



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102021024586-7 A2



(22) Data do Depósito: 06/12/2021

(43) Data da Publicação Nacional: 03/03/2022

(54) **Título:** FOTOBIORREATOR MODULAR HÍBRIDO (TERRA-ÁGUA) E/OU CARTUCHOS PARA O CULTIVO DE MICROALGAS LIVRES OU IMOBILIZADAS EM BIOPOLÍMEROS APLICADO NO PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES, GERAÇÃO DE PRODUTOS E SEUS USOS

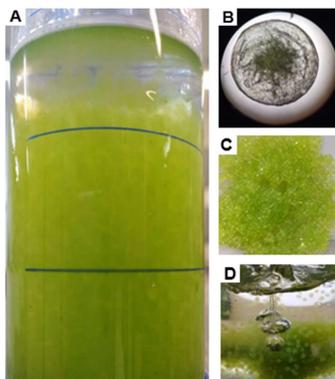
(51) **Int. Cl.:** C12M 1/00; C12M 1/12.

(52) **CPC:** C12M 21/02; C12M 23/06.

(71) **Depositante(es):** UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANA.

(72) **Inventor(es):** ANDRÉ BELLIN MARIANO; JOSÉ VIRIATO COELHO VARGAS; PAULO ALEXANDRE SILVEIRA DA SILVA; IHANA DE AGUIAR SEVERO; VANESSA MERLO KAVA; DIEGO DE OLIVEIRA CORRÊA; RAFAEL SILVA RIBEIRO GONÇALVES; WELLINGTON BALMANT; LAUBER DE SOUZA MARTINS; BEATRIZ JACOB FURLAN; RAFAELA COSTA MIRABILE; PEDRO HENRIQUE SIQUEIRA ZATTA.

(57) **Resumo:** FOTOBIORREATOR MODULAR HÍBRIDO (TERRA-ÁGUA) E/OU CARTUCHOS PARA O CULTIVO DE MICROALGAS LIVRES OU IMOBILIZADAS EM BIOPOLÍMEROS APLICADO NO PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES, GERAÇÃO DE PRODUTOS E SEUS USOS. A invenção encontra seu campo de aplicação dentre as tecnologias para produção de biomassa (bioenergia) e que diminuam ou eliminem o impacto ambiental. A presente patente divulga um tipo de plataforma destinada ao tratamento de forma simultânea de águas residuárias a partir de microalgas livres ou imobilizadas em matrizes biopoliméricas, projeto de novos fotobiorreatores, obtenção e utilização dos bioprodutos que servem como matéria-prima e/ou insumos finais de interesse industrial. As vantagens do bioprocessamento consistem em soluções tecnológicas que possibilitem a biorremediação, fácil remoção das microalgas do efluente, aprimoramento das características intrínsecas do microrganismo, exploração comercial dos produtos formados e, essencialmente, a fácil ampliação dos sistemas de cultivo, sua operação e manutenção, podendo ser implementado em novas instalações ou adaptado a processos já existentes.



FOTOBIORREATOR MODULAR HÍBRIDO (TERRA-ÁGUA) E/OU CARTUCHOS PARA O CULTIVO DE MICROALGAS LIVRES OU IMOBILIZADAS EM BIOPOLÍMEROS APLICADO NO PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES, GERAÇÃO DE PRODUTOS E SEUS USOS

Campo da Invenção

[001]. A presente invenção pertence ao campo técnico de tecnologias para produção de biomassa (energia renovável) e que diminuam ou eliminem o impacto ambiental. Em particular, a invenção refere-se a uma nova plataforma de tratamento de águas residuárias a partir de microalgas imobilizadas em biopolímeros e, substancialmente, de fotobiorreatores híbridos e/ou modulares. Adicionalmente, o presente pedido trata de bioprodutos obtidos através do dito bioprocessamento da presente invenção e sua utilização como fonte de biomassa (bioenergia) e insumos de interesse industrial.

Fundamentos da Invenção e Descrição do Estado da Técnica

[002]. Nos últimos anos, houve um aumento exponencial na contaminação de corpos hídricos devido às atividades antrópicas, que incluem o lançamento constante de efluentes domésticos, agrícolas e industriais. Este grave problema ambiental ocasiona a eutrofização acelerada dos ecossistemas aquáticos, principalmente pela descarga de substâncias orgânicas e inorgânicas ricas em fósforo e nitrogênio.

[003]. Embora diversos acordos internacionais tenham sido propostos recentemente e estejam presentes em quase todas as agendas científicas, sociais ou políticas no mundo todo, as questões associadas ao gerenciamento dos recursos hídricos impõem sérios riscos

à sua disponibilidade e qualidade. Assim sendo, é imperativo abordar este problema insustentável.

[004]. Os processos convencionais de tratamentos primários e secundários aplicados aos efluentes são uma necessidade e atualmente envolvem uma variedade de procedimentos físicos e químicos, fornecendo um produto final aparentemente limpo. Entretanto, a maioria destes métodos demandam etapas mais complexas e custosas, além de co-gerar consideráveis quantidades de lodo sem a destinação ambiental adequada. Um ponto crítico para o desenvolvimento bem-sucedido de um método para mitigar a carga poluente de águas residuárias é produzir pouca ou nenhuma poluição secundária.

[005]. Em contrapartida, os procedimentos biológicos foram propostos durante as últimas décadas e posteriormente empregados para o de tratamento secundário e/ou terciário de efluentes. Em geral, tratar biologicamente estes resíduos envolvem principalmente o uso de lodos ativados. No entanto, este tipo de sistema apresenta várias falhas inerentes como a baixa concentração de biomassa e onerosidade. Algumas tecnologias recentes foram desenvolvidas para aprimorar a bioatividade do lodo, que por limitações de custo e/ou engenharia complexa, são consideradas pouco atrativas.

[006]. Uma das alternativas que vem ganhando considerável atenção para o tratamento de águas residuárias está baseada no uso de microalgas. Existe um consenso entre pesquisadores, desenvolvedores e industrialistas de que estes microrganismos oferecem uma infinidade de vantagens na remoção do excesso da carga poluidora presente nos efluentes, o que torna possível o seu descarte final eficaz e econômico, com o menor impacto ambiental.

[007]. Dentre os incontáveis benefícios das microalgas, destacam-se a elevada eficiência fotossintética, rápida taxa de crescimento, alta produtividade de biomassa, e produção de inúmeros metabólitos de valor agregado. Além disso, considerando as características da biomassa, os processos mediados por microalgas são vistos como potenciais tecnologias para converter efluentes em insumos empregados na indústria química, petroquímica, energética, alimentícia, farmacêutica e agrícola.

