



República Federativa do Brasil
Ministério da Indústria, Comércio Exterior
e Serviços
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) BR 202012000227-8 Y1

(22) Data do Depósito: 13/12/2011

(45) Data de Concessão: 06/02/2018



(54) Título: REATOR FOTOQUÍMICO INTELIGENTE

(51) Int.Cl.: B01J 19/12

(52) CPC: B01J 19/122

(73) Titular(es): FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP

(72) Inventor(es): ALZIR AZEVEDO BATISTA; JOÃO FERNANDO POSSATTO

REATOR FOTOQUÍMICO INTELIGENTE

O presente pedido de patente de Modelo de Utilidade trata de um reator fotoquímico inteligente que utiliza diodos emissores de luz (LEDs) como fonte de excitação luminosa e é destinado a processos físicos ou químicos sob ação da luz.

O reator fotoquímico inteligente é constituído por um sistema embarcado microcontrolado, que possibilita a interação com o usuário, permitindo a escolha dos LEDs, bem como o controle de intensidade luminosa dos mesmos, com banda de emissão adequada para aplicação, programação do tempo de excitação, monitoramento da temperatura da amostra e controle da velocidade de rotação do agitador.

Em uma modalidade, o reator da invenção contém vários LEDs com uma única cor (banda de emissão).

Em outra modalidade o reator da invenção contém LEDs de várias cores, atendendo à necessidade do usuário.

Os LEDs utilizados no reator proposto possuem bandas de emissão que vão deste o UV-Vis até IV (infravermelho).

O pedido de patente brasileiro BR0401235-6 A2 trata de um reator fotoquímico segmentado com lâmpadas distribuídas em colméia para reações sequenciais ou em única etapa que utiliza lâmpadas como fonte de excitação luminosa. Ainda, o design estrutural e eletrônico do presente pedido difere totalmente daquele apresentado no pedido BR0401235-6 A2.

As patentes norte-americanas U.S. 3.993.911, 4.043.886 e 6.299.844 tratam de reatores fotoquímicos. Todos os reatores descritos nesses documentos de patente utilizam como fonte de excitação luminosa lâmpadas comuns.

A publicação europeia EP2288578 A1 trata de um reator fotoquímico, uma tela luminescente e um sistema de processamento fotoquímico, a fonte luminosa sendo igualmente constituída de lâmpadas comuns.

A publicação chinesa CN201147688-Y trata de um reator fotoquímico com dispositivo emissor de luz como fonte de luz irradiante para uso fotoquímico. O reator compreende um reator de vidro, uma unidade para circulação de solução, uma unidade de controle analógica e fonte de luz, a
5 fonte de luz sendo um conjunto LED para irradiação de luz, montado no lado interno do corpo em forma de barril. O uso do reator fotoquímico é em aplicações fotoquímicas, modificações superficiais de nanotubos, síntese de partículas de nano-ouro, produção de hidrogênio por fotólise da água, tratamento de águas servidas com fotocatalise e síntese de composição
10 orgânica. O reator objeto desta publicação chinesa não possui nenhum sistema eletrônico inteligente, ou seja, apenas possui uma fonte de alimentação elétrica para ligar os LEDs, sem nenhum tipo de controle de intensidade luminosa. Apenas liga os LEDs com uma intensidade luminosa definida e assim permanece.

15 A publicação chinesa CN 101776588 trata de um sistema reacional para fotocatalise em fase líquida, de baixo consumo e elevada estabilidade à base de LED. O sistema reacional resulta da integração de duas partes de uma câmara reacional para fotocatalise e um sistema de controle de uma fonte de luz LED.

20 A publicação coreana KR 20090055170 A trata de um fotobioreator cilíndrico para induzir a cultura em massa de microalgas usando LED cilíndrico, fonte de luz circular, e fonte de luz helicoidal. O reator é provido de orifício de entrada e de saída de gás para utilização na reação de cultura de algas. O arranjo estrutural do bioreator descrito difere daquele utilizado
25 no presente pedido de Modelo de Utilidade.

O artigo por Ghosh, J.P. et al. Characterization of an LED Based Photoreactor to Degrade 4-Chlorophenol in an Aqueous Medium Using Coumarin (C-343) Sensitized TiO₂ *J. Phys. Chem. A*, **2008**, *112* (41), pp 10310–10314 descreve uma avaliação detalhada do desempenho de um

fotorreator simples à base de LEDs de alta intensidade que explora uma faixa estreita de comprimentos de onda do LED para combinar com o espectro de um corante em um sistema fotocatalítico. Este artigo não detalha a estrutura do reator LED utilizado.

