABELA 5.1 - Resultados obtidos nos grupos de experimentos
de I a IV ($\theta' = 7$ h)

GRUPO	Nº Exp.	K (h ⁻¹)	θ (h)	P' _e (g/L.h)	P' _e (g/L.h)	η (%)	P' _X (g/L.h)	P _X	R' _X (%)	R _X (%)
I	1	0	8,0	7,8	7,7	74,2	1,4	1,2	62,3	62,3
I	2	0	8,0	7,6	7,5	71,4	1,3	1,2	62,2	65,5
I	3	0	8,0	8,0	7,8	83,2	1,0	0,9	42,9	46,0
I	4	0	7,5	8,0	8,0	73,0	1,2	1,1	50,9	54,1
I	5	0	8,0	8,3	7,9	76,8	1,1	1,2	50,0	59,4
II	6	0,2	7,5	8,7	8,4	83,7	1,2	1,2	52,2	55,3
II	7	0,2	7,0	8,6	8,6	81,8	1,3	1,3	58,1	58,1
II	8	0,2	7,0	8,7	8,7	71,9	1,2	1,2	50,3	50,3
II	9	0,2	8,0	7,9	7,4	70,3	1,4	1,3	64,4	71,1
II	10	0,2	7,5	8,4	8,5	77,3	1,3	1,2	58,4	58,4
III	11	0,4	7,0	9,0	9,0	75,9	1,7	1,7	74,1	74,1
III	12	0,4	7,0	8,4	8,4	80,5	1,5	1,5	66,7	66,7
III	13	0,4	7,0	9,0	9,0	83,5	1,4	1,4	59,4	59,4
III	14	0,4	7,0	8,7	8,7	72,2	1,4	1,4	59,5	59,5
III	15	0,4	7,0	8,6	8,6	71,1	1,6	1,6	74,5	74,5
IV	16	0,6	7,0	8,8	8,8	72,4	1,5	1,5	65,6	65,6
IV	17	0,6	7,0	8,5	8,5	81,1	1,4	1,4	64,5	64,5
IV	18	0,6	7,0	9,0	9,0	76,1	1,7	1,7	74,1	74,1
IV	19	0,6	7,0	8,9	8,9	75,7	1,6	1,6	67,7	67,7
IV	20	0,6	7,0	8,9	8,9	76,2	1,7	1,7	76,3	76,3

TABELA 5.2 - Resultados obtidos nos grupos de experimentos
de V a IX ($\theta' = 5$ h)

GRUPO	Nº Exp.	K (h ⁻¹)	θ (h)	P' _e (g/L.h)	P _e	η (%)	P' _X (g/L.h)	P _X	R' _X (%)	R _X (%)
V	21	0	7,0	7,3	8,0	76,2	1,2	1,0	37,8	44,2
V	22	0	7,0	9,2	8,6	82,6	1,2	1,3	34,7	52,7
V	23	0	7,0	8,7	8,3	71,1	1,4	1,4	44,7	60,4
V	24	0	7,0	9,0	9,0	76,5	1,2	1,2	39,2	55,1
V	25	0	7,0	9,1	8,7	73,0	1,3	1,2	36,4	47,7
VI	26	0,2	6,5	8,2	8,4	74,2	1,8	1,4	63,1	66,7
VI	27	0,2	6,5	9,8	8,8	77,8	1,9	1,5	60,3	66,7
VI	28	0,2	7,0	9,4	9,0	76,4	1,4	1,3	42,9	55,3
VI	29	0,2	7,0	8,8	8,4	74,8	1,4	1,0	45,2	45,2
VI	30	0,2	7,0	9,2	8,5	79,9	1,6	1,1	49,7	59,2
VII	31	0,4	6,5	9,7	8,8	72,7	2,1	1,9	66,7	73,1
VII	32	0,4	6,5	9,7	9,6	76,3	1,5	1,4	48,4	61,3
VII	33	0,4	6,5	8,9	9,1	75,1	1,6	1,3	52,6	59,1
VII	34	0,4	6,5	8,5	8,6	76,6	1,7	1,5	54,6	64,5
VII	35	0,4	6,5	9,7	9,2	72,0	1,7	1,5	49,1	60,8
VIII	36	0,6	6,0	9,5	9,5	69,7	2,0	1,7	61,5	67,7
VIII	37	0,6	6,0	10,6	9,7	71,2	2,0	1,9	62,5	71,9
VIII	38	0,6	6,0	9,7	10,1	83,1	1,8	1,8	56,4	65,6
VIII	39	0,6	6,0	9,6	10,1	82,4	1,8	1,7	53,6	59,6
VIII	40	0,6	6,5	11,9	9,1	75,6	1,6	1,7	50,6	69,9
IX	41	0,8	6,0	8,9	9,7	77,5	1,7	1,8	58,6	72,4
IX	42	0,8	6,0	8,9	9,7	77,5	1,6	1,6	50,0	59,4
IX	43	0,8	6,5	9,5	9,1	78,0	2,2	1,8	73,3	80,0
IX	44	0,8	6,0	9,5	9,7	77,0	2,0	1,8	62,5	68,8
X	45	0,8	7,0	9,5	8,4	77,5	2,1	1,6	67,7	74,2

5.2 - PRODUÇÃO DE ETANOL

Nos itens 5.2.1.1 e 5.2.1.2 são abordadas as produtividades em etanol em função das constantes de adição (K) e do tempo de enchimento da dorna (θ'), respectivamente, enquanto que o item 5.2.2 refere-se ao rendimento em etanol.

5.2.1 - Produtividade em etanol

5.2.1.1 - Produtividade em etanol em função da constante de adição (K):

Na tabela 5.3 são apresentados os valores médios das produtividades em etanol no final da fase de enchimento da dorna ($\bar{P}'_e$) e no final da fermentação ($\bar{P}_e$), seus desvios padrão (δ) e valores de K correspondentes, para $\theta' = 7$ h. Nas figuras 5.1 e 5.2 são representados os gráficos elaborados a partir dessa tabela.

TABELA 5.3 - Produtividades em etanol em função de K , para $\theta' = 7$ h

K (h^{-1})	$\bar{\theta}$ (h)	$\delta_{\bar{\theta}}$ (h)	$\bar{P}'_e$ (g/L.h)	$\delta_{\bar{P}'_e}$ (g/L.h)	$\bar{P}_e$ (g/L.h)	$\delta_{\bar{P}_e}$ (g/L.h)
0	7,9	0,2	7,9	0,3	7,8	0,2
0,2	7,4	0,4	8,5	0,3	8,3	0,5
0,4	7,0	0,0	8,7	0,3	8,7	0,3
0,6	7,0	0,0	8,8	0,2	8,7	0,3

FIGURA 5.1 - Produtividade média em etanol no final da fase de enchimento da dorna em função da constante de adição, para $\theta' = 7$ h.

FIGURA 5.2 - Produtividade média em etanol no final da fermentação em função da constante de adição, para $\theta' = 7$ h.

Na tabela 5.4 são apresentados os valores médios das produtividades em etanol ($\bar{P}'_e$ e $\bar{P}_e$), com seus desvios padrão e valores de K correspondentes, para $\theta' = 5$ h. Nas figuras 5.3 e 5.4 são representados os gráficos elaborados a partir dessa tabela.

TABELA 5.4 - Produtividades em etanol em função de K, para $\theta' = 5$ h.

K (h ⁻¹)	$\bar{\theta}$ (h)	$\delta\bar{\theta}$ (h)	$\bar{P}'_e$ (g/L.h)	$\delta\bar{P}'_e$ (g/L.h)	$\bar{P}_e$ (g/L.h)	$\delta\bar{P}_e$ (g/L.h)
0	7,0	0,0	8,7	0,8	8,5	0,4
0,2	6,8	0,3	9,1	0,6	8,6	0,3
0,4	6,5	0,0	9,3	0,6	9,1	0,4
0,6	6,1	0,2	10,3	1,0	9,7	0,4
0,8	6,3	0,4	9,3	0,3	9,3	0,6

A tabela 5.3 e as figuras 5.1 e 5.2 permitem concluir que, para $\theta' = 7$ h, as produtividades médias em etanol ($\bar{P}'_e$ e $\bar{P}_e$) são funções crescentes de K, tendendo a um valor máximo para K por volta de $0,6 \text{ h}^{-1}$. Convém destacar, no entanto, que praticamente não houve aumento da produtividade quando se trabalhou com valor de K igual a $0,6 \text{ h}^{-1}$ em vez de $0,4 \text{ h}^{-1}$. Isso ocorreu porque para os valores de K iguais a $(0,4 \text{ e } 0,6) \text{ h}^{-1}$ a fermentação terminou no final da fase de enchimento da dorna ($\theta = \theta'$), sendo os valores das massas de etanol produzidas bastante

FIGURA 5.3 - Produtividade média em etanol no final da fase de enchimento da dorna em função da constante de adição, para $\theta' = 5$ h.

FIGURA 5.4 - Produtividade média em etanol no fim da fermentação em função da constante de adição, para $\theta' = 5$ h.

próximos. Portanto, seria preferível trabalhar com valor de K igual a $0,4 \text{ h}^{-1}$ em vez de $0,6 \text{ h}^{-1}$, pois as produtividades médias em etanol são praticamente equivalentes e com valor de K igual a $0,4 \text{ h}^{-1}$ a diferença entre vazão final e inicial é menor, facilitando o trabalho operacional.