[008]. Apesar da existência de muitas rotas tecnológicas utilizando microalgas para a purificação de águas residuárias, até o presente momento, elas têm sido limitadas sob certos aspectos, porém não impedidas para o escalonamento industrial. As principais barreiras consistem na (i) relativa ocupação de espaço para o cultivo, (ii) dificuldade na separação das frações sólido/líquido pós-tratamento do efluente, (iii) perdas celulares e (iv) descarte da biomassa remanescente.

[009]. A técnica de imobilização celular é uma estratégia promissora para transpor essas dificuldades. A imobilização de microalgas está fundamentada em fixar ou aprisionar as células em uma matriz através de interações físico-químicas. Dentre os diversos métodos existentes, a imobilização através da técnica de gelificação iônica é a que apresenta maturidade necessária para aplicação em escala. Em adição a estas considerações, a imobilização apresenta as seguintes vantagens competitivas: as células são facilmente coletadas por filtração simples, que tem baixo consumo de energia, devido ao tamanho das esferas formadas em comparação as microalgas livres, variando de 1 a 8 mm; maior concentração celular e preservação das mesmas, evitando a contaminação; maior estabilidade térmica; biodegradabilidade; alta atividade metabólica; baixo excesso de lodo gerado; redução de custos de manutenção dos equipamentos (biorreatores); as esferas contendo

as microalgas imobilizadas podem ser reutilizadas, reduzindo a necessidade subcultivar a cultura estoque com frequência; e possui um efeito notável na purificação de águas residuárias, removendo compostos nitrogenados e fosfatados, inclusive metais pesados.

[010]. Independente destes aspectos, quando as microalgas imobilizadas são aplicadas em um fluxo hídrico, as questões de escoamento ainda são um inconveniente. Por essa razão, é crucial utilizar sistemas que sustentem o crescimento adequado destes microrganismos e atinjam elevadas produtividades, como é o caso dos fotobiorreatores fechados. A maioria das configurações de fotobiorreatores de microalgas imobilizadas conhecidas do estado da técnica, adotam equipamentos que operam com propósitos específicos para atender as peculiaridades dos resíduos. Além disso, esses fotobiorreatores apresentam informações técnicas limitadas (por exemplo: complexidade de parâmetros), o que resulta em despesas elevadas. Considerando o enorme volume de efluente a ser tratado, qualquer aumento no custo operacional dificulta a venda de uma nova tecnologia para as estações de tratamento de águas residuárias.

[011]. Diante do exposto, há uma demanda latente em desenvolver novas tecnologias com duplo papel: solucionar os aspectos problemáticos dos fotobiorreatores para cultivar microalgas imobilizadas em concomitância com a biorremediação das águas residuárias.

[012]. Portanto, uma plataforma que considere simultaneamente o tratamento de águas residuárias empregando microalgas imobilizadas em matrizes biopoliméricas, o projeto de fotobiorreatores inovadores, incluindo sistemas híbridos (terra-água) e/ou cartuchos modulares, e a obtenção de bioprodutos que servem como matéria-prima e/ou produtos finais de muitos consumíveis úteis para a indústria é algo ainda não existente no atual estado da técnica.

[013]. Existem diversas rotas tecnológicas objetivando processos de biorremediação ambiental utilizando microalgas. A técnica de imobilização, por outro lado, tem sido explorada como uma estratégia prospectiva para melhorar a colheita de células de microalgas em águas residuárias; também é eficaz para controlar o crescimento microalgal em fotobiorreatores. Contudo, o tratamento de águas residuárias empregando microalgas imobilizadas associado ao desenvolvimento de novos fotobiorreatores híbridos e/ou cartuchos modulares e uso dos produtos ainda não foi relatado e possui grande potencial para implementação industrial.

[014]. Alguns pedidos de patente foram depositados na tentativa de viabilizar os processos acima descritos. Dentre os documentos existentes no estado da técnica, os seguintes podem ser citados:

[015]. A patente chinesa TWM497670U, intitulada "*Immobilized microalgae particles*" relata um método para a imobilização de grânulos de microalgas em uma estrutura de alginato com a finalidade majoritária de conservar o microrganismo, mantendo-o viável, e para impedir que as microalgas se movam para o meio aquoso.

[016]. A patente americana US20120225472A1, intitulada "*Preservation and composition of bioprocess algae for production of lipids, seedstock, and feed*" descreve a produção de uma microalga imobilizada e métodos para a cultura, colheita, preservação, armazenamento e usos.

[017]. A patente chinesa CN112522109A, intitulada "*Microalgae immobilization method, immobilized microalgae and application in water pollution treatment*" refere-se a um método de imobilização de microalgas e uso no tratamento da poluição de corpos hídricos, utilizando um suporte esponjoso.

[018]. A patente francesa WO2012171123A1, intitulada "*Method using immobilized algae for production and harvest of algal biomass and products*" descreve composições, artigos, aparelho, métodos e sistemas para o cultivo de microalgas imobilizadas, colheita e processamento.

[019]. A patente chinesa CN107988079A, intitulada "*Compound algae preparation for removing nitrogen and phosphorus pollutants*" cita um método de uso combinado de várias algas para a remoção de poluentes utilizando a técnica de imobilização em alginato de sódio.

[020]. A patente chinesa CN110343605A, intitulada "*A kind of method of immobilized cells culture processing breeding wastewater*" refere-se a um método de tratamento de águas residuárias da aquicultura com microalgas imobilizadas em alginato.

[021]. A patente americana US20190241853A1, intitulada "*Compositions comprising microalgae and methods of producing and using same*" compreende um processo de microalgas encapsuladas em alginato e/ou quitosana e um elemento flutuante para manter as células no meio, o qual é caracterizado pela própria partícula microalgal.

[022]. Os documentos de patentes acima descritos apresentam diversas inconsistências comuns, caracterizadas essencialmente pela ausência de um sistema adequado de cultivo das microalgas imobilizadas, o que é pouco atrativo para a exploração comercial. Sob outra perspectiva, alguns destes documentos desconsideram o tratamento de efluentes e/ou a aplicabilidade das esferas, seja diretamente ou como insumo intermediário para a formação de outros produtos, os quais são de interesse industrial.

[023]. Em termos de fotobiorreatores, muitos modelos isoladamente já são conhecidos no estado da técnica. No entanto, os equipamentos ou aparatos registrados são considerados

frequentemente como sistemas complexos, mais difíceis de construir e operar, além de necessitar de substancial área para ocupação, exigindo maiores investimentos de capital.

[024]. Um dos principais direcionamentos do presente invento consiste no projeto de fotobiorreatores, particularmente sistemas híbridos (terra-água) e/ou cartuchos modulares, para o cultivo robusto das microalgas imobilizadas. Concluiu-se, portanto, que através da busca de anterioridade, não existem documentos de patentes propondo uma plataforma para o tratamento de águas residuárias com microalgas imobilizadas em biopolímeros, projeto de novos fotobiorreatores, obtenção de produtos e seus usos de forma simultânea.

