

DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA EM SISTEMAS ALIMENTADOS COM
VAZÃO VARIÁVEL

Renata Akemi Sasaki

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
CIVIL

Aprovada por:

Prof. Geraldo Lippel Sant'Anna Jr., Dr.Ing.

Prof. José Paulo Soares de Azevedo, Ph.D.

Prof. Príamo Albuquerque Melo Jr., D.Sc.

Prof. Isaac Volschan Jr., D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2005

SASSAKI, RENATA AKEMI

Distribuição de Tempos de Residência em Sistemas Alimentados com Vazão Variável [Rio de Janeiro] 2005

XI, 89 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Análise Hidrodinâmica

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Aos meus pais, Mario e Irene,
meu irmão, Leandro,
e Matthias.

AGRADECIMENTOS

- Especialmente ao professor Geraldo Lippel pela solicitude e orientação eficiente, fundamental na elaboração desta Tese.
- Ao professor José Paulo Soares de Azevedo pelo apoio e incentivo.
- Ao professor João Roldão, Otávio Pecly e Amauri, equipe do Laboratório de Traçadores da COPPE/ UFRJ, pelo grande apoio e orientação.
- À professora Marcia Dezotti e ao professor Giulio Massarani (*in memoriam*), por permitirem utilizar as facilidades de seus laboratórios.
- Ao Hudson, à Simone, ao Antônio e à equipe do Laboratório de Química pelo auxílio e paciência durante a realização dos experimentos.
- À Promon Engenharia que com o seu programa de incentivo à pós-graduação tornou possível a produção desta Tese.
- Ao Engenheiro Alexandre César da Promon Engenharia pela compreensão e interesse com que acompanhou o desenvolvimento desta pesquisa.
- Aos professores Príamo Melo e Isaac Volschan Jr. por aceitarem participar da banca examinadora desta Tese.

Resumo da tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA EM SISTEMAS ALIMENTADOS COM VAZÃO VARIÁVEL

Renata Akemi Sasaki

Abril/2005

Orientadores: Geraldo Lippel Sant'Anna Jr.

José Paulo Soares de Azevedo

Programa: Engenharia Civil

Foi estudada, em escala de laboratório, a macro-mistura da fase líquida em tanques de aeração alimentados com vazão constante e variável. Em função das características de mistura desses tanques, buscou-se representar o escoamento pelos seguintes modelos de tanques perfeitamente agitados: um único tanque; dois tanques de volumes iguais em série; dois tanques de volumes diferentes em série e três tanques de volumes iguais em série. A técnica de estímulo-resposta foi utilizada. Primeiramente, foram determinadas as distribuições de tempos de residência (DTR) das unidades operadas com vazão constante. Posteriormente, foram determinadas as DTR, nas mesmas unidades alimentadas com vazão variável. Os resultados obtidos nos ensaios com vazão variável foram tratados segundo a formulação proposta por NIEMI [1] de modo a obter curvas de DTR para ajuste dos modelos de escoamento. O comportamento da macro-mistura nos tanques foi representado por modelos clássicos de tanques agitados em série sem e com retromistura. As curvas de DTR obtidas, nos ensaios com vazão variável, com o tratamento proposto por NIEMI [1], mostraram-se bastante similares às obtidas nos ensaios com vazão constante. Este resultado permite ampliar o uso da técnica de estímulo-resposta para situações reais em que tanques e reservatórios são alimentados em regime de vazão variável.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Sciences (M.Sc.)

RESIDENCE TIME DISTRIBUTION IN VARIABLE FLOW SYSTEMS

Renata Akemi Sasaki

April/2005

Advisors: Geraldo Lippel Sant'Anna Jr.
 José Paulo Soares de Azevedo

Department: Civil Engineering

The macromixing of the liquid phase was investigated in bench-scale aerated vessels fed with constant or variable flow rate. The experimental set-up was able to operate using the following configurations of perfectly mixed vessels: only one vessel, two equal volume vessels in series; two vessels of different volumes in series and three equal volume vessels in series. The flow behavior in the vessels was assessed through the classical stimulus-response technique. Firstly, the residence time distributions (RTDs) were determined, operating the experimental set-up at constant flow rate and further at variable flow rate. The results obtained in the experiments conducted with variable flow rate were treated according to the procedure proposed by NIEMI [1]. The macromixing behavior in the experimental set-up was represented by the classical models of perfectly mixed vessels in series with or without backmixing. The RTDs for variable flow conditions obtained from the treatment proposed by NIEMI [1] were similar to those obtained for constant flow conditions. The results show that the stimulus-response technique can be applied to real systems where vessels and reservoirs are operated under variable flow conditions.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Objetivos do trabalho	2
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.1	Introdução.....	4
2.2	Sistemas alimentados com vazão constante.....	4
2.2.1	Conceitos básicos	4
2.2.2	Revisão bibliográfica	13
2.2.3	Modelos hidrodinâmicos	19
2.3	Sistemas alimentados com vazão variável.....	24
2.3.1	A proposta de NIEMI [1]	24
2.3.2	Modelos hidrodinâmicos expressos na formulação proposta por NIEMI [1]	29
2.3.3	Revisão bibliográfica	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1	Escolha do traçador	34
3.2	Sistema experimental estudado	35
3.2.1	Dimensões do reservatório.....	35
3.2.2	Equipamentos acessórios.....	37
3.3	Determinação da concentração do traçador.....	40
3.4	Determinação da vazão	42
3.5	Tratamento dos dados dos experimentos realizados com vazão variável	42
3.6	Experimentos realizados	43
3.7	Codificação dos experimentos	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1	Tempo médio de residência e vazões	45
4.2	Modelagem dos resultados dos experimentos com vazão constante	48
4.3	Resultados dos experimentos com vazão variável.....	59

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	63
5.1 Conclusões	63
5.2 Recomendações	64

LISTA DE SÍMBOLOS

a	parâmetro dos modelos hidrodinâmicos definido no próprio texto	[T ⁻¹]
A	raíz de uma equação polinomial	-
b	parâmetro dos modelos hidrodinâmicos definido no próprio texto	[T ⁻¹]
B	raíz de uma equação polinomial	-
c	concentração de traçador à saída do sistema	[M.L ⁻³]
C	raíz de uma equação polinomial	-
c ₀	concentração de traçador à entrada do sistema	[M.L ⁻³]
cv	coeficiente de variação	-
D	constante que representa um componente qualquer que entra no processo	-
E(t)	função de distribuição de tempos de residência	[T ⁻¹]
E(θ)	função normalizada de distribuição de tempos de residência	-
E(θ')	função normalizada de distribuição de tempos de residência, substituindo-se o parâmetro τ por \bar{t}	-
G(s)	função de transferência	-
K	coeficiente angular da reta Ln c(t) x t	-
L	transformada de Laplace	-
m	parâmetro dos modelos hidrodinâmicos definido no próprio texto	-
M	massa de traçador	[M]
n	número de pontos experimentais	-
N	quantidade de tanques em série	-

$p(z)$	função normalizada de distribuição de tempos de residência, proposta por NIEMI [1]	-
$p(t, \omega)$	Função distribuição de tempos de residência em função dos tempos de saída do material que entrou no sistema (NIEMI [1])	$[T^{-1}]$
$p'(t, \omega)$	Função distribuição de tempos de residência em função dos tempos de entrada de material no sistema (NIEMI [1])	$[T^{-1}]$
q	vazão de retromistura	$[L^3.T^{-1}]$
Q	vazão	$[L^3.T^{-1}]$
\bar{Q}	vazão média	$[L^3.T^{-1}]$
s	variável de Laplace	-
S	desvio padrão	-
t	tempo	$[T]$
t_0	tempo inicial	$[T]$
\bar{t}	média da distribuição de tempos de residência	$[T]$
V	volume	$[L^3]$
w	parâmetro dos modelos hidrodinâmicos definido no próprio texto	-
$x(t)$	signal de estímulo à entrada do sistema	-
$X(t)$	transformada de Laplace do signal de estímulo à entrada do sistema	-
\bar{x}	média aritmética de amostra com N elementos	-
$y(t)$	signal de resposta à saída do sistema	-
$Y(t)$	transformada de Laplace do signal de resposta à saída do sistema	-
z	variável de integração proposta por NIEMI [1]	-
\bar{z}	valor médio da variável z	-

Letras gregas

α, α''	razão entre volumes	-
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	parâmetros dos modelos hidrodinâmicos definidos no próprio texto	-
β	razão de retromistura	-
γ	parâmetro dos modelos hidrodinâmicos definido no próprio texto	-
$\delta(t)$	sinal de estímulo tipo pulso à entrada do sistema	-
ξ	Variável tempo em que ocorreu a injeção na entrada do sistema, proposta por NIEMI [1]	[T]
θ	tempo adimensional	-
θ'	tempo adimensional, substituindo-se o parâmetro τ por \bar{t}	-
τ	tempo médio de residência	[T]
ω	tempo de entrada de fluido no sistema, NIEMI [1]	[T]

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Considerações iniciais

Sistemas aerados de tratamento de esgotos domésticos ou de efluentes industriais empregam tanques de aeração. Em função dos enormes volumes a serem tratados, esses tanques têm dimensões muito grandes e a distribuição do líquido no seu interior pode apresentar comportamento que foge dos modelos ideais de escoamento: mistura perfeita ou escoamento empistonado [2].

Outro aspecto importante desses sistemas é a presença de sólidos biológicos (lodo ativado), uma vez que esses tanques atuam como biorreatores no processo de tratamento secundário de efluentes. Portanto, para que o processo opere adequadamente, níveis convenientes de agitação e turbulência da fase líquida devem ser mantidos. No entanto, tanto o excesso como a falta de condições adequadas de mistura, podem provocar problemas operacionais tais como deposição do lodo nas regiões do tanque menos agitadas ou a quebra dos flocos biológicos, em decorrência de turbulência muito intensa.

Do ponto de vista do projeto e também da operação desses sistemas é fundamental ter-se um conhecimento preciso do modelo cinético de degradação dos poluentes e do modelo de escoamento da fase líquida. A combinação desses modelos permitirá obter equações descritivas do funcionamento dessas unidades.

O escoamento da fase líquida em reatores ou tanques de aeração tem sido objeto de estudo desde a década de cinquenta, do século passado [3]. A partir de então, muitos estudos têm sido realizados em sistemas alimentados com vazão constante; alguns destes encontram-se resumidos no item 2.2 deste trabalho. No entanto, há ainda carência de trabalhos sobre o estabelecimento de modelos de escoamento para sistemas que operam com vazão variável, como é o caso das estações de tratamento de efluentes.

O consumo de água, notadamente em países tropicais, aumenta durante o verão. Porém em um mesmo mês ou semana há dias em que a demanda de água é maior que os demais. Durante o dia, a vazão de água consumida varia continuamente atingindo valores máximos em torno do meio-dia e, valores mínimos nas primeiras horas da madrugada [4]. Desta forma, as estações de tratamento de esgoto doméstico

recebem volumes de efluentes que variam em função do tempo. As vazões também podem variar em processos de tratamento industriais quando a produção aumenta ou diminui, ou quando o sistema está conectado a outros sistemas abertos que recebem água de chuva, por exemplo. Ou seja, dificilmente a vazão de alimentação das estações de tratamento será constante. Publicações de pesquisas realizadas em sistemas alimentados com vazão variável encontram-se resumidas no item 2.3 deste trabalho.

Nessas últimas décadas também houve progresso no desenvolvimento de traçadores usados para a determinação experimental da distribuição de tempos de residência nos tanques e reatores. Traçadores fluorescentes têm sido empregados com êxito, uma vez que apresentam bom índice de conservação e podem ser usados em concentrações muito baixas, interferindo pouco na atividade biológica dos lodos presentes nesses sistemas. Algumas pesquisas realizadas com utilização deste tipo de traçador são citadas na Tabela 2.1 deste trabalho.

Traçadores radioativos também têm sido bastante empregados, pois são de fácil detecção e dificilmente sofrem alterações em sua fórmula química. Porém implicam em cuidados especiais de manuseio (estocagem, transporte, preparo, injeção, etc.) por apresentarem toxidez, incorrendo em problemas de segurança [5].

Traçadores salinos são mais utilizados em experimentos em escala de laboratório [6], pois grandes quantidades do traçador são necessárias quando se pretende marcar grandes volumes de líquido como ocorre em ensaios de campo.

1.2 Objetivos do trabalho

Este trabalho visa estudar, em escala de laboratório, o escoamento da fase líquida em tanques de aeração alimentados com vazão variável. Pretende-se:

- a) Determinar as distribuições de tempos de residência (DTR) nas unidades operadas com vazão constante, utilizando a técnica de estímulo-resposta. Ajustar modelos de escoamento às curvas experimentais, utilizando as formulações consagradas na literatura técnica;
- b) Determinar as DTR nas unidades operadas com vazão variável, utilizando a técnica de estímulo-resposta. Tratar os resultados obtidos segundo a

formulação proposta por NIEMI [1] de modo a obter as curvas de distribuição para ajuste dos modelos de escoamento;

- c) Verificar se a proposta de NIEMI [1] conduz a resultados consistentes com os obtidos nos experimentos com vazão constante;
- d) Verificar o comportamento do traçador NaCl, utilizado na totalidade dos experimentos, injetando-se em um dos ensaios os traçadores fluorescentes amidorodamina G-Extra e uranina, juntamente com o traçador salino.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Introdução

O escoamento de um fluido através de determinado equipamento seja em uma estação de tratamento de esgotos domésticos, seja em uma estação de tratamento de efluentes industriais, está sujeito a sofrer modificações que estão condicionadas às características do equipamento. Para melhor caracterizar o desempenho deste equipamento há que se investigar a maneira como o fluido escoar pelo dispositivo, em outros termos, a natureza do escoamento ou a macro-mistura. Para isto, é necessário conhecer o tempo que cada porção de fluido permanece dentro do dispositivo. Esta informação sobre a distribuição de idades das porções de fluido na corrente de saída do equipamento, ou seja, a distribuição dos tempos de residência (DTR) do fluido em escoamento pode ser facilmente obtida através do uso de uma técnica experimental amplamente utilizada, denominada técnica de estímulo-resposta com injeção de traçadores.

O modelo de mistura perfeita foi o selecionado para este estudo por representar o funcionamento de alguns dos tipos de biorreatores empregados no tratamento de efluentes, como as lagoas aeradas e os tanques de aeração, que são utilizados no sistema de tratamento de lodos ativados.

2.2 Sistemas alimentados com vazão constante

2.2.1 Conceitos básicos

2.2.1.1 Tipos de escoamento

São dois os modelos ideais de escoamento encontrados na literatura: o de mistura perfeita (*Backmix flow* ou *Continuous Stirred Tank Reactor - CSTR*) e o empistonado (*Plug flow*). Escoamentos com comportamentos diferentes podem ser considerados não-ideais.

O escoamento empistonado é aquele em que as moléculas do fluido atravessam o equipamento com a mesma velocidade, movendo-se “alinhas”. Não há mistura por dispersão axial. Já no escoamento de mistura perfeita, as moléculas do fluido se misturam obtendo-se composição homogênea no interior do tanque.

Os modelos não ideais incorporam desvios da idealidade ocasionados por fenômenos de escoamento que podem ocorrer no interior dos equipamentos. Alguns fenômenos são descritos a seguir:

- a) Escoamento preferencial – ocorre quando grandes quantidades de elementos do fluido escoam através do equipamento em tempo menor que outros;
- b) Curto circuito – ocorre quando elementos do fluido escoam através do equipamento sem percorrer todo seu interior. Este fenômeno indica deficiência de projeto e não é desejável, uma vez que diminui a eficiência do dispositivo;
- c) Zonas mortas – são regiões do equipamento isoladas ou inacessíveis, onde o fluido nelas aprisionados não interage com as regiões ativas. Ou seja, não há troca de matéria entre as regiões mortas e a fração ativa do equipamento;
- d) Zonas estagnantes – são regiões do equipamento onde o fluido aprisionado interage fracamente com a região ativa. A troca de matéria entre estas regiões ocorre lentamente;
- e) Reciclo – ocorre quando parcelas do fluido são recirculadas para a entrada ou ao interior do equipamento;
- f) Retromistura - ocorre quando parcelas do fluido apresentam movimento na direção contrária ao fluxo principal.

Algumas dessas anomalias do escoamento podem ser detectadas a partir da observação das curvas de distribuição de tempos de residência (DTR) e da análise de parâmetros calculados a partir dos dados experimentais. Vários autores têm proposto modelos que incorporam esses desvios de idealidade em sua formulação. Uma resenha dessas propostas foi apresentada por SOARES [7].

A Figura 2.1 ilustra a curva de DTR para uma situação real, que foge do comportamento previsto pelo modelo de um único tanque perfeitamente agitado.

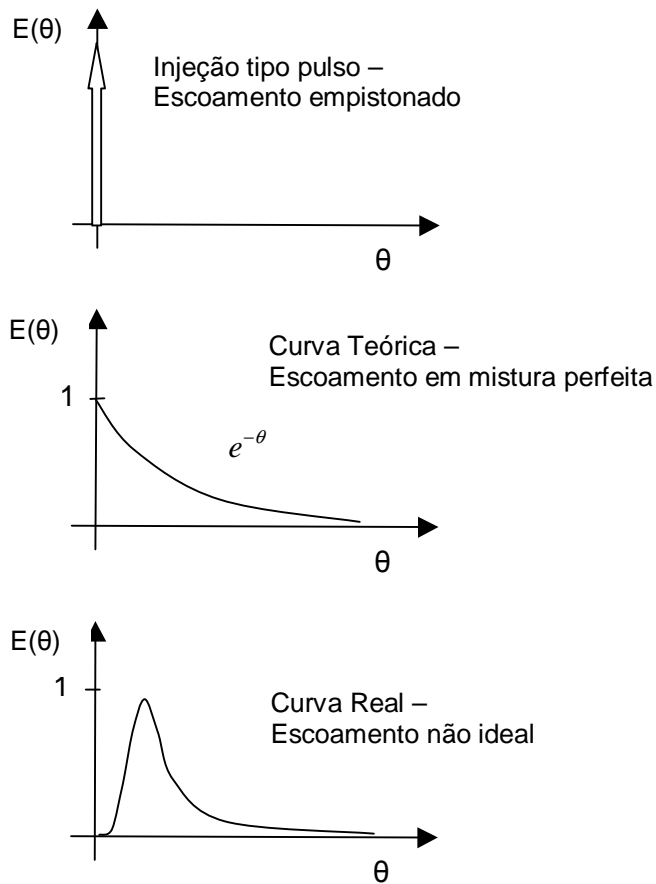


Figura 2.1 – Curvas $E(\theta)$ para os casos de escoamento real e ideal (mistura perfeita)

2.2.1.2 Método estímulo-resposta

A técnica experimental utilizada para estudar a distribuição de tempos de residência de um fluido num equipamento é a de estímulo-resposta, que consiste em injetar um traçador na entrada do dispositivo e em observar as concentrações de traçador nas amostras coletadas na saída deste dispositivo. A injeção é feita de maneira conhecida, que pode ser de diferentes formas: aleatória, pulso, degrau, etc. Estes sinais estão ilustrados na Figura 2.2.

Para o estudo em questão, nos ateremos somente à injeção tipo pulso por ser mais simples de ser aplicada, além de atender de forma plenamente satisfatória ao que se propõe este trabalho.

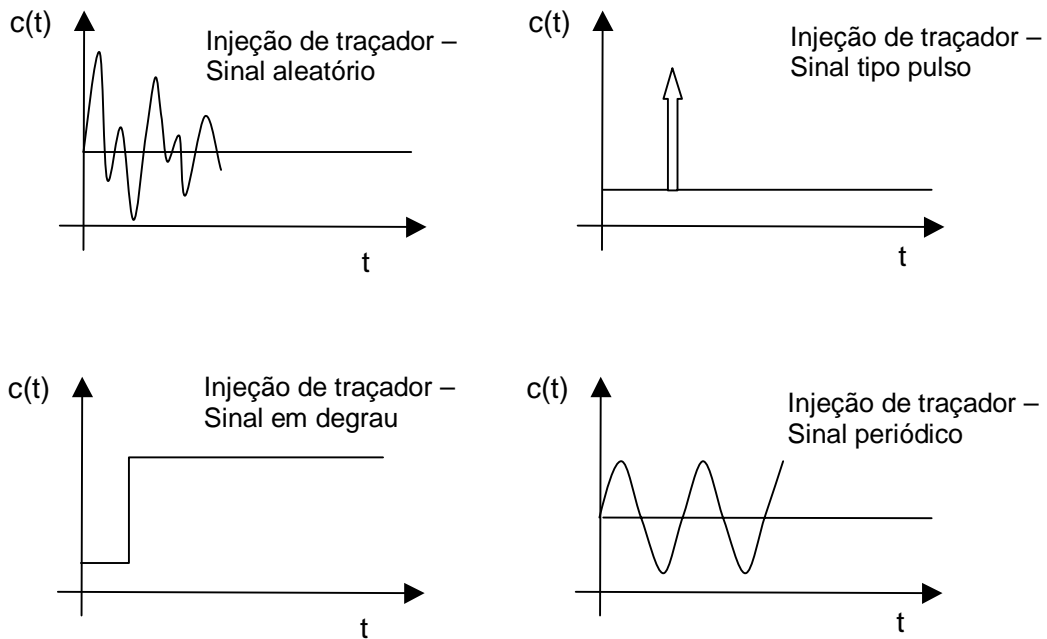


Figura 2.2 – Representação esquemática de alguns tipos de injeção que podem ser utilizados no método estímulo-resposta

O estímulo tipo pulso é matematicamente definido por:

$$\delta(t - t_0) = \infty \text{ para } t = t_0$$

$$\delta(t - t_0) = 0 \text{ para } t \neq t_0$$

$$\int_0^{\infty} \delta(t - t_0).dt = 1 \quad (1)$$

Onde :

t = tempo

t_0 = tempo inicial

Se o estímulo ocorrer no instante $t_0 = 0$, a transformada de Laplace deste estímulo é dada pela seguinte equação:

$$L[\delta(t - t_0)] = 1 \quad (2)$$

A Figura 2.3 representa esquematicamente o estímulo tipo pulso aplicado à entrada de um tanque ou reator e a resposta obtida à sua saída.

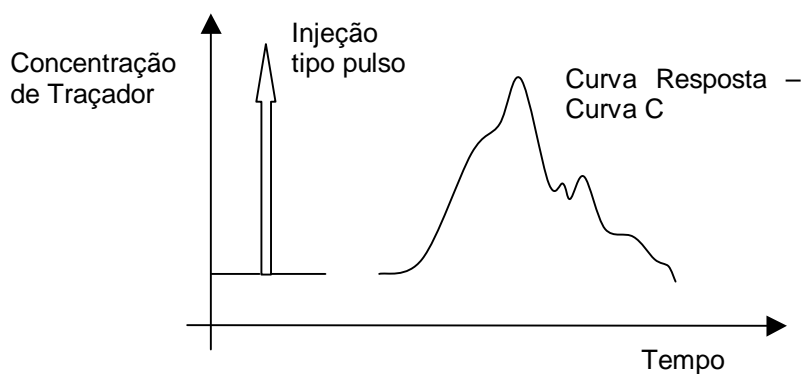


Figura 2.3 – Representação esquemática de um estímulo unitário instantâneo e da respectiva resposta.

2.2.1.3 Traçadores

Conforme conceitua BEDMAR [5], o traçador é qualquer produto que, incorporado na massa de uma substância, permite investigar o comportamento desta em um determinado processo físico ou químico.

Os traçadores são utilizados para marcarem fluidos, constituindo importante ferramenta na obtenção de modelos que representem o escoamento. As principais propriedades de um traçador ideal são apresentadas a seguir:

- a) Comportamento hidrodinâmico idêntico ao da substância que pretende estudar;
- b) Possuir uma característica adicional que permita diferenciá-lo da substância que pretende estudar;
- c) O traçador ou esta característica adicional que o distingue não deve existir (se possível) no meio em que o traçador será empregado (baixo *background*);
- d) O método de detecção e de medição do traçador deve ser fácil, de alta eficiência e passível de ser realizado através de equipamento simples e de baixo custo;
- e) O traçador deve ser conservativo, i.e. não deve estar sujeito a perdas indesejáveis durante o trânsito entre o local de injeção e o de coleta, ou ainda, entre o local de coleta e o de medição;

- f) Amostras coletadas para posteriores análises em laboratório devem ter volume reduzido para maior facilidade de transporte e manuseio, e conseqüentemente menor custo;
- g) A composição química do traçador não deve ser tóxica aos seres vivos;
- h) O traçador deve estar disponível no mercado nacional e ter baixo custo.

2.2.1.4 Tempo médio de residência

O tempo médio de residência do fluido em um reservatório é definido como:

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

Onde:

V = volume do reservatório;

Q = vazão (onde as vazões de alimentação e de saída são iguais, ou seja, o volume do reservatório é constante).

2.2.1.5 Tempo adimensional

Usualmente é conveniente representar o tempo em relação ao tempo médio de residência do fluido no reservatório, de forma adimensional:

$$\theta = \frac{t}{\tau} \quad (4)$$

2.2.1.6 Curva C – Resposta à injeção tipo pulso de traçador

Se à entrada de um equipamento for aplicada uma injeção tipo pulso, como ilustrado na Figura 2.3, a resposta do sistema a este sinal é denominada curva C. A curva-resposta é adimensionalizada dividindo-se as concentrações medidas na saída do equipamento, ao longo do tempo, por c_0 :

$$c_o = \frac{M}{V} \quad (5)$$

Onde:

M = Massa total de traçador injetado;

V = Volume do reservatório.

A Equação (5) pode ser escrita da seguinte forma:

$$c_o = \frac{Q \int_0^{\infty} c(t).dt}{V} \quad (6)$$

$$c_o = \frac{\int_0^{\infty} c(t).dt}{\tau} \quad (7)$$

A curva $c(t)$, normalizada em relação às variáveis concentração e tempo, resulta na curva $E(\theta)$, ilustrada na Figura 2.4, que representa a distribuição de tempos de residência do fluido no equipamento.

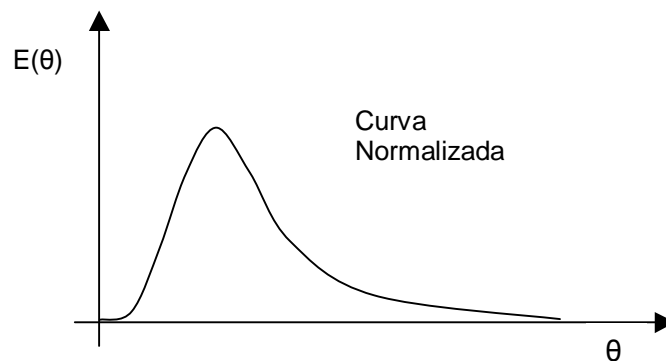


Figura 2.4 – Função normalizada da distribuição de tempos de residência do fluido – curva de resposta adimensional.

2.2.1.7 Distribuição de tempos de residência

A idade de um elemento fluido é o tempo que passa entre a entrada do elemento no equipamento e um instante dado, sendo, portanto, menor ou igual do tempo de residência.

O tempo de residência de uma porção ou elemento de fluido é o tempo decorrido desde a sua entrada até sua saída no equipamento.

Uma vez que os diversos elementos de um fluido passam por diferentes caminhos dentro do reservatório, desde a sua entrada até a saída, fica fácil perceber que terão diferentes tempos de residência.

