



II-148 - AERAÇÃO POR CENTRIFUGAÇÃO LÍQUIDA MULTIVENTURI TECNOLOGIA INOVADORA DE TRATAMENTO DE LÍQUIDOS

Domenico Capulli ⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Federal Fluminense. Auditor Ambiental pela Escola de Química da UFRJ. Consultor de Controle de Poluição Atmosférica, Diretor de Tecnologia da Capmetal Tecnologia Ambiental.

Elisa Jacinto Fernandes

Engenheira Química pela Universidade Federal Fluminense

Endereço ⁽¹⁾: Rua Idalina Senra, 45 – São Cristovão – Rio de Janeiro - RJ - CEP: 20941-090 - Brasil - Tel.: (21) 3860-1261 –R. 461; (21) 9971 –7568 e-mails: capulliconsultoria@hotmail.com

RESUMO

A constatação da estagnação de novos desenvolvimentos tecnológicos em processos de aeração de líquidos que permitam a maximização da razão kg de O₂ dissolvido/kW consumido, nos estimulou a pesquisar tecnologias inovadoras que respondessem com valores mais eficientes ao parâmetro em questão. Com o objetivo de aplicar a tecnologia e know how acumulado nos últimos 30 anos em processos de transferência de massa e energia nos aplicativos de despoluição atmosférica, migramos para o processo de difusão gasosa num corpo líquido e desenvolvemos ensaio com uso da tecnologia de *centrifugação líquida multiventuri* que conjuga a ação da força centrífuga com o eficiente fator de contato ar-água na partição múltipla para inoculação do oxigênio contido no ar para o líquido.

Desta feita, buscamos formatar o estado da arte elencando o desempenho dos aeradores de superfície, aeradores submersos e da técnica de aeração por ar difuso com estruturas submersas que promovem através de estruturas porosas a inoculação de ar atmosférico ou O₂ puro com formação de microbolhas que se disseminam e ascendem pela diferença de densidade, enquanto se solubilizam no corpo líquido. Principal rubrica de custo energético de uma E.T.E. Responde por até 90% da energia consumida que é demandada pelo sistema de aeração, a economia no consumo energético pela técnica de ar difuso pode chegar a 60% quando comparado com a utilização de aeradores mecânicos.

O emprego da tecnologia de centrifugação do efluente com ar em rotores dinâmicos com elevada sinergia de mistura assegura uma maior efetividade na transferência de massa de oxigênio, refletindo-se num menor tempo de residência dos efluentes, com incremento da capacidade operacional dos tanques e com menor consumo de energia, acessibilidade para manutenção, viabilidade de implantação com redundância e aplicação em unidades instaladas como polimento final para descarte em corpo receptor sem impacto ambiental por demanda de oxigênio. Com efeito, ensaio realizado em estação de esgoto domiciliar de grande porte mostrou a capacidade gigantesca de inoculação de oxigênio no líquido a partir da centrifugação do efluente com ar atmosférico alcançando a transferência instantânea de 6,3 mg O₂/l valor esta acima das ocorrências naturais de águas puras e sem carga orgânica, para um consumo médio de 0,33kW/m³ de efluente processado.

PALAVRAS-CHAVE: Aeração de efluentes líquidos, Redução da DBO efluente, Aeração na piscicultura, Redução da carga orgânica, Oxidação ferro em águas.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de aeração são altamente empregados em diversos tipos de processos industriais e em estações de tratamento de esgoto domiciliar, oxidação de águas ferrosas, estações de tratamento de efluentes industriais (processos biológicos, químicos e físicos), corpos naturais de água contaminados como lagos e lagoas, e na aeração para fins de produção econômica como piscicultura e carcinicultura, onde a maior disponibilidade de oxigênio permite o suporte de uma população maior na mesma área de tanques.

A indústria de bebidas é outra atividade fabril onde a transferência de ar para água, eleva os teores de oxigênio e nitrogênio na água e simultaneamente reduz os teores de gás carbônico (CO₂), gás sulfídrico (H₂S), cloro,

metano e substâncias aromáticas voláteis, promovendo também a oxidação e precipitação de compostos indesejáveis nas bebidas, como o ferro e manganês.