Descrição da abordagem do problema técnico

[025]. No presente invento, os principais problemas técnicos a serem solucionados frente ao que existe no estado da técnica estão relacionados ao (i) tratamento das águas residuárias; (ii) descarte da biomassa residual; (iii) contaminação; (iv) dificuldade na separação das frações sólido/líquido pós-tratamento do efluente; e (v) perdas celulares, ocupação de área e complexidade operacional dos cultivos, conforme se segue:

[026]. (i) Os recursos hídricos contaminados por esgoto doméstico, agrícola e/ou industrial, possuem suas características alteradas, portanto são capazes de carregar e disseminar doenças ou substâncias tóxicas para a saúde humana e animal. As estações de tratamento de efluentes apresentam dificuldades em remover o mínimo necessário de poluentes, e muitas vezes acabam oferecendo recursos hídricos de má qualidade. Além disso, os efluentes com alta carga de nutrientes, principalmente nitrogênio, fósforo e matéria orgânica, sofrem eutrofização causada pelo

crescimento acelerado das algas presentes no meio, as quais consomem praticamente todo o oxigênio dissolvido na água, resultando em perdas ecológicas consideráveis.

[027]. (ii) Alguns sistemas de tratamento de efluentes possuem problemas quanto à destinação dos resíduos gerados pós-tratamento, como é o caso dos sistemas de lodos ativados, cujo processo não tem uma disposição ambientalmente correta. Os flocos do lodo são formados por agregados contendo bactérias, fungos, protozoários e algas. Por ser um material altamente contaminado, não pode ser disposto em aterros e nem serve para adubagem do solo; então a alternativa mais comumente utilizada consiste em processos de incineração.

[028]. (iii) Existem diferentes sistemas de cultivos de microalgas para a produção de biomassa e o tratamento de efluentes. Dentre eles, o cultivo aberto é o mais popular para a cultura de microalgas em escala comercial. Contudo, possui diversas desvantagens, incluindo a influência do meio externo, como oscilações frequentes de temperaturas, contaminações e perdas por evaporação, resultando em baixa produtividade de biomassa ou até mesmo a perda da cepa microalgal.

[029]. (iv) Um dos grandes desafios do uso de microalgas no tratamento de efluentes é garantir que a biomassa seja convenientemente recuperada. Caso as microalgas livres sejam adicionadas no efluente a ser tratado, o problema reside na forma de recuperação das células suspensas, a qual é dispendiosa e pode representar até 30% dos custos totais de produção. Atualmente, esse gasto é devido ao intenso consumo energético na etapa de colheita, caracterizada geralmente pela centrifugação da biomassa, em função do meio ser altamente diluído, da necessidade de processar grandes volumes e do pequeno tamanho das células.

[030]. (v) similarmente ao descrito no item acima (iv), a problemática inerente a recuperação da biomassa ocasiona perdas das células em suspensão. Em geral, adota-se o uso de sistemas de cultivo baseados em fotobiorreatores fechados para solucionar esse inconveniente. Porém, a maioria dos equipamentos requer maiores extensões de área, enquanto a carga de trabalho e os custos operacionais associados à sua manutenção, desmontagem e limpeza são substancialmente altos.

[031]. Os principais gargalos destacados acima podem ser melhorados ou solucionados com a plataforma de tratamento de efluentes a partir de microalgas imobilizadas em biopolímeros cultivadas em novos fotobiorreatores e suas aplicações, objeto da presente invenção.

[032]. Portanto, de modo a resolver os problemas técnicos, um dos objetivos do invento aqui revelado é fornecer um tipo de sistema que facilite a remoção das microalgas do efluente por filtração simples, com a utilização de peneiras e crivos, permitindo minimizar o consumo energético, devido ao considerável tamanho das partículas (esferas de aproximadamente 5 mm) em relação às células livres. Adicionalmente, a diminuição do volume dos fotobiorreatores, gerando estações mais compactas e significativamente mais baratas, também é uma dificuldade a ser superada.

[033]. Outro aspecto a ser solucionado com a esta patente consiste em aprimorar as características intrínsecas das microalgas, conferindo-lhes melhor resistência a contaminações e variações de temperaturas, aumentar a capacidade de remoção de compostos nitrogenados, fosfatados, compostos orgânicos dissolvidos e também metais pesados, bem como eliminar a formação de lodo e qualquer outro tipo de material residual.

[034]. Em adição, após tratarem o efluente, é possível ter diversas aplicações para as esferas contendo as microalgas. Elas podem ser recuperadas e reutilizadas no processo e/ou novamente imobilizadas, servindo como matéria-prima para o processamento de biocombustíveis, essencialmente biodiesel, aditivos para formulações de ração animal e uso como biofertilizante agrícola.

[035]. A invenção aqui descrita é passível de ser explorada industrialmente, pois foi elaborada para atender a demanda de obter um processo de biorremediação através da técnica de imobilização celular, servindo um instrumento propulsor para o desenvolvimento sustentável. Nesta patente conseguiu-se unir as vantagens da aplicabilidade de novos fotobiorreatores em qualquer sistema de tratamento de efluentes com a exploração comercial dos produtos formados.

[036]. Em suma, a novidade reside nas soluções tecnológicas que permitem aumentar facilmente o processo de cultivo, sua operação e manutenção, podendo ser implementado em novas instalações ou adaptado a processos já existentes.

[037]. Para tornar os objetos, soluções técnicas, novidades e vantagens da presente patente mais aparentes, a invenção é ainda descrita em detalhes com referência às modalidades a seguir.

Descrição detalhada da Invenção

[038]. As características da plataforma de tratamento de efluentes a partir de microalgas imobilizadas, fotobiorreatores e produtos, objeto da presente invenção, serão perceptíveis a partir da descrição minuciosa que se fará a seguir.

[039]. O presente bioprocesso possibilita diferentes cultivos de microalgas (fotoautotrófico, fotoheterotrófico, heterotrófico e mixotrófico), e em diversos modos de operação (batelada, batelada alimentada e contínuo).

[040]. O processo aqui revelado ocorre por meio das etapas de: (i) imobilização celular; (ii) projeto de fotobiorreatores específicos; (iii) tratamento de águas residuárias; e (iv) produtos obtidos e seus usos.