Não se aumentou o valor da constante de adição (K) acima de $0,6 \text{ h}^{-1}$, pois não havia sentido, já que com os valores de K iguais a $(0,4 \text{ e } 0,6) \text{ h}^{-1}$ obteve-se o fim da fermentação no fim da fase de enchimento.

A tabela 5.4 e as figuras 5.3 e 5.4 mostram que, para $\Theta' = 5\text{h}$, as produtividades médias em etanol ($\bar{P}'_e$ e $\bar{P}_e$) são funções crescentes para o intervalo de K de $(0,2 - 0,6) \text{ h}^{-1}$, sendo decrescentes no intervalo de K de aproximadamente $(0,6 - 0,8) \text{ h}^{-1}$. A queda das produtividades em etanol quando se passou o valor de K de $0,6 \text{ h}^{-1}$ a $0,8 \text{ h}^{-1}$ não era inesperada, uma vez que para os valores de K igual a $0,8 \text{ h}^{-1}$ atingiram-se as maiores concentrações de ART residuais na dorna, chegando a concentrações superiores a 100 g/L , as quais começam a se tornar inibitórias à fermentação (16, 56). Portanto, quando se trabalhou com tempo de enchimento da dorna igual a 5 h , conseguiu-se melhores resultados com valor de K igual a $0,6 \text{ h}^{-1}$.

Para tempo de enchimento da dorna de 7 h , quando se passou o valor de K de 0 (vazão constante de alimentação) para K igual a $0,6 \text{ h}^{-1}$, houve um aumento de $(11,4 \text{ e } 11,5)\%$ em $\bar{P}'_e$ e $\bar{P}_e$, respectivamente. E, para tempo de enchimento de 5 h , quando se passou o valor de K de 0 (vazão constante de alimentação) para K igual a

$0,6 \text{ h}^{-1}$, houve um aumento de (18,4 e 14,1)% em $\bar{P}'_e$ e $\bar{P}_e$, respectivamente.

Embora os perfis das curvas de produtividades médias em etanol, em função da constante de adição sejam diferentes, ambos são crescentes tendendo a um ponto de máxima produtividade, a partir do qual poder-se-ia manter-se ($\theta' = 7 \text{ h}$) ou decrescer ($\theta' = 5 \text{ h}$).

5.2.1.2 - Produtividades em etanol em função do tempo de enchimento da dorna(θ')

Na tabela 5.5 são apresentados os valores médios das produtividades em etanol no fim da fase de enchimento da dorna ($\bar{P}'_e$) e no fim da fermentação ($\bar{P}_e$), seus desvios padrão (δ) e valores de θ' e constantes de adição (K) correspondentes. Nas figuras 5.5 e 5.6 são representados os gráficos elaborados a partir dessa tabela

A tabela 5.5 e as figuras 5.5 e 5.6 permitem concluir que as produtividades em etanol foram maiores quando se trabalhou com tempo de enchimento da dorna de 5 horas em vez de 7 horas, para o mesmo valor da constante de adição (K). Esta constatação vem confirmar resultados obtidos anteriormente para vazões constantes de alimentação (28, 40, 42, 68) e até mesmo ampliar as conclusões desses resultados, visto que essas podem ser estendidas para as vazões exponencialmente decrescentes.

TABELA 5.5 - Produtividades em etanol em função de θ'

θ' (h)	K (h ⁻¹)	$\bar{P}'_e$ (g/L.h)	$\delta \bar{P}'_e$ (g/L.h)	$\bar{P}_e$ (g/L.h)	$\delta \bar{P}_e$ (g/L.h)
7	0	7,9	0,3	7,8	0,2
5	0	8,7	0,8	8,5	0,4
7	0,2	8,5	0,3	8,3	0,5
5	0,2	9,1	0,6	8,6	0,3
7	0,4	8,7	0,3	8,7	0,3
5	0,4	9,3	0,6	9,1	0,4
7	0,6	8,8	0,2	8,8	0,2
5	0,6	10,3	1,0	9,7	0,4

FIGURA 5.5 - Correlação entre produtividade média em etanol no final da fase de enchimento da dorna e tempo de enchimento.

FIGURA 5.6 - Correlação entre produtividade média em etanol no final da fermentação e tempo de enchimento.

A partir dos itens 5.2.1.1 e 5.2.1.2 conclui-se que são importantes tanto a variação da vazão de alimentação quanto o tempo de enchimento da dorna, sem considerar as variáveis não estudadas aqui. Exemplificando: o fato de passar-se de $\theta' = 7 \text{ h}$ e $K = 0$ para $\theta' = 5 \text{ h}$ e $K = 0,6 \text{ h}^{-1}$, levou a um aumento de 24,4% na produtividade em etanol no final da fermentação.

5.2.2 - Rendimento em etanol

Procurou-se uma correlação entre rendimento médio em etanol ($\bar{\eta}$), constante de adição (K), produtividade média em etanol ($\bar{P}_e$) e tempo de enchimento da dorna (θ').

5.2.2.1 - Rendimento em etanol em função da constante de adição (K) e da produtividade média em etanol ($\bar{P}_e$)

Na tabela 5.6 são apresentados os valores médios dos rendimentos em etanol, das produtividades em etanol no final da fermentação ($\bar{P}_e$) com os respectivos desvios padrão e valores de K , para $\theta' = 7 \text{ h}$. Nas figuras 5.7 e 5.8 são representados os gráficos elaborados a partir dessa tabela.

TABELA 5.6 - Rendimentos em etanol em função de K e $\bar{P}_e$, para $\theta' = 7 \text{ h}$

K (h^{-1})	θ (h)	$\bar{\eta}$ (%)	$\delta_{\bar{\eta}}$ (%)	$\bar{P}_e$ (g/L.h)	$\delta_{\bar{P}_e}$ (g/L.h)
0	7	75,7	4,6	7,8	0,2
0,2	7	77,0	5,9	8,3	0,5
0,4	7	76,6	5,3	8,7	0,3
0,6	7	76,4	3,1	8,8	0,2

Na tabela 5.7 são apresentados os valores médios dos rendimentos em etanol, das produtividades em etanol no final da fermentação ($\bar{P}_e'$) com os respectivos desvios padrão e valores da constante de adição (K), para $\theta' = 5 \text{ h}$. Nas figuras 5.9 e 5.10 são representados os gráficos elaborados a partir dessa tabela.

TABELA 5.7 - Rendimentos em etanol em função de K e $\bar{P}_e$, para $\theta' = 5 \text{ h}$

K (h^{-1})	θ (h)	η (%)	$\delta_{\bar{\eta}}$ (%)	$\bar{P}_e$ (g/L.h)	δ_{P_e} (g/L.h)
0	5	75,9	4,4	8,5	0,4
0,2	5	76,6	2,3	8,6	0,3
0,4	5	74,5	2,1	9,1	0,4
0,6	5	76,4	6,2	9,7	0,4
0,8	5	77,5	0,4	9,3	0,6

FIGURA 5.7 - Rendimento médio em etanol em função da constante de adição, para $\theta' = 7$ h.

FIGURA 5.8 - Rendimento médio em etanol em função da produtividade média em etanol no final da fermentação, para $\theta' = 7$ h.

FIGURA 5.9 - Rendimento médio em etanol em função da constante de adição, para $\theta' = 5$ h.

FIGURA 5.10 - Rendimento médio em etanol em função da produtividade média em etanol no final da fermentação, $\theta' = 5$ h.

5.2.2.2 - Rendimento em etanol em função do
tempo de enchimento da dorna (θ')

Na tabela 5.8 são apresentados os valores médios dos rendimentos em etanol ($\bar{\eta}$), seus desvios padrão e valores de θ' e constantes de adição (K) correspondentes. Na figura 5.11 é representado o gráfico elaborado a partir dessa tabela.

TABELA 5.8 - Rendimentos em etanol em função de θ'

θ' (h)	K (h ⁻¹)	$\bar{\eta}$ (%)	$\delta \bar{\eta}$ (%)
7	0	75,7	4,6
5	0	75,9	2,3
7	0,2	77,0	5,9
5	0,2	76,6	2,3
7	0,4	76,6	5,3
5	0,4	74,5	2,1
7	0,6	76,4	5,3
5	0,6	76,4	6,2

FIGURA 5.11 - Correlação entre rendimento médio em etanol e tempo de enchimento da dorna.

A análise das tabelas 5.6 e 5.7 e das figuras 5.8 e 5.10 levam à conclusão que não houve correlação entre produtividade em etanol e rendimento em etanol, confirmando resultados obtidos por outros autores (40,43).

Observando-se também as tabelas 5.6, 5.7, 5.8 e as figuras 5.7, 5.9 e 5.11, que relacionam rendimentos médios em etanol em função da constante de adição (K) e tempo de enchimento da dorna (θ') é possível concluir que os rendimentos em etanol independem de K e de θ' estudados.

O valor médio obtido para o rendimento em etanol para tempo de enchimento da dorna de 7 h foi de 76,4% ($\delta = 3,0\%$) e para tempo de enchimento de 5 h foi de 75,9% ($\delta = 0,9\%$).

Não se obtiveram rendimentos mais elevados, provavelmente, porque trabalhou-se com fermento prensado, que além de ser obtido por processo aeróbico de fermentação não foi ativado previamente para trabalhar em melhores condições em processo anaeróbico de fermentação.

5.3 - PRODUÇÃO DE CÉLULAS

Neste item serão abordadas as razões de crescimento celular e as produtividades em células em função das constantes de adição (K) e do tempo de enchimento da dorna (θ').