A inoculação de oxigênio à biomassa (processos de oxidação de carga orgânica dos mais variados tipos, nitrificação biológica, remoção biológica de nutrientes), possibilita processos de mistura, equalização, stripping, flotação e digestão em todos os tipos possíveis de tanques, lagoas, valos, canais e caixas de areia aeradas, ou seja, a dissolução de oxigênio em água assegura a estabilização química e biológica do líquido de forma a viabilizar etapas posteriores de ações físico-químicas de tratamento.

Historicamente temos ocorrências naturais de oxigenação de águas nas quedas de cascatas e cachoeiras que inspiraram o uso da força da gravidade, através do bombeamento e lançamento de jatos de águas com elevadas demandas biológicas e químicas de oxigênio (DBO, DQO) em alturas relevantes de forma que em queda livre o líquido interaja com o ar atmosférico, solubilizando oxigênio, esta técnica é restrita a grandes corpos d'água como lagos e represas; outras tecnologias como aeradores mecânicos de superfície, fundamentam-se na agitação do efluente para introduzir ar da atmosfera com pás, laminas brochas e sistemas propelentes diversos com o intento de agitar, movimentar e misturar o líquido com elevada carga orgânica com lodo contendo microrganismos aeróbicos em suspensão e o oxigênio do ar atmosférico como comburente nas reações de oxidação de matéria orgânica. Estes equipamentos pelo próprio princípio de funcionamento incorporam uma ineficiência típica da circulação de 40% do líquido recém-misturado (“looping”), já os aeradores mecânicos submersos podem ser de fluxo ascendente em que o líquido é bombeado a superfície em alta velocidade sendo aspergido no ar circunvizinho do aerador flutuante, este como podemos visualizar na figura 1, tem o problema da névoa de aerossóis de efluente que é uma fonte de poluição atmosférica e contaminação a depender do tipo de efluente, enquanto que os aeradores de fluxo descendente operam pela formação de vácuo de aspiração de ar que é misturado ao líquido através de perfurações no eixo tubular de propulsão, ambos tem uma capacidade de aeração da ordem de 1,8 a 1,2 kg de O₂/cv. h respectivamente.



Figura 1: Aerador de superfície com grande agitação mecânica do líquido e formação de aerossol

Diante da realidade da crise energética e considerando-se que para estações de tratamento de efluentes até 90% da energia consumida são demandadas pelo sistema de aeração, partir da década de 80, partiu-se para a injeção de ar atmosférico e às vezes oxigênio puro, este quando não há área disponível para uma maior retenção do efluente, através de estruturas submersas porosas capazes de formar bolhas, assim a economia no consumo energético pela técnica de ar difuso pode chegar a 60% quando comparado com a utilização de aeradores mecânicos. Entretanto a gigantesca diferença de densidade dos fluidos (1:1000) faz as bolhas ascenderem rapidamente em direção à linha d'água dispersando-se novamente na atmosfera de onde foi captado, restando neste rápido percurso frações de ar que se solubilizam no líquido ávido por oxigênio. A fronteira de transferência de massa é o perímetro da bolha, e devido à elevada diferença de densidade o resultado é ainda um relevante consumo de energia; como evolução e ao mesmo tempo para contornar os problemas de entupimento a partir da década de 90 foi desenvolvida difusores porosos de cerâmica, plástico ou membranas flexíveis de EPDM. Atualmente a tecnologia consagrada de aeração do efluente líquido e a suspensão mecânica do lodo ativo é a da técnica de aeração por ar difuso em microbolhas (1-5 mm) com estruturas submersas que promovem a inoculação de ar atmosférico ou O₂ puro que se disseminam e ascendem, pela diferença de densidade, enquanto se solubilizam no corpo líquido com maior eficiência requerendo até 40% menos ar e cerca

de 28% na redução do consumo de energia graças a maior área superficial das microbolhas. Estudos feitos na Europa e Estados Unidos consolidaram a utilização de sistemas de aeração por ar difuso para essas aplicações devido a elevada eficiência e ao seu baixo custo de operação em relação aos sistemas com utilização de aeradores mecânicos; entretanto problemas de entupimento e manutenção das estruturas submersas são graves, pois implica no esvaziamento do tanque, sendo recomendada a disponibilidade de tanque reserva ou tanques com capacidade ociosa para permitir manobras. Estas e outras questões trazem preocupação como da formação de neblina do líquido processado que seria uma fonte de contaminação secundária em sistema de aeração de superfície ou a manutenção dos dispositivos ou equipamento, sempre onerosa e dificultosa quando implica em ações em estruturas submersas no líquido a ser aerado, haja visto que o regime operacional é contínuo.