[041]. (i) Em um aspecto detalhado, a imobilização é realizada pelo método de gelificação ionotrópica. A partir de um cultivo de microalgas livres pré-existente no estado estacionário, é então realizada a floculação, decantação ou centrifugação das mesmas, e então ressuspendidas com água deionizada, destilada ou ultrapura, em um volume de até o máximo duas vezes do volume original. Após a ressusensão, é então adicionado 0,8-3% do agente gelificante (alginatos, quitosana, agarose, celulose ou carragena) a solução de microalgas, a qual deve ser gotejada em um meio catiônico como, por exemplo, contendo íons Ca^+ ou Na^+ . Após esse processo, as microalgas estão imobilizadas na matriz escolhida, envoltas por uma membrana gelatinosa, em formato de esferas.

[042]. Uma vez que há a formação das esferas contendo as microalgas aprisionadas, as mesmas podem ser revestidas por uma camada de nanopartículas poliméricas (nanoquitosana, nanocelulose e nanocarragena). As esferas são banhadas com uma solução de polímeros naturais dissolvidos em 1-3% de ácido acético, submetidas a agitação contínua por 0,5 a 1 h. Depois do tempo decorrido, as esferas são colocadas em uma solução de heptamolibdato de amônio, em torno de 2 g L^{-1} , e então lavadas para a remoção de compostos residuais.

[043]. (ii) Após o processo de imobilização celular, o cultivo é realizado em fotobiorreatores específicos. Os sistemas consistem em unidades básicas de produção de microalgas, projetadas para aumentar facilmente o processo de cultivo, sua operação e manutenção. Os fotobiorreatores ora propostos são passíveis de variáveis construtivas, ou seja, pode-se alterar os seus formatos (geometrias) de acordo com a sua aplicação.

[044]. O fotobiorreator híbrido (terra/água), um dos equipamentos do invento, inclui 4 unidades principais, conforme apresentado na Figura 2. Em uma perspectiva detalhada, o referido sistema compreende basicamente os seguintes componentes: dois módulos 1A e 1B ($0,3 \times 1,5 \times 2,2$ m), construídos em material plástico arranjados horizontalmente, formando as superfícies inferior e superior, seladas entre si; um módulo constituído de uma unidade *air-lift* ($1 \times 1 \times 1$ m), com volume útil variando entre 500 a 1000 L; e uma zona desgaseificadora com tubos transparentes verticais de PVC ($0,3 \times 3$ m), na qual uma delas recebe a alimentação de ar (*riser*) e outra não (*downcorner*). O filme plástico é fabricado a partir de folhas de polietileno transparente de baixo custo com 0,15 mm de espessura.

[045]. Conforme indicado na Figura 2, 1A (terrestre) e 1B (flutuante) detalham os módulos utilizados em lagos e corpos d'água. O sistema com camada transparente superior permite o aproveitamento luminoso e com baixa necessidade de estruturas de sustentação ou suporte. Cada um dos módulos "2" (Figura 2) foi dimensionado para atender até 20 módulos 1A ou 20 módulos 1B, totalizando uma área de cultivo de 21 m². Como os módulos são acoplados entre si, o sistema é notavelmente versátil, permitindo a produção de inoculo e posterior produção utilizando o mesmo conjunto funcional. Destaca-se o contraste deste sistema de cultivo fechado aos equipamentos com tubos transparentes

ou painéis que demandam estruturas de sustentação, implicando em custos elevados. O principal diferencial deste fotobiorreator consiste na modularidade do sistema e da flexibilidade de aplicação em qualquer terreno, bem como sobre lagos ou reservatórios de efluentes. Ao utilizar reservatórios como suporte para os módulos, o sistema faz um bom uso de área já disponível sem custos adicionais e grandes obras civis para estruturas de sustentação.

[046]. No caso do fotobiorreator de cartuchos modulares (Figuras 4 e 5), outro equipamento do presente invento, o sistema provê tubos de PVC para as conexões e PVC cristal para os tubos que comportam as microalgas, de modo a evitar interferências na incidência de luz e facilitar o mecanismo fotossintético das células microalgais. Como alternativa de construção, pode-se utilizar tubos de aço ou de acrílico, dando-se preferência para o último devido a evitar a oxidação de materiais metálicos que podem interferir no processo de tratamento. O diâmetro da tubulação de entrada na bomba é dn 100 (dn = diâmetro nominal), equivalente a 100 mm; e na linha de saída de bombeamento até os cotovelos é dn 50. As válvulas são utilizadas para o controle do fluxo de efluente, permitindo que o sistema de tratamento do efluente possa ser realizado de modo contínuo. Nos tubos ascendentes ocorre uma redução do diâmetro da tubulação, dn 40. Após os tubos de tratamento, retorna-se ao diâmetro original (dn 50) encaminhando em sentido a saída do sistema.

[047]. O volume de tratamento de um tubo, considerando o diâmetro da tubulação e seu comprimento de 2 metros equivale ao tratamento de aproximadamente 2,5 L, assim o volume total de tratamento para a configuração piloto é de 30 L. O sistema pode ser aumentado ou diminuído considerando uma nova disposição de feixe

de tubos, desde que seja determinada uma nova bomba que suporte o funcionamento do sistema.

[048]. O bombeamento foi representado pela utilização de uma bomba centrífuga, porém este equipamento pode ser substituído por uma bomba diafragma ou de deslocamento positivo. Como não haverá a passagem das microalgas ou esferas imobilizadas pelo sistema de bombeamento, não há possibilidade de perda de biomassa devido ao sistema de bombeamento, assim aumentando o espectro de escolha de possíveis bombas a serem utilizadas.

[049]. Apesar de as microalgas estarem imobilizadas ainda poderia ocorrer a passagem de esferas ao longo da tubulação, para evitar esse problema foram equipadas válvulas tanto na parte superior quanto na inferior, que possuem um sistema de filtragem por malha metálica furada. Esse sistema evita sujeiras decorrentes do processo de tratamento primário e impede que esferas passem para a saída do sistema.

[050]. (iii) Normalmente, os cultivos de microalgas imobilizadas possuem por objetivo a produção de biomassa, compostos energéticos ou tratamento de efluentes. A taxa de crescimento das microalgas imobilizadas é menor, quando comparada às microalgas livres, porém, as microalgas imobilizadas permanecem mais tempo em crescimento exponencial e demoram a atingir o platô (fase estacionária), assim possuindo uma maior capacidade biorremediadora.

[051]. O sistema proposto faz parte de um tratamento secundário de efluente, o qual não visa substituir os métodos convencionais de tratamento, e sim complementá-los. O tratamento pode ser realizado em batelada, batelada alimentada ou contínuo. Os reatores de leito fixo ou fluidizado são ideais para o tratamento de efluentes utilizando microalgas imobilizadas; basicamente, é constituído de uma coluna vertical de

secção circular, onde as microalgas são contidas. Assim, o efluente é bombeado para dentro do fotobiorreator, tratado pelas microalgas e retirado pela extremidade oposta. Os principais compostos a serem biorremediados pelas microalgas no tratamento de efluentes são os derivados de nitrogênio e fósforo. Dependendo do modo de operação, é possível alcançar mais de 90% de remoção desses nutrientes.