5.3.1 - Razão de crescimento celular

5.3.1.1 - Razão de crescimento celular em função da constante de adição (K)

Na tabela 5.9 são apresentados os valores médios de massa celular inicial ($\bar{M}_{X0}$), razão de crescimento celular no final da fase de enchimento ($\bar{R}_X'$), razão de crescimento celular no final da fermentação ($\bar{R}_X$) e seus desvios padrão, para os respectivos valores de K , para $\theta' = 7$ h. Nas figuras 5.12 e 5.13 são representados os gráficos elaborados a partir dessa tabela.

TABELA 5.9 - Razões de crescimento celular em função de K , para $\theta' = 7 \text{ h}$

K (h^{-1})	$\bar{M}_{XO}$ (g)	$\delta \bar{M}_{XO}$ (g)	$\bar{R}'_X$ (%)	$\delta \bar{R}'_X$ (%)	$\bar{R}_X$ (%)	$\delta \bar{R}_X$ (%)
0	156,4	5,4	53,7	8,4	57,5	7,7
0,2	157,8	5,8	56,7	5,6	58,6	7,7
0,4	156,6	5,6	66,8	7,4	66,8	7,4
0,6	158,6	3,4	69,6	5,3	69,6	5,3

Na tabela 5.10 são apresentados os valores médios de massa celular inicial ($\bar{M}_{XO}$), razão de crescimento celular no final da fase de enchimento da dorna ($\bar{R}'_X$), razão de crescimento celular no final da fermentação ($\bar{R}_X$) e seus desvios padrão, para os respectivos valores de K , para $\theta'=5\text{h}$. Nas figuras 5.14 e 5.15 são representados os gráficos elaborados a partir dessa tabela.

TABELA 5.10 - Razões de crescimento celular em função de K , para $\theta' = 5 \text{ h}$

K (h^{-1})	$\bar{M}_{XO}$ (g)	$\delta \bar{M}_{XO}$ (g)	$\bar{R}'_X$ (%)	$\delta \bar{R}'_X$ (%)	$\bar{R}_X$ (%)	$\delta \bar{R}_X$ (%)
0	163,2	8,3	38,6	3,8	52,0	6,3
0,2	154,0	7,6	52,2	9,0	58,6	9,0
0,4	157,6	7,6	54,3	7,4	63,8	5,8
0,6	161,2	3,7	56,9	5,1	66,9	4,7
0,8	154,0	6,5	62,4	8,9	71,0	7,6

FIGURA 5.12 - Razão de crescimento celular média no final da fase de enchimento da dorna em função da constante de adição, para $\theta' = 7 \text{ h}$.

FIGURA 5.13 - Razão de crescimento celular média no final da fermentação em função da constante de adição, para $\theta' = 7 \text{ h}$.

FIGURA 5.14 - Razão de crescimento celular média no final da fase de enchimento da dorna em função da constante de adição, para $\theta' = 5$ h.

FIGURA 5.15 - Razão de crescimento celular média no final da fermentação em função da constante de adição, para $\theta' = 5$ h.

A tabela 5.9 e os gráficos das figuras 5.12 e 5.13 permitem concluir que, para $\theta' = 7$ h, as razões de crescimento celular médias no final da fase de enzhimento da dorna ($\bar{R}'_X$) e no final da fermentação ($\bar{R}/\bar{X}$) foram praticamente funções lineares crescentes da constante de adição (K), com as seguintes representações matemáticas:

$$\bar{R}'_X = 53,0 + 28,9 \cdot K \quad (r = 0,970)$$

$$\bar{R}_X = 56,5 + 22,3 \cdot K \quad (r = 0,960)$$

A tabela 5.10 e os gráficos das figuras 5.14 e 5.15, referentes a $\theta' = 5$ h, levam a conclusões análogas no que diz respeito às correlações entre $\bar{R}'_X$ e $\bar{R}_X$ com K, para $\theta' = 7$ h, com as seguintes representações matemáticas:

$$\bar{R}'_X = 48,2 + 16,6 \cdot K \quad (r = 0,972),$$

excluindo o ponto P (0; 38,6)

$$\bar{R}_X = 53,2 + 23,2 \cdot K \quad (r = 0,990)$$

Para tempo de enchimento da dorna de 7 h, quando se passou o valor de K de 0 (vazão constante de alimentação) para $K = 0,6 \text{ h}^{-1}$, houve um aumento de (29,6 e 21,0)% em $\bar{R}'_X$ e $\bar{R}_X$, respectivamente. E para tempo de enchimento de 5 h, quando se passou o valor de K de 0 (vazão constante de alimentação) para $K = 0,8 \text{ h}^{-1}$, houve um aumento de (61,7 e 36,5)% em $\bar{R}'_X$ e $\bar{R}_X$, respectivamente.

Ainda comparando vazão constante de alimentação ($K = 0$) com os valores extremos das constantes de adição testadas para tempos de enchimento da dorna (θ') de 7 horas e 5 horas, temos que para $\theta' = 7$ h, houve aumento de massa celular do final da fase de enchimento para o final de fermentação de 7,1% e 0% para $K = 0$ e $K = 0,6 \text{ h}^{-1}$, respectivamente. Para $\theta' = 5$ h, o aumento de massa celular do final da fase de enchimento da dorna para o final da fermentação foi de 34,7% e 13,8% para $K = 0$ e $K = 0,8 \text{ h}^{-1}$. Esses fatos indicam que no final da fase de enchimento da dorna, para valores de K mais elevados ($K = 0,6 \text{ h}^{-1}$ para $\theta' = 7$ h e $K = 0,8 \text{ h}^{-1}$ para $\theta' = 5$ h) a massa celular atingiu valores bem mais elevados do que aqueles obtidos com vazões constantes, uma vez que $\bar{M}_{X0}$ são valores bastante próximos.

Pelo fato de obter-se valores de $\bar{R}_X$ mais elevados para vazões exponencialmente decrescentes, poder-se-ia pensar que seria lógico ter-se valores mais baixos de rendimento em etanol, pois parte do substrato seria deslocado para a produção de células. Nossos resultados, no entanto, contradizem essa hipótese uma vez que os rendimentos em etanol permaneceram praticamente inalterados em função de K . Na verdade, sabe-se que o metabolismo celular compreende reações catabólicas que produzem energia, a qual será acoplada em reações de síntese. Se houver perda de energia na forma de calor esta não poderá ser utilizada pela célula. Essas considerações levam à conclusão que uma possível explicação pa

ra tais resultados obtidos está na maior eficiência das células em fermentar e crescer quando se trabalha com vazões exponencialmente decrescentes. Para que tivéssemos certeza dessa hipótese teríamos que medir quantidade de energia liberada da fermentação, o que não foi ainda possível.

5.3.1.2 - Razão do crescimento celular em função do tempo de alimentação da dorna (θ')

Na tabela 5.11 são apresentados os valores médios de massa celular inicial ($\bar{M}_{X0}$), razão de crescimento celular no final da fase de alimentação ($\bar{R}'_X$) razão de crescimento celular no final da fermentação ($\bar{R}_X$) e seus desvios padrão, para os respectivos valores de tempo de enchimento da dorna (θ') e constante de adição (K). Nas figuras 5.16 e 5.17 são representados os gráficos elaborados a partir dessa tabela.

A observação da tabela 5.11 e das figuras 5.16 e 5.17 permitem concluir que obtiveram-se maiores razões de crescimento celular para tempo de enchimento da dorna de 7 horas, não sendo encontrada uma explicação para este fenômeno até agora. O fato das diferenças entre as razões de crescimento celular para tempos de enchimento de 5 horas e 7 horas serem mais acentuadas no final da fase de enchimento da dorna são explicadas pelo maior tempo disponível para o crescimento celular quando $\theta' = 7$ h.

TABELA 5.11 - Razões de crescimento celular em função de θ'

θ' (h)	K (h ⁻¹)	$\bar{M}_{XO}$ (g)	$\delta \bar{M}_{XO}$ (g)	$\bar{R}'_X$ (%)	$\delta \bar{R}'_X$ (%)	$\bar{R}_X$ (%)	$\delta \bar{R}_X$ (%)
7	0	156,4	5,4	53,7	8,4	57,5	7,7
5	0	163,2	8,3	38,6	3,8	52,0	6,3
7	0,2	157,8	5,8	56,7	5,6	58,6	7,7
5	0,2	154,0	7,6	52,2	9,0	58,6	9,0
7	0,4	156,6	5,6	66,8	7,4	66,8	7,4
5	0,4	157,6	7,6	54,3	7,4	63,8	5,8
7	0,6	158,6	3,4	69,6	5,3	69,6	5,3
5	0,6	161,2	3,7	56,9	5,1	66,9	4,7

FIGURA 5.16 - Razão de crescimento celular média no final da fase de enchimento da dorna, em função do tempo de enchimento.

FIGURA 5.17 - Razão de crescimento celular média no final da fermentação, em função do tempo de enchimento da dorna.

Quando se passa das condições de trabalho de $\theta' = 5h$ e $K = 0$ para $\theta' = 7h$ e $K = 0$ temos um aumento de (39,1 e 10,6)% em $\bar{R}'_X$ e $\bar{R}_X$, respectivamente, sendo essas as maiores diferenças encontradas quando se considera apenas tempo de enchimento da dorna (θ').

A partir dos itens 5.3.1.1 e 5.3.1.2 é possível concluir que as razões de crescimento celular dependem tanto do tempo de enchimento da dorna quanto da variação da vazão de enchimento, sendo esta a de maior influência dentro dos limites de tempo de enchimento da dorna e constantes de adição estudadas.