Figura 2: Difusor de microbolhas tipo membrana perfurada, percebe-se o cone vertical de ascensão com mínima difusão lateral, típica de fluidos de densidades díspares.

A simples análise visual da *coluna vertical de microbolhas* que ascende em direção à linha d'água já demonstra a reduzida capacidade de mistura e difusão mássica entre dois fluidos com densidades tão distintas, $1,12\text{kg/m}^3$ para o ar contra 1000 kg/m^3 da água, ou seja, a depender da profundidade o tempo de residência é tão reduzido que grande parte do ar inoculado retorna para atmosfera sem participar do processo sendo apenas carga de consumo energético.

DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO

Da exposição acima se depreende que apesar da evolução ao longo das últimas oito décadas o estudo da bibliografia e consulta a catálogos de fabricantes permite sintetizar a performance das tecnologias disponíveis para referência em nosso estudo, com uma coletânea de valores típicos por tecnologia como na Tabela 1 onde constatamos apesar de incrementos de eficiência energética de 300% ainda o processo tem um reduzido grau de conversão de O_2 em CO_2 sendo grande parte do ar inoculado perdido para atmosfera, ou seja, nos aeradores mecânicos o grande consumo de energia na movimentação de líquido denso e na tecnologia de microbolhas na contrapressão para injetar um fluido menos denso num líquido 1000 vezes mais denso, em ambos o grande dispêndio de energia não se converte em trabalho, isto é oxigênio dissolvido no líquido.

Tabela 1: Quadro comparativo entre tecnologias de aeração pelo oxigênio inoculado no líquido.

Tecnologia de Aeração	Oxigênio Inoculado (kgO ₂) / Consumo de energia (kWh)	Diferença para base Soprador = 1
Aerador submerso	1,2 a 1,6	140-33%
Aerador mecânico de superfície	1,2 a 1,75	140-45%
Ar difuso microbolhas	2,5 a 6	400%
Ar difuso bolhas grossas	0,7 a 2	40-66%
Soprador	0,5 a 1,2	1

Com vistas a desenvolver um sistema que disponha das características que consagraram a tecnologia de ar difuso por microbolhas como máxima eficiência a custos de um baixo consumo energético, associadas à busca pela tecnologia capaz de efetivar a *fixação do oxigênio* no corpo líquido, disponibilizando-o efetivamente para atender as demandas biológicas e químicas de oxigênio (DBO e DQO), para tanto desenvolvemos uma abordagem inovadora da tecnologia de *centrifugação multiventuri* da mistura ar-efluente líquido aplicada na aeração de líquidos. Esta tecnologia fundamenta-se na transferência do oxigênio do ar atmosférico para a massa líquida, ávida pelo elemento oxidante que é disponibilizado através da centrifugação simultânea do ar atmosférico com líquido aquoso com elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO), onde a aceleração centrífuga do líquido em direção ao perímetro externo do rotor eleva o nível de energia cinética do líquido que é induzido a subdividir-se em centenas de porções e atravessar simultaneamente as gargantas venturi juntamente com o ar, ou seja, temos uma elevação da superfície de contato em alta velocidade que permite as transferências instantâneas de oxigênio do ar atmosférico para as porções de líquido, de forma a favorecer uma maior velocidade da digestão aeróbica por bactérias específicas da matéria orgânica disponível e/ou reações químicas, como nitrificação da amônia, a exemplo das de oxidação, pela maior homogeneidade do meio reacional favorecendo a elevação do grau de conversão das reações bioquímicas.

Os *precipitadores hidrodinâmicos* são autoaspirantes e com capacidade de processar grandes volumes de líquido e de ar atmosférico simultaneamente, o conceito fundamental que responde pelos valores entre 4,63 a 8,96 kgO₂/kW é a reduzida perda de carga, pois estamos centrifugando o fluido mais denso (água) no meio menos denso (ar) com conseqüente redução do consumo de energia. Esta tecnologia é antítese as existentes, pois temos a *inversão dos fluidos em termos de meio reacional*, ou seja, a resistência mecânica do contato do líquido fracionado no ar é muito menor do que a ser superada nas tecnologias existentes em que o ar é inoculado no meio líquido com uma resistência mecânica muito elevada face às diferenças de densidade (1:1000).