[052]. (iv) Após a utilização no sistema de tratamentos de efluentes, as esferas de microalgas não são consideradas como um resíduo, e sim como um subproduto que serve como matéria-prima para outros processos. As microalgas imobilizadas podem ser consideradas como fontes de ácidos graxos e hidrocarbonetos para produção de biocombustíveis, como o biodiesel de microalga. Como as microalgas também são ótimas fontes de proteínas, as esferas também podem ser empregadas como aditivos na alimentação de animais, ou utilizadas na formulação de ração animal. Contudo, como as esferas são constituídas de biopolímeros, logo são biodegradáveis, e podem ser destinadas para o setor da agroindústria como biofertilizantes, fornecendo nitrogênio e indutores de crescimento para as plantas, resultando em culturas com maior produtividade sem danos ambientais.

Exemplos

[053]. Um exemplo de realização da presente invenção direcionada para o tratamento de águas residuárias a partir de microalgas imobilizadas consiste nas etapas de:

1) seleção e adaptação da microalga as condições operacionais do sistema de pH, temperatura, intensidade luminosa e agitação por aeração de ar comprimido;

- 2) cultivo prévio da espécie em meio sintético CHU e posterior imobilização para o aprisionamento das células;
- 3) inserção das esferas geradas na etapa 2 no fotobiorreator juntamente com o meio de cultura líquido/efluente.
- 4) recuperação das esferas de microalgas cultivadas em efluente e destinação comercial.

[054]. Em um aspecto particular, a cultura estoque da microalga *Tetradismus obliquus* foi mantida e propagada em meio sintético CHU, nas condições de 22°C, aeração com vazão volumétrica de 1 L min⁻¹, iluminação de 1 klux e pH ajustado para aproximadamente 7,0-8,0. O inoculo inicial foi cultivado por 15 dias em meio fotoautotrófico. A microalga foi monitorada a cada 24 horas a partir da contagem do número de células e determinação de biomassa seca pelo método gravimétrico, o que permitiu estabelecer a curva de crescimento durante os ensaios.

[055]. O método de imobilização é utilizado após o cultivo prévio, onde 160 ml do volume do meio contendo as microalgas foi coletado para centrifugação e ressuspensão em um volume de 200 ml, e posteriormente misturado em uma solução estéril contendo 1 g de alginato de sódio. Tal mistura foi injetada em uma bureta para ser gotejada em uma solução contendo cloreto de cálcio (CaCl₂) 0,4 M, sob agitação constante (200 rpm) com o auxílio de um agitador magnético para estabilizar os grânulos. As esferas foram formadas imediatamente e, logo após, revestidas com uma solução adicional de nanopartículas de quitosana. A quitosana foi modificada por meio da gelificação iônica com heptamolibdato de amônia; 5 g de quitosana foram dissolvidas em uma solução de 2% de ácido acético. As esferas foram banhadas com a solução sob agitação uniforme por 30 minutos de modo a fortalecer e

estabilizar os grânulos. Após o tempo decorrido, as esferas foram brevemente inseridas em uma solução de heptamolibdato de amônia a 2 g L^{-1} , e logo lavadas para a remoção do excesso do composto. Finalmente, formaram-se as esferas com tamanho de aproximadamente 3 a 5 mm.

[056]. Em uma forma de realização da invenção, as esferas de microalgas imobilizadas são inoculadas no fotobiorreator da etapa 3, caracterizado pelo sistema híbrido (terra-água) ou pelo cartucho modular, equipamentos do presente invento.

[057]. Em uma modalidade da invenção, o meio de cultura compreende o efluente oriundo da suinocultura, rico em compostos nitrogenados e fosfatados.

[058]. Em uma modalidade da presente invenção, finalizada a etapa do tratamento do efluente, as esferas contendo microalgas imobilizadas são destinadas para usos na agricultura, como biofertilizantes. As esferas são enterradas na base das plantas, liberando gradativamente nutrientes e indutores, promovendo o crescimento e uma melhor produtividade dos cultivares.

[059]. A título de exemplificação, um evento real do presente invento pode ser descrito através da Figura 1, que representa a microalga *Tetrademus obliquus* imobilizada em alginato de sódio crescendo sob condições fotoautotróficas em fotobiorreator experimental.

[060]. A descrição acima é apenas uma das modalidades de concretização da presente invenção e o seu escopo técnico não pode de forma alguma estar circunscrito à mesma. Quaisquer características particulares, bem como outras formas de realização nela introduzidas, incluindo alterações ou substituições, serão evidenciadas a partir de práticas e especificações do bioprocesso aqui revelado. Pretende-se,

portanto, que o exemplo descrito seja considerado meramente como objeto para facilitar a compreensão, tendo em vista que o real escopo da presente invenção é indicado pelas reivindicações.

Descrição das Figuras

[061]. Figura 1 – Mostra uma representação completa do procedimento de imobilização da microalga *Tetradismus obliquus* em matriz de alginato de sódio. A referência da figura é (A) a microalga condicionada no meio reacional; (B) uma imagem de microscópio óptico observada evidenciando o crescimento das células microalgais no interior da esfera; (C) as esferas propriamente ditas retidas na malha de uma peneira após o processo de filtração simples; (D) a operação do processo de imobilização em batelada.

[062]. Figura 2 – Representação esquemática da unidade básica do fotobiorreator híbrido (terra-água) com o indicativo das suas subunidades: módulos 1A (terrestre) e 1B (flutuante) utilizados em lagos e corpos d'água e 2 (reservatório/degasser).

[063]. A Figura 3 – Perspectiva frontal das diferentes formas de utilização do fotobiorreator híbrido (terra-água) proposto, considerando a escalabilidade dos sistemas de cultivo, escalabilidade da produção e o seu uso misto. A referência da figura é (A) o arranjo inicial de 6 m³; (B) o arranjo parcial de 11 m³; (C) o sistema completo de 21 m³; (D) a unidade com 3 sistemas completos de 63 m³; (E) o arranjo em reservatório com 84 m³.

[064]. Figura 4 – Fotobiorreator baseado em cartuchos modulares, mostrando a visão geral da disposição das unidades dos módulos no sistema.

[065]. Figura 5 – Demonstra as subunidades do fotobiorreator baseado em cartuchos modulares. A referência da figura é (1) um conector tê com diâmetro dn 50; (2) um cotovelo 90° no diâmetro dn 50; (3) válvulas de gaveta com diâmetro dn 50; (4) válvulas de retenção de esferas e sujidades para o diâmetro dn 40; (5) um divisor de fluxo em 3 vias, com entrada equivalente a dn 50 e saídas de dn 40; (6) um cotovelo 90° no dn 40; (7) tubos em PVC cristal, com dn 40 com comprimento de 2 metros.