5.3.2 - Produtividade em células

Estão inseridas neste item as produtividades em células em função da constante de adição (K) e do tempo de enchimento da dorna (θ').

5.3.2.1 - Produtividade em células em função da constante de adição (K)

Na tabela 5.12 são apresentados os valores médios de massa celular inicial ($\bar{M}_{X0}$), produtividade em células no final da fase de enchimento da dorna ($\bar{P}'_X$), produtividade em células no final da fermentação ($\bar{P}_X$) e seus desvios padrão, para os respectivos valores de K , para $\theta' = 7h$. Nas figuras 5.18 e 5.19 são representados os gráficos elaborados a partir dessa tabela.

TABELA 5.12 - Produtividades em células em função de K, para
 $\theta' = 7 \text{ h}$

K (h ⁻¹)	$\bar{M}_{X0}$ (g)	$\delta \bar{M}_{X0}$ (g)	$\bar{P}'_X$ (g/L.h)	$\delta \bar{P}'_X$ (g/L.h)	$\bar{P}_X$ (g/L.h)	$\delta \bar{P}_X$ (g/L.h)
0	156,4	5,4	1,2	0,16	1,1	0,13
0,2	157,8	5,8	1,3	0,08	1,2	0,05
0,4	156,6	5,6	1,5	0,13	1,5	0,13
0,6	158,6	3,4	1,6	0,13	1,6	0,13

Na tabela 5.13 são apresentados os valores médios de massa celular inicial ($\bar{M}_{X0}$), produtividade em células no final da fase de enchimento da dorna ($\bar{P}'_X$) e seus desvios padrão, para os respectivos valores de K, para $\theta' = 5 \text{ h}$. Nas figuras 5.20 e 5.21 são representados os gráficos elaborados a partir dessa tabela.

TABELA 5.13 - Produtividades em células em função de K,
para $\theta' = 5 \text{ h}$

K (h ⁻¹)	$\bar{M}_{XO}$ (g)	$\delta \bar{M}_{XO}$ (g)	$\bar{P}'_X$ (g/L.h)	$\delta \bar{P}'_X$ (g/L.h)	$\bar{P}_X$ (g/L.h)	$\delta \bar{P}_X$ (g/L.h)
0	163,2	8,3	1,3	0,09	1,2	0,15
0,2	154,0	7,6	1,6	0,23	1,3	0,21
0,4	157,6	7,6	1,7	0,23	1,5	0,23
0,6	161,2	3,7	1,8	0,17	1,8	0,09
0,8	154,0	6,5	1,9	0,26	1,7	0,11

FIGURA 5.18 - Produtividade média em células no final da fase de enchimento da dorna em função da constante de adição, para $\theta' = 7$ h.

FIGURA 5.19 - Produtividade média em células no final da fermentação em função da constante de adição, para $\theta' = 7$ h.

FIGURA 5.20 - Produtividade média em células no final da fase de enchimento da dorna em função da constante de adição, para $\theta' = 5 \text{ h}$.

FIGURA 5.21 - Produtividade média em células no final da fermentação em função da constante de adição, para $\theta' = 5 \text{ h}$.

A tabela 5.12 e os gráficos das figuras 5.18 e 5.19 permitem concluir que, para $\theta' = 7h$, as produtividades médias em células no final da fase de enchimento da dorna ($\bar{P}'_X$) e no final da fermentação ($\bar{P}_X$) foram praticamente funções lineares crescentes da constante de adição (K), com as seguintes representações matemáticas:

$$\bar{P}'_X = 1,19 + 0,70 \cdot K \quad (r = 0,990)$$

e

$$\bar{P}_X = 1,08 + 0,90 \cdot K \quad (r = 0,976)$$

Entretanto, as mesmas conclusões não são verdadeiras para o caso em que se trabalha com tempo de enchimento de dorna igual a 5 horas, a não ser para $\bar{P}'_X$, excluindo-se o ponto P (0; 1,3). Neste caso temos a seguinte representação matemática:

$$\bar{P}'_X = 1,5 + 0,50 \cdot K \quad (r = 1,000)$$

Quando se considera a produtividade em células, para $\theta' = 5 h$, no final da fermentação temos uma representação gráfica que se distancia de uma reta. Representa uma função crescente no intervalo de $(0-0,6)h^{-1}$, tendendo a um ponto de máximo e depois decrescendo, uma vez que para $K = 0,8 h^{-1}$ aumentou-se o tempo para que se completasse a fermentação.

Na verdade observando-se mais atentamente todos os gráficos que procuram correlacionar a produti

vidade em células com o valor de K (figuras 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21), pode-se perceber que, embora a maior parte deles mostre um comportamento praticamente linear, o que é muito interessante do ponto de vista prático, também ficaria claro que se as curvas fossem traçadas a rigor, estas teriam um perfil crescente tendendo a um ponto de máximo, o que foi observado mais nitidamente na figura 5.21. Optou-se pelo traçado linear no intervalo de K estudado, justamente por maiores facilidades do ponto de vista prático.

Convém destacar, porém, que as curvas que tendem a um ponto de máximo são as que mais se aproximam do fenômeno biológico, pois a partir de variações de vazões muito altas (constantes de adição mais elevadas) pode-se chegar a concentrações muito elevadas de ART na dorna, o que inibe o crescimento celular.

É interessante lembrar que os gráficos que correlacionam razão de crescimento celular e K (figuras 5.12, 5.13 e 5.14, principalmente) também possuem características semelhantes aos que correlacionam produtividade em células e K , motivo pelo qual lá se adotou o mesmo critério para o traçado dos gráficos.

Considerando as produtividades médias em células no final da fermentação ($\bar{P}_X$), para tempo de enchimento da dorna (θ') de 7 horas, quando se passou a constante de adição (K) de 0 para $0,6 \text{ h}^{-1}$ conseguiu-se um aumento de 45,5% em $\bar{P}_X$; para $\theta' = 5 \text{ h}$, quando se

passou constante de adição (K) de 0 para $0,6 \text{ h}^{-1}$ conseguiu-se um aumento de 50,0% em $\bar{P}_X$. A partir desses dados fica evidente a importância das vazões exponencialmente decrescentes, dadas pelos valores de K , também na produtividade em células.

5.3.2.2 - Produtividade em células em função do tempo de enchimento da dorna (θ')

Na tabela 5.14 são apresentados os valores médios das produtividades em células no final da fase de enchimento da dorna ($\bar{P}_X'$) e no final da fermentação ($\bar{P}_X$), seus desvios padrão (δ) e valores de θ' e constantes de adição (K) correspondentes. Nas figuras 5.22 e 5.23 são representados os gráficos elaborados a partir dessa tabela.

A observação da tabela 5.14 e das figuras 5.22 e 5.23 permitem concluir que obtiveram-se maiores produtividades médias em células para tempo de enchimento da dorna de 5 horas. Embora para o tempo de enchimento de 7 horas tenham sido encontrados valores maiores de razões de crescimento celular médias, o mesmo não aconteceu para as produtividades médias em células. Este fato é justificado pelos menores tempos de fermentação e de enchimento de dornas, decorrentes do enchimento das dornas ser efetuado num período de 5 horas e não de 7 horas.

TABELA 5.14 - Produtividades em células em função de θ'

θ' (h)	K (h ⁻¹)	$\bar{P}'_X$ (g/L.h)	$\delta \bar{P}'_X$ (g/L.h)	$\bar{P}_X$ (g/L.h)	$\delta \bar{P}_X$ (g/L.h)
7	0	1,2	0,16	1,1	0,13
5	0	1,3	0,09	1,2	0,15
7	0,2	1,3	0,08	1,2	0,05
5	0,2	1,6	0,23	1,3	0,21
7	0,4	1,5	0,13	1,5	0,13
5	0,4	1,7	0,23	1,5	0,23
7	0,6	1,6	0,13	1,6	0,13
5	0,6	1,8	0,17	1,8	0,09

FIGURA 5.22 - Produtividade média em células no final da fase de enchimento da dorna, em função do tempo de enchimento.

FIGURA 5.23 - Produtividade média em células no final da fermentação, em função do tempo de enchimento da dorna.

Considerando as produtividades médias em células no final da fermentação ($\bar{P}_X$), o maior aumento encontrado quando se passou de tempo de enchimento da dorna (θ') de 7 horas para 5 horas foi de 12,5%, para o valor da constante de adição (K) igual a $0,6 \text{ h}^{-1}$.

A partir dos itens 5.3.2.1 e 5.3.2.2 é possível concluir, que dentro dos limites de tempo de enchimento de dorna e constantes de adição estudados, as variações de vazão de enchimento (dadas pelas constantes de adição) têm maior influência nas produtividades em células.

5.4 - CORRELAÇÃO ENTRE PRODUÇÃO DE ETANOL E CRESCIMENTO CELULAR

Na tabela 5.15 são apresentados os valores médios das produtividades no final da fermentação em células ($\bar{P}_X$) e em etanol ($\bar{P}_e$), seus desvios padrão e respectivos valores das constantes de adição (K), para tempo de enchimento da dorna (θ') de 7 horas. Na figura 5.24 é representado o gráfico elaborado a partir dessa tabela.

Na tabela 5.16 são apresentados os valores médios das produtividades no final da fermentação em células ($\bar{P}_X$) e em etanol ($\bar{P}_e$), seus desvios padrão e respectivos valores das constantes de adição (K), para tempo de enchimento de dorna (θ') de 7 horas. Na figura 5.25 é representado o gráfico elaborado a partir dessa tabela.