5 A publicação internacional WO WO2009129993 A1 descreve um reator para irradiar luz em um meio fluido, o reator compreendendo pelo menos uma fonte de luz emitindo luz em comprimento de onda entre 200 nm e 500 nm, pelo menos um corpo oco tendo uma parede que é pelo menos parcialmente permeável a luz deste comprimento de onda, e de
10 preferência um alojamento que envolve o pelo menos um corpo oco. A pelo menos uma fonte de luz é um LED. O reator é usado como reator de oxidação e síntese e para desinfetar meios líquidos. O design estrutural e eletrônico do presente pedido difere totalmente daqueles desta publicação internacional.

15 O pedido publicado Norte-Americano US 20100190227 A1 trata de um reator fotoquímico para a síntese de algas que utiliza LED como fonte luminosa. Tal reator é especialmente adaptado para a síntese de algas e, portanto, o arranjo estrutural do mesmo não representa anterioridade para o arranjo proposto no presente pedido.

20 O pedido publicado Norte-Americano U.S. 2011076196 A1 trata de um reator fotoquímico utilizando como fonte de excitação luminosa lâmpadas UV.

O Modelo de Utilidade MU 8801262-0 trata de dispositivos introduzidos na construção de reatores ultravioleta (UV) para a purificação
25 de água em sistema fechado. O design construtivo e eletrônico do presente pedido de patente de Modelo de Utilidade difere totalmente daquele proposto no MU citado, onde são empregadas lâmpadas UV como fonte de energia luminosa e não LEDs.

Estes documentos da literatura não descrevem nem antecipam a matéria do presente pedido de Modelo de Utilidade, relativa a um reator fotoquímico inteligente portátil de bancada.

O reator conforme o presente Modelo compreende uma câmara reacional de formato geralmente cilíndrico usualmente em metal ou plástico de engenharia, a câmara sendo dotada de orifícios a intervalos regulares em toda a estrutura da mesma e se destina a alojar as fontes de luz LED. Em geral a câmara reacional contém oito conjuntos de LEDs com bandas de emissões (Cores) diferentes entre si, sendo que cada conjunto contém 40 LEDs. Os 40 LEDs são distribuídos em quatro colunas verticais com dez LEDs cada, equidistantes de 90° no interior da câmara reacional cilíndrica.

Os oito tipos de LEDs são diferentes entre si pela banda de emissão (50nm) característica de cada um, e correspondendo a uma determinada cor.

A fim de fazer incidir a luz dos LEDs sobre o recipiente que contém o meio reacional que se deseja submeter à reação fotoquímica, cada LED é acomodado em um furo da câmara reacional.

O reator do presente Modelo compreende:

- Câmara reacional de formato geralmente cilíndrico;
- Recipiente para compostos a serem irradiados;
- Base de suporte da dita câmara;
- Alojamento para conter a dita câmara e circuitos eletrônicos;
- LEDs;
- Tampa acoplada ao alojamento para isolar a câmara reacional da luz externa.

O reator fotoquímico objeto do presente Modelo compreende ainda uma interface de saída que apresenta, de forma clara e objetiva, os dados do sistema para o usuário do equipamento. A título de exemplo, foi adotado o *display LCD 2x16* (duas linhas e dezesseis colunas).

Ainda, a fim de promover uma interface o mais simples possível para proporcionar ao usuário entrar com os parâmetros do sistema de forma simplificada e intuitiva, a configuração adotada foi a de dois potenciômetros digitais (*encoder* digital) e um botão de liga/desliga.

5 Para obter um *feedback* da temperatura do compartimento de amostra, é instalado um sensor de temperatura na base, com temperatura na faixa de medição de -55 a 125°C, com precisão de 0,5 graus toda vez que é solicitado por um microcontrolador.

10 O controle de intensidade luminosa que possibilita o controle da cinética das reações é efetuado com auxílio da tecnologia de modulação por largura de pulso ou *PWM* (*Pulse-Width Modulation*).

O reator do presente Modelo é dotado de *hardware* e *software* embarcados. Todos os componentes eletrônicos são comerciais e não constituem objeto do presente Modelo de Utilidade.

15 O sistema embarcado do reator fotoquímico a LEDs do presente Modelo compreende placa de controle, placa de interface gráfica, placa dos LEDs e *firmware* do microcontrolador.