Ao analisarmos a equação (1) da difusão de massa, segundo a Lei de Fick que descreve o processo de difusão mássica relacionando o fluxo difusivo às composições (concentração ou fração).

equação (1).

$$\mathbf{j}_A = -\rho D_{AB} \nabla m_A$$

Onde: ρ é a densidade mássica: $\rho = \rho_A + \rho_B$; m_A é a fração de massa: $m_A = \rho_A/\rho$

Observamos que a difusão de substâncias tem sua velocidade diretamente relacionada à densidade dos meios, ou seja, é mais fácil difundir uma substância no meio menos denso, e nosso conceito coaduna com esta assertiva clássica da mecânica dos fluidos quando induzimos o fracionamento líquido nas perfurações venturi e forçamos o ar atmosférico a se misturar com o líquido em centenas de pequenas porções com elevada superfície de contato, ou seja, multiplicamos as fronteiras perimetrais do líquido de forma a termos mais superfície de contato para as transferências gasosas. É o mesmo conceito adotado pela difusão por microbolhas porém com a diferença de que na *centrifugação multiventuri* invertemos o meio fracionado do gasoso para o líquido de forma a difundir a massa de líquido fragmentada pela centrifugação, no fluido menos denso que é o ar elevando de sobremaneira a solubilização gasosa no líquido.

Uma visualização do rotor de *centrifugação multiventuri* na figura 3 mostra as paletas verticais responsáveis pela aspiração do ar (“booster function”) e o perímetro com múltiplas perfurações, ou seja, o fundo é fechado, logo o líquido é induzido ao perímetro pela ação da força centrífuga, é obrigado a *subdividir-se* em centenas de porções com elevada superfície de contato de forma a multiplicar a área de transferência de massa gasosa para o líquido por diferencial de pressão parcial de contato. Trata-se de transferências instantâneas devido à elevada sinergia de contato alcançada pela *centrifugação multiventuri* requerendo, portanto um tempo de residência muito curto para processar o líquido em regime de vazão contínua.



Figura 3: Nas perfurações tipo venturi ocorre à transferência de oxigênio do ar para o líquido.

Os limites teóricos de solubilização de oxigênio na água, a exemplo de outras moléculas de gases apolares com interação intermolecular fraca com água, é pequena devido à característica polar da molécula de água, sendo sua presença explicada pela sua dissolução do ar atmosférico para a água $O_2(g) \rightleftharpoons O_2(aq)$ cuja constante de equilíbrio apropriada é a constante da Lei de Henry (K_H).

Para o processo de dissolução do oxigênio, K_H é definida como:

$$K_H = [O_2(aq)] / p_{O_2} \quad \text{equação (2),}$$

onde p_{O_2} é a pressão parcial do oxigênio atmosférico.

O valor de K_H da equação (2) para o oxigênio a temperatura de 25 °C é de $1,29 \times 10^{-3} \text{ mol/L} \cdot \text{atm}$. ou podemos escrever a Lei de Henry que a solubilidade é proporcional à pressão parcial de O_2 ,

$$[O_2] = K_H p_{O_2} \quad \text{equação (3),}$$

Desta forma inferimos a partir da figura (4) que a uma dada temperatura a solubilidade do oxigênio na água decresce com temperatura. Como a solubilidade dos gases em água diminui com a elevação da temperatura, por exemplo, a quantidade de oxigênio que se dissolve a 0 °C (14,2 mg/L) é mais do que o dobro da que se dissolve a 35 °C (7,0 mg/L).