Seja $E(t)$ a função que representa a distribuição de idades do fluido à saída do equipamento. $E(t).dt$ é a fração de elementos do fluido que deixa o dispositivo entre o intervalo $t + dt$. Como para tempos suficientemente elevados todos os elementos do fluido que entraram no sistema em $t=0$ terão deixado o sistema, então:

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = 1 \quad (8)$$

Ou seja, a soma de todas as frações de material à saída do reservatório é igual a unidade. A função $E(t)$ é assim definida:

$$E(t) = \frac{c(t)}{\int_0^{\infty} c(t).dt} \quad (9)$$

Normalizando a curva $E(t)$ em relação à variável θ , a relação entre $E(t)$ e $E(\theta)$ fica:

$$\int_0^{\infty} E(t).dt = \int_0^{\infty} E(\theta).d\theta = 1 \quad (10)$$

Utilizando a Equação (4):

$$\tau.E(t) = E(\theta) \quad (11)$$

2.2.1.8 Média da distribuição de tempos de residência

A fim de determinar a DTR em um equipamento experimentalmente, pode-se proceder à injeção tipo pulso de um traçador, cuja massa é conhecida, à entrada do sistema. A curva $c(t)$ é determinada através da análise das amostras coletadas na saída do sistema em intervalos de tempo que são registrados. O volume do reservatório também é conhecido.

A média da distribuição de tempos de residência constitui parâmetro associado à DTR, conforme definido pela Equação abaixo.

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t.c(t).dt}{\int_0^{\infty} c(t).dt} \quad (12)$$

De posse de \bar{t} e de τ , calcula-se θ e $E(\theta)$ com auxílio das Equações (4), (9) e (11).

2.2.1.9 Noções de função de transferência

A modelagem de experimentos de estímulo-resposta pode utilizar a noção de função de transferência. Por isto, uma revisão breve deste conceito é apresentada neste item.

Seja o estímulo $x(t)$ aplicado na entrada de um equipamento e $y(t)$ a resposta ao estímulo provocado. O equipamento pelo qual escoo o fluido é considerado uma “caixa preta”, conforme ilustrado na Figura 2.5.

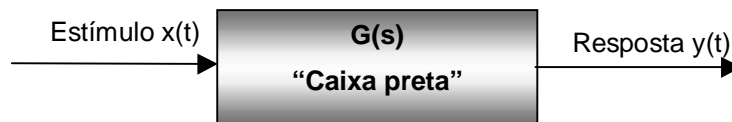


Figura 2.5 – Ilustração do conceito de função de transferência

A função de transferência $G(s)$ é definida como a relação entre a transformada de Laplace do sinal de saída $y(t)$ dividida pela transformada de Laplace do sinal de entrada $x(t)$:

$$L(x(t)) = X(s) \quad (13)$$

$$L(y(t)) = Y(s) \quad (14)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (15)$$

Se $x(t)$ for uma perturbação tipo pulso:

$$X(s) = L(x(t)) = 1 \quad (16)$$

$$G(s) = Y(s) \quad (17)$$

O procedimento para se chegar à função $G(s)$ envolve a realização de balanços materiais aplicados ao traçador no sistema ou modelo hidrodinâmico escolhido para representar o escoamento da fase líquida.

Exemplos de determinação da função de transferência em tanques de mistura e sua posterior inversão para obtenção de $E(t)$ e $E(\theta)$ são encontrados nos Apêndices A e B.

2.2.2 Revisão bibliográfica

Alguns estudos foram publicados anteriormente considerando a técnica de injeção de traçadores em dispositivos de tratamento de esgotos. Estes estudos estão resumidos na Tabela 2.1, que fornece os nomes dos autores e o ano de publicação dos trabalhos, os dispositivos estudados, os modelos que melhor se ajustaram às curvas-resposta e os tipos de traçadores adotados. A forma de injeção utilizada na totalidade dos estudos foi do tipo pulso. Alguns desses trabalhos são comentados com mais detalhe neste texto.

DANCKWERTS [3] realizou as primeiras pesquisas relacionadas a sistemas alimentados com vazão constante, apresentando técnicas para obtenção das funções de distribuição de tempos de residência, em trabalho publicado em 1953. “Posteriormente LEVENSPIEL [2] sintetizou os trabalhos de DANCKWERTS, introduzindo novos conceitos e ampliando a análise do escoamento e de modelos teóricos aplicáveis, particularmente a reatores químicos” (AZEREDO [12], 1985, p. 11). Desde então muitos trabalhos foram publicados na literatura, apresentando modelos de escoamento não-ideais.

AZEREDO [12] estudou uma unidade de decantação primária da estação de tratamento de esgotos da Ilha do Governador – ETIG – no Rio de Janeiro, testando diferentes combinações de modelos ideais de fluxo empistonado, laminar e de mistura perfeita. O autor chamou de unidade de decantação primária o conjunto formado por: tanque de mistura do esgoto, tanque de tubulação de alimentação e distribuição ao

Tabela 2.1 – Resumo de trabalhos realizados e publicados anteriormente com uso da técnica de injeção de traçadores em modelos de mistura perfeita

Referência	Ano	Dispositivo estudado/ modelo ajustado	Traçador
MURPHY e TYMPANY [8]	1967	Tanque de aeração - TA (1m ³) com difusores de ar/ N (1,43) tanques de mistura perfeita em série e volumes iguais, porém o melhor ajuste se deu com o modelo de dispersão axial.	Fluorescente rodamina lissamina B-200
MURPHY e WILSON [9]	1974	Três lagoas de estabilização (347.443m ³ , 499.562m ³ e 333.041m ³) com aeradores de superfície/ N tanques de mistura perfeita em série e volumes diferentes.	Fluorescente rodamina WT
ELMALEH e BEM AIM [10]	1975	TA (12m ³) com difusores de ar/ 2 tanques de mistura perfeita em série e volumes diferentes.	Fluorescente rodamina-B
AZEREDO [11]	1985	Unidade de decantação primária (1.110m ³)/ 2 tanques em série: escoamento laminar seguido de mistura perfeita.	Fluorescente amidorodamina G-Extra
SOARES [7]	1985	Dois TAs com difusores de ar (1.806m ³ , cada) e um sistema de decantação secundária (1.727m ³)/ 3 reatores de mistura perfeita em série para os TAs e, para o sistema de decantação: 3 tanques em série com 2 volumes de mistura perfeita e 1 volume de escoamento empistonado (fase sobrenadante) e N tanques em série perfeitamente agitados com zonas mortas (fase lodo).	Fluorescente amidorodamina G-Extra
FAROOQ <i>et al.</i> [12]	2003	Clarificadores primário (1.387m ³) e secundário (2.790m ³) e um TA (567.5m ³)/ N tanques de mistura perfeita e escoamento empistonado, com volumes diferentes, reciclo e zonas mortas (clarificadores) e N tanques de mistura perfeita, com retromistura em série e volumes diferentes (TA).	Radioativo ⁸² Br

sedimentador e anel periférico de coleta de sobrenadante. O decantador primário possui 24 metros de diâmetro, 2,40 metros de profundidade máxima e volume aproximado de 1.110 m³.

As curvas-resposta foram obtidas através da injeção instantânea de traçador. Os traçadores fluorescentes utilizados foram: amidorodamina G-Extra, rodamina B, uranina e eosina.

Dois modelos foram empregados para representar os dados experimentais:

- a) Modelo de três tanques em série: escoamento empistonado (tubulação afluente ao decantador primário, vinda da caixa de mistura), seguido de escoamento tipo mistura perfeita (caixa de mistura na entrada do decantador primário além de regiões do próprio decantador, eventualmente próximas às zonas de entrada e saída) com zonas mortas (camada de lodo no fundo do sedimentador), seguido de mistura perfeita (canal circundante de coleta do efluente);
- b) Modelo de dois tanques em série: escoamento laminar (interior do decantador primário) seguido de escoamento de mistura perfeita (caixa de mistura, regiões misturadas à entrada e à saída do próprio decantador e canal circundante de coleta do efluente).

A vazão afluente ao decantador primário variou, oscilando entre os valores de 60 L/s e 380 L/s.

O autor realizou dezoito experimentos em campo, sendo que onze puderam ser modelados de modo conveniente. Nenhum dos modelos aplicados representou todos os casos razoavelmente, sendo que o modelo de dois tanques em série foi o que melhor se ajustou aos resultados. O autor atribuiu esta dificuldade de ajuste, em parte, à grande variação da vazão de alimentação.

Além disso, concluiu ser a amidorodamina G-Extra o traçador mais adequado para emprego nos equipamentos estudados:

- a) A rodamina B e a uranina indicaram alta tendência de adsorção pelo material orgânico, apresentando respectivamente 92% e 60% de perda de massa de traçador;
- b) A eosina apresenta problemas de foto-decaimento e é mais empregada em águas subterrâneas. Porém nos resultados obtidos por AZEREDO indicou baixo grau de adsorção, da ordem de 10% da massa injetada, embora tenha sido utilizada somente em um único experimento;
- c) O conjunto de experimentos onde a amidorodamina G-Extra foi empregada, apresentou valores de perda de traçador inferiores aos demais além de ter baixo custo.

SOARES [7] analisou as curvas-resposta de dois tanques de aeração e do sistema de decantação da estação de tratamento da Ilha do Governador – ETIG – no Rio de Janeiro. Utilizou a técnica de estímulo-resposta, provocando à entrada dos sistemas uma injeção do tipo pulso do traçador fluorescente amidorodamina G-Extra.

O autor denominou o conjunto decantador secundário e linhas de reciclo de lodo de sistema de decantação, o qual foi subdividido em dois outros subsistemas: um da fase sobrenadante e outro da fase lodo ativado e linhas de reciclo. O volume do sistema de decantação é de aproximadamente 1.727m^3 , e de cada tanque de aeração igual a 1.806m^3 , totalizando o volume de 5.339m^3 .

Para ajuste dos dados experimentais obtidos no decantador secundário, foi utilizado o modelo de três tanques em série adotado por AZEREDO [11]. Considerando-se a existência de cinco aeradores de superfície em cada um dos tanques de aeração, tentou-se ajustar o modelo de N tanques em série, perfeitamente agitados com zonas mortas.

A vazão afluyente à estação de tratamento variou, oscilando entre os valores de 100L/s e 400L/s, aproximadamente. O autor realizou oito experiências de campo, sendo cinco nos tanques de aeração e três no sistema de decantação.

A fase sobrenadante do sistema de decantação ajustou-se ao modelo proposto com dois volumes de mistura perfeita e um volume de escoamento empistonado, em série. Com relação à fase lodo, o ajuste se deu ao modelo de N tanques em série

perfeitamente agitados com zonas mortas. O valor de N variou de 8 a 10, indicando baixo grau de mistura; e o valor do parâmetro correspondente ao volume ativo, variou de 67% a 88%, indicando a parcela do volume em que o traçador teve acesso, e evidenciando a existência de zonas mortas. Os tanques de aeração foram melhor ajustados ao modelo de três tanques em série com mistura perfeita e sem zonas mortas.

O autor concluiu seu trabalho indicando ser a amidorodamina G-Extra um traçador confiável, de baixo custo e que não demanda cuidados especiais no que se refere à proteção radiológica. Também atribuiu à variação de vazão a dificuldade de aplicação dos modelos teóricos.

FAROOQ *et al* [12] publicaram estudo realizado na Estação Municipal de Tratamento de Esgotos de Islamabad, no Paquistão. A técnica de estímulo-resposta foi empregada, provocando à entrada dos sistemas injeção do tipo pulso do traçador radioativo ^{82}Br . O processo de tratamento da estação de esgoto é do tipo lodos ativados. Os autores estudaram o escoamento nos clarificadores primário e secundário e, também, em um dos tanques de aeração. Os volumes considerados foram iguais a 1.387m^3 (clarificador primário), $567,5\text{m}^3$ (tanque de aeração) e 2.790m^3 (clarificador secundário).

O modelo ajustado ao clarificador primário está representado na Figura 2.6.

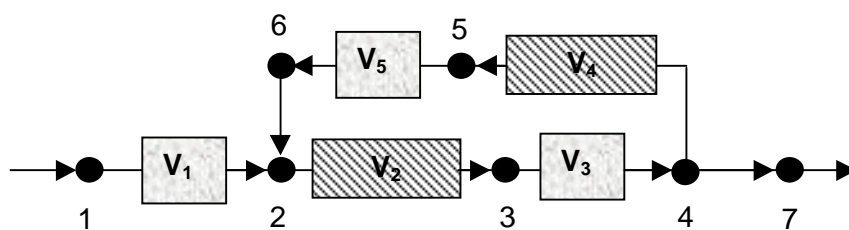


Figura 2.6 - Modelo de escoamento do clarificador primário. $V_1=96,2\text{m}^3$, $V_2=285,78\text{m}^3$, $V_3=201,8\text{m}^3$, $V_4=76,3\text{m}^3$ e $V_5=199\text{m}^3$ (FAROOQ *et al*, 2003).

O nó 1 representa a entrada e o ponto de injeção de traçador, enquanto que o nó 7 representa a saída do sistema. Há reciclo entre os nós 4 e 2. Os volumes V_1 , V_3 e V_5 têm mistura perfeita enquanto os volumes V_2 e V_4 apresentam escoamento empistonado. Através de análises comparativas entre o tempo médio de residência

(289 min.) e a média da distribuição de tempos de residência (164,3 min.), foram identificadas 43% de zonas mortas.

O modelo ajustado ao tanque de aeração está representado na Figura 2.7.

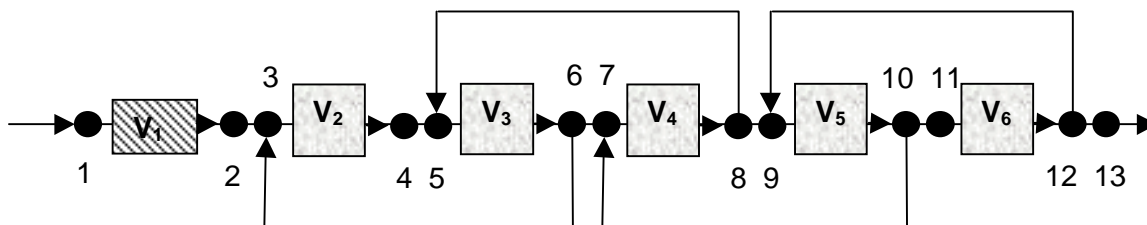


Figura 2.7 - Modelo de escoamento do tanque de aeração. $V_1=80\text{m}^3$, $V_2=101\text{m}^3$, $V_3=100\text{m}^3$, $V_4=100\text{m}^3$, $V_5=97,7\text{m}^3$ e $V_6=106,7\text{m}^3$ (FAROOQ *et al*, 2003).

O modelo consiste, segundo os autores, de cinco volumes de mistura perfeita em série com retromistura conectados a um volume de escoamento empistonado no início. Após o ponto de injeção de traçador, o fluido escoava por tubulação estreita antes de entrar no tanque de aeração. Foi identificada uma porcentagem muito pequena de zonas mortas igual a 0,32%.

O modelo ajustado ao clarificador secundário foi o mesmo representado na Figura 2.6, porém com volumes iguais a: $V_1=29\text{m}^3$, $V_2=230,2\text{m}^3$, $V_3=374\text{m}^3$, $V_4=314,1\text{m}^3$ e $V_5=315\text{m}^3$. Foram identificadas 57,5% de zonas mortas.

As vazões de entrada dos sistemas apresentaram boa estabilidade, quase não variando durante a realização dos experimentos.

Os autores concluíram ser bem sucedido o uso do traçador radioativo na análise hidrodinâmica em estações de tratamento de esgotos. Também justificam a baixa eficiência operacional dos clarificadores pelos grandes volumes de zonas mortas identificados. Pelo mesmo motivo, apontam boa eficiência do tanque de aeração. Finalmente, consideram ser o conceito de distribuição de tempos de residência uma poderosa ferramenta na investigação de processos em escala industrial.

2.2.3 Modelos hidrodinâmicos

A seguir são apresentadas as expressões da função $E(\theta)$ para alguns modelos hidrodinâmicos, passíveis de representar o comportamento do sistema experimental empregado neste trabalho, constituído de, no máximo, três tanques em série.

O sistema experimental foi projetado procurando-se representar condições hidrodinâmicas que apresentassem algum afastamento do modelo de mistura perfeita, visto que os tanques de aeração reais são suficientemente agitados e podem apresentar desvios, relativamente pequenos, com respeito ao modelo ideal acima citado.

As deduções das expressões para $E(\theta)$ referentes aos modelos de escoamento de dois tanques de mistura perfeita e volumes diferentes em série com retromistura e de três tanques de mistura perfeita e volumes iguais em série com retromistura, encontram-se nos Apêndices A e B, respectivamente.

As outras expressões para $E(\theta)$ a seguir foram apresentadas por SANT'ANNA [13].

2.2.3.1 Um único tanque perfeitamente agitado

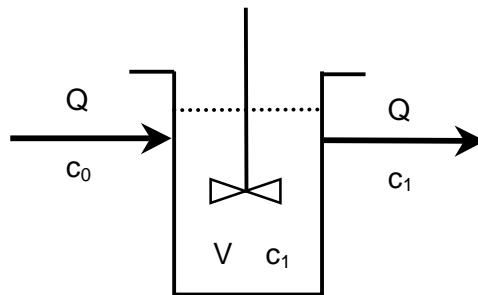


Figura 2.8 – Representação de um CSTR ou tanque de mistura perfeita

$$E(\theta) = e^{-\theta} \quad (18)$$

2.2.3.2 Dois tanques de mistura perfeita e volumes iguais em série

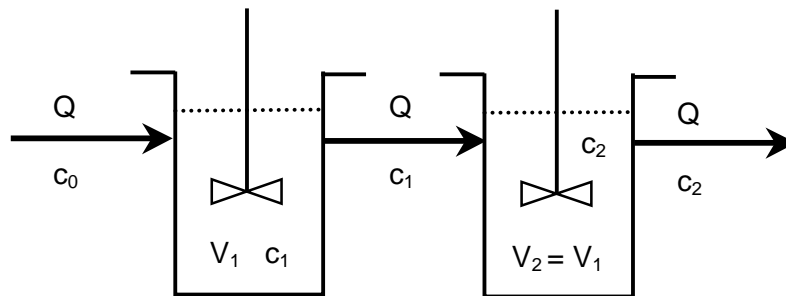


Figura 2.9 - Representação de dois CSTR de mesmo volume

$$E(\theta) = 4.\theta.e^{-2\theta} \quad (19)$$

2.2.3.3 Dois tanques de mistura perfeita e volumes diferentes em série

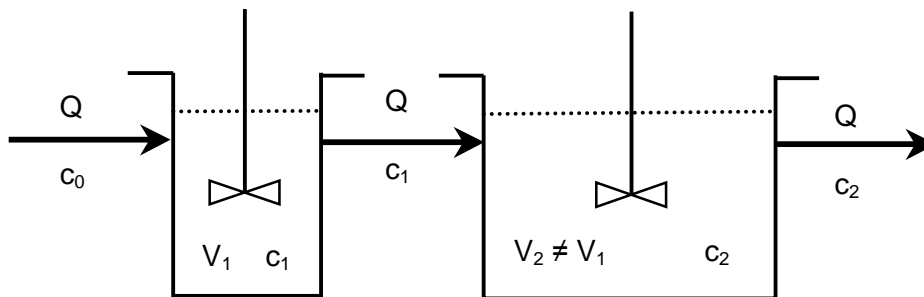


Figura 2.10 - Representação de dois CSTR em série e volumes diferentes

$$\alpha'' = \frac{V_1}{V_2} \quad (20)$$

$$E(\theta) = \frac{1 + \alpha''}{1 - \alpha''} \left\{ \exp[-(1 + \alpha'')\theta] - \exp\left[-(1 + \alpha'')\frac{\theta}{\alpha''}\right] \right\} \quad (21)$$

2.2.3.4 Três tanques de mistura perfeita e volumes iguais em série

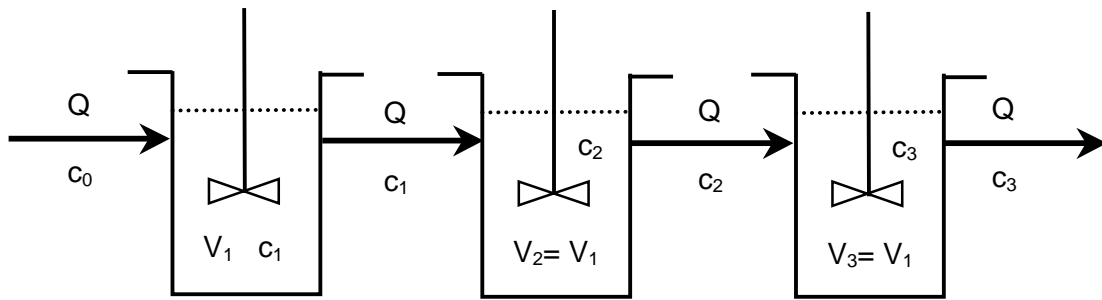


Figura 2.11 - Representação de três CSTR de mesmo volume

$$E(\theta) = 13,50.\theta^2.e^{-3\theta} \quad (22)$$

2.2.3.5 Dois tanques de mistura perfeita e volumes iguais em série com retromistura

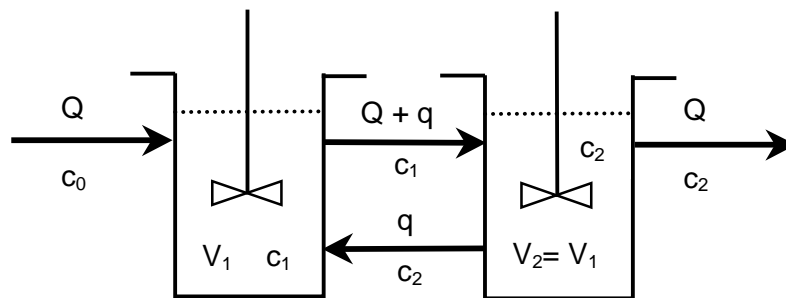


Figura 2.12 – Representação de dois tanques iguais perfeitamente agitados, em série, com retromistura

$$V_1 = V_2 = \frac{V}{2} \quad (23)$$

$$E(\theta) = \left[\frac{(1+\beta)}{\gamma} \right] \cdot \{ \exp[-2.(1+\beta-\gamma).\theta] - \exp[-2.(1+\beta+\gamma).\theta] \} \quad (24)$$

$$\gamma = [\beta.(1+\beta)]^{0,5} \quad (25)$$

$$\beta = \frac{q}{Q} \quad (26)$$

2.2.3.6 Dois tanques de mistura perfeita e volumes diferentes em série com retromistura

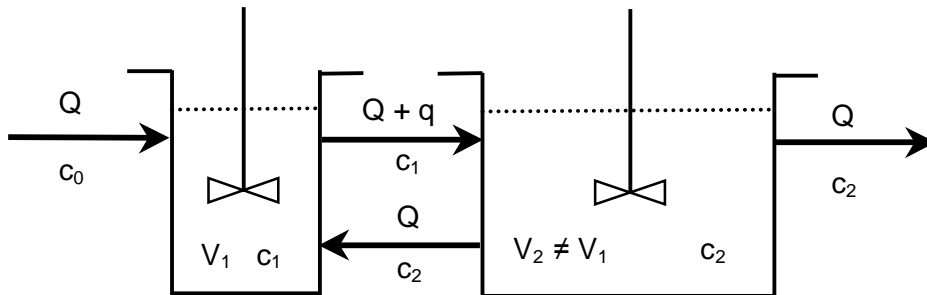


Figura 2.13 – Representação de dois tanques perfeitamente agitados de volumes diferentes, em série, com retromistura

$$V_1 + V_2 = V \quad (27)$$

$$\frac{V_1}{V} = \alpha \quad (28)$$

$$\beta = \frac{q}{Q} \quad (29)$$

$$m = \frac{(1 + \beta)}{\alpha \cdot (1 - \alpha)} \quad (30)$$

$$w = \sqrt{m^2 - 4m} \quad (31)$$

$$E(\theta) = \frac{m}{w} \cdot \left\{ \exp\left[\frac{(w-m)}{2} \cdot \theta\right] - \exp\left[-\frac{(m+w)}{2} \cdot \theta\right] \right\} \quad (32)$$

2.2.3.7 Três tanques de mistura perfeita e volumes iguais em série com retromistura

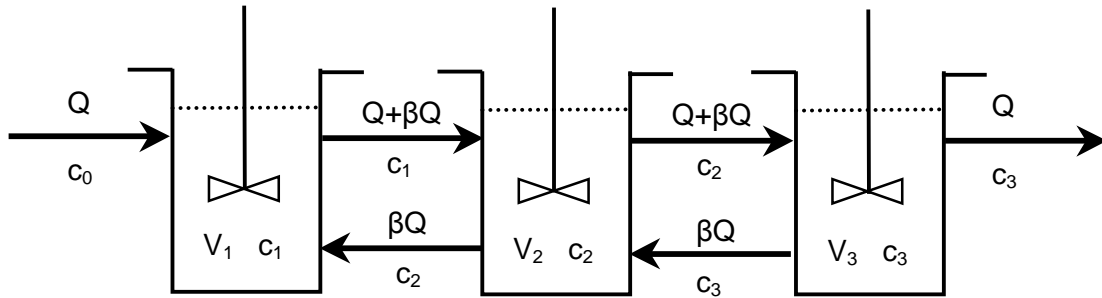


Figura 2.14 – Representação de três tanques perfeitamente agitados com retromistura

$$V_1 = V_2 = V_3 = \frac{V}{3} \quad (33)$$

$$\beta = \frac{q}{Q} \quad (34)$$

$$a = \frac{(1 + \beta)}{\tau} \quad (35)$$

$$b = \frac{(1 + 2\beta)}{\tau} \quad (36)$$

$$s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_2 s + \alpha_3 = 0 \quad (37)$$

Onde:

$$\alpha_1 = 2a + b$$

$$\alpha_2 = ab + a(a + b) - \frac{2\beta a}{\tau}$$

$$\alpha_3 = a^2 b - \frac{2\beta a^2}{\tau}$$

Sejam A, B e C as raízes da Equação (37), então:

$$E(t) = -\frac{a^2}{\tau} \left[\frac{(B - C) \exp(At) + (C - A) \exp(Bt) + (A - B) \exp(Ct)}{(A - B) \cdot (B - C) \cdot (C - A)} \right] \quad (38)$$

$$E(\theta) = 3\tau \cdot E(t) \quad (39)$$

2.3 Sistemas alimentados com vazão variável

Poucos trabalhos têm sido publicados a respeito da determinação de modelos hidrodinâmicos para sistemas alimentados com vazão variável. Os principais trabalhos publicados são comentados a seguir.

2.3.1 A proposta de NIEMI [1]

Este autor considerou um sistema constituído por uma entrada e uma saída, sendo variável somente a vazão de alimentação, mantendo-se todos os outros parâmetros independentes constantes. O procedimento proposto, apresentado a seguir, é baseado na conservação da quantidade de traçador.

Sendo:

$dM(\omega)$ = quantidade do elemento injetado na entrada do sistema em um curto intervalo de tempo $d\omega$ no tempo ω ;

$Q(\omega)$ = vazão de entrada no tempo ω .

Pode-se escrever:

$$dM(\omega) = Q(\omega).d\omega \quad (40)$$

O material injetado é removido do sistema ao longo do tempo. t é o tempo de saída e $p(t, \omega)$ representa a distribuição de tempos de residência (DTR).

Decorrido um curto intervalo de tempo após a injeção, se o volume do elemento injetado $dM(t)$ deixa o reservatório no tempo t , a fração de material que entrou no tempo inicial ω contida neste volume de saída é $d[dM(t)]$.

$$dM(t) = Q(t).dt \quad (41)$$

$$d[dM(t)] = dM(\omega).p(t, \omega).dt = Q(\omega).d\omega.p(t, \omega).dt \quad (42)$$

$$t > \omega$$

Por outro lado, a quantidade total do elemento $dM(t)$ que deixa o reservatório é constituída pelas várias frações do material que entraram nos diversos tempos ω . Conseqüentemente o material que sai no tempo t é distribuído em função dos tempos de entrada do material no reservatório. A função $p'(t, \omega)$ é utilizada nesta distribuição:

$$d[dM(t)] = dM(t).p'(t, \omega).d\omega = Q(t).dt.p'(t, \omega).d\omega \quad (43)$$

As duas distribuições estão relacionadas da seguinte maneira:

$$p'(t, \omega) = \frac{Q(\omega)}{Q(t)}.p(t, \omega) \quad (44)$$

Com base nessa formulação, NIEMI [1] concluiu que:

- a) Todo material contido no elemento $dM(\omega)$ deverá deixar o reservatório;
- b) O material contido no elemento $dM(t)$ é completamente composto por frações do material que entrou anteriormente.