20 As informações obtidas de todos os componentes estão armazenadas em arquivos eletrônicos de modo que possam a qualquer momento ser resgatadas, modificadas e atualizadas.

Nos reatores fotoquímicos do estado da técnica não são empregados controles automáticos. Todas as intervenções feitas nestes sistemas são executadas de forma manual, por exemplo, para trocar o comprimento de onda de excitação é necessário substituir as lâmpadas manualmente e o
25 controle da intensidade luminosa é feito aumentando ou diminuindo o número de lâmpadas ativas, assim como todos os outros recursos são necessariamente implementados de forma manual.

Já no Reator fotoquímico a LEDs conforme o presente Modelo, com a implementação de um sistema digital microcontrolado, é provida uma serie de recursos com controle automático do sistema, tais como:

- 5 – Seleção de comprimento de onda de excitação luminosa através de uma interface digital, sem nenhuma interação mecânica, com a possibilidade de até oito opções de diferentes comprimentos de onda;
- Controle eletrônico da intensidade luminosa numa escala de 0 a 100%.
- 10 – Programação eletrônica do tempo em que a amostra ficará exposta à radiação luminosa;
- Monitoramento da temperatura no interior da câmara reacional;
- Ativação do agitador magnético e informação da velocidade de rotação do mesmo.

Estas vantagens e facilidades são a base para que se possa chamar o reator fotoquímico objeto do presente Modelo de Reator Inteligente.

O Modelo de Utilidade proposto é descrito em relação às Figuras anexas, em que a Figura 1 é uma vista geral do Reator Fotoquímico inteligente, a Figura 2 é um corte do dito reator mostrando a câmara reacional e recipiente contenedor dos reagentes a serem irradiados pelos LEDs, a Figura 3 é uma vista geral da parte interna do reator fotoquímico inteligente da invenção, a Figura 4 mostra as curvas obtidas pelo monitoramento da cinética de reação do composto *trans*-[RuCl₂(dppb)(bipy)] no equipamento Rayonet®, a Figura 5 mostra as curvas obtidas pelo monitoramento da cinética de reação do composto *trans*-[RuCl₂(dppb)(bipy)] no Reator Fotoquímico a LEDs do presente Modelo, a Figura 6 mostra o espectro de emissão da lâmpada fluorescente e o espectro e emissão do LED, tal como utilizados nos Reatores Fotoquímicos comparados, Rayonet® e a LEDs do presente Modelo, a Figura 7 mostra o espectro de emissão luminosa do LED UV-A 374 nm e aquele da lâmpada fluorescente 350 nm utilizados no experimento, a Figura 8 mostra o Espectro de

absorção atômica do actinômetro Ferrioxalato de Potássio no interior do Reator Fotoquímico a LEDs, a Figura 9 mostra o Espectro de absorção atômica do actinômetro Ferrioxalato de Potássio no interior do Reator Fotoquímico da Rayonet®, a Figura 10 mostra o Espectro de absorção atômica do actinômetro Ferrioxalato de Potássio utilizando 4 tipos de LEDs com pico de emissão diferentes, e a Figura 11 mostra o Espectro de absorção atômica do actinômetro Ferrioxalato de Potássio utilizando como fonte de excitação luminosa: LEDs com pico de emissão luminosa em 513 nm e lâmpadas fluorescentes com picos de excitação luminosa em 575 nm.

10 Assim, a Figura 1 é uma vista do reator fotoquímico inteligente (100) da invenção.

A Figura 2 é um corte do reator (100) mostrando em (10) a câmara reacional de formato geralmente cilíndrico e dotada de conjuntos de LEDs (11) de alto brilho para irradiação do material que se deseja fazer reagir de modo fotoquímico.

15 A câmara (10) é dotada de placa eletrônica (14) onde os LEDs (11) estão fixados, estes estando por sua vez inseridos em furos verticais dispostos ao longo da estrutura da mesma. Não é possível indicar um numeral em separado para os furos onde está inserida a placa eletrônica (14), pois os furos se confundem com os LEDs (11).

A estabilidade da câmara reacional (10) é realizada com auxílio de um flange (13) adaptado à borda superior e à borda inferior da mesma. O flange (13) é fixado à câmara (10) com auxílio de quaisquer meios de fixação (16). A câmara (10) é apoiada sobre suportes (51) para fixação da dita câmara (10) à base de sustentação (50) do dito reator fotoquímico (100).