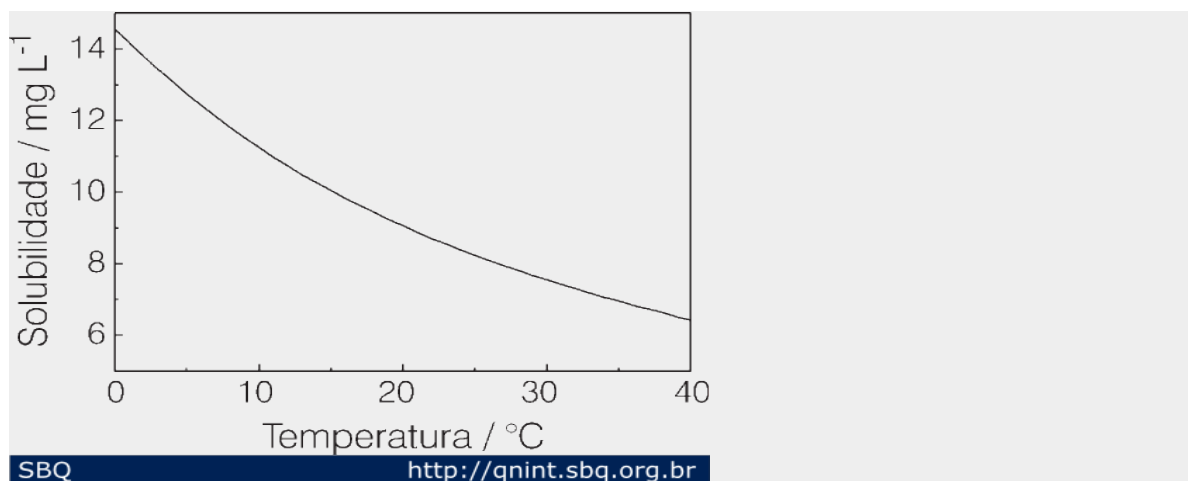


Figura 4: Solubilidade do gás oxigênio em água a várias temperaturas, na pressão atmosférica de 1 atm. (760 mmHg).

Deste modo, águas de rios ou lagos, aquecidos artificialmente como resultado de poluição térmica contêm menos oxigênio dissolvido (OD), pode-se concluir que a própria digestão aeróbica, uma oxidação exotérmica, gera aquecimento e redução do oxigênio dissolvido no corpo de líquido aquoso.

A demonstração dos valores segue o raciocínio, por exemplo, no nível do mar a pressão atmosférica é de 1 atm. e a composição média em volume ou molar do ar seco é de 21% de O₂, pode-se estimar a pressão parcial do oxigênio como sendo 0,21 atm., substituindo esse valor de .pressão na equação(3), tem-se:

$$[O_2] = K_H p_{O_2} = 1,29 \times 10^{-3} \text{ mol/ (L. atm.)} \times 0,21 \text{ atm.} = 2,7 \times 10^{-4} \text{ mol/ L equação(4)}$$

Portanto, estima-se a solubilidade do O₂ em água, a 25 °C e no nível do mar, como sendo 8,6 mg /L, esse valor apresenta uma concordância razoavelmente boa com o valor medido de 8,11 mg/ L, portanto temos estabelecido os limites teóricos da pressão atmosférica, a tecnologia de *aeração por centrifugação líquida multiventuri* tem a exclusividade de incrementa a pressão de contato acima da atmosférica e assim conseguir valores de solubilização induzida superiores aos alcançados historicamente pelas tecnologias de aeradores mecânicos e de ar difuso.

A materialização do equipamento dá-se por uma construção dinâmica composta de lóbulos de centrifugação e o lóbulo de separação ciclônica que promove o desague do líquido aerado para o tanque de digestão aeróbica. O *aerador centrifugo multiventuri* deve receber o líquido com reduzido teor de oxigênio por bombeamento ou gravidade, sendo requerido que o líquido já tenha passado pelo gradeamento, ou seja, sua implantação pode ser em linha de alimentação do efluente como um dos primeiros estágios de tratamento. Na sequencia o motor elétrico conectado diretamente ao rotor de centrifugação promove a aspiração de ar atmosférico e a simultânea mistura do mesmo com o líquido no interior do rotor de *centrifugação multiventuri* onde processa-se a inoculação do oxigênio no líquido. A lógica funcional da tecnologia se fundamenta na teoria de convergência da amplitude de vibração molecular dos fluidos, a exemplo do emprego com sucesso na depuração de gases, agora temos uma inversão de objetivos sob os mesmos requerimentos no meio reacional, ou seja, transferência de massa e energia em fluidos de fases distintas, sendo impelido o líquido com elevada DBO a uma aceleração centrífuga em rotor fechado contendo o ar aspirado, assim os dois fluidos são induzidos ao perímetro do rotor, onde são obrigados a subdividir-se em centenas de porções com uma área superficial de transferência muito maior. Devido à partição do líquido em porções que experimentam uma maior pressão de contato nas gargantas tipo venturi, enquanto que simultaneamente o ar atmosférico tem uma solubilização induzida no líquido, ou seja, a partição multiplica a área superficial de contato para as transferências de massa e energia.