[066]. Figuras 6 e 7 – Representação da modelagem do padrão de consumo de nutrientes (nitratos e fosfatos) da microalga imobilizada em regime de batelada. Os gráficos elucidam o potencial biorremediador das microalgas, que em apenas 6 dias de tratamento já são capazes de reduzir significativamente a concentração dos poluentes.

REIVINDICAÇÕES

1) FOTOBIORREATOR DE MICROALGAS LIVRES E/OU IMOBILIZADAS **caracterizado por** possuir os seguintes componentes:

a) Materiais transparentes compreendendo vidro, polímeros reforçados ou não, a base de polietileno, poliestireno, polipropileno, policarbonato, PVC, PTFE, PET, PETG, poli ácido lático e acrílico;

b) Instrumentação e controle de líquidos e gases através de válvula do tipo gaveta, globo, pistão, agulha, esfera, diafragma e/ou válvula de fundo;

c) Acessórios de bombeamento ou transferência de efluente compreenderem bombas centrífugas, de deslocamento positivo, axiais, heliocentrífugas e/ou volumétricas rotativas;

d) Modo de operação descontínua, semi-contínua, com ou sem reciclo de microalgas e/ou efluentes, em escala laboratorial, piloto e industrial;

e) Unidades e/ou subunidades para cultivo e armazenamento de microalgas livres e/ou imobilizadas, definidas como módulos, compreendendo geometrias retangulares, redondas e/ou cilíndricas.

2) FOTOBIORREATOR HÍBRIDO MODULAR, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** possuir os seguintes componentes adicionais aos componentes da reivindicação 1:

a) *Air-lift* ou leito fluidizado acoplado a módulos flutuantes ou terrestres, construídos em material plástico;

b) Módulos flutuantes constituídos de filme plástico selado e transparente, dispensando suportes ou sistemas de sustentação;

c) Zona desgaseificadora (*degasser*) compreendendo tubos transparentes verticais para a alimentação e remoção de ar.

3) FOTOBIORREATOR BASEADO EM CARTUCHOS MODULARES, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** possuir os seguintes componentes adicionais aos componentes da reivindicação 1:

a) Cartuchos compreendendo módulos de fotobiorreator do tipo leito fixo ou fluidizado, dispostos em serie ou paralelo, de fluxo ascendente ou descendente;

b) Malha de aço para retenção de microalgas imobilizadas dentro dos módulos;

c) Módulo constituído de uma coluna vertical de secção circular;

d) Válvula de amostragem para microalgas imobilizadas;

e) Escalonamento do reator em função do número e disposição dos cartuchos.

4) PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES A PARTIR DE MICROALGAS LIVRES OU IMOBILIZADAS **caracterizado por** conter as seguintes etapas:

a) Cultivo de microalgas fotoautotrófico, fotoheterotrófico, heterotrófico e/ou mixotrófico, preferencialmente da microalga *Tetradismus obliquus* e dos seguintes gêneros: *Tetradismus* sp., *Scenedesmus* sp., *Chlorella* sp., *Spirulina* sp., *Anabaena* sp., *Skeletonema* sp., *Chaetoceros* sp., *Anacystis* sp., *Euglena* sp., *Cryptocodinium* sp., *Haematococcus pluialis*, *Dunaliella* sp., *Chlamydomonas* sp., *Rhodella*, *Tetraedrom*, *Trichodesmium*, *Isochrysis galbana*, *Tetraselmis* sp., *Oscillatoria* sp., *Nostoc muscorum*, *Synechococcus*, *Botryococcus braunii*, bem como outros gêneros e espécies de microalgas e cianobactérias, combinações e/ou consórcios de espécies de microalgas e bactérias;

b) Imobilização de microalgas a partir de biomassa seca de microalgas, biomassa úmida e/ou cultivo de microalgas, com ou sem suporte, por técnicas de adsorção, auto-imobilização, imobilização na matriz ou encapsulamento, utilizando polímeros e/ou biopolímeros,

incluindo PHB, PHA, PHV, PHB-HV, carragena, alginato, quitosana, celulose e ágar, para formação e uso de esferas, microesferas, cápsulas e microcápsulas;

c) Tratamento de efluentes em fotobiorreator híbrido (terra-água) e/ou cartuchos modulares, como sistema de tratamento secundário e/ou terciário de águas residuárias agrícolas, industriais, domésticas e de processamento de aves, suínos e/ou peixe;

d) Colheita de microalgas livres ou imobilizadas obtidas após o tratamento de efluentes, caracterizadas como produto ou subproduto do processo.

5) USO DAS MICROALGAS LIVRES E/OU IMOBILIZADAS, de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado pela** aplicação em rações animais, como biocombustíveis, biofertilizantes, cosméticos, alimentação humana e química fina.

6) USO DAS MICROALGAS LIVRES E/OU IMOBILIZADAS, de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado pela** aplicação em produtos de biorrefinaria de microalga, tais como proteínas, aminoácidos, óleos e ácidos graxos, carboidratos e exopolissacarídeos, pigmentos, minerais e ácidos nucleicos.

7) USO DAS MICROALGAS LIVRES E/OU IMOBILIZADAS, de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado pela** aplicação na modificação dos produtos ou subprodutos por técnicas de *spraydryer*, liofilização e cristalização.