TABELA 5.15 - Produtividades no final da fermentação em células e em etanol, para $\theta' = 7$ h

$\bar{P}_X$ (g/L.h)	$\delta \bar{P}_X$ (g/L.h)	$\bar{P}_e$ (g/L.h)	$\delta \bar{P}_e$ (g/L.h)	K (h ⁻¹)
1,1	0,13	7,8	0,2	0
1,2	0,05	8,3	0,5	0,2
1,5	0,13	8,7	0,3	0,4
1,6	0,13	8,8	0,2	0,6

TABELA 5.16 - Produtividades no final da fermentação em células e em etanol, para $\theta' = 5$ h

$\bar{P}_X$ (g/L.h)	$\delta \bar{P}_X$ (g/L.h)	$\bar{P}_e$ (g/L.h)	$\delta \bar{P}_e$ (g/L.h)	K (h ⁻¹)
1,2	0,15	8,5	0,4	0
1,3	0,21	8,6	0,3	0,2
1,5	0,23	9,1	0,4	0,4
1,7	0,11	9,3	0,6	0,8
1,8	0,09	9,7	0,4	0,6

FIGURA 5.24 - Produtividade média em etanol em função da produtividade média em células, para $\theta' = 7\text{h}$.

FIGURA 5.25 - Produtividade média em etanol em função da produtividade média em células para $\theta' = 5 \text{ h}$.

A análise das tabelas e figuras deste item levam à conclusão que a produtividade em etanol no final da fermentação ($\bar{P}_e$) foi função crescente da produtividade média em células no final da fermentação ($\bar{P}_X$), confirmando resultados obtidos por outros autores (28, 40).

A tabela 5.16 e a figura 5.25 permitem concluir que, para tempo de enchimento da dorna (θ') igual a 5 horas $\bar{P}_e$ foi praticamente uma função linear crescente de $\bar{P}_X$, com a seguinte representação matemática:

$$\bar{P}_e = 6,15 + 1,92 \cdot \bar{P}_X \quad (r = 0,985)$$

Quanto à tabela 5.15 e figura 5.24, para $\theta' = 7$ h o $\bar{P}_e$ também foi praticamente uma função linear crescente de $\bar{P}_X$, com a seguinte representação matemática:

$$\bar{P}_e = 5,94 + 1,82 \cdot \bar{P}_X \quad (r = 0,955)$$

Entretanto, deve-se levar em consideração que houve um ponto a menos e que eles estão mais desalinhados.

5.5 - COMPARAÇÃO DE PRODUTIVIDADES EM ETANOL ENTRE VAZÃO LINEARMENTE DECRESCENTE E VAZÃO EXPONENCIALMENTE DECRESCENTE

Na literatura existem diversos trabalhos com processo descontínuo alimentado em que o mosto é adicionado com vazão constante (28, 40, 42, 68). Uma comparação entre a vazão constante e exponencialmente decrescente já foi feita anteriormente neste trabalho.

É interessante ressaltar os aumentos de produtividades médias em etanol ($\bar{P}_e$) no final da fermentação obtidos neste trabalho e em outro em que se usou vazão linearmente decrescente (43, 44), quando comparados com vazões de enchimento constantes e com os mesmos tempos de enchimento da dorna (tabela 5.16). Essas fermentações foram iniciadas em condições análogas de trabalho.

TABELA 5.17 - Aumento de $\bar{P}_e$, para vazões exponencialmente e linearmente decrescentes, quando comparadas com vazões constantes de alimentação.

θ' (h)	$\Delta \bar{P}_e$ (%)	
	Vazão linearmente decrescente	Vazão exponencialmente decrescente ($K=0,6h^{-1}$)
7	6,9	11,5
5	8,9	14,1

6. CONCLUSÕES

Nas condições experimentais adotadas neste trabalho, os resultados obtidos permitem concluir que:

- 1 - A produtividade média em etanol foi sempre superior nos experimentos com vazão exponencialmente decrescente de alimentação, sendo, no final da fermentação, 11,5% e 14,1% maior em relação à vazão constante, para tempo de enchimento da dorna de 7 horas e 5 horas, respectivamente e valor da constante de adição (K) igual a $0,6 \text{ h}^{-1}$.
- 2 - A produtividade média em etanol foi sempre maior para tempo de enchimento da dorna em 5 horas, considerando-se os mesmos valores da constante de adição (K) para comparação.
- 3 - O rendimento médio em etanol teve um comportamento que não dependeu das condições experimentais adotadas.
- 4 - O rendimento médio em etanol não parece ser função da produtividade em etanol.

- 5 - A razão de crescimento celular média foi praticamente função linear crescente da constante de adição (K). No final da fermentação, para tempo de enchimento da dorna (θ') de 7 horas, quando se passou de $K = 0$ (vazão constante de alimentação) para $K = 0,6 \text{ h}^{-1}$ houve um aumento de 21% em R_X ; para $\theta' = 5 \text{ h}$, quando se passou de $K = 0$ para $K = 0,6 \text{ h}^{-1}$ houve um aumento de 36,5%.
- 6 - A razão de crescimento celular média foi quase sempre maior para tempo de enchimento da dorna de 7 horas, considerando-se os mesmos valores de K para comparação.
- 7 - A produtividade média em células no final da fermentação ($\bar{P}_X$) foi função crescente até $K = 0,6 \text{ h}^{-1}$. No final da fermentação, para tempo de enchimento da dorna (θ') de 7 horas, quando passou de $K = 0$ para $K = 0,6 \text{ h}^{-1}$ houve um aumento de 45,5% de $\bar{P}_X$; para $\theta' = 5 \text{ h}$, quando se passou de $K = 0$ para $K = 0,6 \text{ h}^{-1}$ houve um aumento de 50,0%.
- 8 - A produtividade média em células foi quase sempre maior para $\theta' = 5 \text{ h}$, considerando-se os mesmos valores de K para comparação.
- 9 - A produtividade média em etanol no final da fermentação foi praticamente função linear crescente da

produtividade média em células.

- 10 - A vazão exponencialmente decrescente (com $K = 0,6 \text{ h}^{-1}$), quando comparada com vazão linearmente decrescente de outros autores, deu resultados superiores em relação às produtividades médias em etanol no final da fermentação, nos mesmos tempos de enchimento da dorna.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AIBA, S.; SHODA, M.; NAGATANI, M. - Kinetics of product inhibition in alcohol fermentation. Bio-technol. Bioeng., New York, 10(6):845-64, 1968.
2. AIBA, S. & SHODA, M. - Reassessment of the product inhibition in alcohol fermentation. J. Ferment. Technol., Osaka, 47(12):790-4, 1969.
3. AIBA, S.; NAGAI, S.; NISHIZAWA, Y. - Fed batch culture of Saccharomyces cerevisiae: A perspective of computer control to enhance the productivity in baker's yeast cultivation. Biotechnol. Bioeng., New York, 18(7):1001-16, 1976.
4. Álcool e Açúcar |Edição Especial: Motor a Álcool|, Ed. Som Verde Ltda, Nov/Dez, 1983.
5. ANÔNIMO - Em dez anos, o Proálcool conquistou seu lugar na economia brasileira. Rev. do Álcool, São Paulo, 4(32):4-17, 1985.
6. ANÔNIMO - VI Econálcool avalia 10 anos e debate rumos do Proálcool. Rev. do Álcool, São Paulo, 4(32): 21-7, 1985.

7. ANÔNIMO - Pesquisas realizadas na USP confirmam que motor a álcool polui menos que o a gasolina. Rev. do Álcool, São Paulo, 5(34):24-30, 1986.
8. AQUARONE, E. - Penicillin and tetracycline as contamination control agents in alcoholic fermentation of sugar cane molasses. Appl. Microbiol., Baltimore, 8:263-68, 1960.
9. AQUARONE, E.; SATO, S.; BORZANI, W. - Non constant fed-batch ethanol fermentation of molasses (Preliminary tests). Arq. Biol. Technol., Curitiba, 29(2):327-35, 1986.
10. ARAÚJO, N.Q.; CASTRO, H.F.; VISCONTI, A.E.S. - Sorgo-matéria prima renovável para produção de etanol na escalada energética nacional. Rev. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 90(2):23-41, 1977.
11. BANERJEE, M.; DEBNATH, S.; MAJUMDAR, S.K. - Production of alcohol from starch by direct fermentation. Biotechnol. Bioeng., New York, 32(6):831-4, 1988.
12. BAZUA, C.D. & WILKE, C.R. - Ethanol effects on the kinetics of a continuous fermentation with Saccharomyces cerevisiae. Biotechnol. Bioeng. Symp., New York, 7:105-18, 1977.
13. BORZANI, W. - Fermentação descontínua. In: BORZANI, W.; LIMA, V.A.; AQUARONE, E. - Biotecnologia: Engenharia

ria Bioquímica. São Paulo, Edusp, 1975, v.3, p.105-11.