Integrando as DTRs obtém-se:

$$\int_{\theta}^{\infty} p(t, \omega).dt = 1 \quad (45)$$

$$\int_{-\infty}^t p'(t, \omega).d\omega = 1 \quad (46)$$

As Equações (45) e (46) evidenciam a natureza probabilística das funções p e p' .

Similarmente, pode-se pensar em um componente D do processo. O volume parcial ou massa M_D no elemento do fluido na entrada ou na saída do reservatório está relacionado com as concentrações de entrada c_0 ou de saída c , conforme abaixo indicado:

$$Q(\omega).c_0(\omega).d\omega = c_0(\omega).dM(\omega) = dM_D(\omega) \quad (47)$$

$$dM_D(t) = Q(t).c(t).dt \quad (48)$$

O elemento D na alimentação do sistema no tempo inicial ω contribui com a fração $d[dM_D(t)]$ no elemento que sai no tempo t. Assim:

$$d[dM_D(t)] = c_0(\omega).dM(\omega).p(t, \omega).dt = Q(\omega).c_0(\omega).d\omega.p(t, \omega).dt \quad (49)$$

A quantidade total do componente $dM_D(t)$ no volume de saída no tempo t é obtida se consideradas as contribuições de todos os elementos que entraram no sistema anteriormente, ou seja, através de integração em relação à variável ω . O resultado é equiparado à Equação (48) de modo a obter a concentração de saída $c(t)$ e, após, relacionado à Equação (44), o que resulta em:

$$c(t) = \int_{-\infty}^t \frac{Q(\omega)}{Q(t)}.c_0(\omega).p(t, \omega).d\omega = \int_{-\infty}^t c_0(\omega).p'(t, \omega).d\omega \quad (50)$$

No caso de alimentação com concentração de material constante, a concentração de saída mantém seu valor constante mesmo existindo variações de vazão, conforme pode ser observado através das Equações (46) e (50).

A Equação (50) demonstra que a função p' é a função de densidade de concentração no sistema. No caso de sistemas alimentados com vazões variáveis, a função p' difere da função p . E no caso de sistemas alimentados com vazões constantes, que não variam com o tempo, a função p' é igual a função p . Assim:

- a) Para vazões variáveis $p' \neq p$;
- b) Para vazão constante $p' = p$.

Para facilitar, no caso de sistemas alimentados com vazões variáveis, o autor sugere apresentar as distribuições p e p' em termos do volume total de material que passa através do sistema após um tempo de referência. Introduce, então a variável adimensional $z(\zeta)$, abaixo deferida, no lugar do tempo $t(\omega)$.

$$z = z(t) = \frac{1}{V} \int_{\eta}^t Q(v).dv \quad (51)$$

$$z(\theta) = \zeta = \frac{1}{V} \int_{\eta}^{\theta} Q(v).dv \quad (52)$$

Se for adotado que:

$\eta = \text{zero}$;

z no lugar de t ;

ζ no lugar de ω .

Então, resulta:

$$p(t, \omega).dt = p(z, \zeta).dz = p(z, \zeta). \frac{Q(t)}{V}.dt \quad (53)$$

$$p'(t, \omega).d\omega = p'(z, \zeta).d\zeta = p'(z, \zeta). \frac{Q(\omega)}{V}.d\omega \quad (54)$$

$$\int_{\zeta}^{\infty} p(z, \zeta).dz = \int_{-\infty}^z p'(z, \zeta).d\zeta = 1 \quad (55)$$

$$p(z, \zeta) = p'(z, \zeta) \quad (56)$$

Desta forma as funções p e p' são iguais, se expressas em relação à nova variável $z(\zeta)$.

O autor assume que o padrão de escoamento no interior do reservatório não é alterado pela variação de vazão no sistema. Desta forma as probabilidades acima referidas poderão ser expressas em termos da quantidade de material que passa através do sistema entre a entrada e a saída, ou seja, em termos de $z - \zeta$:

$$z - \zeta = \frac{1}{V} \int_{\omega}^t Q(v).dv \quad (57)$$

A integral de convolução da Equação (50) corresponde a:

$$c(t) = c(z) = \int_{-\infty}^z c_0(\zeta) \cdot p(z - \zeta) \cdot d\zeta \quad (58)$$

No caso do experimento empregar uma injeção tipo pulso, todo traçador será inserido no sistema em um intervalo muito curto de tempo. Pode-se considerar que a concentração de alimentação c_0 será diferente de zero somente entre o intervalo de tempo $\omega \rightarrow \omega + d\omega$. O termo $Q(\omega) \cdot c_0(\omega) \cdot d\omega$ na Equação (49) representa a massa total de traçador $M_D = M_{tr}$. A segunda simbologia é introduzida para evitar confusão.

A fração de material que deixa o sistema $dM_D(t)$ no intervalo $t \rightarrow t + dt$ consiste unicamente do material que foi injetado, podendo ser obtido através da integração da Equação (49) em relação a ω .

$$dM_D = M_{tr} \cdot p(t, \omega) \cdot dt \quad (59)$$

Considerando as Equações (48), (44) e (53), pode-se escrever:

$$c(t) = c(z) = \frac{M_{tr}}{Q(t)} \cdot p(t, \omega) = \frac{M_{tr}}{Q(\omega)} \cdot p'(t, \omega) = \frac{M_{tr}}{V} \cdot p(z - \zeta) \quad (60)$$

A integral em relação ao tempo da concentração da alimentação tipo pulso correspondente à quantidade de traçador M_{tr} , é igual a $\frac{M_{tr}}{Q}$, onde Q é a vazão no instante de alimentação do traçador, ou seja $Q(\omega)$. Da Equação (60) pode-se constatar que a integral da concentração em termos de z ou ζ é $\frac{M_{tr}}{V}$.

No caso da vazão de alimentação ser constante, a variável z fica reduzida a $\frac{(t - \omega)}{\tau}$, que representa o tempo médio de residência, conforme Equação (61) a seguir:

$$z - \zeta = \frac{1}{V} \int_{\omega}^t \bar{Q} \cdot dv = \frac{\bar{Q}}{V} (t - \omega) = \frac{(t - \omega)}{\tau} \quad (61)$$

De forma a obter o valor médio da variável z , a parte esquerda da Equação (62) é escrita. Para o caso de vazão constante e sistema fechado, ou seja, conservativo, a Equação (63) é válida.

Considerando as Equações (61), (53) e (63), a parte direita da Equação (62) pode então ser escrita demonstrando que o valor médio da variável z é igual a um.

$$\bar{z} = \int_0^{\infty} z \cdot p(z) \cdot dz = \int_0^{\infty} \frac{\bar{Q}}{V} t \cdot p(t) \cdot dt = 1 \quad (62)$$

$$\int_0^{\infty} t \cdot p(t) \cdot dt = \frac{V}{\bar{Q}} \quad (63)$$

O autor introduziu a variável adimensional $z(\zeta)$ e, através da utilização desta nova variável de integração, demonstrou independência do sistema em relação à vazão de alimentação, provando ser possível a modelagem hidrodinâmica de sistemas alimentados com vazão variável.

Embora o artigo de NIEMI [1] tenha sido publicado há quase três décadas e as formulações apresentadas pareçam ser relativamente simples, não foram encontrados trabalhos publicados com a aplicação experimental de sua proposta.

2.3.2 Modelos hidrodinâmicos expressos na formulação proposta por NIEMI [1]

Nos trabalhos de NIEMI [1] podem ser encontradas as funções $p(z)$ para os seguintes modelos hidrodinâmicos: N tanques em série de volumes iguais; dois tanques em série de volumes diferentes dados, respectivamente, pelas Equações (64) e (65) a seguir.

$$p(z) = \frac{N^N \cdot z^{(N-1)}}{(N-1)!} e^{-N \cdot z} \quad (64)$$

$$p(z) = \frac{V}{V_1 - V_2} \left[\exp\left(-\frac{V}{V_1} z\right) - \exp\left(-\frac{V}{V_2} z\right) \right] \quad (65)$$

Sendo:

$$V = V_1 + V_2$$

A função $p(z)$ para N tanques em série pode ser apresentada para os casos particulares de interesse e encontram-se relacionadas na Tabela 2.2 a seguir.

Tabela 2.2 – Funções $p(z)$ correspondentes aos modelos hidrodinâmicos de um tanque até três tanques em série.

Modelo hidrodinâmico	Função $p(z)$
Um único tanque perfeitamente agitado	$p(z) = e^{-z}$ (66)
Dois tanques de mistura perfeita e volumes iguais em série	$p(z) = 4z \cdot \exp(-2z)$ (67)
Dois tanques de mistura perfeita e volumes diferentes em série	$p(z) = \frac{V}{V_1 - V_2} \left[\exp\left(-\frac{V}{V_1} z\right) - \exp\left(-\frac{V}{V_2} z\right) \right]$ (68) Sendo $V = V_1 + V_2$
Três tanques de mistura perfeita e volumes iguais em série	$p(z) = 13,50z^2 \exp(-3z)$ (69)

Essas expressões são evidentemente análogas às funções clássicas obtidas para a operação a vazão constante, substituindo-se $p(z)$ por $E(\theta)$ e z por θ . No Capítulo 3 serão apresentados os procedimentos para o cálculo dessas funções.

2.3.3 Revisão bibliográfica

NIEMI [14] e [15] realizou trabalhos repetindo a teoria apresentada em [1] no que se refere aos sistemas alimentados com vazão variável, porém incluindo também estudo de modelos variando, além da vazão de alimentação, o volume do reservatório.

Outros trabalhos apresentando algoritmos de controle e métodos de identificação de parâmetros por processos recursivos em sistemas com variação de vazão e volume foram apresentados por NIEMI [16] e TIAN *et al* [17] e também por NIEMI *et al* [18].

FERNÁNDEZ-SEMPERE *et al* [19] fazem considerações a respeito da escassez de trabalhos existentes na área de sistemas sob regimes de escoamento não permanente.

Estes autores, assim como NIEMI [1], também se basearam na conservação da quantidade de traçador injetado, propondo a seguinte formulação:

$$M = \int_0^{\infty} dM = \int_0^{\infty} cdV = \int_0^{\infty} cQ_0 dt \quad (70)$$

Sendo:

c = Concentração do traçador;

Q_0 = Vazão na saída do sistema;

V = Volume do tanque.

Denominaram E a função de distribuição de tempos de residência, obtida através da seguinte Equação:

$$\frac{cQ_0}{M} = E \quad (71)$$

Pode-se notar que a Equação acima (71) é similar à Equação (52), escrita em termos de z , introduzida por NIEMI [1].

Para o caso de sistemas alimentados com vazão variável e de volume constante, os autores sugerem traçar gráfico com a curva $\frac{E}{Q_0}$ contra $\int_0^t Q_0 dt$. Estas expressões equivalem àquelas introduzidas por NIEMI [1]: $p(z)$ e z , divididas pelo volume do tanque.

Os autores apresentam formulações para os modelos hidrodinâmicos de um tanque de mistura perfeita, volume constante e vazão variável e de N tanques de mistura perfeita, volumes constantes e iguais, em série e vazão variável:

$$\frac{E}{Q_0} = \left(\frac{1}{V}\right) \exp\left[\left(\frac{-1}{V}\right) \int_0^t Q_0 dt\right] \quad (72)$$

$$\frac{E}{Q_0} = \left(\frac{N}{V}\right) \left[\left(\frac{N}{V}\right) \int_0^t Q_0 dt\right]^{(N-1)} \left[\frac{1}{(N-1)!}\right] \exp\left[\left(\frac{-N}{V}\right) \int_0^t Q_0 dt\right] \quad (73)$$

As Equações (72) e (73) são exatamente iguais à Equação (60) para N tanques de mistura perfeita, volumes iguais, em série e vazão variável encontrada no trabalho de NIEMI [1].

O artigo de FERNÁNDEZ-SEMPERE *et al* [19] também apresentou formulações considerando sistemas com variação de volume, além da vazão. Porém este assunto não será abordado aqui, pois foge aos objetivos deste trabalho.

Após a apresentação desses conceitos e formulações, os autores aplicaram a teoria apresentada aos resultados de um experimento realizado no sistema de esgotamento sanitário da *Alicante University Science Faculty (Phase I)*. Quatro departamentos, além de alguns laboratórios, esgotavam seus efluentes no sistema estudado.

Os resultados foram obtidos através da injeção de traçador salino, do tipo pulso, despejando a solução saturada de NaCl em uma pia em um dos laboratórios da Universidade. Amostras foram coletadas à saída do sistema a cada 5 minutos. Repetiu-se este procedimento mais duas vezes.

Também as vazões foram medidas a cada 5 minutos. A Figura 2.15 a seguir ilustra os valores aproximados dessas vazões.

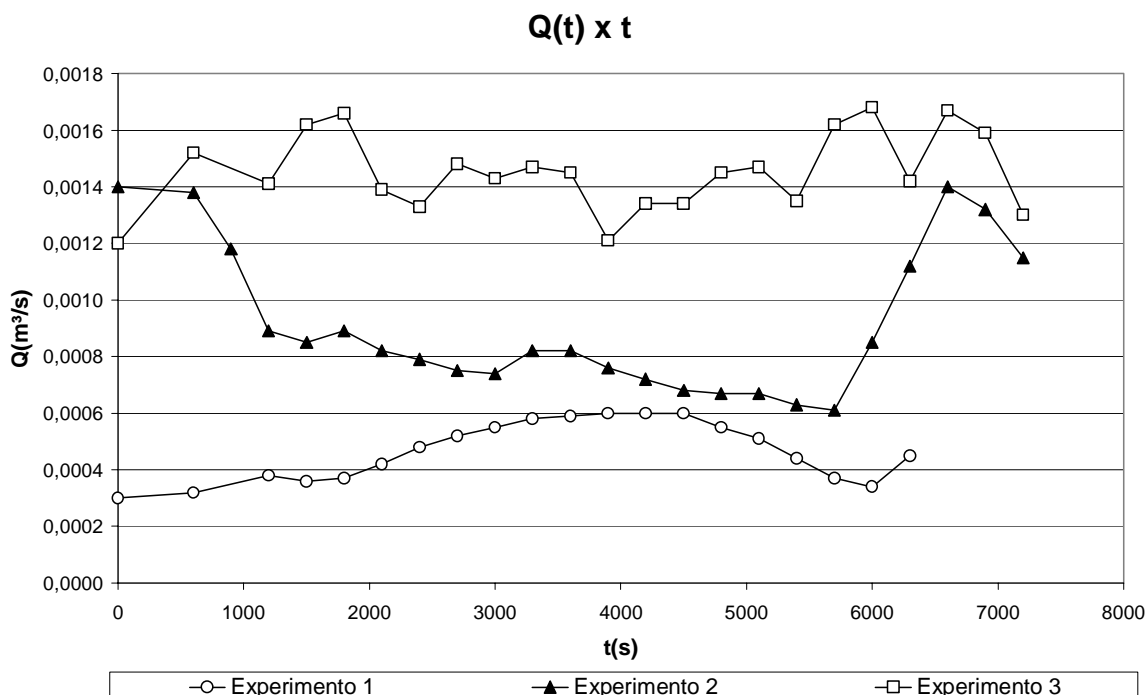


Figura 2.15 - Hidrógrafas obtidas durante a realização dos experimentos no sistema de esgotamento da *Alicante University Science Faculty (Phase I)* (FERNÁNDEZ-SEMPERE *et al*, 1997).

Inicialmente os autores assumiram ser o volume do sistema constante, porém com a vazão variável. Ao traçar o gráfico com as curvas de $\frac{E}{Q_0}$ contra $\int_0^t Q_0 dt$, para os três experimentos, observaram que as mesmas não coincidiam entre si. Portanto, concluíram ser o volume do sistema variável. Os autores não mediram o volume do sistema.

YLINEN e NIEMI [20] publicaram comentários a respeito das conclusões de FERNÁNDEZ-SEMPERE *et al* [19], principalmente no que se refere ao desconhecimento das soluções propostas anteriormente por NIEMI [1], [14] e [15], pois a proposta apresentada por FERNÁNDEZ-SEMPERE *et al*, infelizmente, já tinha sido formulada.

Os experimentos foram realizados sem controle de despejos de produtos no sistema através dos laboratórios da Universidade. Portanto os resultados poderiam ter sido afetados por lançamento acidental de soluções contendo NaCl por algum aluno, por exemplo. Além disso, uma falha é atribuída ao desconhecimento do volume do sistema estudado.

FERNÁNDEZ-SEMPERE *et al* [21] replicaram os comentários acima mencionados desculpando-se por não terem encontrado os artigos de NIEMI [1], [14] e [15] em suas fontes de pesquisa, pois haviam sido publicados em periódicos que não estavam diretamente ligados à Engenharia Química. Lamentaram, pois, caso contrário, teriam escrito o artigo [19] de forma bastante diferente e, afinal, agradeceram o interesse demonstrado pelos comentários realizados, dando oportunidade de ampliar, clarificar e corrigir erros existentes. Concluíram que o assunto apresentado precisa de maior atenção de forma a encontrar melhores soluções que as discutidas no artigo.

ZUBER [22] publicou um estudo a respeito da interpretação de dados obtidos através da injeção de traçadores em sistemas com vazão variável. Porém, seus interesses estavam voltados para aplicações em hidrologia e, portanto, para sistemas com volumes variáveis.

RAWATLAL e STARZAK [23] apresentaram estudo em sistema de N tanques de mistura perfeita, em série, sob regime de escoamento não permanente utilizando a técnica de balanços populacionais.

Segundo os autores as distribuições de tempos de residência em equipamentos sob regimes de escoamento não permanente resultam em sistemas complexos de equações diferenciais ordinárias, equações diferenciais parciais ou integrais que muitas vezes são difíceis de serem equacionadas. Além disso, a solução global obtida através dos conceitos de população existente e nova e utilizada para sistemas alimentados com vazão variável, não pode ser aplicada em casos mais gerais como em modelos de N tanques em série, por exemplo.

A partir de balanços materiais e da extensão do domínio das condições de contorno para a população nova, os autores formulam modelo possível de ser aplicado também em sistemas de N tanques em série alimentados com vazão variável. Algumas simulações são apresentadas para vários padrões de variação da vazão de alimentação, porém nenhuma aplicação experimental foi realizada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Escolha do traçador

Para marcar grandes volumes são mais vantajosos os traçadores fluorescentes ou radioativos. Porém para o experimento em questão, como foram utilizados pequenos volumes, empregou-se o traçador salino cloreto de sódio.

O fluido utilizado foi a água da rede de distribuição, que apresentou baixos valores de *background* de cloreto de sódio (NaCl). Esse sal é amplamente disponível no mercado, além de apresentar baixo custo. Foi utilizado NaCl de grau analítico, adquirido do fabricante Vetec.

Em um dos experimentos optou-se por utilizar traçadores fluorescentes, além do salino, com o objetivo de observar a similaridade das respectivas curvas-resposta. Os traçadores escolhidos foram a amidorodamina G-Extra e a uranina.

A amidorodamina G-Extra foi utilizada pelos seguintes autores e entidades:

- a) AZEREDO [11] – foi injetada no sistema investigado em 8 dos 18 ensaios realizados. O autor conclui ser a amidorodamina G-Extra o traçador mais indicado devido aos menores valores de perda de massa identificados e ao baixo custo;

- b) SOARES [7] – foi utilizada na totalidade de seus experimentos chegando às mesmas conclusões de AZEREDO [11];
- c) Laboratório de Traçadores (LT/COPPE) – foi testada e é comumente utilizada pelo LT em seus experimentos de campo.

A uranina foi utilizada pelos seguintes autores e entidades:

- a) AZEREDO [11 – foi injetada no sistema investigado em 2 dos 18 ensaios realizados. O autor identificou perda de traçador da ordem de 55% e 68%, atribuindo estes valores à problemas de adsorção em material orgânico presente no esgoto sanitário;
- b) Laboratório de Traçadores (LT/COPPE) – foi testada e é comumente utilizada pelo LT em seus experimentos de campo.

Traçadores radioativos são de difícil manuseio demandando cuidados especiais de proteção radiológica, portanto, não foram utilizados neste estudo.

A amidorodamina G-Extra e a uranina, empregadas neste trabalho, foram provenientes dos fabricantes Organic Dye Stuffs Inc. e Xangai Chemical Inc., respectivamente.

3.2 Sistema experimental estudado

3.2.1 Dimensões do reservatório

Empregou-se um reservatório retangular com dimensões internas iguais a: 120mm de largura, 600mm de comprimento e 160mm de altura, composto por duas chicanas removíveis conforme indicado na Figura 3.1. Cada experimento foi realizado utilizando variações deste modelo, seja removendo ou instalando as chicanas. Assim, foi possível trabalhar com os seguintes sistemas:

- a) Um único reservatório: $\boxed{1}$;
- b) Dois reservatórios, em série, de volumes diferentes: $\boxed{1}$ e $\boxed{2+3}$;

c) Dois reservatórios, em série, de volumes iguais: 1 e 2;

d) Três reservatórios, em série, de volumes iguais: 1, 2 e 3.

Para reduzir as perdas por evaporação foi prevista uma tampa, provida de três orifícios de 10mm de diâmetro para cada compartimento, de modo a permitir a saída do ar insuflado. O reservatório foi construído com chapas de acrílico transparente.

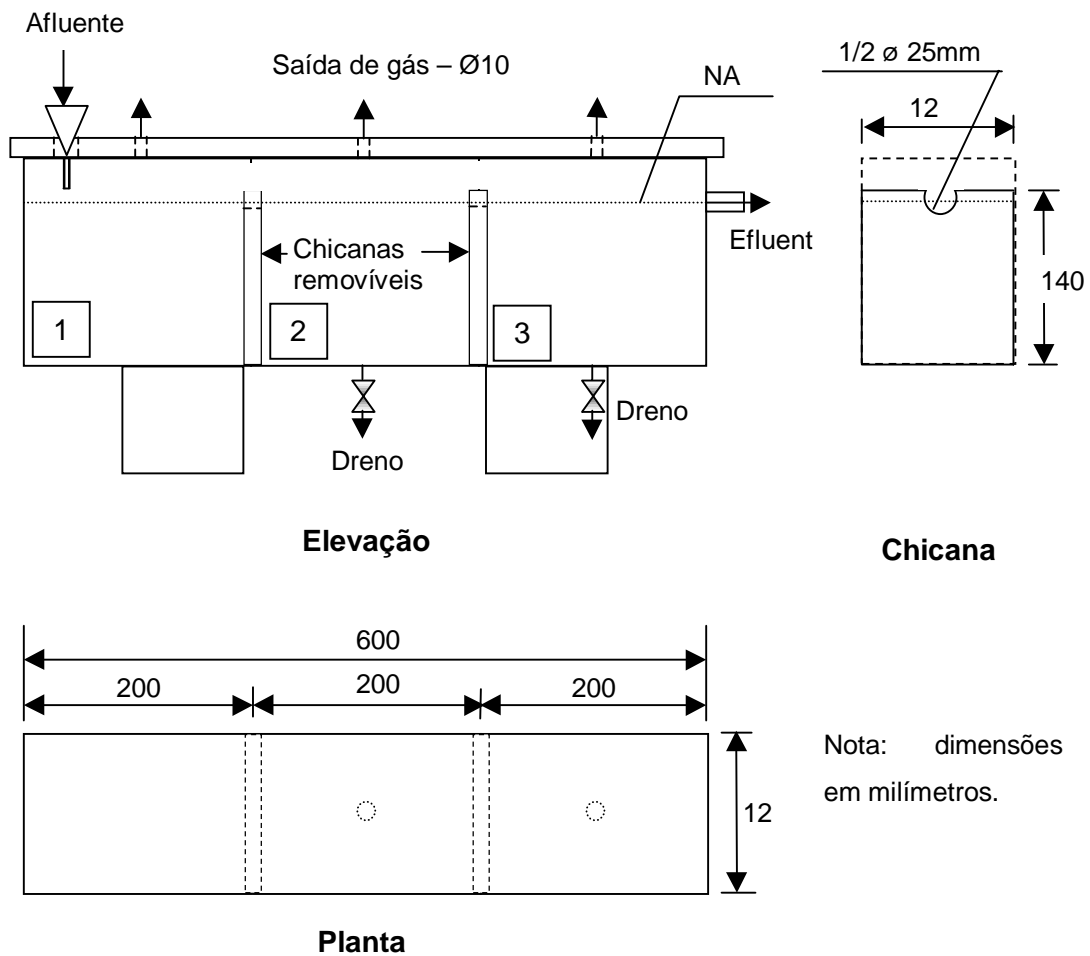


Figura 3.1 – Dimensões do reservatório e dos seus compartimentos – medidas em milímetros

A Figura 3.2 mostra a fotografia do sistema experimental, com destaque para os reservatórios e alguns acessórios.

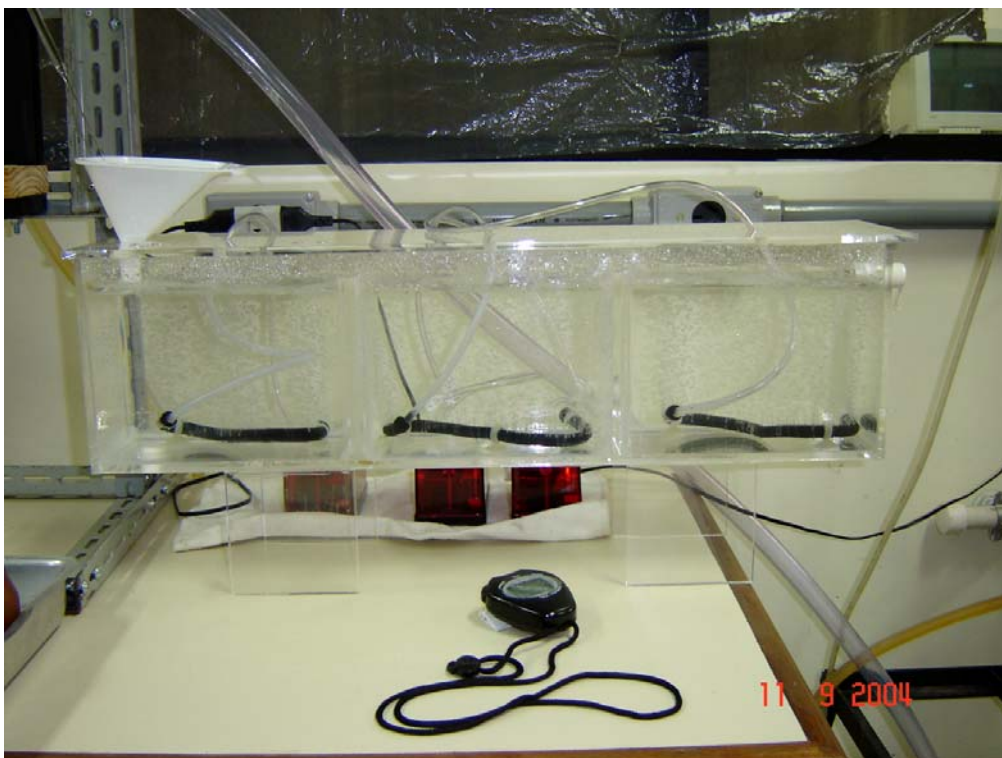


Figura 3.2 – Vista frontal do reservatório de acrílico empregado nos experimentos

3.2.2 Equipamentos acessórios

Como o tipo de escoamento previsto para cada compartimento foi o de mistura perfeita, foram utilizadas como aeradores três mangueiras flexíveis de ar com 30cm de comprimento, marca Kong's, modelo AS-30. O ar foi insuflado por três pequenos compressores de ar marca ANGEL, modelo BETTA SILENTE. A vazão de ar insuflado era medida em um rotâmetro marca Aalborg, modelo 044-40C.