FIGURAS

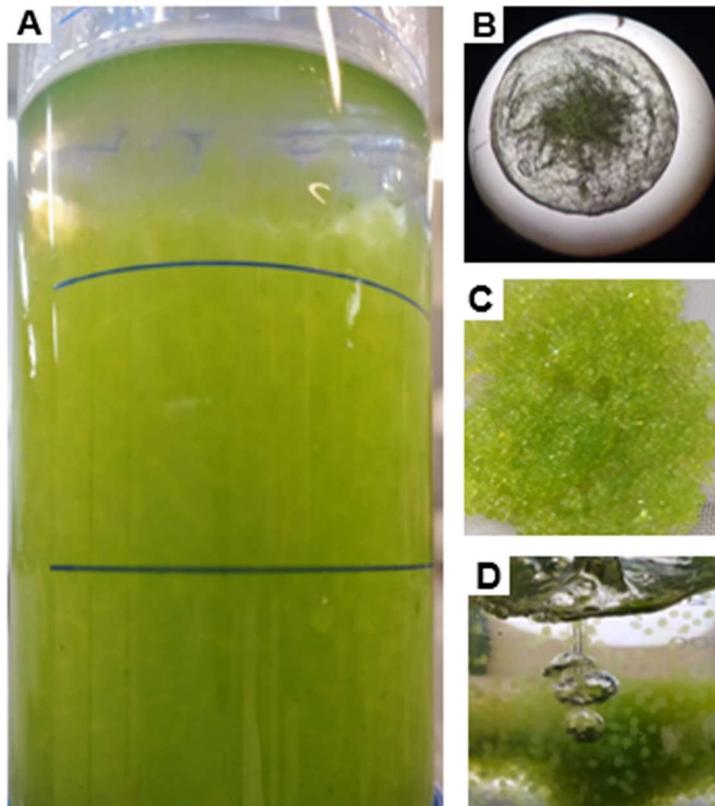


Figura – 1

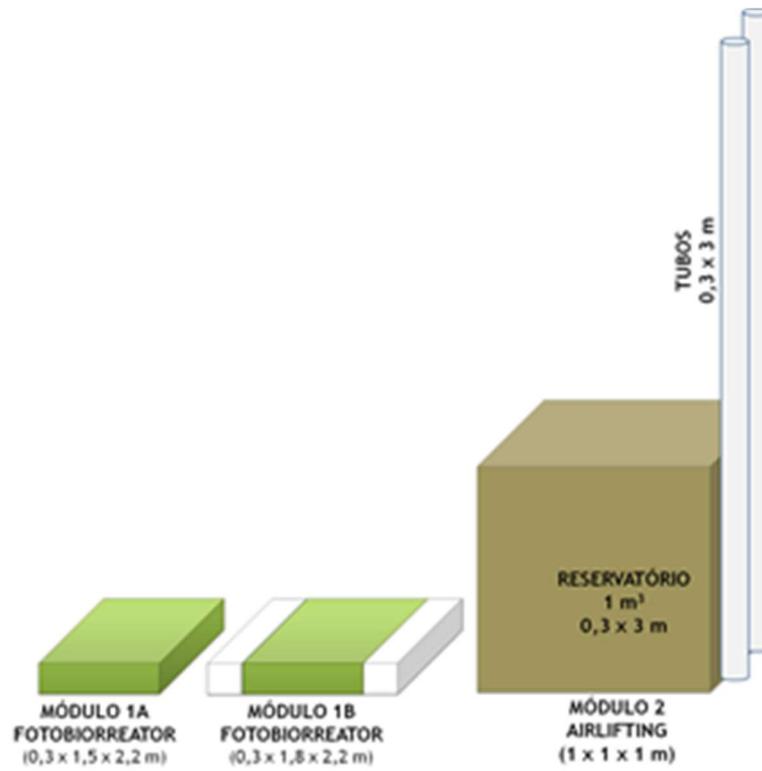


Figura – 2

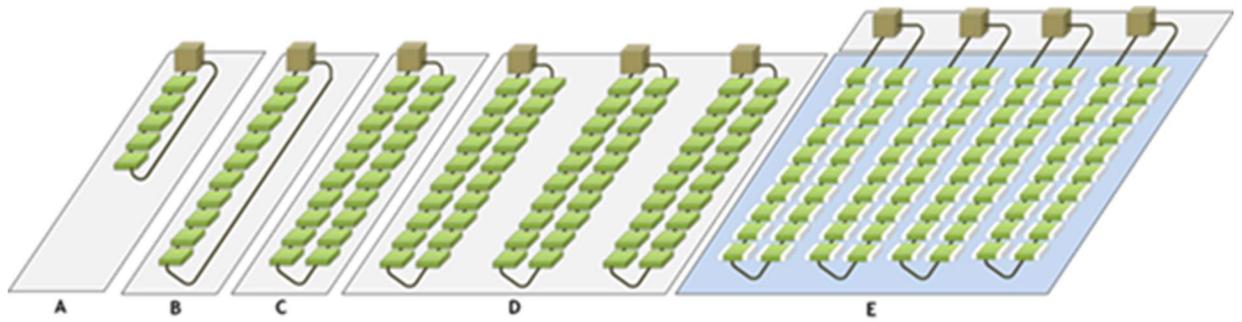


Figura – 3



Figura – 4

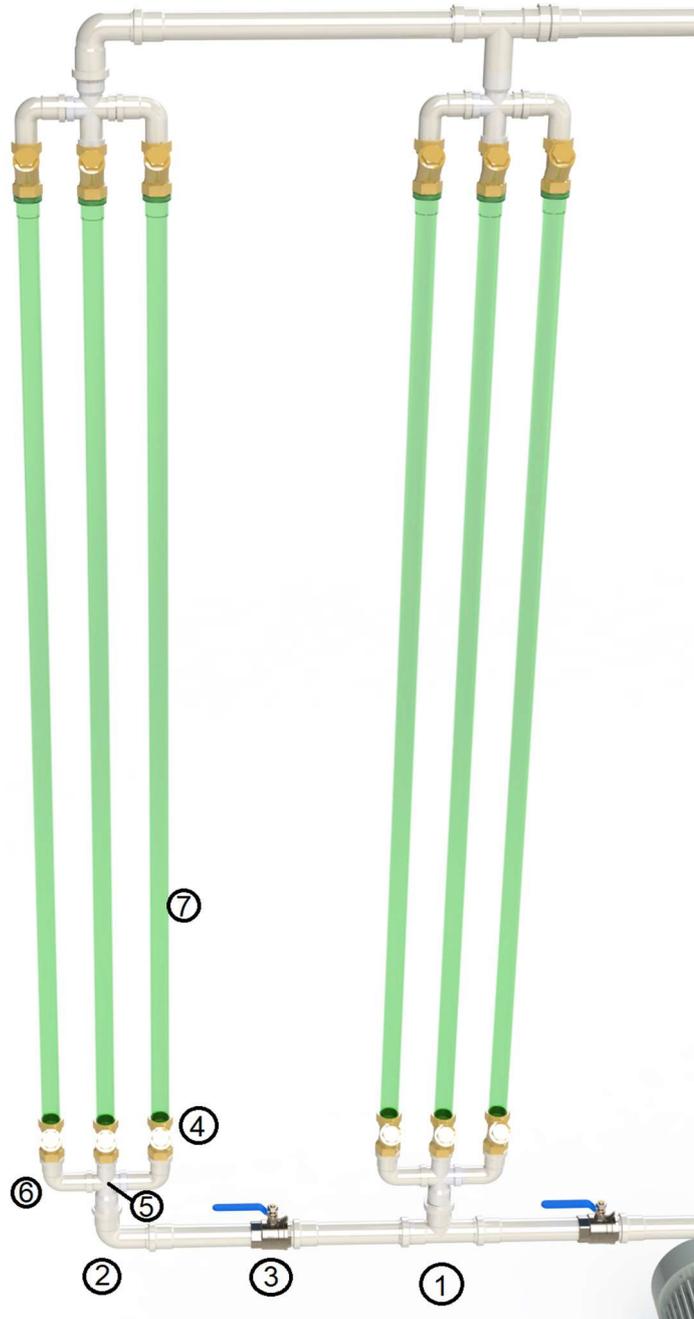


Figura – 5

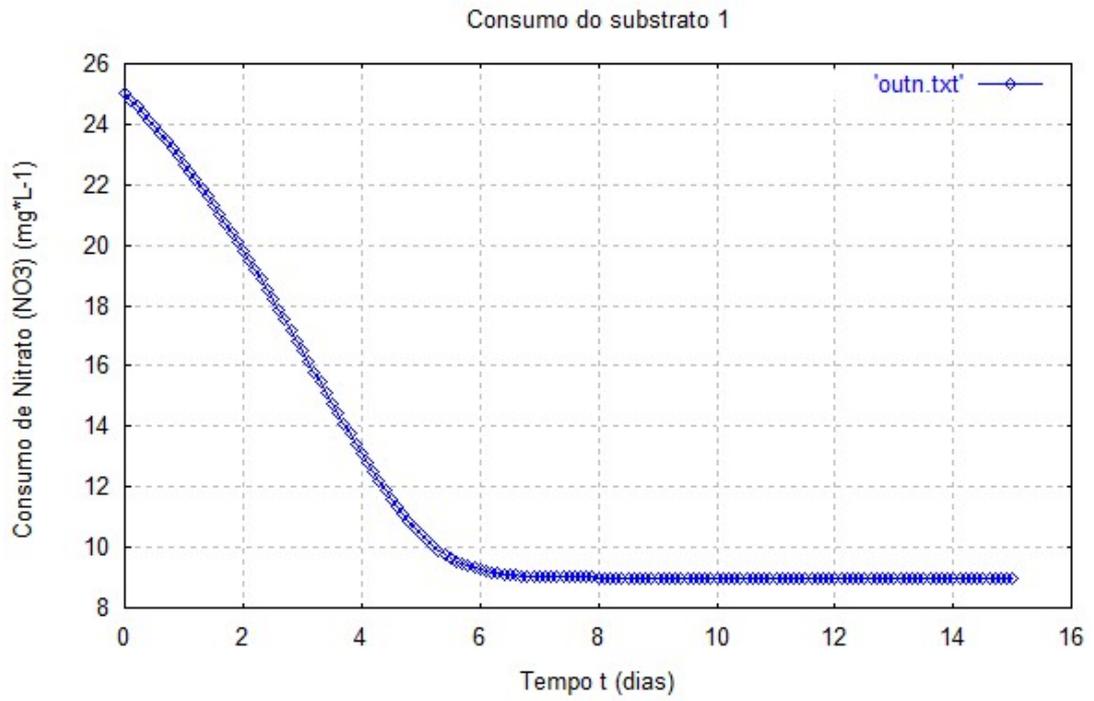


Figura – 6

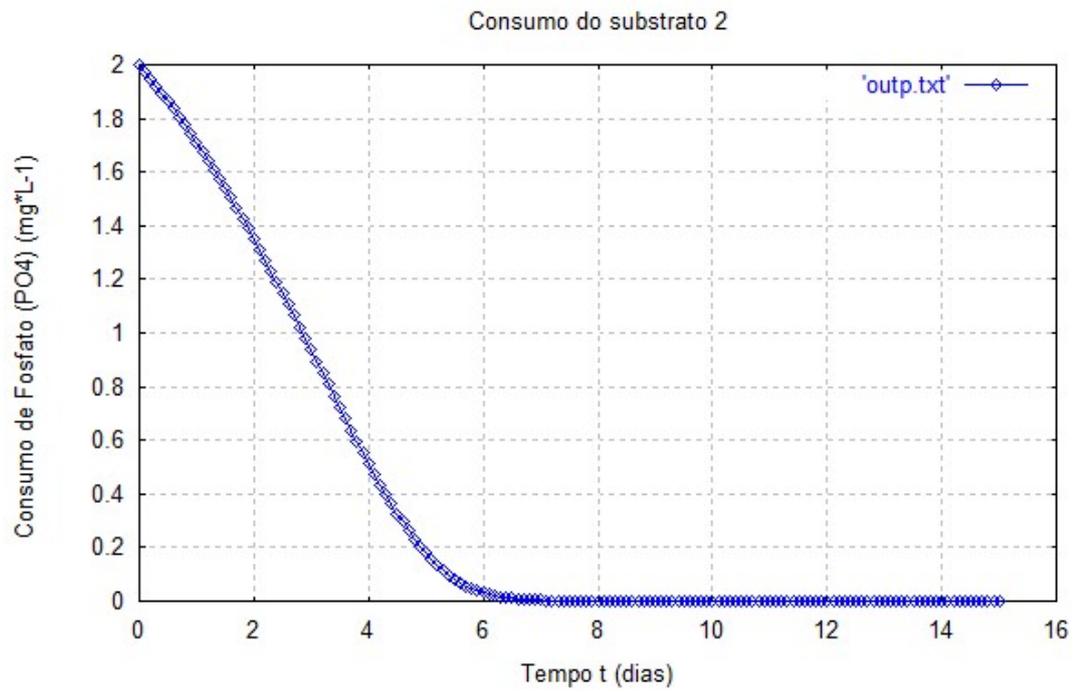


Figura – 7

RESUMO**FOTOBIORREATOR MODULAR HÍBRIDO (TERRA-ÁGUA) E/OU CARTUCHOS PARA O CULTIVO DE MICROALGAS LIVRES OU IMOBILIZADAS EM BIOPOLÍMEROS APLICADO NO PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES, GERAÇÃO DE PRODUTOS E SEUS USOS**

A invenção encontra seu campo de aplicação dentre as tecnologias para produção de biomassa (bioenergia) e que diminuam ou eliminem o impacto ambiental. A presente patente divulga um tipo de plataforma destinada ao tratamento de forma simultânea de águas residuárias a partir de microalgas livres ou immobilizadas em matrizes biopoliméricas, projeto de novos fotobiorreatores, obtenção e utilização dos bioprodutos que servem como matéria-prima e/ou insumos finais de interesse industrial. As vantagens do bioprocessamento consistem em soluções tecnológicas que possibilitem a biorremediação, fácil remoção das microalgas do efluente, aprimoramento das características intrínsecas do microrganismo, exploração comercial dos produtos formados e, essencialmente, a fácil ampliação dos sistemas de cultivo, sua operação e manutenção, podendo ser implementado em novas instalações ou adaptado a processos já existentes.