14. BORZANI, W. - Kinetics of ethanol production during the reactor feeding phase in constant fed-batch fermentation of molasses. Biotechnol. Bioeng., New York, 29(7):844-49, 1987.
15. BORZANI, W. & VAIRO, M.L.R. - Quantitative adsorption of methylene blue by dead yeast cells. J. Bacteriol., Baltimore, 76(3):251-55, 1958.
16. CONVERTI, A.; PEREGO, P.; LODI, A.; PARISI, F.; BORGHI, M. - A kinetic study of Saccharomyces strains: Performance at high sugar concentrations. Biotechnol. Bioeng., New York, 27(8):1108-14, 1985.
17. CYSEWSKY, G.R. & WILKE, C.R. - Rapid ethanol fermentations using vacuum and cell recycle. Biotechnol. Bioeng., New York, 19(7):1125-43, 1977.
18. DAIRAKU, K.; YAMASAKI, Y.; KUKI, K.; SHIOYA, S.; TAKAMATSU, T. - Maximum production in a baker's yeast fed-batch culture by a tubing method. Biotechnol. Bioeng., New York, 23(9):2069-81, 1981.
19. DANTAS, R.B. - Alcool e outras fontes alternativas de energia como substitutivas de petróleo (1^a parte). Rev. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 94(4):21 - 37, 1979.

20. DANTAS, R.B. - Álcool e outras fontes alternativas de energia como substitutivas de petróleo (2^a parte). Rev. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 94(5): 26-41, 1979.
21. DEMAİN, A.L. - Cellular and enviromental factors affecting the synthesis and excretion of metabolites. J. Appl. Chem. Biotechnol., London, 22(3): 345-62, 1972.
22. DUNN, I.J. & MOR, J.R. - Variable-volume continuous cultivation. Biotechnol. Bioeng. (New York), 17(12):1805-22, 1975.
23. ENDO, J. & INOVE, I. - A fundamental research of fed-batch fermentation. Top. Biochem. Eng., New York, 2:283-88, 1977.
24. FALCONE, M. & MARQUES, A.B. - Estudo sobre as condições de hidrólise pelo ácido clorídrico na dosagem de açúcares redutores totais. Tecnol. Alim. Beb., São Paulo, 4:24-30, 1965.
25. GHOSE, T.K. & TYAGI, R.D. - Rapid ethanol fermentation of cellulose hydrolysate. I. Batch versus continuous systems. Biotechnol. Bioeng., New York, 21(8):1387-400, 1979.
26. GHOSE, T.K. & TYAGI, R.D. - Rapid ethanol fermentation of cellulose hydrolysate. II. Product and substrate inhibition and optimization of fermentor

- design. Biotechnol. Bioeng., New York, 21(8):1401-20, 1979.
27. GRAY, W.D. - Studies on the alcohol tolerance of yeast. J. Bacteriol., Baltimore, 42:561-74, 1941.
28. GOMEZ, E.I.V. - Influência da concentração inicial de leveduras e do tempo de alimentação da dorna no processo descontínuo alimentado da fermentação alcoólica de mosto de melaço de cana-de-açúcar. São Paulo, 1983. |Dissertação de mestrado - Escola Politécnica - USP|.
29. GUIJARRO, J.M. & LAGUNAS, R. - Saccharomyces cerevisiae does not accumulate ethanol against a concentration gradient. J. Bacteriol., Baltimore, 160(3):874-8, 1984.
30. HAYASHIDA, S.; FENG, D.D.; HONGO, M. - Function of the high concentration alcohol-producing factor. Agr. Biol. Chem., Tokyo, 38(10):2001-6, 1974.
31. HO, N.W.Y. - Yeast alcohol tolerance and recombinant DNA for improved alcohol production process. Annual Reports on Fermentation Process. New York, Academic Press, 4:235-66, 1980.
32. HOLZBERG, I.; FINN, R.; STEINKRAUS, K. - A kinetic study of the alcoholic fermentation of grape juice. Biotechnol. Bioeng., New York, 9(3):414-27, 1967.

33. HORII, J. - Problemas especiais de fermentação alco-
ôlica. In: Fermentações industriais e transfor-
mações microbianas do solo. São Paulo, Soc. Bras.
Microbiol., p. 70-74, 1980.
34. INSTITUTO DO AÇÚCAR E DO ALCOOL - Bol. Estatístico,
1989.
35. JONES, R.C.; ANTHONY, R.M. - The relationship between
nutrient feed rate and specific growth rate in
fed-batch cultures. European J. Appl. Microbiol.,
Berlin, 4:87-92, 1972.
36. JONES, R.P.; PAMMENT, N.; GREENFIELD, P.F. - Alcohol
fermentation by yeast . the effect of environmental
and other variables. Process Biochemistry, London,
16(3):42-9, 1981.
37. JOSEPH JUNIOR, H. - O álcool e as emissões veiculares.
STAB, Piracicaba, 6(4/5):14-20, 1988.
38. JOSLYN, M.A. - Methods in food analysis. 2 ed., Aca-
demic Press, 1970. p. 457.
39. KISHIMOTO, M.; TOSHIOMI, Y.; TAGUCHI, H. - Simulation
of fed-batch culture for glutamic acid production
with ethanol feeding by use of regression analysis.
J. Ferment. Technol., Osaka, 59(1):43-8, 1981.
40. KOSHIMIZU, L.H. - Influência da concentração inicial
de leveduras e do tempo de alimentação da dorna

no processo descontínuo alimentado de fermentação alcoólica de mosto de melaço de cana-de-açúcar. São Paulo, 1984. |Dissertação de mestrado - Faculdade de Ciências Farmacêuticas - USP|.

41. KOSHIMIZU, L.H.; CRUZ, M.R.M.; VALDEOLIVAS, E.I.; NETTO, C.L.B.; GONÇALVES, A.C.R.; IGLESIA, M.R.; BORZANI, W. - Fermentação alcoólica contínua de caldo-de cana-de-açúcar numa única dorna, em escala piloto. Rev. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 102:14-21, 1983.
42. KOSHIMIZU, L.H.; GOMEZ, E.I.V.; NETTO, C.L.B.; CRUZ, M.R.M.; VAIRO, M.L.R.; BORZANI, W. - Constant fed-batch ethanol fermentation of molasses. J. Ferment. Technol., Osaka, 62:205-10, 1984.
43. KRAUTER, M. - Influência da adição de mosto com variação linearmente decrescente com o tempo no processo descontínuo alimentado de fermentação alcoólica. São Paulo, 1987. |Dissertação de mestrado - Faculdade de Ciências Farmacêuticas - USP|.
44. KRAUTER, M.; AQUARONE, E.; SATO, S.; PEREGO Jr., L.-BORZANI, W. - Influence of linearly decreasing feeding rates on fed-batch ethanol fermentation of sugar-cane blackstrap molasses. Biotechnol. Lett., Surrey, 9(9):647-50, 1987.

45. LAFON-LAFOURCADE, S.; LARVE, F.; RIBEREAU-GAYON, P. - Evidence for the existence of "survival factors" as an explanation for some peculiarities of yeast growth, especially in grape must of high sugar concentration. Appl. Environ. Microbiol., Washington, 38(6):1069-73, 1979.
46. LAWFORD, H.; HOLLOWAY, P.; RUGGIERO, A. - Effect of pH on growth and ethanol production by Zymomonas mobilis. Biotechnol. Lett., Surrey, 10(11): 809-14, 1988.
47. LEE, J.H.; WILLIAMSON, D.; ROGERS, P.L. - The effect of temperature on the kinetics of ethanol production by Saccharomyces uvarum. Biotechnol. Lett., Surrey, 2(4):141-6, 1980.
48. LEE, K.J.; SKOTNICKI, M.L.; TRIBE, D.E.; ROGERS, P. L. - The kinetics of ethanol production by Zymomonas mobilis on fructose and sucrose media. Biotechnol. Lett., Surrey, 3(5):207-12, 1981.
49. LEÃO, C. & VAN UDEN, N. - Effects of ethanol and other alkanols on the glucose transport system of Saccharomyces cerevisiae. Biotechnol. Bioeng., New York, 24(11):2601-4, 1982.
50. LEÃO, C. & VAN UDEN, N. - Effects of ethanol and other alkanols on the ammonium transport system of Saccharomyces cerevisiae. Biotechnol. Bioeng.,

New York, 25(9):2085-90, 1983.

51. LIMTONG, S.; NAKATA, M.; FUNAHASHI, H.; YOSHIDA, T. ; SEKI, T.; KUMNUANTA, J.; TAGUCHI, H. - Continuous ethanol production by a concentrated culture of flocculating yeast. J. Ferment. Technol., Osaka, 62(1):55-62, 1984. .
52. LYNESS, E. & DOELLE, H.W. - Ethanol production from cane juice by Zymomonas mobilis. Biotechnol. Lett., Surrey, 3(5):257-60, 1981.
53. LYNESS, E. & DOELLE, H.W. - Fermentation pattern of sucrose to ethanol conversions by Zymomonas mobilis. Biotechnol. Bioeng., New York, 23(7): 1449-60, 1981.
54. MAGALHÃES, M.M.A.; VAIRO, M.L.R.; BORZANI, W. - Influência da adição de fontes de nitrogênio ao mosto no teor de proteína da levedura residual de fermentação alcoólica de melaço de cana-de-açúcar. Rev. Bras. Tecnol., Rio de Janeiro, 11(1):13 - 21, 1980.
55. MARGARITIS, A.; BAJPAI, P.K.; WALLACE, J.B. - High ethanol productivities using small Ca-alginate beads of immobilized cells of Zymomonas mobilis. Biotechnol. Lett., Surrey, 3(11):613-18, 1981.
56. MOHITE, U. & RAMAN, H.S. - Continuous conversion of sweet sorghum juice to ethanol using immobilized

- yeast cells. Biotechnol. Bioeng., New York, 26
(10):1126-27, 1984.
57. MORRIS, S.M.F.; AQUARONE, E.; ROSE, A.H.; BEAVAN, M.
J. - Efeito do etanol na atividade fermentativa de
Saccharomyces cerevisiae. Rev. Microbiol., São
Paulo, 17(4):371-5, 1986.
58. MOTA, M.; BESLE, J.M.; STREHAIANO, P.; GOMA, G. -
A simple device of fed-batch control in alcoholic
fermentation. Biotechnol. Bioeng., New York, 29
(6):775-77, 1987.
59. MOULING, G.; BOZE, H.; GALZY, P. - Inhibition of Al-
coholic fermentation by substrate and ethanol.
Biotechnol. Bioeng., New York, 22(11):2375 - 81 ,
1980.
60. MOULING, G.; BOZE, H.; GALZY, P. - A comparative
study of the inhibitory effect of ethanol and
substrates on the fermentation rate of parent and
a respiratory - deficient mutant. Biotechnol.Lett.,
Surrey, 3(7):351-6, 1981.
61. MULLINS, J.T. - Enzymatic hydrolysis and fermentation
of corn for fuel alcohol. Biotechnol. Bioeng., New
York, 27(3):321-6, 1985.
62. NAGATANI, M.; SHODA, M; AIBA, S. - Kinetics of
product inhibition in alcohol fermentation (PART
I) Batch experiments. J. Ferment. Technol., Osa-

ka, 46(3):241-48, 1968.