Figura 5 Centrifugação multiventuri de esgoto domiciliar na estação da Penha no Rio de Janeiro.

Para demonstrar a efetividade deste conceito foi realizado um ensaio de campo na ETE da Penha (CEDAE) – RJ cujos resultados estão na tabela 2, onde vemos que processamos o esgoto “in natura” com 2,3 mgO₂/litro após tanque de aeração, já que no decantador primário era nula, e com uma passagem única no equipamento alcançamos os resultados de até 8,6 mgO₂/litro, valor acima de uma ocorrência natural de rios e nascentes de água de cerca de 5 mgO₂/litro. Este desempenho apresenta uma redução de 49% do consumo de energia empregada nos compressores e sopradores da técnica difusão de microbolhas e alcança índices de oxigênio dissolvido acima das ocorrências nos corpos líquidos naturais, ou seja, podemos processar apenas parte da vazão, pois por gradiente de difusão, o oxigênio dissolvido migra da maior concentração para a porção com menor concentração.

Tabela 2: Ensaio de oxigênio dissolvido 01/01 DRE- CEDAE/RJ

Análise	Horário	Ponto de Amostragem	Oxigênio Dissolvido (mg/l)	pH	Temperatura °C
	10:40	Sobrenadante do decantador primário	Zero	-	-
1 ^o	10:45	Afluente	2,97	7.0	28,7
	10:50	Efluente do Aerador centrifugo multiventuri	6,79	7.0	28,8
2 ^o	10:55	Afluente	2,98	7.0	29,3
	11:00	Efluente do Aerador centrifugo multiventuri	6,99	7.0	28,6

Da análise dos resultados alcançados percebe-se a elevada capacidade da tecnologia de centrifugação multiventuri em saturar o líquido com oxigênio, alcançando patamares limites dos valores encontrados na literatura de solubilidade do O₂ em água, a 25 °C e no nível do mar, como sendo 8,6 mg /L, fato que valida a ideia de que podemos processar apenas uma parte do efluente que por difusão o oxigênio iria tender ao equilíbrio natural de 5 mg/l desde que satisfeitas os requerimentos demandados pelos microrganismos aeróbicos na oxidação da matéria orgânica.

Outras questões relevantes são operacionais face à possibilidade de operar com redundância sem a necessidade de tanque reserva ou esvaziar tanques para ações de manutenção, bem como alta confiabilidade operacional,

CONCLUSÕES

Os resultados alcançados com o ensaio de campo demonstram que é recomendável o desenvolvimento da aplicação da *aeração por centrifugação multiventuri*, inclusive como unidade de polimento final da ETE antes de lançar ao corpo receptor do efluente, de forma que não teremos nenhum impacto em termos de oxigênio dissolvido, esta solução é indicada em plantas operando com deficiências crônicas ou sobrecarregadas.

O uso desta tecnologia em efluentes de processos de fabricação de bebidas fermentadas, frigoríficos e processadores de aves e carnes, esgotos domiciliares, efluentes químicos de plantas industriais, indústrias farmacêuticas e alimentícias, curtumes, oxidação de ferro, redução de manganês, sulfito e amônia dentre outras, viabiliza expansões com reduzido espaço e investimento quando comparado com os processos tradicionais de aeração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HIMMELBLAU, DAVID MAUTNER: Engenharia química: princípios e cálculos. 4 edição- Prentice Hall do Brasil Ltda..
2. PERRY & CHILTON: manual de Engenharia Química, 5º ED, GUANABARA DOIS, 1980.



3. LENORE S. CLESCERI, ARNOLD e, GRENNBERG, ANDREW d. EATON- Standard methods for the examination of water and wastewater, 20 edição by APHA-AWWA-WEF
4. SITE WWW.capmetal.com.br - Precipitadores Hidrodinâmicos. Catálogo Capmetal, 2002.
5. FIORUCCI, ANTONIO ROGERIO; BENEDETTI, EDEMAR FILHO. A Importância do Oxigênio Dissolvido em Ecossistemas Aquáticos. Química Nova na Escola n. 22 – SBQ- Sociedade Brasileira de Química Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
6. SITE www.nei.com.br/produto/2008/09/aeradores/misturadores Catálogos de fabricantes Aeradores
7. SITE www.tps.com.au/handbooks/93BFDOv2_1.PDF