A Figura 3.3 ilustra o sistema em funcionamento, podendo-se observar a intensidade de aeração aplicada nos compartimentos do reservatório.

Para os experimentos com sistemas alimentados com vazão constante, foi utilizado um reservatório suspenso, também em acrílico, de forma que a vazão requerida pudesse ser controlada através da variação da altura deste reservatório: aumentando ou diminuindo a carga hidráulica.

A Figura 3.4 ilustra o esquema de funcionamento experimental para o ensaio com vazão constante. A Figura 3.5 ilustra a condução de um ensaio típico com vazão constante onde o reservatório suspenso é utilizado. A estrutura metálica de suporte possibilitava a variação da carga através do ajuste da altura do reservatório.



Figura 3.3 – Vista dos aeradores em funcionamento, gerando pequenas bolhas que promovem a agitação do líquido

Para os ensaios com sistemas alimentados com vazão variável, utilizou-se uma bomba peristáltica marca Gilson, modelo MINIPULS 3. Somente no último experimento com três reservatórios em série, volumes iguais e vazão de alimentação variável, foi utilizada a bomba peristáltica marca Cole Parmer, modelo 302FM-B, devido à maior vazão requerida. A variação da vazão foi feita manualmente alterando-se de tempos em tempos a velocidade de rotação da bomba.

A Figura 3.6 ilustra o esquema de funcionamento experimental para o ensaio com vazão variável. A Figura 3.7 ilustra a condução de um ensaio típico com vazão variável.

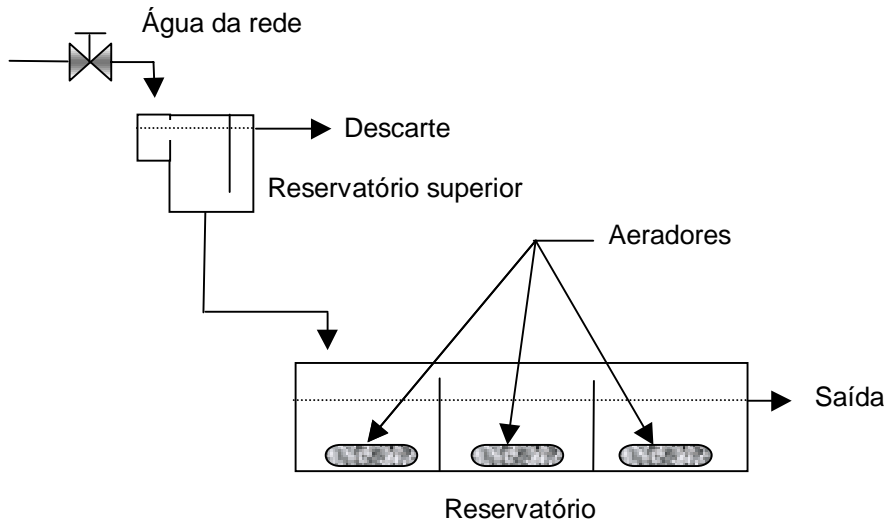


Figura 3.4 – Esquema experimental dos ensaios realizados com vazão constante

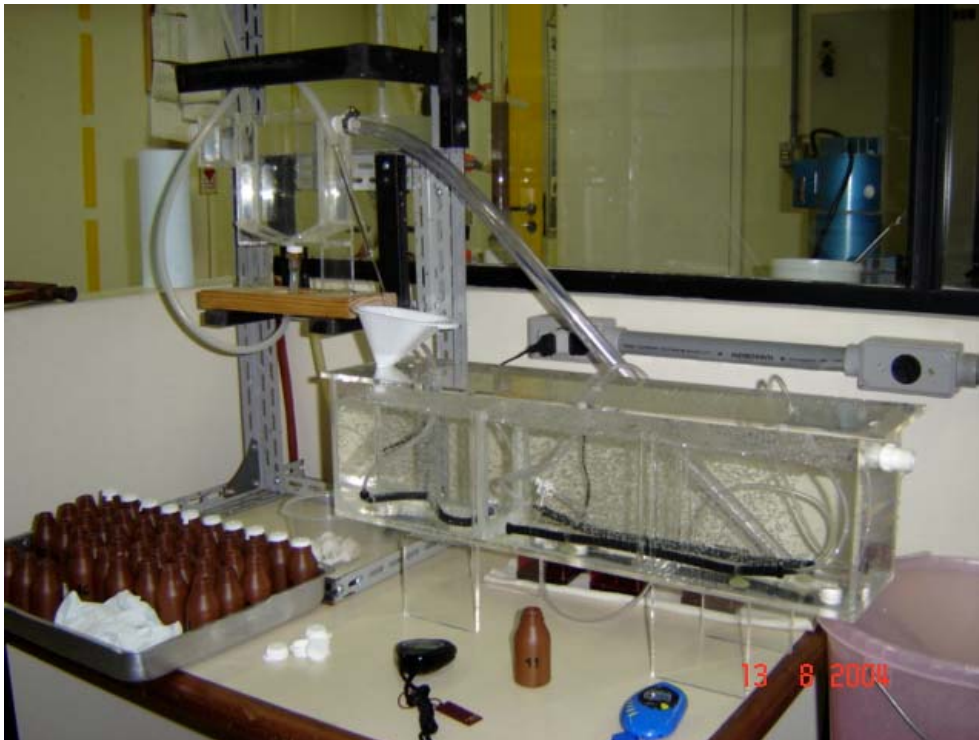


Figura 3.5 – Foto ilustrativa de um ensaio típico com vazão constante

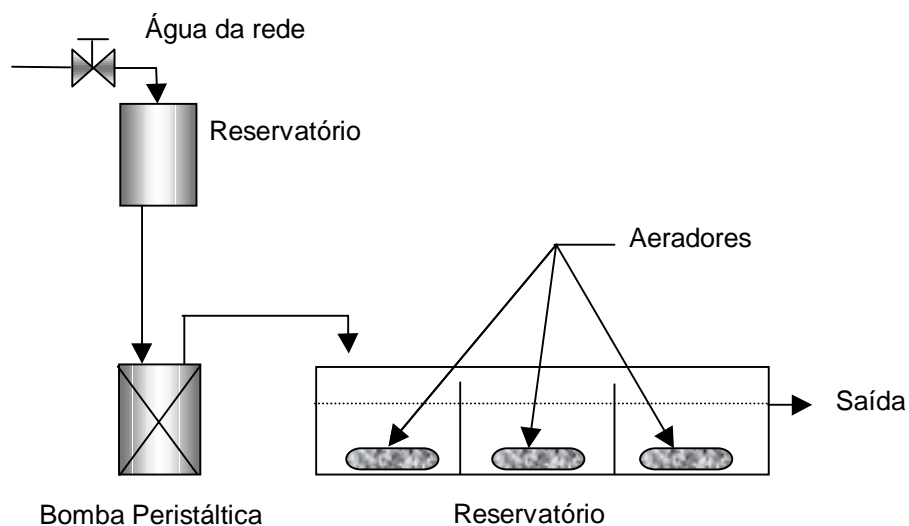


Figura 3.6 – Esquema experimental dos ensaios realizados com vazão variável



Figura 3.7 – Foto ilustrativa de um ensaio típico com vazão variável

3.3 Determinação da concentração do traçador

O traçador salino (NaCl) foi usado em todos os experimentos. A quantidade de sal injetada foi previamente calculada para obter-se concentração da ordem de 1g/L, caso houvesse completa homogeneização no volume do reservatório. Ou seja:

- a) Experimentos com um reservatório: utilizou-se solução de 2,9g de NaCl diluídos em aproximadamente 10mL de água da rede;
- b) Experimentos com dois reservatórios de volumes iguais: utilizou-se solução de 5,8g de NaCl diluídos em aproximadamente 20mL de água da rede;
- c) Experimentos com dois reservatórios de volumes diferentes: utilizou-se solução de 9,2g de NaCl em aproximadamente 30mL de água da rede;
- d) Experimentos com três reservatórios de volumes iguais: utilizou-se solução de 8,88g de NaCl em aproximadamente 30mL de água da rede.

As injeções para os experimentos com um reservatório e dois reservatórios de volumes iguais em série foram realizadas com auxílio de uma seringa na entrada do sistema em um intervalo de tempo de aproximadamente 1 e 2 segundos, respectivamente. As injeções para os experimentos com dois reservatórios de volumes diferentes em série e três reservatórios de volumes iguais em série foram realizadas com auxílio de um frasco, despejando-se a solução diretamente na estrada do sistema em um intervalo de tempo de aproximadamente 3 segundos.

O tempo de injeção é considerado muito pequeno face à duração do experimento e, em especial, ao tempo médio de residência de 2,5h aproximadamente.

Uma reta de calibração foi construída relacionando a condutividade elétrica da solução com a concentração salina. Este procedimento foi repetido sempre que o condutímetro precisava ser calibrado. Essas retas são apresentadas no Apêndice C. Assim foi possível medir, de modo prático e rápido, as condutividades das amostras coletadas à saída do reservatório e calcular as respectivas concentrações salinas.

As amostras foram coletadas em intervalos de cinco minutos durante certo tempo e posteriormente em intervalos de dez minutos. A condutividade elétrica foi medida nos seguintes condutímetros: marca Digimed, modelo CD-20, marca MS-Tecnopon, modelo *mCA-150* e marca Quims, modelo Q-405M. A utilização de cada um desses equipamentos deveu-se à respectiva disponibilidade de uso, pois os equipamentos foram compartilhados entre os alunos do laboratório. A reta de calibração foi construída com soluções salinas de 0g/L, 0,20g/L, 0,40g/L, 0,60g/L, 0,80g/L e 1,0g/L, empregando-se água da rede.

Em um dos experimentos (3 reservatórios em série) foram empregados simultaneamente três traçadores (NaCl, amidorodamina G-Extra e uranina). Os traçadores fluorescentes foram injetados na forma de solução concentrada de modo a gerar concentração de 0,03mg/L, se homogeneizado inteiramente no volume do reservatório. As amostras foram coletadas tal como acima descrito e as concentrações de traçador na corrente de saída foram determinadas com auxílio de retas de calibração construídas com água destilada preparadas pelo LT/COPPE. As retas de calibração para os traçadores fluorescentes utilizadas nos experimentos são apresentadas no Apêndice C. A fluorescência das amostras foi determinada em fluorímetro marca Turner, modelo T10.

3.4 Determinação da vazão

Quando da coleta das amostras, a massa de água acumulada no intervalo de tempo da amostragem foi determinada com emprego de balança analítica marca GEHAKA, modelo BG1000. A massa específica utilizada para os cálculos foi de 1Kg/L para as amostras. Desse modo foi possível determinar a vazão com frequência adequada.

3.5 Tratamento dos dados dos experimentos realizados com vazão variável

A seguir é apresentado um fluxograma dos procedimentos necessários para a obtenção dos valores das variáveis $p(z)$ e z , para um experimento realizado com vazão variável:

1. Mede-se o volume V do reservatório;
2. Registra-se o tempo t decorrido desde a injeção tipo pulso;
3. Registra-se a variação da vazão com o tempo $Q(t)$;
4. Mede-se a concentração do traçador na corrente de saída em função do tempo $c(t)$;
5. Calcula-se a vazão média de alimentação \bar{Q} através da média aritmética dos valores medidos;
6. Calcula-se o tempo médio de residência τ , empregando-se a Equação (3);

7. Calcula-se a concentração de injeção de traçador c_0 por integração numérica e analítica, pois um ajuste exponencial do trecho de decaimento da curva $c(t) \times t$, foi necessário. O valor de c_0 é obtido dividindo-se o valor encontrado pelo tempo médio de residência τ , conforme Equação 7;
8. Calcula-se a variável $p(z)$, empregando-se a Equação (60), ou seja, os valores absolutos de $p(z)$ são obtidos dividindo-se $c(t)$ medidos por $\frac{Mtr}{V}$ que é a concentração de injeção de traçador c_0 ;
9. Calcula-se por integração passo a passo a variável z para cada valor de t , empregando-se a Equação (51);
10. Ajusta-se a escala z à escala t , conforme Equação (62), ou seja, iguala-se o valor médio da variável z ao tempo médio de residência τ ;
11. Traça-se o gráfico $p(z)$ contra z .

3.6 Experimentos realizados

Foram realizados oito experimentos considerando as possibilidades do equipamento utilizado, os traçadores injetados e o tipo de vazão de alimentação.

Os tempos de residência médios foram projetados para o valor de 2,5 horas, de forma que o período total de observação, isto é, de coleta das amostras, fosse de três vezes o tempo de residência, ou seja, 7,5 horas aproximadamente.

Conforme comentado, as amostras foram coletadas em intervalos de tempo iguais a 10 minutos, porém de 5 em 5 minutos no período inicial, logo após a injeção do traçador, para melhor observação do trecho ascendente da curva de concentração.

3.7 Codificação dos experimentos

Os experimentos serão identificados através da seguinte codificação:

E-1C Um único reservatório alimentado com vazão constante. Injeção tipo pulso com traçador salino NaCl;

- E-1V Um único reservatório alimentado com vazão variável. Injeção tipo pulso com traçador salino NaCl;
- E-2C Dois reservatórios em série, de volumes iguais, alimentados com vazão constante. Injeção tipo pulso com traçador salino NaCl;
- E-2V Dois reservatórios em série, de volumes iguais, alimentados com vazão variável. Injeção tipo pulso com traçador salino NaCl;
- E-2DC Dois reservatórios em série, de volumes diferentes, alimentados com vazão constante. Injeção tipo pulso com traçador salino NaCl;
- E-2DV Dois reservatórios em série, de volumes diferentes, alimentados com vazão variável. Injeção tipo pulso com traçador salino NaCl;
- E-3C Três reservatórios em série, de volumes iguais, alimentados com vazão constante. Injeção tipo pulso com traçadores salino NaCl e fluorescentes (amidorodamina G-extra e uranina);
- E-3V Três reservatórios em série, de volumes iguais, alimentados com vazão variável. Injeção tipo pulso com traçador salino NaCl.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Tempo médio de residência e vazões

Os resultados experimentais relativos ao tempo médio de residência (τ), a média da distribuição de tempos de residência \bar{t} , o parâmetro $\frac{\bar{t}}{\tau}$, os volumes dos reservatórios e as vazões médias estão representados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Vazões médias, tempos médios de residência e médias das distribuições de tempos de residência para o conjunto de experimentos realizados.

Código do experimento	data	volume V (l)	Vazão média Q (ml/min.)	τ (h)	\bar{t} (h)	$\frac{\bar{t}}{\tau}$
E-1C	03/07/04	2,9	19,23	2,51	2,42	0,96
E-1V	17/11/04	2,9	18,52	2,61	-	-
E-2C	28/08/04	5,8	39,35	2,46	2,53	1,04
E-2V	19/11/04	5,8	38,77	2,49	-	-
E-2DC	13/08/04	9,02	61,11	2,46	2,55	1,03
E-2DV	25/11/04	9,02	60,1	2,56	-	-
E-3C	25/01/05	8,93	60,63	2,45	2,89	1,18
E-3V	25/02/05	8,93	58,77	2,53	-	-

Os valores de τ foram calculados através da Equação (3) e os valores de \bar{t} , através da Equação (12). Como as curvas de concentração *versus* tempo apresentavam lento decaimento e como as determinações de concentração passam a apresentar alguma imprecisão para valores muito baixos, optou-se por ajustar o trecho de decaimento da curva por uma função exponencial. Assim, parte da integração relativa à Equação (12) foi calculada numericamente e parte analiticamente, empregando a função ajustada. O procedimento seguido está detalhado no Apêndice D.

Para medir a dispersão dos dados de vazão obtidos nos experimentos, utilizou-se o coeficiente de variação obtido através da Equação (73):

$$cv = \frac{S}{x} \cdot 100 \quad (73)$$

Onde:

S = desvio padrão da amostra;

\bar{x} = média aritmética da amostra com n elementos.

Nos experimentos com vazão constante, exceto para o experimento E-3C, as vazões de alimentação sofreram variações insignificantes (coeficiente de variação menor que 5%) em relação ao valor médio, no decorrer do experimento graças ao sistema de alimentação com carga constante utilizado. Os perfis de variação das vazões estão ilustrados na Figura 4.1.

Nos experimentos com vazões variáveis foram impostos os perfis de variação mostrados na Figura 4.2. Observa-se que foi possível gerar perfis que apresentam significativa variação de vazão em relação aos valores médios indicados na Tabela 4.1.

Os coeficientes de variação calculados estão representados na Tabela 4.2.

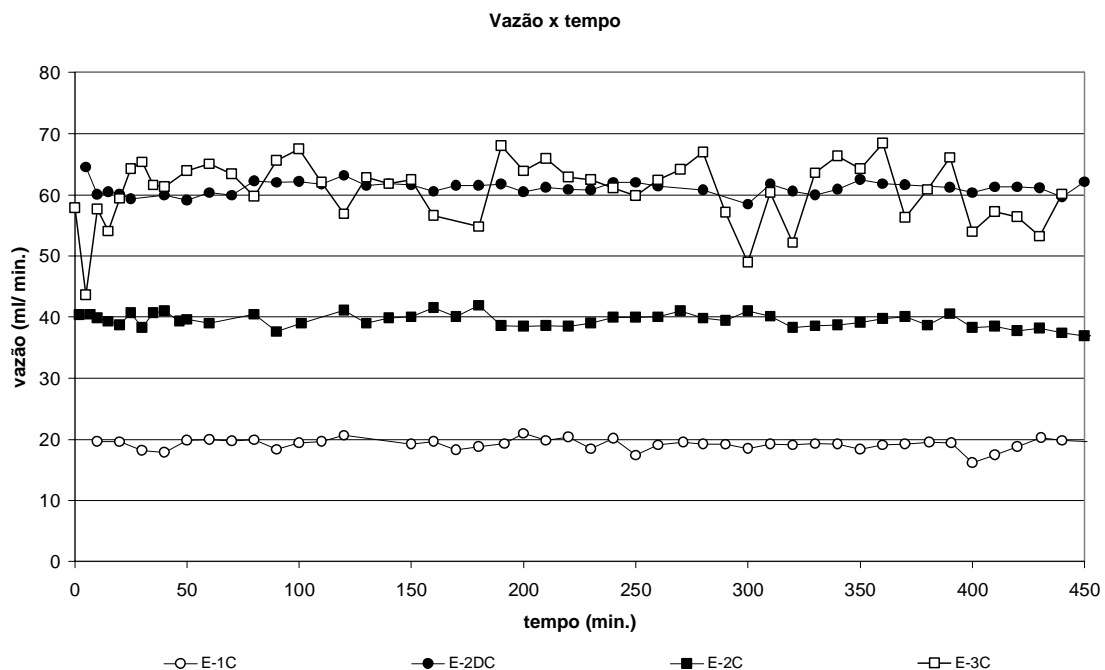


Figura 4.1 – Hidrógrafas obtidas durante os experimentos realizados em sistemas alimentados com vazão constante

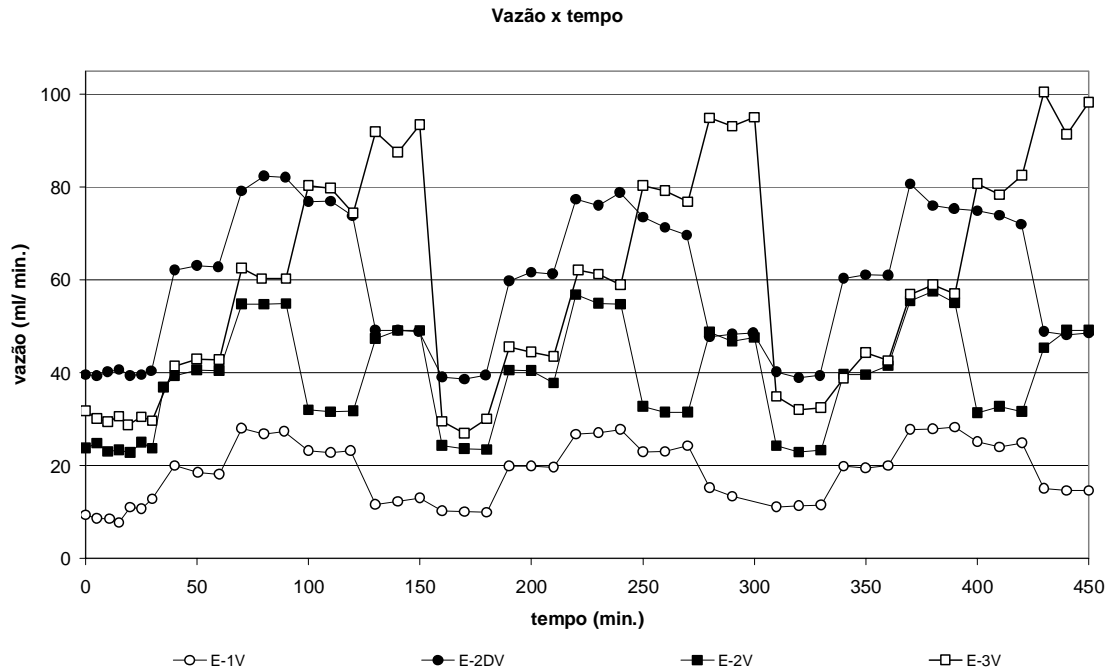


Figura 4.2 - Hidrógrafas obtidas durante os experimentos realizados em sistemas alimentados com vazão variável

Tabela 4.2 – Vazões médias e coeficientes de variação das vazões medidas para o conjunto de experimentos realizados.

Código do experimento	Vazão média (mL/ min.)	Coefficiente de variação (c.v.)
E-1C	19,23	4,7%
E-1V	18,52	36%
E-2C	39,35	2,9%
E-2V	38,77	30%
E-2DC	61,11	1,8%
E-2DV	60,10	26%
E-3C	60,63	8,5%
E-3V	58,77	41%

Outra observação a ser feita refere-se à razão $\frac{\bar{t}}{\tau}$ que se manteve praticamente igual a 1 (um), indicando a não existência de zonas mortas nos reservatórios. Porém no experimento E-3C houve um desvio maior deste parâmetro (em torno de 18%) que pode ser atribuída à existência de zonas mortas ou à erros experimentais como será visto mais adiante.

4.2 Modelagem dos resultados dos experimentos com vazão constante

A seguir são apresentados nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 os modelos hidrodinâmicos que melhor se ajustaram às curvas experimentais de $E(\theta)$ versus θ obtidas nos ensaios de vazão constante.

Para expressar quantitativamente os desvios entre as curvas teórica e experimental, calculou-se a relação dada pela Equação (74):

$$Desvio = \frac{\sum_{i=1}^n [E(\theta_i)_{\text{exp}} - E(\theta_i)_{\text{teo}}]^2}{n} \quad (74)$$

Sendo:

n = número de pontos experimentais

$E(\theta)_{\text{exp}}$ = valores experimentais de $E(\theta)$

$E(\theta)_{\text{teo}}$ = valores teóricos de $E(\theta)$

O modelo ideal de um único tanque de mistura perfeita ajustou-se muito bem aos dados experimentais obtidos no ensaio de um reservatório alimentado com vazão constante (Figura 4.3). O valor do desvio calculado através da Equação (74) é igual a $8,97 \times 10^{-4}$.

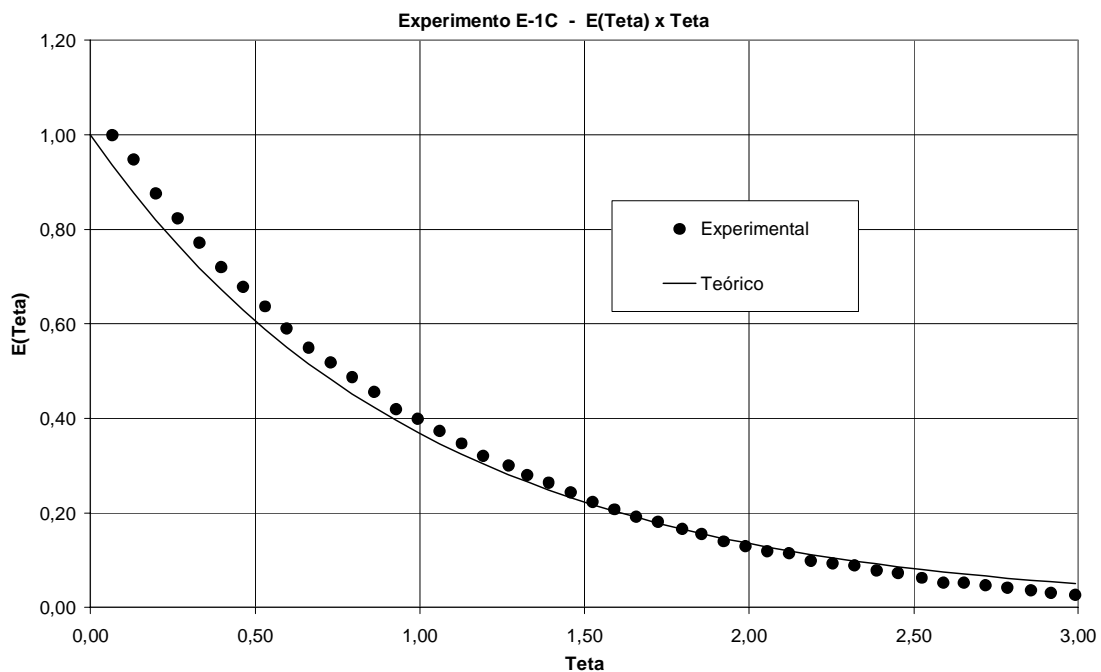


Figura 4.3 – Distribuição dos tempos de residência (DTR) no único tanque.

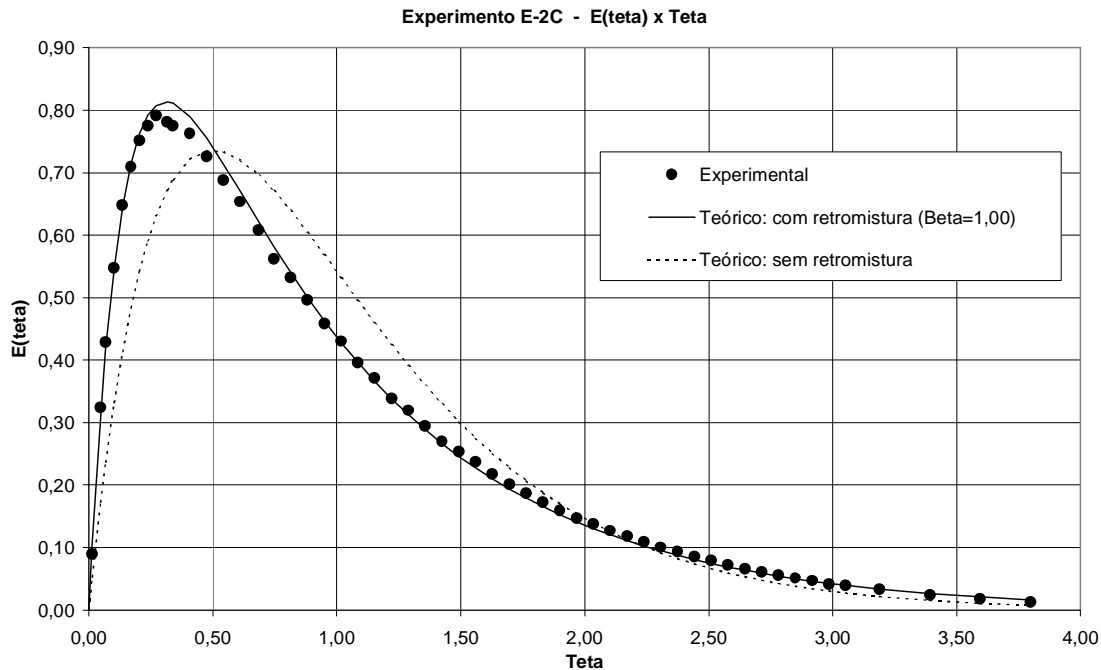


Figura 4.4 – DTR nos dois tanques de volumes iguais, em série, e vazão de alimentação constante

Dois modelos hidrodinâmicos foram utilizados na tentativa de melhor ajustar a curva resposta do ensaio com dois reservatórios de volumes iguais, em série, alimentados com vazão constante. Os modelos usados foram de dois tanques de mistura perfeita, volumes iguais, em série, com e sem retromistura.