63. NAGODAWITHANA, T.W.; CASTELLANO, C.; STEINKRAUS, K. H. - Effect of dissolved oxygen, temperature, initial cell count and sugar concentration on the viability of Saccharomyces cerevisiae in rapid fermentations. Appl. Microbiol., Baltimore, 28(3):383-91, 1974.
64. NAGODAWITHANA, T.W.; STEINKRAUS, K.H. - Influence of the rate of ethanol production and accumulation on the viability of Saccharomyces cerevisiae in rapid fermentation. Appl. Environ. Microbiol., Washington, 31(2):158-62, 1976.
65. NAVARRO, J.M. & DURAND, G. - Fermentation alcoolique: Influence de la température sur l'accumulation d'alcool dans les cellules de levure. Ann. Microbiol., Paris, 129-B:215-21, 1978.
66. NAVARRO, J.M. - Fermentation alcoolique: Influence des conditions de culture sur l'inhibition par l'ethanol. Cellular & Molecular Biology, Oxford, 26:241-6, 1980.
67. NEIVA, J.L. - Principais matérias-primas para fabricação industrial de álcool. Rev. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 89(5):27-35-1977.
68. NETTO, C.L.B. - Influência da concentração inicial de células e do tempo de enchimento da dorna no pro-

cesso descontínuo alimentado de fermentação alcoólica de mosto de melaço de cana-de-açúcar. São Paulo, 1982. |Dissertação de mestrado - Escola Politécnica - USP|.

69. NETTO, C.B. & GOMA, G. - Ethanol fermentation by flocculent yeast: On the kinetics of biomass accumulation. Biotechnol. Bioeng., New York, 30(2):320-4, 1987.
70. NOGUEIRA, S.L.C. - O momento atual do Proálcool. STAB, Piracicaba, 5(5/6):12-20, 1987.
71. NOVAK, M.; STREHAIANO, P.; MORENO, M.; GOMA, G. - Alcoholic fermentation: on the inhibition effect of ethanol. Biotechnol. Bioeng., New York, 23(1):201-11, 1981.
72. OHNO, H.; NAKANISHI, E.; TAKAMATSU, T. - Optimal control of a semibatch fermentation. Biotechnol. Bioeng., New York, 18:847-64, 1976.
73. PEREGO Jr., L. - Fermentação alcoólica contínua de mosto de melaço: influência da concentração de mosto e da vazão específica de alimentação na estabilidade do sistema a 32°C. São Paulo, 1979. |Dissertação de mestrado - Faculdade de Ciências Farmacêuticas - USP|.

74. PERINGER, P. & BLACHERE, H.T. - Modeling and optimal control of baker's yeast production. Biotechnol. Bioeng. Symp., New York, 9:205-13, 1979.
75. PIRRÔ E LONGO, W. - Álcool etílico: desenvolvimento de processo. Rev. Brasileira de Engenharia Química, Rio de Janeiro, 4(1):35-43, 1980.
76. PIRT, S.J. - The theory of fed-batch with reference to the penicillin fermentation. J. Appl. Chem. Biotechnol., London, 24(7):415-24, 1974.
77. PREMA, P.; RAMAKRISHNA, S.V.; MADHUSUDHANARAO, J. - Influence of composition of sugars in cassava starch hydrolysate on alcohol production. Biotechnol. Lett., Surrey, 8(6):449-50, 1986.
78. PROÁLCOOL - Programa Nacional do Álcool. Comissão Executiva Nacional do Álcool. Secretaria Executiva. In: VII SIMPÓSIO NACIONAL DE FERMENTAÇÃO, São Paulo, julho de 1986.
79. RAMALINGHAN, A. & FINN, R.K. - The vacuo ferm process a new approach to fermentation alcohol. Biotechnol. Bioeng., New York, 19(4):583-90, 1977.
80. RHEE, S.K.; PAGAN, R.J.; LEFEBVRE, M.F.; WONG, L.; ROGERS, P.L. - Ethanol production from desalted molasses using Saccharomyces uvarum and Zymomonas mobilis. J. Ferment. Technol., Osaka, 62(3): 297-300, 1984.

81. ROLZ, C. - A new technology to ferment sugar cana directly: The Ex-Ferm Process. Process Biochemistry, London, 15(4):2-6, 1980.
82. RYU, D.D.Y.; KIM, Y.J.; KIM, J.H. - Effect of air supplement on the performance of continuous ethanol fermentation system. Biotechnol. Bioeng., New York, 26:12-6, 1984.
83. SANTOS, T.W. - Influência das condições de operação sobre os parâmetros cinéticos do cultivo no processo semicontínuo de fermentação alcoólica do mosto de melaço de cana-de-açúcar. São Paulo, 1987. |Tese de doutorado - Escola Politécnica - USP|.
84. SCHMIDELL, W.; ABOUTBOUL, H.; FACCIOTTI, M.C.R.; MAEDA, M. - Estudo de algumas variáveis na hidrólise e fermentação alcoólica de farinha de mandioca. Rev. Brasileira de Engenharia, Rio de Janeiro, 3(1):57-70, 1985.
85. SERRA, G.E. - Algumas considerações sobre as possibilidades de matérias-primas para produção de álcool etílico. Rev. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 87(3):44-51, 1976.
86. SOLTERO, F. & JOHNSON, M.J. - The effect of the carbohydrate nutrition on penicillin production by Penicillium chrysogenum Q-176. Appl. Microbiol., Baltimore, 1(1):52-7, 1953.

87. SOMOGYI, M. - Notes on sugar determination. J. Biol. Chem., Baltimore, 195:19-23, 1952.
88. STREHAIANO, P.; MOTA, M.; GOMA, G. - Effects of inoculum level on kinetics of alcoholic fermentation. Biotechnol. Lett., Surrey, 5(2):135-40, 1983.
89. TRILLI, A.; MICHELINI, V.; MANTOVANI, V.; PIRT, J. - Estimation of productivities in repeated fed batch cephalosporin fermentation. J. Appl. Chem. Biotechnol., London, 27(4):219-24, 1977.
90. UEDA, S.; ZENIN, C.T.; MONTEIRO, D.A.; PARK, Y.K. - Production of ethanol from raw cassava starch by a nonconventional fermentation method. Biotechnol. Bioeng., New York, 23(2):291-9, 1981.
91. VAIRO, M.L.R. - Methylene blue solutions for staining dead yeast cells. Stain, Washington, 36:329-30, 1961.
92. VALSECHI, O. & OLIVEIRA, E.R. - Tecnologia do Alcool. Piracicaba, ESALQ, 1986.
93. VASCONCELOS, J.N. & VALDMAN, B. - Otimização do processo de fermentação alcoólica através da batelada alimentada. Rev. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 106(2):38-48, 1988.
94. VASCONCELOS, J.N. & VILELA FILHO, V. - Estudo do comportamento cinético da fermentação alcoólica indus

trial conduzida pelo processo descontínuo. STAB, Piracicaba, 7(2):40-50, 1988.

95. VEGA, J.L.; NAVARRO, A.R.; CLAUSEN, E.C.; GADDY, J.L. Effects of inoculum size on ethanol inhibition modeling and other fermentation parameters. Bio-technol. Bioeng., New York, 29(5):633-8, 1987.
96. WANG, H.Y.; ROBINSON, F.M.; LEE, S.S. - Enhanced alcohol production through on-line extraction. Bio-technol. Bioeng. Symp., New York, 11:555-65, 1981.
97. WEEKS, M.G.; MUNRO, P.A.; SPEDDING, P.L. - Semicon-
tinuous ethanolic fermentation using a novel
yeast settling and recycle technique. Biotechnol. Lett., Surrey, 4(2):85-90, 1982.
98. WHITE, J. - Baker's yeast: The growth of yeast and
the mechanism of yeast growth. In: Yeast
Technology. London, Chapman & Hall, 1954.
99. WILLIAMS, D. & MUNNECKE, D.M. - The production of e-
thanol by immobilized yeast cells. Biotechnol. Bio-
eng., New York, 23(8):1813-25.
100. YOSHIDA, F.; YAMANE, T. & NAKAMOTO, K.I. - Fed-batch
hydrocarbon fermentation with colloidal emulsion
feed. Biotechnol. Bioeng., New York, 15():257 -
70, 1973.

8. A P Ê N D I C E I

Técnica utilizada no enchimento da dorna nos experimentos
com vazão de alimentação constante

Partindo da equação:

$$F = F_0 \cdot e^{-K \cdot t} \quad (1)$$

onde

F_0 é a vazão de alimentação inicial (L/h) e
 K é a constante de adição (h^{-1}).

Para $K = 0$, chega-se a:

$$F = F_0 \quad (\text{Vazão constante de alimentação}) \quad (2)$$

Lembrando que $F = \frac{dV}{dt}$, tem-se:

$$\frac{dV}{dt} = F_0$$

$$\int_{V_0}^V dV = \int_0^t F_0 dt$$

$$\therefore V - V_0 = F_0 \cdot t \quad (3)$$

Quando $t = \theta'$, $V = V_f$

$$\therefore F_0 = \frac{V_f - V_0}{\theta'} \quad (4)$$

De (2) e (4), vem:

$$F = \frac{V_f - V_o}{\theta'} \quad (5)$$

Em nossos experimentos, $V_f - V_o$ é constante (7,0 litros). Fixado o tempo de enchimento (θ'), a equação (5) permite calcular a vazão correspondente:

O tempo de enchimento foi subdividido em intervalos de tempo suficientemente pequenos Δt . Se se dispusesse de uma banda capaz de fornecer uma vazão constante igual a F , o volume de meio adicionado à dorna, no intervalo Δt , seria $F \cdot \Delta t$.

Procedia-se, então, do seguinte modo:

- 1) No instante $t = 0$ (quando somente o inóculo existia na dorna) adicionava-se, ao fermentador, um volume de mosto $F \cdot \Delta t$;
- 2) decorrido o intervalo de tempo Δt , adicionava-se novo volume de mosto $F \cdot \Delta t$;
- 3) e assim por diante, até completar o volume V_f , o que ocorria no instante $\theta' - \Delta t$.

As amostras correspondentes a um dado instante eram colhidas imediatamente antes da adição de mosto no instante considerado.

O valor de Δt foi fixado em 15 minutos para todos os tempos de enchimento da dorna.

A comparação dos resultados obtidos quando se operou com a bomba e adição intermitente ($\Delta t = 15$ minutos) para obter vazão constante mostrou que a técnica escolhida não afetou o desempenho do fermentador (43).

9. A P Ê N D I C E I I

Técnica utilizada no enchimento da dorna nos experimentos
com vazão de alimentação exponencialmente decrescente

A equação representativa da variação da vazão com o tempo é:

$$F = F_0 \cdot e^{-K \cdot t} \quad (K > 0) \quad (1)$$

onde

F_0 é a vazão de alimentação inicial (L/h) e

K é a constante de adição (h^{-1}).

Lembrando que $F = \frac{dV}{dt}$, tem-se

$$\frac{dV}{dt} = F_0 \cdot e^{-K \cdot t}$$

$$\int_{V_0}^V dV = F_0 \cdot \int_0^t e^{-K \cdot t} \cdot dt \quad (2)$$

Resolvendo-se a integral $\int e^{-k \cdot t} \cdot dt$: (3)

Chamando-se:

$$u = -K \cdot t$$

$$\therefore du = -K \cdot dt$$

$$\therefore dt = \frac{du}{-K} \quad (4)$$

De (3) e (4), vem:

$$\begin{aligned} \int e^{-K \cdot t} \cdot dt &= \int e^u \cdot \frac{du}{-K} = -\frac{1}{K} \cdot e^u + c = \\ &= -\frac{1}{K} e^{-K \cdot t} + c \end{aligned} \quad (5)$$

Substituindo-se (5) em (2) e resolvendo a integral, tem-se:

$$\begin{aligned} V - V_0 &= F_0 \left[\left(-\frac{1}{K} e^{-K \cdot t} + c \right) - \left(-\frac{1}{K} \cdot e^{K \cdot 0} + c \right) \right] \\ \therefore V - V_0 &= \frac{F_0}{K} \cdot (1 - e^{-K \cdot t}) \end{aligned} \quad (6)$$

Quando $V = V_f$, $t = \theta'$

Portanto substituindo-se as considerações acima em (6), tem-se:

$$F_0 = \frac{(V_f - V_0) \cdot K}{(1 - e^{-K \cdot \theta'})} \quad (7)$$

Substituindo-se (7) em (6), vem:

$$V - V_0 = V_{ad} = (V_f - V_0) \cdot \frac{(1 - e^{-K \cdot t})}{(1 - e^{-K \cdot \theta'})} \quad (8)$$

Considerando-se que $V_f - V_0$ é conhecido (7,0 litros) e que o valor de θ' e K são fixados em cada experimento é possível calcular a partir da equação (8) o volume

de mosto adicionado ao fermentador desde o instante 0 até o instante t (Ver Tabela 9.1).

TABELA 9.1 - V_{ad} calculados pela equação (8)
(para $\theta' = 5 \text{ h}$; $K = 0,4 \text{ h}^{-1}$)

t (h)	V_{ad} (L)
0,00	0,00
0,25	0,77
0,50	1,47
0,75	2,10
1,00	2,67
1,25	3,19
1,50	3,65
1,75	4,08
2,00	4,46
2,25	4,80
2,50	5,12
2,75	5,40
3,00	5,66
3,25	5,89
3,50	6,10
3,75	6,29
4,00	6,46
4,25	6,62
4,50	6,76
4,75	6,88
5,00	7,00

Procedia-se, então, do seguinte modo para a alimentação da dorna (exemplificando-se pela tabela 9.1):

- 1) no instante $t = 0$, adicionava-se à dorna 0,77 L de mosto;
- 2) decorridos 15 minutos ($t = 0,25$ h), mais 0,70 L de mosto ($1,47 - 0,77 = 0,70$) eram adicionados no fermentador;
- 3) após mais 15 minutos ($t = 0,50$ h), outros 0,63 L de mosto ($2,10 - 1,47 = 0,63$) eram adicionados no fermentador;
- 4) e assim por diante até completar o volume adicionado de 7,0 litros, o que ocorria 15 minutos antes de se atingir o tempo de enchimento de 5 horas.

Neste caso, também as amostras correspondentes a um dado instante eram colhidas imediatamente antes da adição de mosto no instante considerado.

E R R A T A

PÁGINA	LINHA	ONDE SE LÊ	LEIA-SE
VI	18	o final da fase de enchimento da dorna	um instante t
VIII	13	ml	mL
VIII	15	ml	mL
VIII	19	ml	mL
X	12	tratamento das amostras	Descrição de um experimento típico
13	2	etanol, depender	etanol depender
13	3	produzido	adicionado é menos inibidor que o produzido
14	15	glicose	sacarose
14	última	e da constante de Michaelis-Menten	e aumento da constante de Michaelis-Menten
15	19	STREHIANO	STREHAIANO
85	17	18	19
98	14	etanol não	etanol, geralmente, não
112	1	que o	que, geralmente, o
154	última	X	IX
164	11	$(\bar{P}'_e)$	$(\bar{P}_e)$
173	4	$(\bar{R}/\bar{X})$	$(\bar{R}_X)$
179	11	$(\bar{P}'_X)$ e	$(\bar{P}'_X)$, produtividade em células no final da fermentação $(\bar{P}_X)$ e
183	penúltima	Na verdade observando-se	Na verdade, observando-se
188	antepenúltima	7 horas	5 horas
191	eixo das ordenadas	80; 90; 100	8,0; 9,0; 10,0
192	2	produtividade em etanol	produtividade média em etanol
193	penúltima	tabela 5.16	tabela 5.17
201	14	(12)	(12)
213	penúltima	()	(2)
215	8	banda	bomba de alimentação

Nas páginas 162, 177 e 187, por inadvertência, não foram unidos os pontos dos gráficos.

4.4.1 - Experimento nº 16

Condições experimentais:

$$S_O = 236,9 \text{ g/L } (\Delta = 3,0\%); \quad F = 4,26 \cdot e^{-0,6 \cdot t} \quad (t \text{ em h e } F \text{ em L/h})$$

TABELA 4.20 - Resultados experimentais e massas calculadas do experimento nº 16

t (h)	V _d (L)	V _X (%)	X (g/L)	S (g/L)	E (g/L)	M _X (g)	M _{Sa} (g)	M _{Sr} (g)	M _{Sc} (g)	M _e (g)
0	3,0	-	54,2	-	-	162,6	-	-	-	-
1	6,2	10,0	26,1	97,5	14,9	161,8	758,1	544,0	214,1	83,2
2	8,0	9,0	23,0	99,8	27,2	184,0	1137,1	726,5	410,6	198,0
3	8,9	9,0	23,8	67,3	37,9	211,8	1397,7	545,1	852,6	307,0
4	9,5	8,0	25,3	39,4	48,6	240,3	1539,9	344,3	1195,6	424,8
5	9,8	8,0	26,7	22,0	58,0	261,6	1610,9	198,3	1412,6	523,0
6	9,9	8,0	27,6	10,0	65,2	273,2	1634,6	91,1	1543,5	593,8
7	10,0	8,0	23,8	6,0	67,0	238,0	1658,3	55,2	1603,1	616,4
8	10,0	8,0	24,1	5,6	65,9	241,0	1658,3	51,5	1606,8	606,3
9	10,0	8,0	27,2	5,1	66,7	272,0	1658,3	46,9	1611,4	613,6
10	10,0	8,0	26,8	5,8	67,0	268,0	1658,3	53,4	1604,9	616,4