O modelo de melhor ajuste foi o de retromistura com valor do parâmetro β igual a 1,00, o que representa 100% de retromistura. O ajuste pode ser considerado muito bom (Figura 4.4).

Os valores dos desvios calculados através da Equação (74) foram iguais a $1,39 \times 10^{-4}$ (modelo com 100% de retromistura) e $8,30 \times 10^{-3}$ (modelo sem retromistura). A Tabela 4.3 apresenta os desvios calculados em relação aos valores de retromistura.

Tabela 4.3 - Valores dos desvios entre as curvas teórica e experimental obtidas através do ensaio de dois tanques de volumes iguais em série com vazão constante, em relação à retromistura

Retromistura	Desvio
70%	$5,17 \times 10^{-4}$
80%	$2,93 \times 10^{-4}$
90%	$1,74 \times 10^{-4}$
100%	$1,39 \times 10^{-4}$
110%	$1,72 \times 10^{-4}$

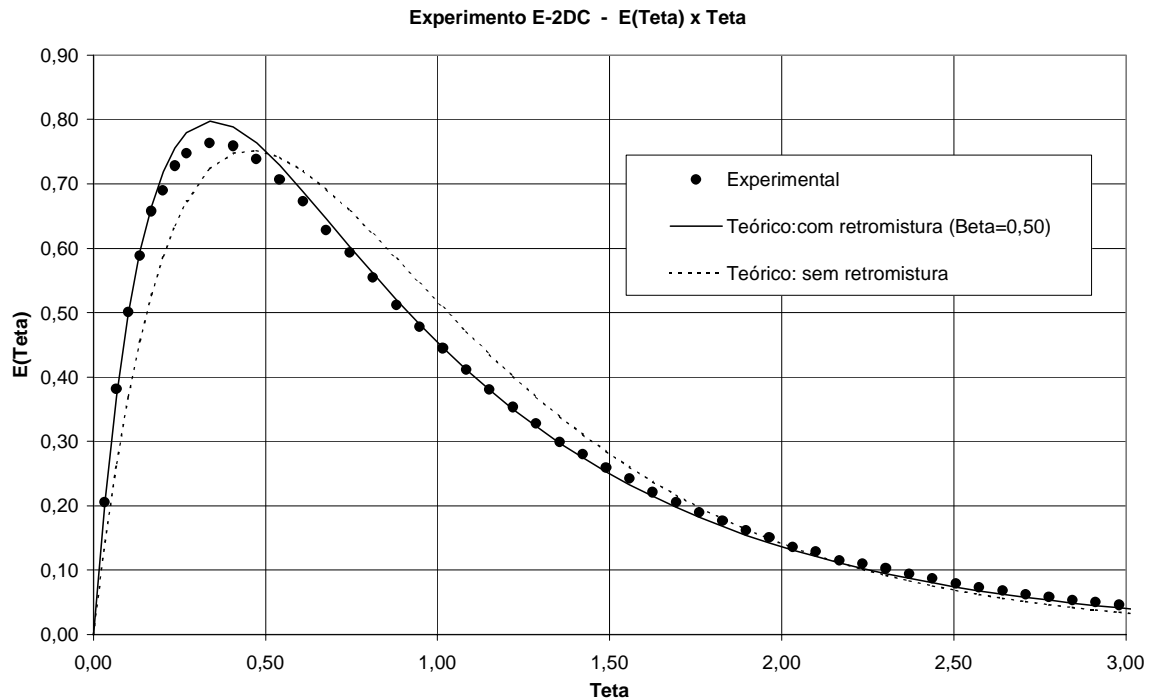


Figura 4.5 – DTR nos dois tanques de volumes diferentes, em série, e vazão de alimentação constante

Dois modelos hidrodinâmicos foram utilizados na tentativa de ajustar a curva resposta do ensaio com dois reservatórios de volumes diferentes, em série, alimentados com vazão constante. Os modelos de dois tanques de mistura perfeita, volumes diferentes, em série, com e sem retromistura foram empregados.

O modelo de melhor ajuste foi o com retromistura com valor do parâmetro β igual a 0,50, o que representa 50% de retromistura. O ajuste obtido com esse modelo pode ser considerado muito bom (Figura 4.5).

Os valores dos desvios calculados através da Equação (74) foram iguais a $1,61 \times 10^{-4}$ (modelo com 50% de retromistura) e $1,87 \times 10^{-3}$ (modelo sem retromistura). A Tabela 4.4 apresenta os desvios calculados em relação aos valores de retromistura.

Tabela 4.4 – Valores dos desvios entre as curvas teórica e experimental obtidas através do ensaio de dois tanques de volumes diferentes em série com vazão constante, em relação à retromistura

Retromistura	Desvio
40%	$2,88 \times 10^{-3}$
50%	$1,61 \times 10^{-4}$
60%	$2,78 \times 10^{-4}$

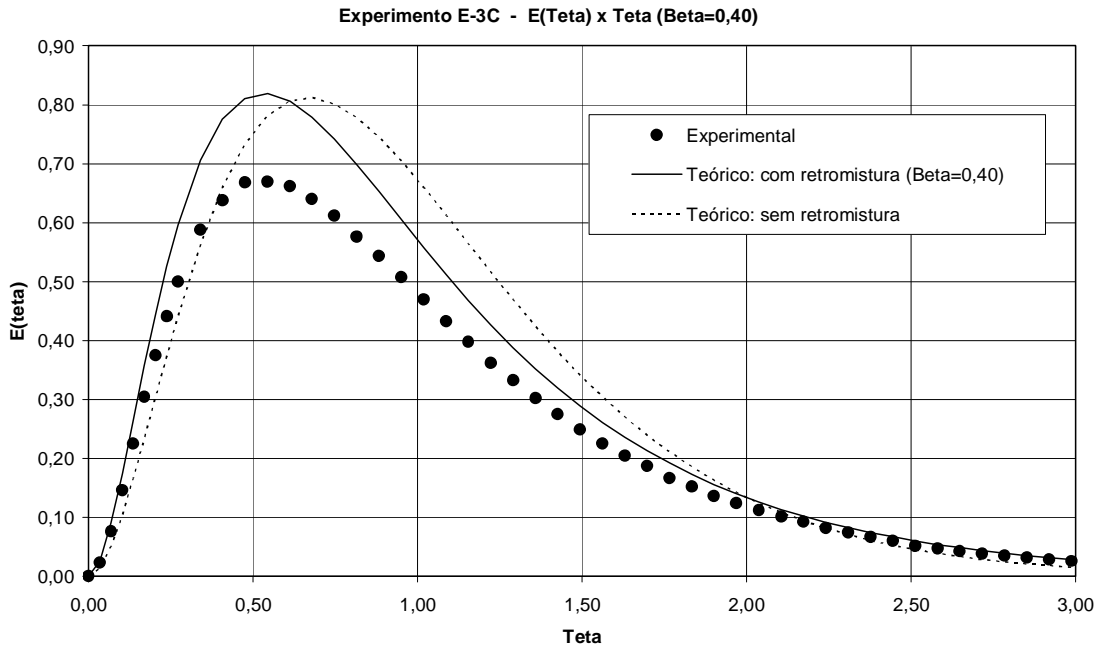


Figura 4.6 - DTR nos três tanques de volumes iguais, em série e vazão de alimentação constante

Dois modelos hidrodinâmicos foram empregados na tentativa de melhor ajustar a curva resposta do ensaio com três reservatórios de volumes iguais, em série, alimentados com vazão constante. Foram utilizados os modelos de três tanques de mistura perfeita, volumes iguais, em série, com e sem retromistura.

Os valores dos desvios calculados através da Equação (74) foram iguais a $2,36 \times 10^{-3}$ (modelo com 40% de retromistura) e $6,95 \times 10^{-3}$ (modelo sem retromistura). A Tabela 4.5 apresenta os desvios calculados em relação aos valores de retromistura.

Tabela 4.5 - Valores dos desvios entre as curvas teórica e experimental obtidas através do ensaio de três tanques de volumes iguais em série com vazão constante, em relação à retromistura

Retromistura	Desvio
20%	$3,55 \times 10^{-3}$
40%	$2,36 \times 10^{-3}$
60%	$2,84 \times 10^{-3}$

Nenhum modelo se ajustou satisfatoriamente (Figura 4.6). O pico da curva assim como o trecho de decaimento, não foram adequadamente previstos pelos modelos.

Este comportamento pode ser atribuído a alguns problemas experimentais listados a seguir:

- a) Volume do reservatório: os três tanques foram completados com água da rede até o extravasamento na saída do sistema. Então os compressores de ar foram ligados até que toda água excedente pudesse sair. Depois de desligados os compressores, toda água dos tanques foi medida com auxílio de uma balança. Um pequeno volume de água foi perdido ou por ficar aderido às paredes do reservatório e dos frascos utilizados na determinação do peso, ou por ficar retido nos aeradores;
- b) Vazão de alimentação: o coeficiente de variação das vazões neste experimento foi o maior encontrado (8,5%), em comparação com os outros experimentos (4,7%, 1,8% e 2,9%);
- c) Reta de calibração: a Equação da reta encontrada para correlação das condutividades medidas nas amostras coletadas e as concentrações salinas não ficou bem ajustada. O gráfico da reta de calibração utilizada neste experimento está ilustrado na Figura C.4 do Apêndice C;
- d) Parâmetro $\frac{\bar{t}}{\tau}$: o valor desse parâmetro neste experimento apresentou desvio de 18% aproximadamente. Este resultado pode ter ocorrido devido à grande variação da vazão (8,5%) ou à presença de zonas mortas.

Optou-se, portanto, por utilizar o valor calculado de \bar{t} no lugar do parâmetro τ . Desta forma pôde-se obter melhor ajuste do modelo de três tanques de mistura perfeita, volumes iguais, em série, com retromistura. A distribuição dos tempos de residência, obtida com esse procedimento está ilustrada na Figura 4.7.

Sendo:

$$\theta' = \frac{t}{\bar{t}}$$

$$E(\theta') = \bar{t}.E(t)$$

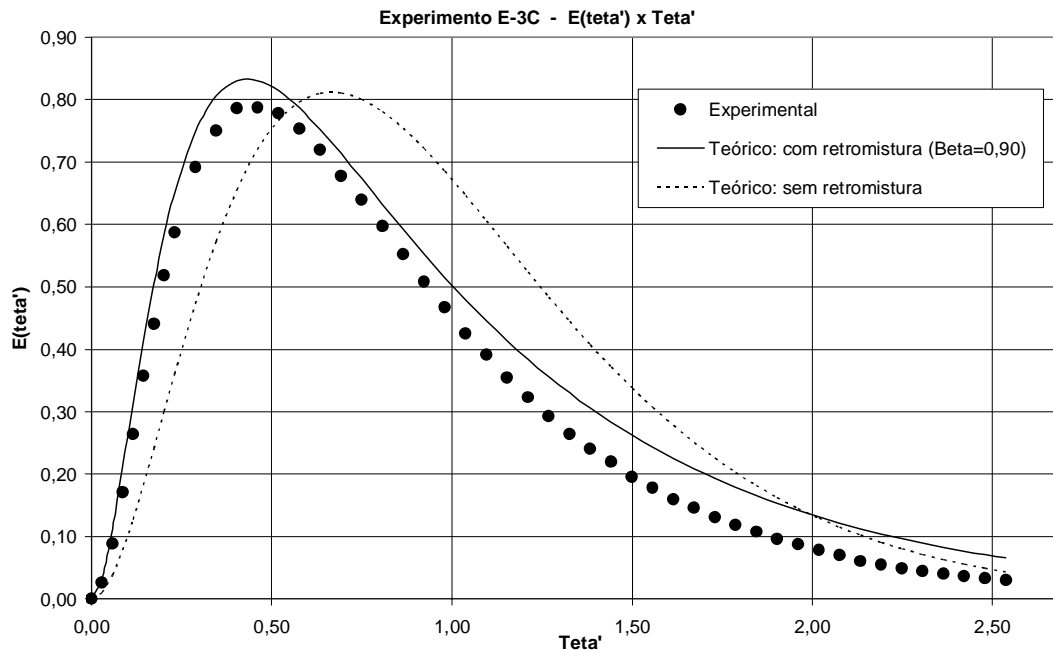


Figura 4.7 – DTR nos três tanques de volumes iguais, em série e vazão de alimentação constante (utilização do valor de \bar{t} ao invés do valor de τ).

O modelo de melhor ajuste foi o de três tanques em série com retromistura com valor do parâmetro β igual a 0,90, o que representa 90% de retromistura. O ajuste obtido com a substituição de valores proposta pode ser considerado muito bom.

Os valores dos desvios calculados através da Equação (74) foram iguais a $1,66 \times 10^{-4}$ (modelo com 90% de retromistura) e $1,71 \times 10^{-2}$ (modelo sem retromistura). A Tabela 4.6 apresenta os desvios calculados em relação aos valores de retromistura.

Tabela 4.6 - Valores dos desvios entre as curvas teórica e experimental obtidas através do ensaio de três tanques de volumes iguais em série com vazão constante, em relação à retromistura – com substituição de τ por \bar{t}

Retromistura	Desvio
80%	$2,23 \times 10^{-4}$
90%	$1,66 \times 10^{-4}$
95%	$2,10 \times 10^{-4}$

Foram encontrados valores altos de retromistura. Este fenômeno pode ser explicado pelas baixas vazões utilizadas (gotejantes) nos ensaios, provocando mudança de

direção do escoamento no interior dos tanques em função da intensa aeração. A Figura 4.8 ilustra este comportamento.

Foi realizada medição da vazão de ar insuflado nos reservatórios. Com auxílio de um rotâmetro, uma medição de vazão foi feita para cada compressor de ar e a média das três vazões medidas resultou em 3,8L/min.

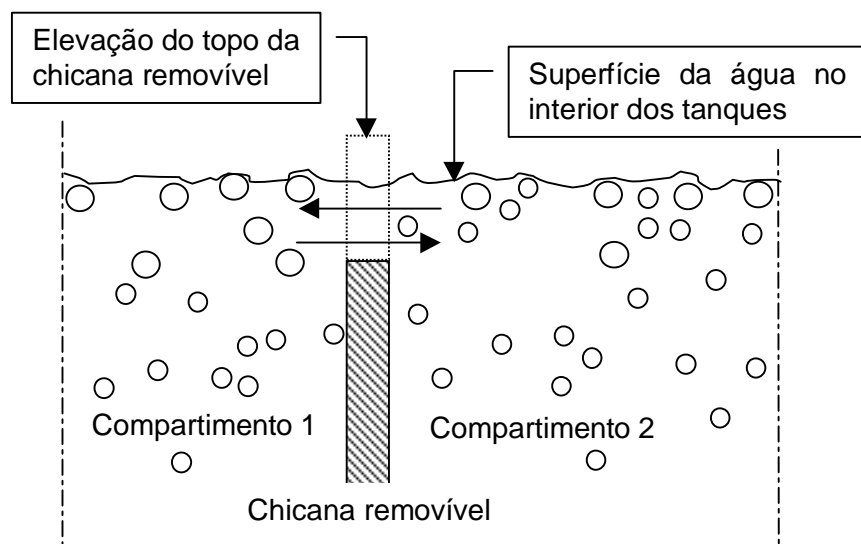


Figura 4.8 – Detalhe da chicana e possível causa da retromistura no interior dos tanques durante a realização dos ensaios

Para confirmar esta hipótese, foi feito um teste com corante para visualização. Foi utilizado corante artificial usado para fins alimentícios, do fabricante MAGO.

Condições similares às de três reservatórios aerados de volumes iguais, em série, alimentados com vazão constante, foram reproduzidas. A injeção de solução concentrada de corante foi feita no reservatório intermediário. Decorridos em torno de 60 segundos após a injeção, uma parte do corante injetado retornou ao compartimento à montante e outra parte passou para o compartimento à jusante, em direção à saída do sistema. Após cerca de 10 minutos do momento da injeção, os três compartimentos apresentavam coloração quase homogênea. A Figura 4.9 ilustra este comportamento.

Na realidade a retromistura não estava prevista quando do planejamento dos experimentos. Ao se tentar ajustar os modelos hidrodinâmicos sem retromistura aos dados experimentais de dois e três reservatórios, observou-se que as curvas não coincidiam. Então modelos com retromistura foram empregados na tentativa de se obter melhor ajuste.

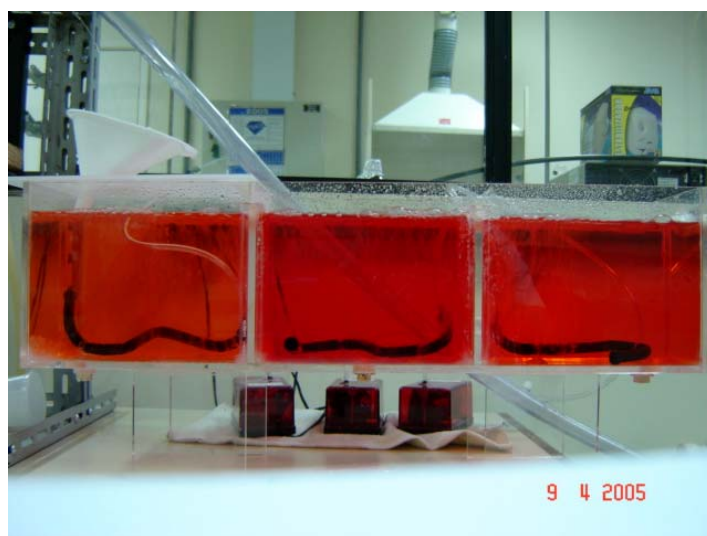
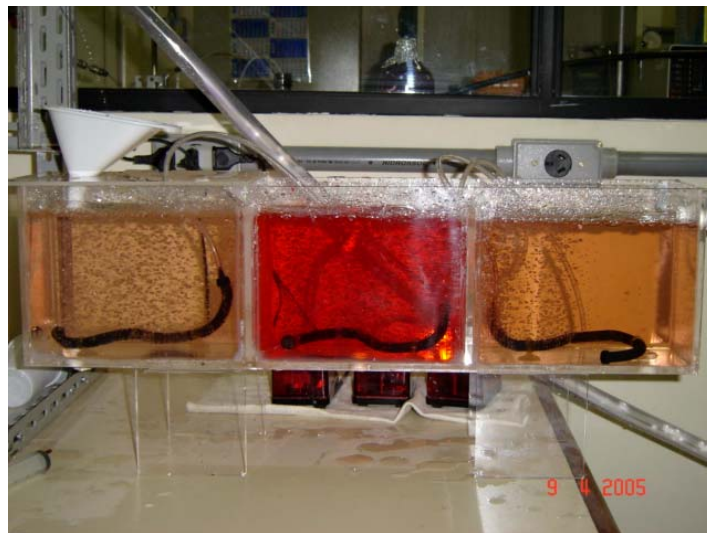
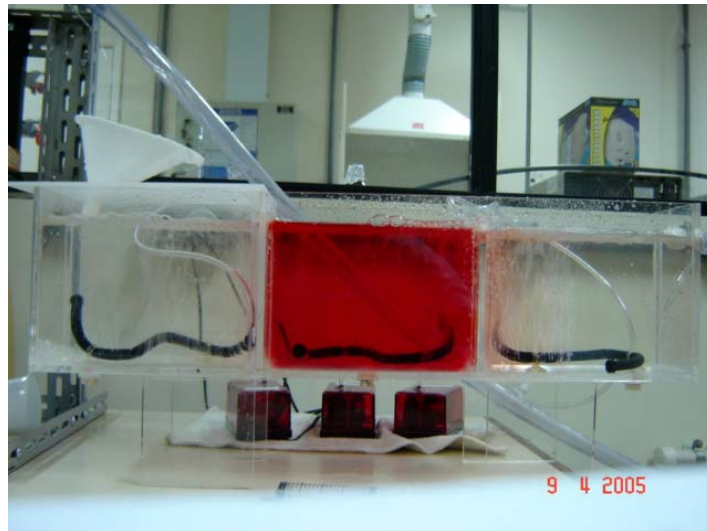


Figura 4.9 – Fotos ilustrativas do teste realizado em laboratório a fim de comprovar a retromistura

O retorno do fluido poderia ter sido evitado com a construção dos reservatórios em desnível ou simplesmente diminuindo as alturas da segunda chicana e da saída do sistema.

No experimento E-3C foram injetados instantaneamente o Cloreto de Sódio, a amidorodamina G-Extra e a uranina à entrada de três reservatórios em série, de volumes iguais, alimentados com vazão constante. A injeção de traçadores fluorescentes neste ensaio teve o objetivo de observar o comportamento dos três tipos de traçadores, em especial, suas curvas-respostas. Os gráficos dos valores das concentrações de traçador encontradas à saída dos sistemas *versus* o tempo de coleta das amostras podem ser observados nas Figuras 4.10 e 4.11.

A Figura 4.12 ilustra as três curvas normalizadas. As Tabelas 4.7 e 4.8, a seguir, apresentam os tempos de ocorrência de 75%, 50% e 25% do valor da concentração máxima de traçador na parte ascendente e descendente da curva, respectivamente.

Tabela 4.7 – Tempos de ocorrência de 100%, 75%, 50% e 25% do valor de concentração de traçador na parte ascendente da curva de concentrações *versus* tempo

Concentração de traçador	NaCl (min.)	amidorodamina G-Extra (min.)	uranina (min.)
C(t) máx.	70	70	70
0,75 C(t) máx.	39	37	40
0,50 C(t) máx.	20	20	22
0,25 C(t) máx.	11	13	13

Tabela 4.8 – Tempos de ocorrência de 75%, 50% e 25% do valor de concentração de traçador na parte descendente da curva de concentrações *versus* tempo

Concentração de traçador	NaCl (min.)	amidorodamina G-Extra (min.)	uranina (min.)
0,75 C(t) máx.	145	122	106
0,50 C(t) máx.	227	177	155
0,25 C(t) máx.	320	217	206

Esses resultados apontam para o rápido desaparecimento da uranina, seguida da amidorodamina G-Extra.

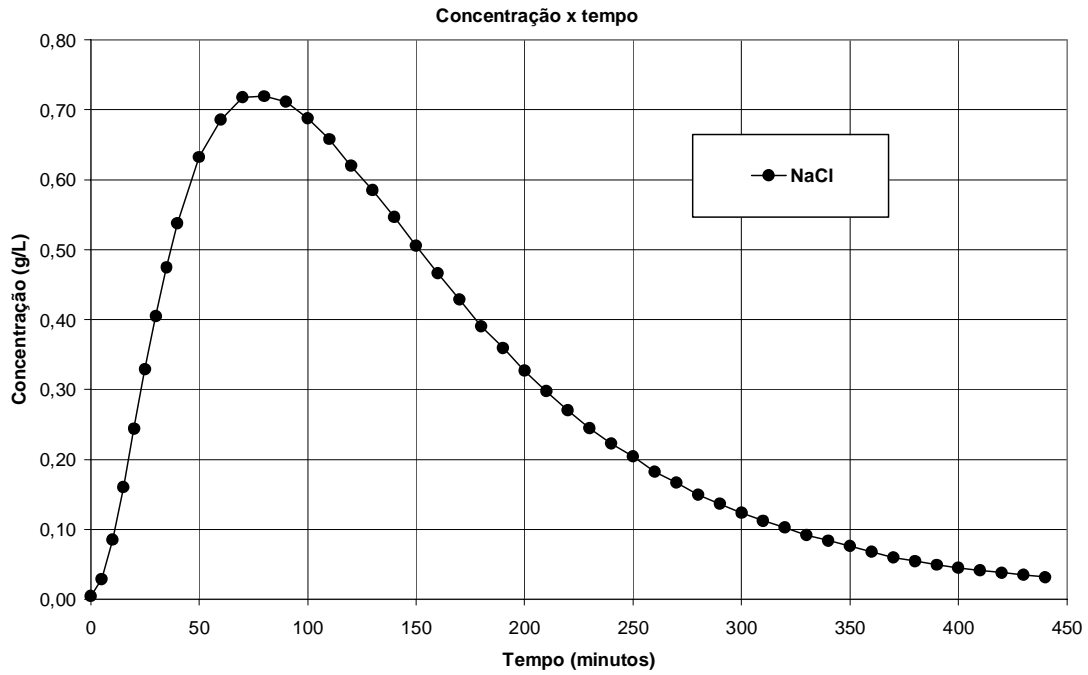


Figura 4.10 - Curva de concentração de traçador salino *versus* tempo para o ensaio com três reservatórios em série (E-3C)

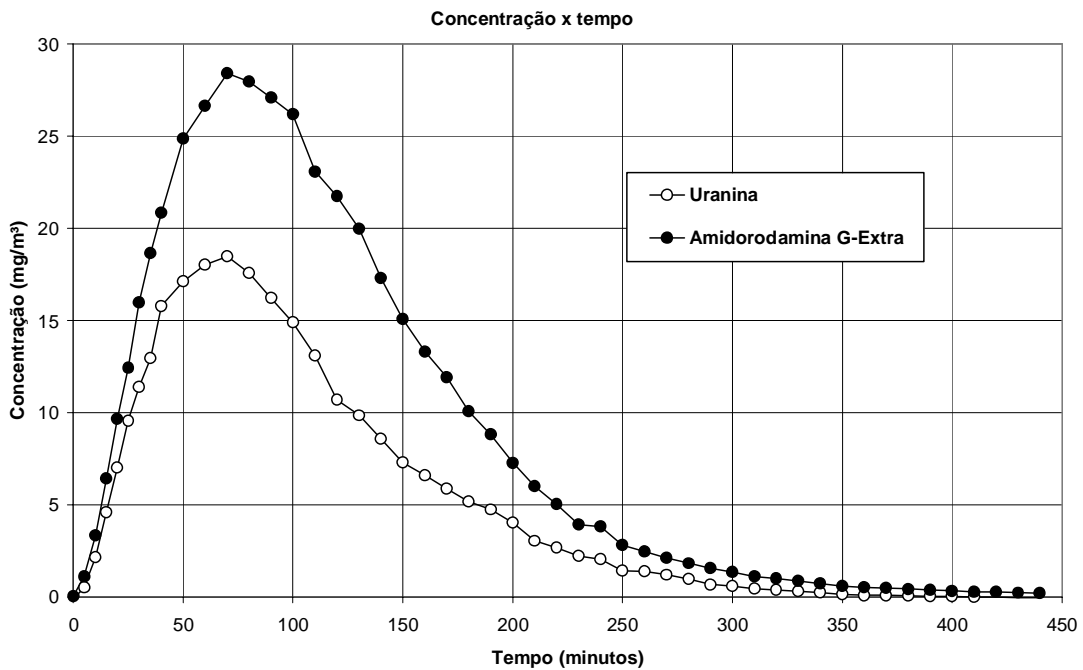


Figura 4.11 - Curva de concentrações de traçadores fluorescentes (amidorodamina G-Extra e uranina) *versus* tempo para o ensaio com três reservatórios em série (E-3C)

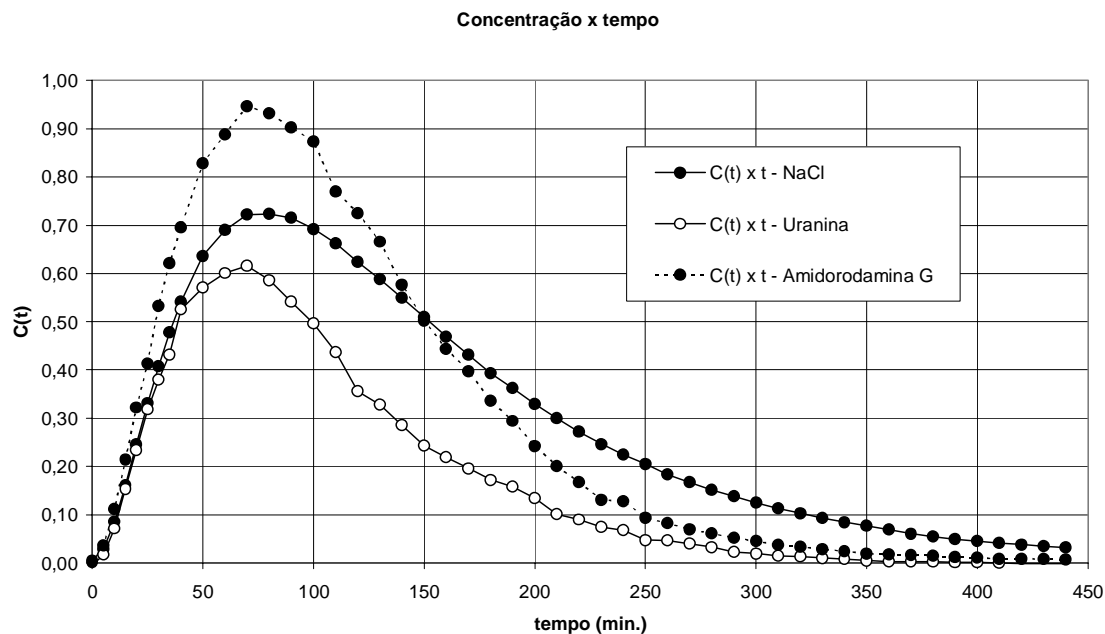


Figura 4.12 - Curvas normalizadas de concentrações dos traçadores salino e fluorescentes (amidorodamina G-Extra e uranina) versus tempo para o ensaio com três reservatórios em série (E-3C)

A partir das medidas das concentrações de traçador, foram calculadas as porcentagens de perda de massa que se encontram na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Porcentagem da perda de traçador observada no experimento de três reservatórios em série de volumes iguais, alimentados com vazão constante

Código	Data	Volume (litros)	Vazão (ml/min.)	Traçador	Perda de traçador
E-3C	25.01.2005	8,93	60,63	NaCl	3%
E-3C	25.01.2005	8,93	60,63	uranina	53%
E-3C	25.01.2005	8,93	60,63	amidorodamina G-Extra	23%

Observa-se grande perda de traçador fluorescente, principalmente de uranina.

O efeito de *quenching* ou de lavagem é um fator irreversível, isto é, o fenômeno da inibição química da fluorescência ocasionada pela presença de cloro livre ou de ozônio no líquido não pode ser revertido como é o caso do efeito da temperatura ou do pH. A perda de fluorescência por efeito da temperatura e/ ou pH é recuperada voltando-se à temperatura inicial e/ ou com a correção do pH [24].

A água utilizada na totalidade dos experimentos foi proveniente da Estação de Tratamento de Água do Guandu (ETA do Guandu), distribuída através da Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE). A ETA do Guandu trata diariamente 40 mil litros de água por segundo e a CEDAE utiliza no tratamento, diariamente, além de outras substâncias, uma média de 15 toneladas de cloro.

A água bruta provém do rio Guandu e a desinfecção com o cloro é feita para a eliminação de bactérias e outros microorganismos patogênicos responsáveis pela transmissão de doenças de veiculação hídrica tais como hepatite, tifo, diarreia, verminoses e esquistossomose.

Portanto, é atribuída à presença de cloro na água a principal causa da perda de fluorescência nas medições das amostras coletadas neste experimento (E-3C). A uranina se mostrou mais sensível que a amidorodamina G-Extra à presença de cloro.

Em decorrência da elevada perda de traçador, os resultados não foram trabalhados de forma a obter as DTRs adimensionais ($E(\theta)$ versus θ).

4.3 Resultados dos experimentos com vazão variável

A seguir são apresentadas nas Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 as curvas construídas segundo o tratamento proposto por NIEMI [1], as curvas experimentais obtidas nos ensaios com vazão constante e os modelos hidrodinâmicos que melhor se ajustaram às curvas experimentais de $E(\theta)$ versus θ .

A curva $p(z)$ versus z obtida através do tratamento proposto por NIEMI [1] para sistemas alimentados com vazão variável coincidiu com a DTR de um único reservatório de mistura perfeita obtida no ensaio com vazão constante. Pode-se dizer que a concordância entre as curvas após o período igual a 1 (um) tempo médio de residência foi excelente; porém, no trecho inicial observou-se pequenos desvios (Figura 4.13).

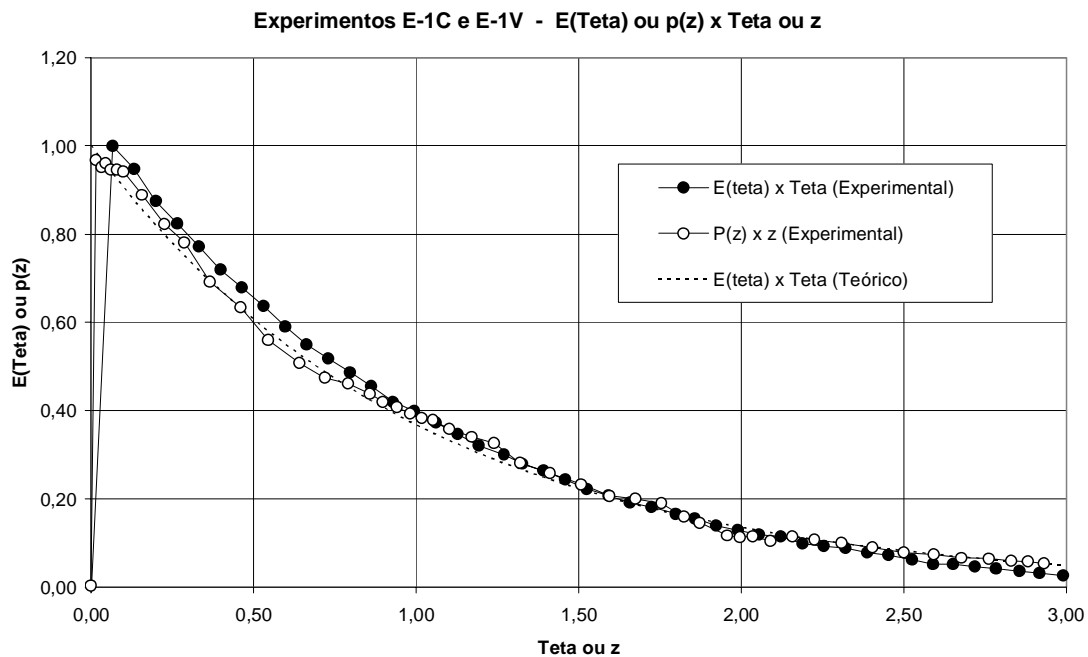


Figura 4.13 – Distribuição dos tempos de residência (DTR) no único tanque alimentado com vazão constante (ensaio E-1C) e variável (ensaio E-1V)

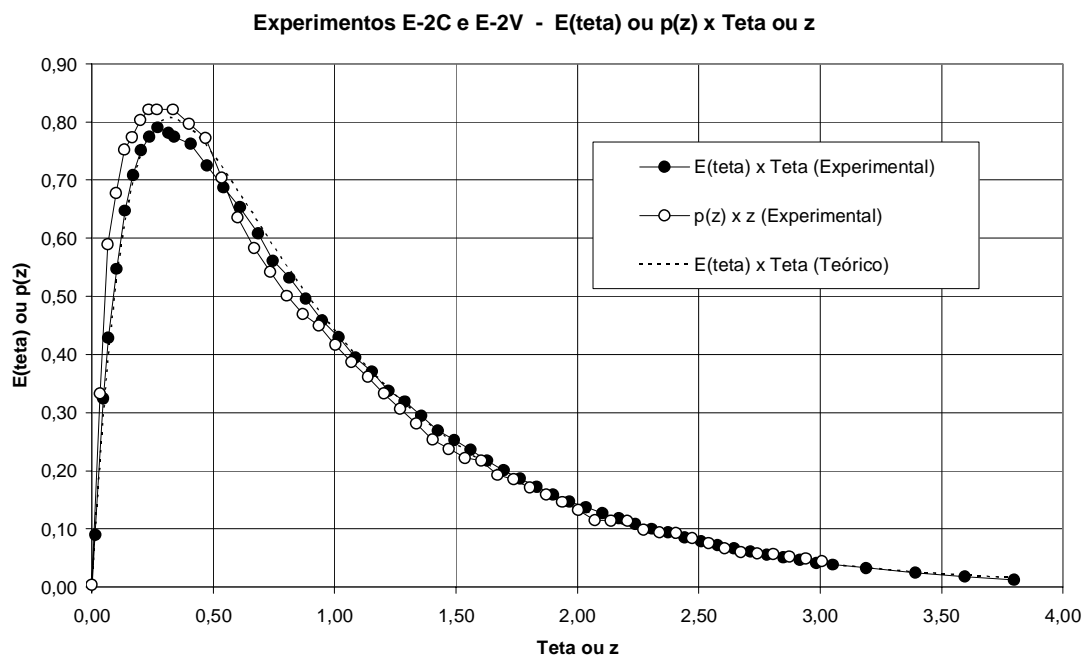


Figura 4.14 - DTR nos dois tanques de volumes iguais, em série, alimentado com vazão constante (E-2C) e variável (E-2V)

A curva $p(z)$ versus z obtida através do tratamento proposto por NIEMI [1] para sistemas alimentados com vazão variável teve boa concordância com a DTR de dois tanques de mistura perfeita e volumes iguais em série obtida no ensaio com vazão

constante. Pequenos desvios podem ser observados nos trechos ascendente e descendente próximos ao pico das curvas; porém, a partir de $\theta=1,50$, as curvas tiveram ótima coincidência (Figura 4.14).

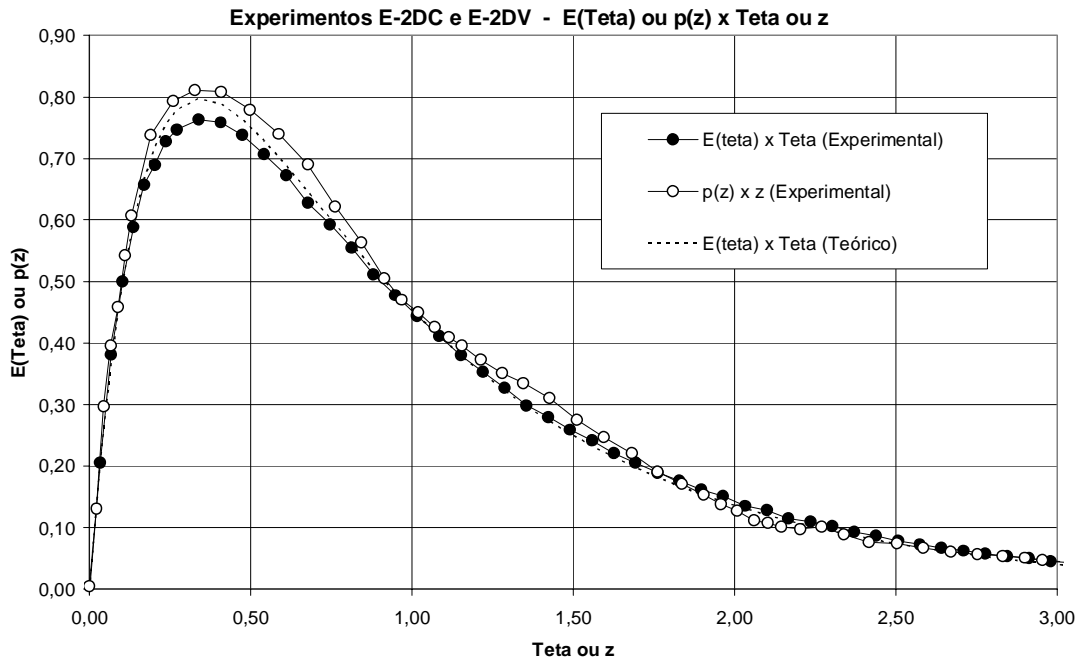


Figura 4.15 - DTR nos dois tanques de volumes diferentes, em série, alimentado com vazão constante e variável

A curva $p(z)$ versus z obtida através do tratamento proposto por NIEMI [1] para sistemas alimentados com vazão variável teve boa concordância com a DTR de dois tanques de mistura perfeita e volumes diferentes em série, obtida no ensaio com vazão constante. Alguns desvios na região próxima ao máximo das curvas podem ser observados; porém, nos demais trechos a coincidência entre as curvas foi ótima (Figura 4.15).

A curva $p(z)$ versus z obtida com o tratamento proposto por NIEMI [1] para sistemas alimentados com vazão variável não concordou adequadamente com a DTR de três tanques de mistura perfeita e volumes iguais em série obtida no ensaio com vazão constante, como pode ser visto no gráfico da Figura 4.16.

Como houve para todos os experimentos (exceto E-3C e E-3V) uma grande similaridade entre as curvas $E(\theta)$ versus θ (vazões constantes) e $p(z)$ versus z (vazões variáveis), os modelos hidrodinâmicos são os mesmos para ambos os casos, como indicado na Tabela 4.10.

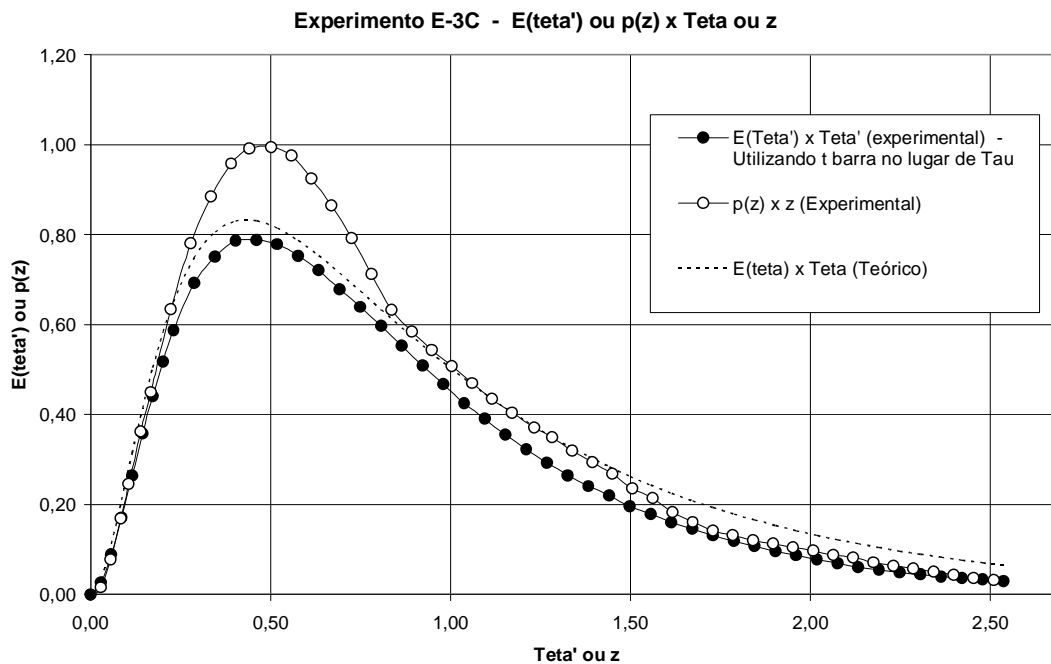


Figura 4.16 - DTR nos três tanques de volumes iguais, em série, alimentado com vazão constante e variável

Tabela 4.10 - Modelos hidrodinâmicos ajustados aos reservatórios estudados

Código do experimento	Reservatórios estudados	Modelo hidrodinâmico
E-1C	Um reservatório	Um único tanque de mistura perfeita
E-2C	Dois reservatórios de volumes iguais em série	Dois tanques de mistura perfeita e volumes iguais em série com retromistura ($\beta=1,00$)
E-2DC	Dois reservatórios de volumes diferentes em série	Dois reservatórios de mistura perfeita e volumes diferentes em série com retromistura ($\beta =0,50$)
E-3C	Três reservatórios de volumes iguais em série	Três reservatórios de mistura perfeita e volumes iguais em série com retromistura ($\beta =0,90$)

Todos os dados experimentais obtidos nos ensaios com vazões constante e variável são apresentados nas Tabelas E.1 a E.8 do Apêndice E. As Tabelas E.5 a E.8 também apresentam os dados experimentais obtidos nos ensaios com vazão variável tratados segundo a proposta de NIEMI [1].

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Os experimentos realizados no sistema experimental, constituído de compartimentos aerados em série, com auxílio da técnica de estímulo-resposta e empregando traçador salino, revelaram que cada compartimento apresentou comportamento hidrodinâmico passível de representação pelo modelo ideal de mistura perfeita ou dispersão infinita.

Nos experimentos realizados com vazão constante e um único tanque, a macromistura da fase líquida pôde ser representada pelo modelo ideal de mistura perfeita. No caso de dois tanques em série de volumes iguais e volumes diferentes, o modelo não ideal de tanques perfeitamente agitados em série com retromistura mostrou-se o mais adequado para representar a hidrodinâmica desses sistemas. Em ambos os casos, os valores do parâmetro β (intensidade de retromistura) se apresentaram relativamente elevados (1,0 e 0,5, respectivamente).

A retromistura inferida no processo de modelagem pode ser fisicamente atribuída ao movimento de retorno do líquido do compartimento a jusante para aquele a montante, em função da baixa vazão de escoamento empregada nos ensaios e da intensa agitação provocada pela aeração. Desse modo, considera-se que a retromistura ocorria na lâmina de líquido sobre a chicana (Figura 3.1) que separava os dois compartimentos.

Para os ensaios com três compartimentos em série observou-se uma discrepância entre o tempo médio de residência (τ) e a média da distribuição de tempos de residência (\bar{t}), que pode ser atribuída a erros experimentais diversos citados anteriormente. A suposição de que o valor mais confiável seria o da média da DTR (\bar{t}), conduziu ao tratamento dos resultados com este parâmetro, definindo uma nova variável ($\theta' = \bar{t}/t$) e uma nova função de distribuição $E(\theta')$. Com essa mudança, o comportamento de mistura do sistema pôde ser representado pelo modelo de três tanques perfeitamente agitados em série com retromistura. Neste caso, o parâmetro β assumiu o valor 0,9.

O procedimento proposto por NIEMI [1] mostrou-se muito adequado para obter distribuições de tempos de residência para sistemas submetidos a apreciáveis

variações de vazão, como as realizadas neste trabalho. Assim, para os experimentos empregando um único compartimento ou dois compartimentos em série (volumes iguais ou diferentes) houve uma ótima concordância entre as DTRs obtidas para os ensaios a vazão constante e as distribuições $p(z)$ calculadas para os ensaios com vazão variável. A concordância dos modelos hidrodinâmicos acima citados ajustaram tanto os resultados dos experimentos com vazão constante como os dos ensaios com vazão variável.

Para o experimento com três compartimentos em série a concordância entre os resultados obtidos com vazão constante e vazão variável não foi adequada. Mesmo assim, não inviabiliza a utilização da metodologia proposta por NIEMI [1], pois é importante ressaltar que acredita-se que este estudo trata da primeira aplicação experimental de sua formulação e, portanto, demandando outros estudos nesta área.

Os traçadores amidorodamina G-Extra e uranina não foram adequados para o sistema empregado, pois houve grande perda de traçador durante o ensaio, possivelmente causada pela presença de cloro livre, que afeta a fluorescência dessas substâncias.

5.2 Recomendações

Re-projetar o aparato experimental, com compartimentos em níveis diferentes, sem chicanas ou diminuir as alturas da segunda chicana e da saída do sistema, para eliminar os efeitos de retromistura.

Empregar água com baixos níveis de cloro livre e ozônio, de modo a eliminar o efeito dessas substâncias na fluorescência dos traçadores amidorodamina G-Extra e uranina, o que permitirá a realização de ensaios comparativos entre o cloreto de sódio e esses traçadores.

Empregar o enfoque de RAWATLAL e STARZAK [23] e confrontar os resultados com o procedimento proposto por NIEMI [1].

REFERÊNCIAS

- [1] NIEMI, A.J. "Residence Time Distributions of Variable Flow Processes". **International Journal of Applied Radiation and Isotopes**, v.28, n.10/11, pp.855-860, 1977.
- [2] LEVENSPIEL, O. **Chemical Reaction Engineering**. 3rd impr. New York: John Wiley and Sons, 1965.
- [3] DANCKWERTS, P.V. "Continuous Flow Systems". **Chemical Engineering Science**. Cambridge, v. 2, n. 1, pp.1-13, 1953.
- [4] AZEVEDO NETTO, FERNANDEZ Y FERNANDEZ, M., ARAUJO, R. **Manual de Hidráulica**. 8 ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1998.
- [5] BEDMAR, P. A. **Isotopos en Hidrologia**. x ed. Madrid: Alhambra, 1972.
- [6] KUOPPAMÄKI, R. "The Applicability of Tracer Techniques for Studies on Sewage Treatment Process Dynamics". **International Journal of Applied Radiation and Isotopes**, v.28, pp.833-837, 1977.
- [7] SOARES, J. H. P. **Uso de Traçadores na Modelagem de Unidades de Aeração e Decantação em Estação de Tratamento de Esgotos**. 100f. Tese de mestrado - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1985.
- [8] MURPHY, K.L., TIMPANY, P.L. "Design and Analysis of Mixing for an Aeration Tank". **Journal of the sanitary Engineering division**, v.93, n.SA5, pp.1-15, 1967.
- [9] MURPHY, K.L., WILSON, A.W. "Characterization of Mixing in Aerated Lagoons" **Journal of the Environmental Engineering Division** , v.100, n.EE5, pp.1105-1117, Oct.1974.

- [10] ELMALEH, S., BEN AIM, R. "Representation de l'Écoulement Macroscopique dans un Bassin d'Aération par une Cascade de Deux Mélangeurs Parfaits Inégaux ". **The Chemical Engineering Journal**, v.9, n.2, pp.107-114, 1975.
- [11] AZEREDO, S. V. de. **Modelagem Hidrodinâmica de Decantador Primário de Esgotos Utilizando-se a Técnica de Traçadores**. 127 f. Tese de Mestrado. - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1985.
- [12] FAROOQ, M., KHAN, I.H., GHIYAS-UD-DIN, *et al.* "Radiotracer Investigations of Municipal Sewage Treatment Stations". **Nukleonika**, v.48, n.1, pp.57-61, 2003.
- [13] SANT'ANNA JUNIOR, G. L. **Contribution a L'étude de L'hydrodynamique des Réacteurs Biologiques Utilisés en Traitement des Eaux Usées**. 187f. Tese de doutorado – A L'institut National des Sciences Appliquees de Toulouse, Toulouse, 1980.
- [14] NIEMI, A.J. "Variable Parameter Model of the Continuous Flow Vessel". **Proc. 6th International Conference on Mathematical Modeling**. vol.11, pp.32-37, Britain, 1988.
- [15] NIEMI, A. J. "Tracer Responses and Control of Vessels with Variable Flow and Volume". **Isotopenpraxis**, v.26, n.9, pp.432-438, 1990.
- [16] NIEMI, A. J. "Process Control Under Variable Flow and Volume". **IFAC Symposium**, Singapore, n.15, Jan. de 1991.
- [17] TIAN, L., NIEMI, A. J., YLINEN, R. "Recursive Process Identification Under Variable Flow and Volume". **3rd IFAC Symposium**, Maryland, USA, n.26, Abril de 1992.
- [18] NIEMI, A.J., TIAN, L., JUTILA, P., *et al.* "Experimental Identification of Variable Parameter Flow Process". **12th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control**, Sydney, Australia, n.18, Julho de 1993.

- [19] FERNÁNDEZ-SEMPERE, J., FONT-MONTESINOS, R., ESPEJO-ALCARAZ, O. "Residence Time Distribution for Unsteady-State Systems". **Chemical Engineering Science**. v.50, n.2, pp.223-230, 1995.
- [20] YLINEN, R., NIEMI, A. J. "Some Comments on 'Residence Time Distribution for Unsteady-state Systems' by Fernández-Sempere *et al.*" **Chemical Engineering Science**. v.52, n.6, pp.1065-1067,1997.
- [21] FERNÁNDEZ-SEMPERE, J., FONT-MONTESINOS, R., ESPEJO-ALCARAZ, O. "Author's reply to the comments of R. Ylinen and A. J. Niemi". **Chemical Engineering Science**. v.52, n.6, pp.1069-1071, 1997.
- [22] ZUBER, A. "On the Interpretation of Tracer Data in Variable Flow Systems". **Journal of Hydrology**. v.86, n.1/2, pp.45-57, 1986.
- [23] RAWATLAL, R., STARZAK, M. "Unsteady-State Residence Time Distribution in Perfectly Mixed Vessels". **AIChE Journal**, v.49, n.2, pp.471-484, Fev. 2003.
- [24] BENISCHKE, R. "Fluorescent Tracers in Hydrology – Principles, Instrumentation, Physico-Chemical Properties, Analytics". **Institute for Geothermics & Hydrogeology**. Austria, 77f., 1989.
- [25] BOYCE, W. E., DIPRIMA, R. C. **Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno**. 6 ed. Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A., 1998.
- [26] SPIEGEL, M.R. **Manual de Fórmulas, Métodos e Tabelas de Matemática**. 2 ed. Rio de Janeiro, Makron, McGraw-Hill, 1992.

APÊNDICE A – Modelo de escoamento para dois tanques de mistura perfeita e volumes diferentes em série com retromistura

Condições iniciais:

$$\begin{array}{ccccc}
 V_1 \neq V_2 & V_1 + V_2 = V & \tau = \frac{V}{Q} & \tau_1 = \frac{V_1}{Q} & \tau_2 = \frac{V_2}{Q} \\
 \alpha = \frac{V_1}{V} & (1 - \alpha) = \frac{V_2}{V} & \beta = \frac{q}{Q} & \tau_1 = \alpha \cdot \tau & \tau_2 = (1 - \alpha) \cdot \tau
 \end{array}$$

Com base na Figura 2.13, pode-se escrever os seguintes balanços para o traçador, adicionado na forma de pulso, no primeiro tanque, no instante $t=0$:

$$V_1 \frac{dc_1}{dt} = Qc_0 + qc_2 - (Q + q)c_1 \quad (75)$$

$$V_2 \frac{dc_2}{dt} = (Q + q)c_1 - qc_2 - Qc_2 \quad (76)$$

Aplicando a transformada de Laplace [25] às Equações acima e levando-se em consideração as condições iniciais, tem-se:

$$\begin{array}{ccc}
 \tau_1 s C_1 = C_0 + \beta C_2 - (1 + \beta) C_1 & \rightarrow & \alpha \cdot \tau \cdot s \cdot C_1 + C_1 + \beta C_1 = C_0 + \beta C_2 \\
 C_1 (\alpha \cdot \tau \cdot s + 1 + \beta) = C_0 + \beta C_2 & & (77)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
 (1 - \alpha) \cdot \tau \cdot s \cdot C_2 = (1 + \beta) C_1 - \beta C_2 - C_2 & \rightarrow & C_2 [(1 - \alpha) \cdot \tau \cdot s + \beta + 1] = (1 + \beta) C_1 \\
 C_1 = C_2 \frac{[(1 - \alpha) \cdot \tau \cdot s + 1 + \beta]}{(1 + \beta)} & & (78)
 \end{array}$$

Substituindo C_1 da Equação (78) na Equação (77), tem-se:

$$C_2 \frac{[(1-\alpha)\tau.s+1+\beta]}{(1+\beta)} (\alpha.\tau.s+1+\beta) = C_0 + \beta C_2$$

$$\frac{C_2}{C_0} = \frac{(1+\beta)}{[(1-\alpha)\tau.s+1+\beta].[\alpha.\tau.s+1+\beta]-\beta(1+\beta)}$$

$$\frac{C_2}{C_0} = \frac{(1+\beta)}{(1-\alpha)\alpha.\tau^2.s^2 + \tau.s(1+\beta) + (1+\beta)^2 - \beta(1+\beta)}$$

$$\frac{C_2}{C_0} = \frac{(1+\beta)}{(1-\alpha)\alpha.\tau^2.s^2 + \tau.s(1+\beta) + (1+\beta)}$$

$$\frac{C_2}{C_0} = \frac{\frac{(1+\beta)}{(1-\alpha)\alpha.\tau^2}}{s^2 + \frac{s(1+\beta)}{(1-\alpha)\alpha.\tau} + \frac{(1+\beta)}{(1-\alpha)\alpha.\tau^2}}$$

$$\frac{C_2}{C_0} = \frac{\frac{m}{\tau^2}}{s^2 + \frac{m}{\tau}s + \frac{m}{\tau^2}}, \text{ onde } m = \frac{(1+\beta)}{(1-\alpha)\alpha} \quad (79)$$

$$\frac{C_2}{C_0} = \frac{\frac{m}{\tau^2}}{(s-A)(s-B)}, \text{ onde A e B são as raízes da Equação } s^2 + \frac{m}{\tau}s + \frac{m}{\tau^2} = 0$$

Portanto:

$$A = \frac{-\frac{m}{\tau} + \sqrt{\frac{m^2}{\tau^2} - 4\frac{m}{\tau^2}}}{2} \rightarrow A = \frac{-m + \sqrt{m^2 - 4m}}{2\tau}$$

$$B = \frac{-\frac{m}{\tau} - \sqrt{\frac{m^2}{\tau^2} - 4\frac{m}{\tau^2}}}{2} \rightarrow B = \frac{-m - \sqrt{m^2 - 4m}}{2\tau}$$

Sendo $w = \sqrt{m^2 - 4m}$, resulta:

$$A = \frac{-m + w}{2\tau} \qquad B = \frac{-m - w}{2\tau} \qquad A - B = \frac{w}{\tau}$$

A transformada inversa de Laplace [26] é aplicada resultando no seguinte:

$$F(s) = \frac{\frac{m}{\tau^2} \left[\exp\left(\frac{(w-m)t}{2\tau}\right) - \exp\left(-\frac{(m+w)t}{2\tau}\right) \right]}{\frac{w}{\tau}}$$

$$E(t) = F(s) = \frac{m}{w\tau} \left[\exp\left(\frac{(w-m)t}{2\tau}\right) - \exp\left(-\frac{(m+w)t}{2\tau}\right) \right]$$

$$\tau.E(t) = E(\theta)$$

$$E(\theta) = \frac{m}{w} \left[\exp\left(\frac{(w-m)\theta}{2}\right) - \exp\left(-\frac{(m+w)\theta}{2}\right) \right] \qquad (80)$$

APÊNDICE B – Modelo de escoamento para três tanques de mistura perfeita e volumes iguais em série com retromistura

Condições iniciais:

$$V_1 = V_2 = V_3 \quad V_1 + V_2 + V_3 = V \quad \beta = \frac{q}{Q} \quad \tau = \frac{V}{Q}$$

Com base na Figura 2.14, podem-se escrever os seguintes balanços para o traçador, adicionado na forma de pulso instantâneo, no primeiro tanque, no instante $t=0$:

$$\tau \frac{dc_1}{dt} = c_0 + \beta c_2 - (1 + \beta)c_1 \quad (81)$$

$$\tau \frac{dc_2}{dt} = (1 + \beta)c_1 + \beta c_3 - (2\beta + 1)c_2 \quad (82)$$

$$\tau \frac{dc_3}{dt} = (1 + \beta)c_2 - (\beta + 1)c_3 \quad (83)$$

Aplicando a transformada de Laplace [25] às Equações acima e levando-se em consideração as condições iniciais, tem-se:

$$\tau.s.C_1 = C_0 + \beta C_2 - (1 + \beta)C_1 \quad (81')$$

$$\tau.s.C_2 = (1 + \beta)C_1 + \beta C_3 - (2\beta + 1)C_2 \quad (82')$$

$$\tau.s.C_3 = (1 + \beta)C_2 - (\beta + 1)C_3 \quad (83')$$

De (81'), tem-se:

$$[(1 + \beta) + \tau.s]C_1 = C_0 + \beta C_2$$

$$C_1 = \frac{C_0 + \beta C_2}{[(1 + \beta) + \tau.s]} \quad (81'a)$$

De (82'), tem-se:

$$\begin{aligned} [(2\beta + 1) + \tau.s]C_2 &= (1 + \beta).C_1 + \beta C_3 \\ C_2 &= \frac{(1 + \beta).C_1 + \beta C_3}{[(1 + 2\beta) + \tau.s]} \end{aligned} \quad (82'a)$$

De (83'), tem-se:

$$\begin{aligned} [(\beta + 1) + \tau.s]C_3 &= (1 + \beta).C_2 \\ C_2 &= \frac{[(1 + \beta) + \tau.s]C_3}{(1 + \beta)} \end{aligned} \quad (83'a)$$

De (81'a) e de (82'a), tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{[(1 + \beta) + \tau.s]}{(1 + \beta)} C_3 &= \frac{(1 + \beta).C_1 + \beta C_3}{[(1 + 2\beta) + \tau.s]} \\ \frac{[(1 + \beta) + \tau.s]}{(1 + \beta)} [(1 + 2\beta) + \tau.s] C_3 &= (1 + \beta).C_1 + \beta.C_3 \end{aligned} \quad (84)$$

C_1 da Equação (84) pode ser substituído, combinando-se as Equações (81'a) e (83'a), ou seja:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{C_0}{[(1 + \beta) + \tau.s]} + \frac{\beta[(1 + \beta) + \tau.s]C_3}{[(1 + \beta) + \tau.s](1 + \beta)} \\ C_1 &= \frac{C_0}{[(1 + \beta) + \tau.s]} + \frac{\beta.C_3}{(1 + \beta)} \end{aligned} \quad (85)$$

Substituindo-se C_1 da Equação (85) na Equação (84), resulta:

$$\frac{[(1+\beta)+\tau.s]}{(1+\beta)} \cdot [(1+2\beta)+\tau.s] C_3 = \frac{(1+\beta).C_0}{[(1+\beta)+\tau.s]} + \frac{(1+\beta)\beta.C_3}{(1+\beta)} + \beta C_3$$

$$\left[\frac{[(1+\beta)+\tau.s][(1+2\beta)+\tau.s]}{(1+\beta)} - 2\beta \right] \cdot C_3 = \frac{(1+\beta).C_0}{[(1+\beta)+\tau.s]}$$

$$\frac{C_3}{C_0} = \frac{(1+\beta)}{[(1+\beta)+\tau.s]} \cdot \frac{(1+\beta)}{\{[(1+\beta)+\tau.s][(1+2\beta)+\tau.s] - 2\beta(1+\beta)\}} \quad (86)$$

$$\frac{C_3}{C_0} = \frac{\frac{(1+\beta)}{\tau}}{[(1+\beta)+\tau.s]} \cdot \frac{\frac{(1+\beta)}{\tau^2}}{\left\{ \left[\frac{(1+\beta)}{\tau} + s \right] \cdot \left[\frac{(1+2\beta)}{\tau} + s \right] - \frac{2\beta(1+\beta)}{\tau^2} \right\}} \quad (87)$$

Definindo:

$$a = \frac{(1+\beta)}{\tau} \qquad b = \frac{(1+2\beta)}{\tau}$$

A Equação (87) fica:

$$\frac{C_3}{C_0} = \frac{\frac{a^2}{\tau}}{(s+a) \cdot \left[(s+a)(s+b) - \frac{2\beta a}{\tau} \right]} \quad (88)$$

Desenvolvendo o denominador da Equação (88):

$$\frac{C_3}{C_0} = \frac{\frac{a^2}{\tau}}{s^3 + (2a+b).s^2 + \left[ab + a(a+b) - \frac{2\beta a}{\tau} \right] s + a^2 b - \frac{2\beta a^2}{\tau}} \quad (89)$$

Definindo:

$$\alpha_1 = (2a + b) \quad \alpha_2 = \left[ab + a(a + b) - \frac{2\beta a}{\tau} \right] \quad \alpha_3 = a^2 b - \frac{2\beta a^2}{\tau}$$

A Equação (89) fica:

$$\frac{C_3}{C_0} = \frac{\frac{a^2}{\tau}}{s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_2 s + \alpha_3} \quad (90)$$

Resolvendo a Equação do 3º grau - denominador da Equação (90) - obtém-se as raízes A, B e C. Então a Equação (90) fica:

$$f(s) = \frac{C_3}{C_0} = \frac{\frac{a^2}{\tau}}{(s - A).(s - B).(s - C)} \quad (91)$$

Desenvolvendo o Segundo membro da Equação (92) utilizando frações parciais [25], resulta:

$$\begin{aligned} f(s) &= \frac{1}{(s - A).(s - B).(s - C)} = \frac{a}{(s - A)} + \frac{b}{(s - B)} + \frac{c}{(s - C)} = \\ &= \frac{a(s - B)(s - C) + b(s - A)(s - C) + c(s - A)(s - B)}{(s - A).(s - B).(s - C)} \end{aligned} \quad (92)$$

Igualando os numeradores das frações:

$$1 = a(s - B)(s - C) + b(s - A)(s - C) + c(s - A)(s - B)$$

Em particular, se s=A:

$$\begin{aligned} 1 &= a(A - B)(A - C) \\ a &= \frac{1}{(A - B)(A - C)} \end{aligned} \quad (93)$$

E se $s=B$:

$$1 = b(B - A)(B - C)$$

$$b = \frac{1}{(B - A)(B - C)} \quad (94)$$

E, finalmente, se $s=C$:

$$1 = c(C - A)(C - B)$$

$$c = \frac{1}{(C - A)(C - B)} \quad (95)$$

Substituindo (93), (94) e (95) em (92), tem-se:

$$f(s) = \frac{1}{(s - A)(A - B)(A - C)} + \frac{1}{(s - B)(B - A)(B - C)} + \frac{1}{(s - C)(C - A)(C - B)} \quad (96)$$

A transformada inversa de Laplace [26] é aplicada resultando no seguinte:

$$F(s) = \frac{a^2}{\tau} \left[\frac{\exp(At)}{(A - B)(A - C)} - \frac{\exp(Bt)}{(A - B)(B - C)} + \frac{\exp(Ct)}{(A - C)(B - C)} \right]$$

$$E(t) = F(s) = -\frac{a^2}{\tau} \left[\frac{(B - C)\exp(At) - (A - C)\exp(Bt) + (A - B)\exp(Ct)}{(A - B)(B - C)(C - A)} \right]$$

$$E(\theta) = 3\tau.E(t)$$

$$E(\theta) = 3a^2 \left[\frac{(B - C)\exp(At) + (C - A)\exp(Bt) + (A - B)\exp(Ct)}{(A - B)(B - C)(C - A)} \right] \quad (97)$$

APÊNDICE C – Retas de calibração típicas utilizadas na determinação das concentrações de traçadores salino e fluorescentes

A seguir são apresentadas nas Figuras C.1 a C.6 as retas de calibração utilizadas para correlação da condutividade elétrica da solução com a concentração salina.

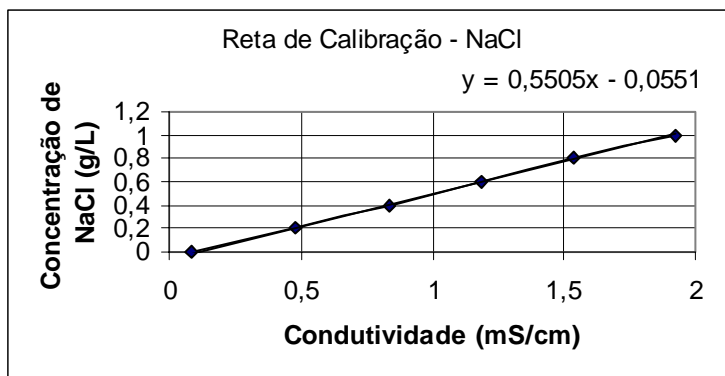


Figura C.1 – Reta de calibração construída em 01/06/2004 utilizada na determinação das concentrações salinas do experimento E-1C.

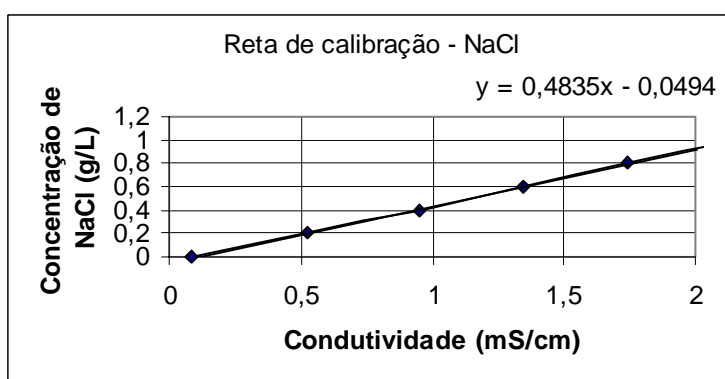


Figura C.2 – Reta de calibração construída em 28/08/2004 utilizada na determinação das concentrações salinas do experimento E-2C.

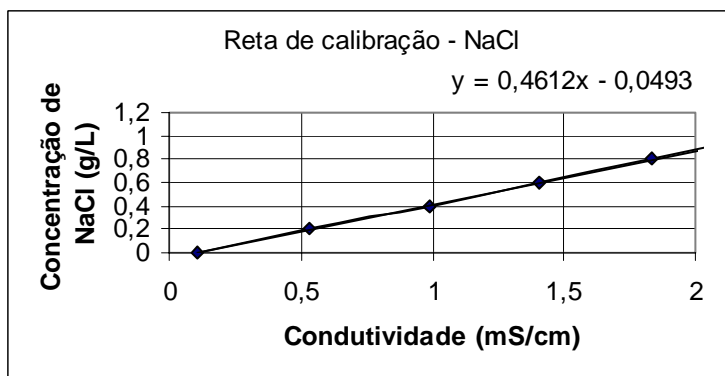


Figura C.3 – Reta de calibração construída em 14/08/2004 utilizada na determinação das concentrações salinas do experimento E-2DC.

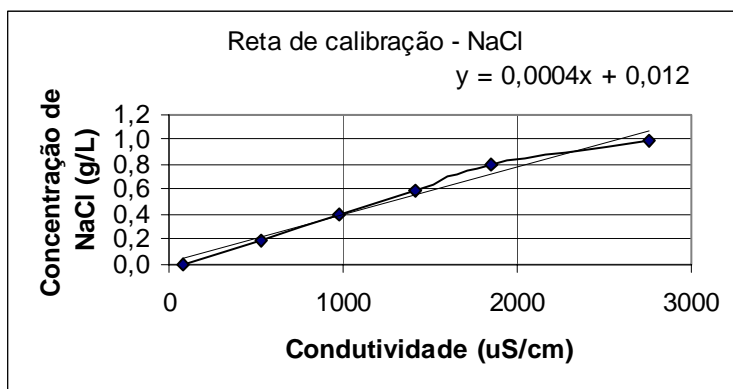


Figura C.4 – Reta de calibração construída em 24/1/2005 utilizada na determinação das concentrações salinas do experimento E-3C.

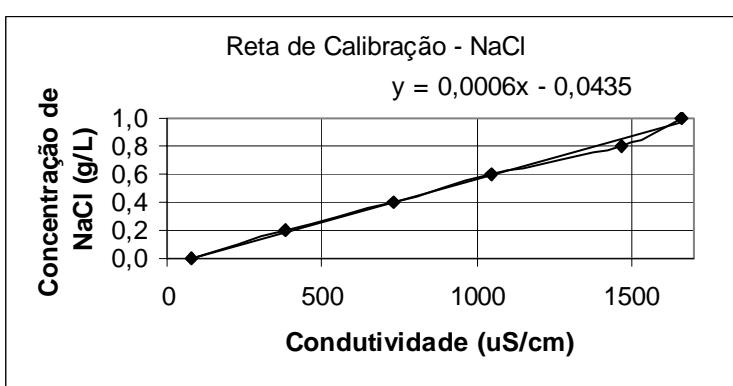


Figura C.5 – Reta de calibração construída em 18/11/2004 utilizada na determinação das concentrações salinas dos experimentos E-1V, E-2V e E-2DV.

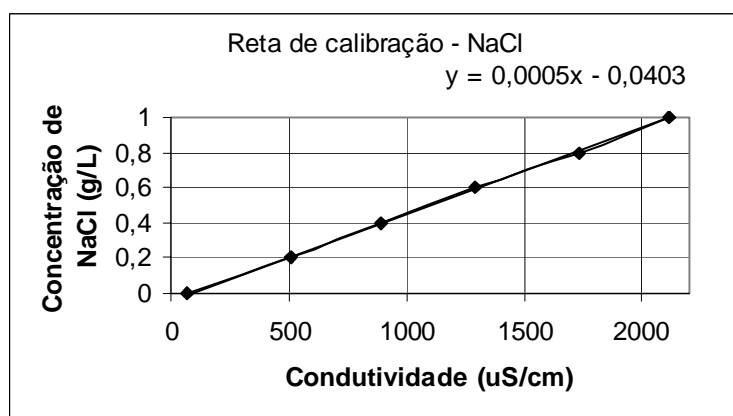


Figura C.6 – Reta de calibração construída em 25/02/2005 utilizada na determinação das concentrações salinas do experimento E-3V.

As Figuras C.7 e C.8 ilustram as retas de calibração utilizadas para correlação da fluorescência da solução com a concentração de traçador fluorescente Amidorodamina G-Extra e uranina, respectivamente.

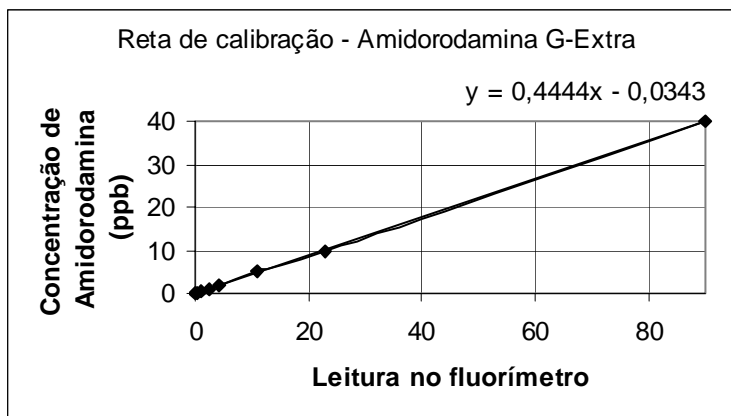


Figura C.7 - Reta de calibração construída em 23/02/2005 utilizada na determinação das concentrações do traçador fluorescente Amidorodamina G-Extra do experimento E-3C

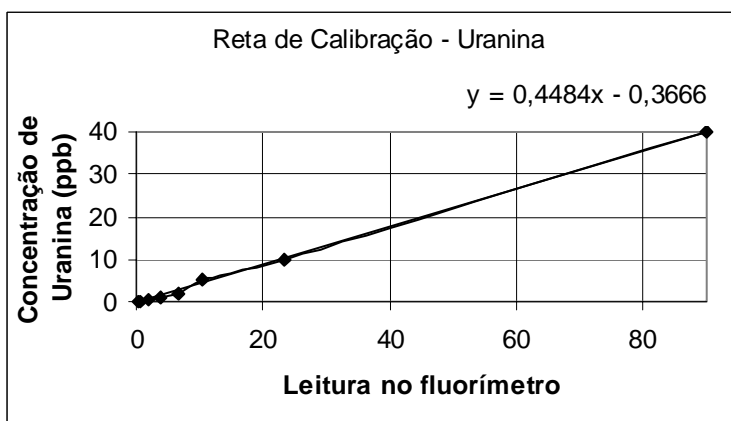


Figura C.8 - Reta de calibração construída em 23/02/2005 utilizada na determinação das concentrações do traçador fluorescente uranina do experimento E-3C

APÊNDICE D – Cálculo do tempo médio de residência experimental para sistemas alimentados com vazão constante

A curva resposta concentração *versus* tempo obtida no ensaio é ilustrada na Figura D.1.

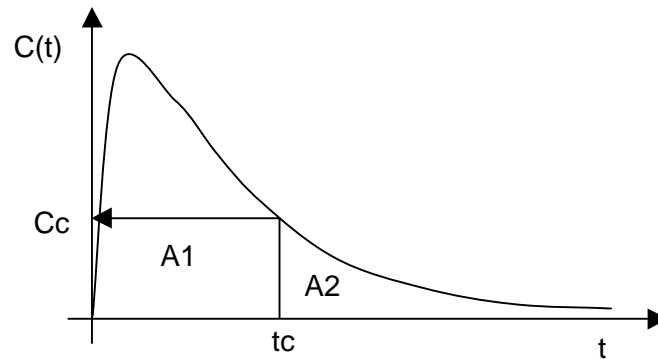


Figura D.1 – Curva resposta típica obtida em ensaio com uso da técnica de estímulo-resposta

A média da distribuição de tempos de residência \bar{t} é calculada pela fórmula:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t(c(t)).dt}{\int_0^{\infty} c(t).dt} \quad (98)$$

Dividiu-se a curva resposta em duas regiões A1 e A2 conforme Figura D.1.

Ajusta-se uma expressão do tipo exponencial para a região A2. Ou seja:

$$c(t) = c_c \cdot \exp[-K \cdot (t - t_c)]$$

$$\frac{c(t)}{c_c} = \exp[-K \cdot (t - t_c)]$$

$$\ln \left[\frac{c(t)}{c_c} \right] = -K \cdot (t - t_c)$$

$$\ln c(t) - \ln c_c = -K \cdot (t - t_c)$$

$$\ln c(t) = \ln c_c - K.t + K.t_c \quad (99)$$

Traça-se a reta $\ln c(t)$ versus t para obtenção do coeficiente K . Esse gráfico está ilustrado na Figura D.2:

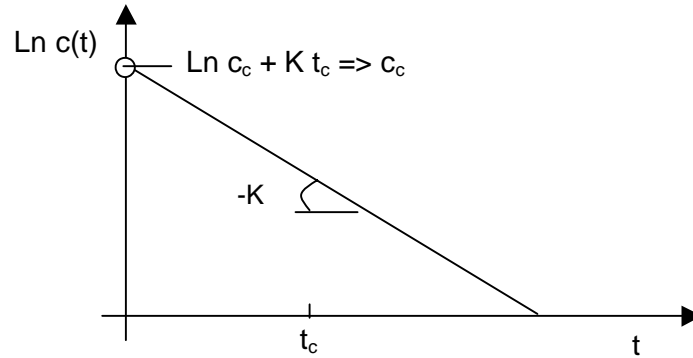


Figura D.2 – Reta típica para obtenção do coeficiente angular k .

Portanto fica conhecida a expressão a seguir:

$$c(t) = c_c \cdot \exp[-K.(t - t_c)] \quad (100)$$

Então o numerador e o denominador devem ser calculados, obtendo-se:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{t_c} t.(c(t)).dt + \int_{t_c}^{\infty} t.c_c \cdot \exp[-K.(t - t_c)]dt}{\int_0^{t_c} c(t).dt + \int_{t_c}^{\infty} c_c \cdot \exp[-K.(t - t_c)]dt} \quad (101)$$

Os primeiros termos do numerador e do denominador devem ser calculados por integração numérica (passo a passo).

Os seguintes termos devem ser calculados analiticamente, a saber:

$$\int_{t_c}^{\infty} c(t).dt = \int_{t_c}^{\infty} c_c \cdot \exp[-K.(t - t_c)]dt$$

$$t - t_c = u \Rightarrow dt = du$$

$$\int_0^{\infty} c_c \cdot \exp(-K.u) . du \Rightarrow c_c \cdot \int_0^{\infty} \exp.[-K.u] . du = c_c \cdot \left[\frac{e^{-K.u}}{-K} \right]_0^{\infty} = c_c \cdot \left[0 - \frac{1}{-K} \right] = \frac{c_c}{K} \quad (102)$$

$$\int_{t_c}^{\infty} t.c(t).dt = \int_{t_c}^{\infty} c_c . t . \{ \exp.[-K(t-t_c)] \} . dt$$

$$t - t_c = u \Rightarrow dt = du$$

$$\begin{aligned} \int_{t_c}^{\infty} c_c . (u + t_c) . \exp.[-K.u] . du &= c_c \int_0^{\infty} u . \exp(-K.u) . du + c_c \cdot \int_0^{\infty} t_c . \exp(-K.u) . du = \\ &= c_c \cdot \left[\frac{e^{-K.u}}{-K} \cdot \left(u + \frac{1}{K} \right) \right]_0^{\infty} + \frac{c_c \cdot t_c}{K} = c_c \cdot \left[0 - \left(-\frac{1}{K} \right) \cdot \left(\frac{1}{K} \right) \right] + \frac{c_c \cdot t_c}{K} = \frac{c_c}{K^2} + \frac{c_c \cdot t_c}{K} \end{aligned} \quad (103)$$

Portanto a Equação (98) fica:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{t_c} t.c(t).dt + \frac{c_c}{K^2} + \frac{c_c \cdot t_c}{K}}{\int_0^{t_c} c(t).dt + \frac{c_c}{K}} \quad (104)$$

De posse de \bar{t} e de $\tau = \frac{V}{Q}$, obtemos $\theta = \frac{t}{\tau}$, $E(t) = \frac{c(t)}{\int_0^{\infty} c(t).dt}$ e $E(\theta) = \tau.E(t)$.

Os valores de t_c escolhidos para o cálculo de \bar{t} , assim como os valores encontrados para k , estão relacionados na Tabela D.1 a seguir:

Tabela D.1 – Valores de t_c e do coeficiente angular k utilizados nos experimentos

código	t_c (min.)	k
E-1C	160	0,0074
E-2C	250	0,0077
E-2DC	250	0,0079
E-3C	250	0,0074

APÊNDICE E – Dados experimentais obtidos nos ensaios com vazões constante e variável

Tabela E.1 - Dados experimentais obtidos no ensaio E-1C

Frasco	t (min)	Q (mL/min)	Cond. (mS/cm)	c (g/L)	Frasco	t (min)	Q (mL/min)	Cond. (mS/cm)	c (g/L)
1	0		0,05	-0,03	24	230	18,43	0,53	0,24
2	10	19,64	2,03	1,06	25	240	20,17	0,50	0,22
3	20	19,58	1,93	1,01	26	250	17,40	0,47	0,20
4	30	18,18	1,79	0,93	27	260	19,07	0,45	0,19
5	40	17,90	1,69	0,88	28	271	19,54	0,42	0,18
6	50	19,82	1,59	0,82	29	280	19,22	0,40	0,17
7	60	19,99	1,49	0,77	30	290	19,17	0,37	0,15
8	70	19,73	1,41	0,72	31	300	18,51	0,35	0,14
9	80	19,88	1,33	0,68	32	310	19,26	0,33	0,13
10	90	18,31	1,24	0,63	33	320	19,04	0,32	0,12
11	100	19,43	1,16	0,58	34	330	19,27	0,29	0,10
12	110	19,65	1,10	0,55	35	340	19,22	0,28	0,10
13	120	20,66	1,04	0,52	36	350	18,37	0,27	0,09
14	130	27,78	0,98	0,48	37	360	19,07	0,25	0,08
15	140	12,33	0,91	0,45	38	370	19,24	0,24	0,08
16	150	19,23	0,87	0,42	39	381	19,57	0,22	0,07
17	160	19,67	0,82	0,40	40	391	19,39	0,20	0,06
18	170	18,26	0,77	0,37	41	400	16,20	0,20	0,06
19	180	18,80	0,72	0,34	42	410	17,49	0,19	0,05
20	192	19,31	0,68	0,32	43	420	18,79	0,18	0,04
21	200	20,94	0,64	0,30	44	431	20,29	0,17	0,04
22	210	19,80	0,61	0,28	45	440	19,80	0,16	0,03
23	220	20,37	0,57	0,26	46	451	19,65	0,15	0,03

Tabela E.2 – Dados experimentais obtidos no ensaio E-2C

Frasco	t (min)	Q (mL/min)	Cond. (mS/cm)	c (g/L)	Frasco	t (min)	Q (ml/min)	Cond. (mS/cm)	c (g/L)
1	0		0,084	-0,01	29	220	38,46	0,643	0,26
2	2	40,35	0,294	0,09	30	230	39,03	0,607	0,24
3	7	40,43	0,794	0,33	31	240	39,91	0,567	0,22
4	10	39,87	1,017	0,44	32	250	39,92	0,531	0,21
5	15	39,25	1,270	0,56	33	260	40,02	0,501	0,19
6	20	38,70	1,484	0,67	34	270	40,99	0,471	0,18
7	25	40,70	1,615	0,73	35	280	39,83	0,441	0,16
8	30	38,30	1,706	0,78	36	290	39,47	0,416	0,15
9	35	40,70	1,756	0,80	37	300	40,98	0,396	0,14
10	40	40,96	1,790	0,82	38	310	40,10	0,373	0,13
11	47	39,35	1,770	0,81	39	320	38,30	0,355	0,12
12	50	39,57	1,756	0,80	40	330	38,55	0,334	0,11
13	60	38,98	1,730	0,79	41	340	38,74	0,316	0,10
14	70		1,650	0,75	42	350	39,12	0,302	0,10
15	80	40,40	1,570	0,71	43	360	39,77	0,285	0,09
16	90	37,64	1,497	0,67	44	370	40,09	0,270	0,08
17	101	38,95	1,400	0,63	45	380	38,67	0,256	0,07
18	110		1,300	0,58	46	390	40,57	0,243	0,07
19	120	41,10	1,237	0,55	47	400	38,31	0,232	0,06
20	130	38,98	1,161	0,51	48	410	38,50	0,221	0,06
21	140	39,89	1,081	0,47	49	420	37,71	0,211	0,05
22	150	39,99	1,020	0,44	50	430	38,16	0,202	0,05
23	160	41,51	0,946	0,41	51	440	37,38	0,190	0,04
24	170	40,07	0,894	0,38	52	450	36,94	0,185	0,04
25	180	41,90	0,824	0,35	53	470	37,21	0,172	0,03
26	190	38,61	0,784	0,33	54	500	37,66	0,154	0,03
27	200	38,46	0,731	0,30	55	530	39,62	0,140	0,02
28	210	38,62	0,677	0,28	56	560	38,30	0,128	0,01

Tabela E.3 - Dados experimentais obtidos no ensaio E-2DC

Frasco	t (min)	Q (mL/min)	Cond (mS/cm)	c (g/L)	Frasco	t (min)	Q (mL/min)	Cond (mS/cm)	c (g/L)
1	0		0,089	-0,01	26	210	61,22	0,741	0,29
2	5	64,48	0,573	0,21	27	220	60,82	0,695	0,27
3	10	60,04	0,971	0,40	28	230	60,77	0,655	0,25
4	15	60,44	1,241	0,52	29	240	61,98	0,607	0,23
5	20	60,07	1,441	0,62	30	250	61,99	0,573	0,21
6	25	59,29	1,597	0,69	31	260	61,40	0,536	0,20
7	30		1,670	0,72	32	270		0,506	0,18
8	35		1,757	0,76	33	280	60,76	0,474	0,17
9	40	59,88	1,801	0,78	34	290		0,449	0,16
10	50	59,12	1,837	0,80	35	300	58,44	0,414	0,14
11	60	60,32	1,827	0,79	36	310	61,74	0,399	0,13
12	70	59,90	1,781	0,77	37	320	60,61		0,12
13	80	62,22	1,709	0,74	38	330	59,96	0,356	0,11
14	90	61,99	1,631	0,70	39	340	60,87	0,339	0,11
15	100	62,14	1,531	0,66	40	350	62,48	0,319	0,10
16	110	61,76	1,451	0,62	41	360	61,79	0,303	0,09
17	120	63,16	1,364	0,58	42	370	61,61	0,286	0,08
18	130	61,51	1,267	0,54	43	380		0,272	0,08
19	140	61,82	1,190	0,50	44	390	61,18	0,260	0,07
20	150	61,57	1,114	0,46	45	400	60,36	0,248	0,07
21	160	60,52	1,040	0,43	46	410	61,25	0,238	0,06
22	170	61,50	0,969	0,40	47	420	61,24	0,228	0,06
23	180	61,50	0,907	0,37	48	430	61,12	0,221	0,05
24	190	61,72	0,849	0,34	49	440	59,64	0,210	0,05
25	200	60,43	0,784	0,31	50	450	62,08	0,203	0,04

Tabela E.4 - Dados experimentais obtidos no ensaio E-3C

Frasco	t (min)	Q (mL/min)	Cond. (mS/cm)	c (g/l)	Frasco	t (min)	Q (mL/min)	Cond. (mS/cm)	c (g/l)
1	0	57,84	80,6	0,00	26	210	65,90	814,0	0,30
2	5	43,61	141,5	0,03	27	220	62,93	745,0	0,27
3	10	57,66	282,0	0,08	28	230	62,48	682,0	0,24
4	15	54,07	470,0	0,16	29	240	61,11	627,0	0,22
5	20	59,37	680,0	0,24	30	250	59,83	580,0	0,20
6	25	64,24	893,0	0,33	31	260	62,43	525,0	0,18
7	30	65,37	1082,0	0,40	32	270	64,10	486,0	0,17
8	35	61,54	1257,0	0,47	33	280	67,01	444,0	0,15
9	40	61,30	1415,0	0,54	34	290	57,10	412,0	0,14
10	50	63,91	1651,0	0,63	35	300	48,99	379,0	0,12
11	60	65,06	1784,0	0,69	36	310	60,37	350,0	0,11
12	70	63,38	1865,0	0,72	37	320	52,16	326,0	0,10
13	80	59,73	1868,0	0,72	38	330	63,58	300,0	0,09
14	90	65,62	1848,0	0,71	39	340	66,30	279,0	0,08
15	100	67,48	1790,0	0,69	40	350	64,23	259,0	0,08
16	110	62,02	1715,0	0,66	41	360	68,44	240,0	0,07
17	120	56,86	1620,0	0,62	42	370	56,33	218,9	0,06
18	130	62,85	1532,0	0,58	43	380	60,80	206,1	0,05
19	140	61,82	1436,0	0,55	44	390	66,09	192,7	0,05
20	150	62,44	1335,0	0,51	45	400	53,90	182,2	0,04
21	160	56,58	1235,0	0,47	46	410	57,20	172,3	0,04
22	170	-	1142,0	0,43	47	420	56,38	164,2	0,04
23	180	54,81	1046,0	0,39	48	430	53,22	156,4	0,03
24	190	68,06	969,0	0,36	49	440	60,10	148,8	0,03
25	200	63,88	887,0	0,33					

Tabela E.5 - Dados experimentais obtidos no ensaio E-1V e tratamento segundo a proposta de NIEMI [1]

Frasco	t (min)	Q (ml/min)	Cond (uS/cm)	C(t) (g/L)	Ln C(t)	∫C(t).dt	t.C(t)	∫t.C(t).dt	An= Q(t)*t	ΣAn	z1= A/V	z1 p/ esc z	θ = t/T	p(z)
2	0	9,31	78	0,003			-				-	-	-	0,00
1	5	8,63	1580	0,905		2,27	4,52	11	45	45	0,02	2,42	0,02	0,97
3	11	8,53	1555	0,890		5,13	9,53	40	49	94	0,03	5,07	0,03	0,95
4	15	7,73	1570	0,899		3,83	13,48	49	35	129	0,04	6,95	0,04	0,96
5	20	11,00	1548	0,885		4,46	17,71	78	47	176	0,06	9,48	0,06	0,95
6	25	10,69	1479	0,844		4,32	21,10	97	54	230	0,08	12,41	0,08	0,95
7	30	12,85	1539	0,880		4,31	26,40	119	59	289	0,10	15,58	0,10	0,94
8	40	20,02	1458	0,831		8,56	33,25	298	164	453	0,16	24,46	0,16	0,89
9	50	18,51	1355	0,770		8,35	38,81	376	201	654	0,23	35,31	0,23	0,82
10	60	18,15	1290	0,731		7,18	43,83	395	175	829	0,29	44,78	0,29	0,78
11	70	28,07	1150	0,647		6,89	45,26	445	231	1.060	0,37	57,26	0,37	0,69
12	80	26,85	1060	0,593		6,20	47,40	463	275	1.335	0,46	72,09	0,46	0,63
13	89	27,40	945	0,524		5,05	46,62	425	245	1.581	0,55	85,35	0,55	0,56
14	100	23,17	864	0,475		5,47	47,49	515	277	1.857	0,64	100,30	0,64	0,51
15	110	22,78	813	0,444		4,60	48,87	482	230	2.087	0,72	112,71	0,72	0,47
16	119	23,21	791	0,431		3,88	51,24	444	204	2.291	0,79	123,71	0,79	0,46
17	130	11,64	754	0,409		4,68	53,16	581	194	2.485	0,86	134,19	0,86	0,44
18	140	12,24	727	0,393		4,01	54,98	541	119	2.604	0,90	140,64	0,90	0,42
19	150	13,07	708	0,381		3,87	57,20	561	127	2.731	0,94	147,47	0,94	0,41
20	160	10,21	684	0,367	1,00	3,74	58,70	579	116	2.847	0,98	153,76	0,98	0,39
21	170	10,04	670	0,359	1,03	96,77		6.501	101	2.949	1,02	159,23	1,02	0,38
22	180	9,95	662	0,354	1,04				100	3.049	1,05	164,62	1,05	0,38
23	190	19,94	630	0,335	1,10				149	3.198	1,10	172,69	1,10	0,36
24	200	19,87	603	0,318	1,14				199	3.397	1,17	183,44	1,17	0,34
25	210	19,67	580	0,305	1,19				198	3.595	1,24	194,11	1,24	0,33
26	220	26,74	510	0,263	1,34				232	3.827	1,32	206,64	1,32	0,28
27	230	27,11	475	0,242	1,42				269	4.096	1,41	221,18	1,41	0,26
28	240	27,81	435	0,218	1,53				275	4.371	1,51	236,01	1,51	0,23
29	250	22,95	395	0,194	1,64				254	4.624	1,59	249,71	1,59	0,21
30	260	23,01	406	0,200	1,61				230	4.854	1,67	262,12	1,67	0,20
31	270	24,25	370	0,179	1,72				236	5.091	1,76	274,88	1,76	0,19
32	280	15,22	320	0,149	1,91				197	5.288	1,82	285,54	1,82	0,16
33	290	13,37	300	0,137	1,99				143	5.431	1,87	293,26	1,87	0,15
35	310	11,15	255	0,110					245	5.676	1,96	306,50	1,96	0,12
36	320	11,38	248	0,105					113	5.789	2,00	312,59	2,00	0,11
37	330	11,51	252	0,108					114	5.903	2,04	318,77	2,04	0,12
38	340	19,86	235	0,098					157	6.060	2,09	327,24	2,09	0,10
39	350	19,48	250	0,107					197	6.257	2,16	337,86	2,16	0,11
40	360	20,00	240	0,101					197	6.454	2,23	348,52	2,23	0,11
41	370	27,79	269	0,118					239	6.693	2,31	361,42	2,31	0,10
42	380	27,92	260	0,113					279	6.972	2,40	376,46	2,40	0,09
43	390	28,28	195	0,074					281	7.253	2,50	391,63	2,50	0,08
44	400	25,13	187	0,069					267	7.520	2,59	406,05	2,59	0,07
45	410	24,03	175	0,062					246	7.765	2,68	419,32	2,68	0,07
46	420	24,91	173	0,060					245	8.010	2,76	432,54	2,76	0,06
47	430	15,10	165	0,056					200	8.210	2,83	443,34	2,83	0,06
48	440	14,61	164	0,055					149	8.359	2,88	451,36	2,88	0,06
49	450	14,58	156	0,050					146	8.505	2,93	459,24	2,93	0,05

Tabela E.6 - Dados experimentais obtidos no ensaio E-2V e tratamento segundo a proposta de NIEMI [1]

Frasco	t (min)	Q (mL/min)	Cond. (uS/cm)	C (g/L)	Ln C(t)	∫C(t).dt	t.C(t)	∫t.C(t).dt	An = Q x t	ΣAn	z1	z1 p/ esc. z1	θ = t/T	p(z)
	0	23,80	80	0,005			-					-	0,00	0,00
1	5	24,83	711	0,383		0,97	1,92	5	122	122	0,02	3,14	0,03	0,33
2	10	23,05	1205	0,680		2,66	6,80	22	120	241	0,04	6,22	0,07	0,59
3	15	23,38	1373	0,780		3,65	11,70	46	116	357	0,06	9,22	0,10	0,68
4	20	22,83	1517	0,867		4,12	17,33	73	116	473	0,08	12,20	0,13	0,75
5	25	24,97	1558	0,891		4,40	22,28	99	119	592	0,10	15,28	0,17	0,77
6	30	23,72	1615	0,926		4,54	27,77	125	122	714	0,12	18,42	0,20	0,80
7	35	36,92	1650	0,947		4,68	33,13	152	152	866	0,15	22,33	0,23	0,82
8	40	39,36	1852	0,947		4,73	37,86	177	191	1.056	0,18	27,25	0,27	0,82
9	50	40,61	1720	0,947		9,47	47,33	426	400	1.456	0,25	37,56	0,33	0,82
10	60	40,49	1758	0,918		9,32	55,10	512	405	1.862	0,32	48,02	0,40	0,80
11	70	54,84	1585	0,890		9,04	62,30	587	477	2.338	0,40	60,31	0,47	0,77
12	80	54,73	1535	0,811		8,51	64,90	636	548	2.886	0,50	74,44	0,53	0,70
13	90	54,87	1260	0,733		7,72	65,93	654	548	3.434	0,59	88,58	0,60	0,64
14	100	32,02	1126	0,672		7,02	67,21	666	434	3.869	0,67	99,78	0,67	0,58
15	110	31,61	1225	0,625		6,48	68,71	680	318	4.187	0,72	107,99	0,74	0,54
16	120	31,72	1001	0,577		6,01	69,25	690	317	4.503	0,78	116,16	0,80	0,50
17	130	47,37	941	0,541		5,59	70,34	698	395	4.899	0,84	126,36	0,87	0,47
18	140	49,07	902	0,518		5,29	72,48	714	482	5.381	0,93	138,79	0,94	0,45
19	150	49,08	933	0,480		4,99	72,00	722	491	5.872	1,01	151,45	1,00	0,42
20	160	24,36	890	0,446		4,63	71,36	717	367	6.239	1,08	160,92	1,07	0,39
21	170	23,63	800	0,417		4,31	70,81	711	240	6.479	1,12	167,11	1,14	0,36
22	180	23,44	780	0,384		4,00	69,12	700	235	6.714	1,16	173,18	1,20	0,33
23	190	40,54	750	0,353		3,69	67,07	681	320	7.034	1,21	181,43	1,27	0,31
24	200	40,44	712	0,324		3,38	64,74	659	405	7.439	1,28	191,88	1,34	0,28
25	210	37,81	720	0,292		3,08	61,32	630	391	7.830	1,35	201,97	1,40	0,25
26	220	56,80	664	0,274		2,83	60,28	608	473	8.303	1,43	214,17	1,47	0,24
27	230	54,93	597	0,256		2,65	58,88	596	559	8.862	1,53	228,58	1,54	0,22
28	240	54,73	490	0,251		2,53	60,12	595	548	9.410	1,62	242,72	1,60	0,22
29	250	32,74	443	0,222	1,50	2,36	55,58	578	437	9.848	1,70	254,00	1,67	0,19
30	260	31,52	429	0,214	1,54	142,65		14.159	321	10.169	1,75	262,29	1,74	0,19
31	270	31,55	402	0,198	1,62				315	10.484	1,81	270,42	1,80	0,17
32	280	48,78	424	0,183	1,70				402	10.886	1,88	280,78	1,87	0,16
33	290	46,85	354	0,169	1,78				478	11.364	1,96	293,12	1,94	0,15
34	300	47,51	326	0,152	1,88				472	11.836	2,04	305,29	2,01	0,13
35	310	24,27	293	0,132	2,02				359	12.195	2,10	314,54	2,07	0,11
36	320	22,89	292	0,132	2,03				236	12.431	2,14	320,62	2,14	0,11
37	330	23,28	291	0,131	2,03				231	12.662	2,18	326,58	2,21	0,11
38	340	39,64	262	0,114	2,17				315	12.976	2,24	334,69	2,27	0,10
39	350	39,54	252	0,108	2,23				396	13.372	2,31	344,90	2,34	0,09
40	360	41,54	251	0,107					405	13.777	2,38	355,36	2,41	0,09
41	370	55,41	281	0,097					485	14.262	2,46	367,86	2,47	0,08
42	380	57,56	269	0,087					565	14.827	2,56	382,43	2,54	0,08
43	390	55,10	201	0,077					563	15.390	2,65	396,96	2,61	0,07
44	400	31,37	188	0,069					432	15.823	2,73	408,11	2,67	0,06
45	410	32,71	184	0,067					320	16.143	2,78	416,37	2,74	0,06
46	420	31,69	182	0,066					322	16.465	2,84	424,68	2,81	0,06
47	430	45,36	173	0,060					385	16.850	2,91	434,61	2,87	0,05
48	440	49,18	168	0,057					473	17.323	2,99	446,81	2,94	0,05
49	450	49,13	157	0,051					492	17.814	3,07	459,48	3,01	0,04

Tabela E.7 - Dados experimentais obtidos no ensaio E-2DV e tratamento segundo a proposta de NIEMI [1]

Frasco	t (min)	Q (mL/min)	Cond. (uS/cm)	C (g/L)	Ln C(t)	∫C(t).dt	t.C(t)	∫t.C(t).dt	An = Qxt	ΣAn	z1 = A/V	z1 p/ esc. Z	θ = t/T	p(z)
1	0	39,58	81,00	0,005			0,00				0,00	0,00	0,00	0,00
2	5	39,31	298,00	0,135		0,35	0,68	2	197	197	0,02	3,36	0,02	0,13
3	10	40,22	583,00	0,306		1,10	3,06	9	199	396	0,04	6,75	0,04	0,30
4	15	40,68	753,00	0,408		1,79	6,12	23	202	598	0,07	10,19	0,07	0,40
5	20	39,38	861,00	0,473		2,20	9,46	39	200	798	0,09	13,60	0,09	0,46
6	25	39,56	1005,00	0,560		2,58	13,99	59	197	996	0,11	16,96	0,11	0,54
7	29	40,40	1117,00	0,627		2,59	18,40	71	175	1170	0,13	19,94	0,13	0,61
8	40	62,12	1341,00	0,761		7,38	30,44	260	545	1715	0,19	29,22	0,19	0,74
9	50	63,09	1436,00	0,818		7,90	40,91	357	626	2342	0,26	39,89	0,26	0,79
10	60	62,78	1467,00	0,837		7,93	49,85	435	603	2945	0,33	50,16	0,33	0,81
11	70	79,10	1462,00	0,834		8,70	58,36	564	739	3684	0,41	62,75	0,41	0,81
12	80	82,37	1412,00	0,804		8,19	64,30	613	807	4491	0,50	76,51	0,50	0,78
13	90	82,13	1345,00	0,764		7,60	68,49	644	798	5289	0,59	90,10	0,59	0,74
14	100	76,84	1260,00	0,713		7,60	71,25	720	819	6107	0,68	104,05	0,68	0,69
15	110	76,96	1142,00	0,642		6,77	70,59	709	769	6876	0,76	117,15	0,76	0,62
16	120	73,79	979,00	0,581		5,90	69,56	676	727	7604	0,84	129,54	0,84	0,56
17	130	49,16	941,00	0,521		5,71	67,74	711	636	8240	0,91	140,38	0,91	0,51
18	140	49,16	881,00	0,485		5,03	67,91	678	492	8732	0,97	148,75	0,97	0,47
19	149	48,93	846,00	0,464		4,50	69,38	651	465	9197	1,02	156,67	1,02	0,45
20	160	39,11	805,00	0,440		4,75	70,32	735	463	9660	1,07	164,56	1,07	0,43
21	170	38,59	777,00	0,423		4,31	71,86	711	389	10048	1,11	171,18	1,11	0,41
22	179	39,50	753,00	0,408		3,89	73,24	680	366	10414	1,15	177,41	1,15	0,40
23	190	59,80	714,00	0,385		4,22	73,13	778	528	10942	1,21	186,41	1,21	0,37
24	200	61,65	677,00	0,363		3,74	72,54	728	607	11549	1,28	196,75	1,28	0,35
25	210	61,33	648,00	0,345		3,39	72,37	694	589	12138	1,35	206,79	1,35	0,33
26	220	77,38	607,00	0,321		3,47	70,55	744	722	12861	1,43	219,10	1,43	0,31
27	230	76,10	545,00	0,284		3,02	65,21	679	767	13628	1,51	232,17	1,51	0,27
28	240	78,85	497,00	0,255		2,61	61,05	612	752	14380	1,59	244,97	1,59	0,25
29	250	73,47	452,00	0,228	1,48	2,48	56,93	608	784	15164	1,68	258,34	1,68	0,22
30	260	71,32	400,00	0,197	1,63	129,71		14188	724	15888	1,76	270,67	1,76	0,19
31	270	69,63	367,00	0,177	1,73				680	16568	1,84	282,26	1,84	0,17
32	280	47,74	336,00	0,158	1,84				607	17176	1,90	292,60	1,90	0,15
33	290	48,37	310,00	0,143	1,95				481	17656	1,96	300,79	1,96	0,14
34	299	48,63	292,00	0,132	2,03				460	18116	2,01	308,63	2,01	0,13
35	310	40,24	264,00	0,115	2,16				467	18584	2,06	316,59	2,06	0,11
36	320	38,95	258,00	0,111	2,20				396	18980	2,10	323,33	2,10	0,11
37	329	39,38	247,00	0,105	2,26				367	19346	2,14	329,58	2,14	0,10
38	340	60,32	240,00	0,101	2,30				530	19876	2,20	338,61	2,20	0,10
39	350	61,05	247,00	0,105	2,26				607	20483	2,27	348,95	2,27	0,10
40	360	60,96	286,00	0,092	2,39				610	21093	2,34	359,34	2,34	0,09
41	370	80,70	204,00	0,079					708	21802	2,42	371,41	2,42	0,08
42	380	75,97	201,00	0,077					783	22585	2,50	384,75	2,50	0,07
43	390	75,33	188,00	0,069					734	23319	2,59	397,25	2,59	0,07
44	400	74,82	177,00	0,063					773	24092	2,67	410,43	2,67	0,06
45	410	73,93	171,00	0,059					744	24836	2,75	423,10	2,75	0,06
46	420	71,94	165,00	0,056					704	25540	2,83	435,09	2,83	0,05
47	430	48,95	160,00	0,053					626	26165	2,90	445,75	2,90	0,05
48	440	48,15	154,00	0,049					485	26651	2,95	454,02	2,95	0,05
49	450	48,56	150,00	0,047					484	27134	3,01	462,25	3,01	0,05

Tabela E.8 - Dados experimentais obtidos no ensaio E-3V e tratamento segundo a proposta de NIEMI [1]

Frasco	t (min)	Q (mL/min)	Cond. (uS/cm)	C (g/L)	Ln C(t)	$\int C(t).dt$	t.C(t)	$\int t.C(t).dt$	An	ΣAn	z1	z1 p/ esc. Z	p(z)	$\theta = t/T$	
1	0	31,77	69	-0,006			0			0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	
2	5	30,16	108	0,014			0	0	155	155	0,01	2,63	0,02	0,03	
3	10	29,39	214	0,067			0	1	2	149	304	0,03	5,17	0,08	0,06
4	15	30,64	372	0,146			1	2	7	150	454	0,04	7,72	0,17	0,08
5	19	28,74	503	0,211			1	4	12	119	573	0,05	9,74	0,25	0,11
6	25	30,46	703	0,311			2	8	35	178	750	0,07	12,76	0,36	0,14
7	30	29,63	854	0,387			2	12	48	150	900	0,09	15,32	0,45	0,17
8	40	41,43	1170	0,545			5	22	167	355	1256	0,12	21,37	0,63	0,22
9	50	42,94	1421	0,670			6	34	276	422	1678	0,16	28,54	0,78	0,28
10	60	42,81	1601	0,760			7	46	396	429	2106	0,20	35,84	0,88	0,33
11	70	62,49	1726	0,823			8	58	516	527	2633	0,25	44,80	0,96	0,39
12	79	60,26	1783	0,851			8	67	562	552	3185	0,30	54,20	0,99	0,44
13	90	60,31	1790	0,855			9	77	793	663	3848	0,37	65,48	0,99	0,50
14	100	80,35	1757	0,838			8	84	804	703	4552	0,43	77,44	0,98	0,56
15	110	79,77	1670	0,795			8	87	856	801	5352	0,51	91,07	0,92	0,61
16	120	74,41	1567	0,743			8	89	883	771	6123	0,58	104,18	0,86	0,67
17	130	91,93	1441	0,680			7	88	888	832	6955	0,66	118,33	0,79	0,73
18	140	87,54	1305	0,612			6	86	871	897	7852	0,75	133,60	0,71	0,78
19	150	93,40	1168	0,544			6	82	836	905	8757	0,83	149,00	0,63	0,84
20	160	29,47	1085	0,502			5	80	810	614	9371	0,89	159,45	0,58	0,89
21	170	26,89	1015	0,467			5	79	799	282	9653	0,92	164,24	0,54	0,95
22	180	30,02	953	0,436			5	79	790	285	9938	0,94	169,09	0,51	1,00
23	190	45,55	888	0,404			4	77	776	378	10316	0,98	175,51	0,47	1,06
24	200	44,46	828	0,374			4	75	757	450	10766	1,02	183,17	0,43	1,12
25	210	43,53	775	0,347			4	73	738	440	11206	1,06	190,66	0,40	1,17
26	221	62,11	718	0,319			4	70	788	581	11787	1,12	200,54	0,37	1,23
27	230	61,23	681	0,300			3	69	628	555	12342	1,17	209,99	0,35	1,28
28	240	58,91	630	0,275			3	66	675	601	12942	1,23	220,21	0,32	1,34
29	250	80,35	585	0,252			3	63	645	696	13639	1,29	232,05	0,29	1,39
30	260	79,24	541	0,230			2	60	615	798	14437	1,37	245,63	0,27	1,45
31	270	76,82	486	0,203			2	55	573	780	15217	1,44	258,91	0,24	1,51
32	280	94,86	449	0,184			2	52	532	858	16075	1,53	273,51	0,21	1,56
33	290	93,07	395	0,157			2	46	486	940	17015	1,61	289,50	0,18	1,62
34	300	95,04	357	0,138			1	41	435	941	17955	1,70	305,50	0,16	1,67
35	310	34,91	324	0,122	2,11		1	38	396	650	18605	1,77	316,56	0,14	1,73
36	320	32,10	308	0,114	2,17	140			18394	335	18940	1,80	322,26	0,13	1,78
37	330	32,49	287	0,103	2,27					323	19263	1,83	327,75	0,12	1,84
38	340	38,83	274	0,097	2,34					357	19620	1,86	333,82	0,11	1,90
39	350	44,32	260	0,090	2,41					416	20036	1,90	340,90	0,10	1,95
40	360	42,63	247	0,083	2,49					435	20470	1,94	348,29	0,10	2,01
41	370	56,93	232	0,076	2,58					498	20968	1,99	356,76	0,09	2,06
42	380	58,95	222	0,071	2,65					579	21547	2,04	366,62	0,08	2,12
43	390	57,06	203	0,061	2,80					580	22127	2,10	376,49	0,07	2,18
44	400	80,77	191	0,055	2,90					689	22817	2,17	388,21	0,06	2,23
45	410	78,30	179	0,049	3,02					795	23612	2,24	401,75	0,06	2,29
46	420	82,52	168	0,044						804	24416	2,32	415,43	0,05	2,34
47	430	100,49	155	0,037						915	25331	2,40	431,00	0,04	2,40
48	440	91,35	144	0,032						959	26290	2,49	447,32	0,04	2,45
49	450	98,25	135	0,027						948	27238	2,58	463,45	0,03	2,51