25 Os suportes (51) de apoio mantêm a mesma isolada da base (50) do dito reator fotoquímico (100).

No interior da câmara reacional (10) encontra-se o recipiente (12) destinado a conter os compostos submetidos à reação fotoquímica. O

conteúdo do recipiente **(12)** é agitado com auxílio de agitador magnético **(40)**.

O recipiente **(12)** é geralmente feito de vidro, para maior transparência à radiação emitida pelos LEDs. No entanto, outros materiais podem ser
5 usados, desde que apresentem alto grau de transparência.

O recipiente **(12)** apresenta qualquer formato adequado para inserção na câmara **(10)** e é apoiado sobre um suporte ou base de sustentação **(15)**.

A Figura 2 mostra ainda o display de LCD **(21)**, o *encoder* digital **(22)** e o botão de start **(23)**.

10 Em funcionamento, o display de LCD **(21)** tem uma função parecida à de um monitor de computador, apresentando ao usuário do reator fotoquímico **(100)** todas as informações relativas ao sistema, tais como: qual comprimento de onda está ativo no momento, a intensidade luminosa, a temperatura do interior da câmara reacional e a velocidade do agitador
15 magnético.

O *encoder* digital **(22)** tem a função de promover a entrada de dados para o sistema, semelhante a um teclado de computador. É através deste componente que o usuário informa ao sistema qual comprimento de onda deseja selecionar, qual a intensidade luminosa do comprimento de onda
20 selecionado e outras determinações.

O botão de start **(23)** se destina a iniciar a contagem regressiva do tempo durante o qual a amostra ficará exposta à radiação luminosa emitida pelos LEDs **(11)**.

O reator fotoquímico **(100)** é dotado de tampa **(30)** para isolar a
25 câmara reacional **(10)** da luz ambiente, deixando a câmara **(10)** e recipiente **(12)** sob a ação exclusiva da radiação emitida por LEDs **(11)** de alto brilho.

A Figura 3 é uma vista do reator fotoquímico **(100)** mostrando em **(13)** o flange de fixação da câmara reacional **(10)**, em **(14)** a placa eletrônica dos LEDs, em **(20)** a placa eletrônica para interface humana, em **(31)** o suporte

para fixação da tampa (30), em (50) a base de sustentação do reator fotoquímico (100), em (51) o suporte para fixação da câmara reacional (10), em (60) a placa eletrônica de controle microcontrolada, em (61) os circuitos integrados, em (62) o microcontrolador e em (70) a fonte de alimentação elétrica.

Em funcionamento, a placa eletrônica de controle (60) microcontrolada é responsável pela execução de todas as operações elétricas no reator fotoquímico (100) a LEDs (11). A placa eletrônica (60) compreende uma placa de circuito impresso para promover a fixação e interligação do microcontrolador (62), drivers de proteção e de potência. É nela que está alocado o cérebro eletrônico do sistema (microcontrolador), assim como todo o sistema de alimentação e chaveamento dos LEDs (11).

A placa eletrônica (60) também está interligada à placa de interface (20) com usuário, à fonte (70) de alimentação de tensão responsável pelo fornecimento das tensões DC de 5 e 12 V, a um sensor de temperatura (não representado) e ao gravador do microcontrolador (62) responsável pela gravação do software na memória do microcontrolador (62).

A placa eletrônica (20) para interface humana compreende uma placa de circuito impresso para promover a fixação do display (21) de LCD, dois *encoder* digitais (22) e o botão de start (23).

O conjunto destes componentes tem a função de agenciar a interface de entrada e saída de dados do sistema embarcado com o usuário do reator fotoquímico inteligente (100).

É através deste sistema que o usuário irá selecionar os parâmetros de funcionamento do equipamento, tais como, selecionar o banco de LEDs (11) que será ativado, programar a potência luminosa dos LEDs (11) numa escala de 0 a 100%, determinar o tempo em horas e minutos que o sistema estará ativo e determinar a velocidade do agitador magnético (40).

Por outro lado o sistema embarcado irá implementar todos os parâmetros indicados pelo usuário e imprimir no display **(21)** de LCD um *feedback* em tempo real de todos parâmetros citados acima e mais a temperatura do composto contido no interior do recipiente **(12)**, este estando apoiado sobre suporte **(15)**.

A placa eletrônica **(14)** dos LEDs **(11)** compreende uma placa de circuito impresso para prover a fixação dos LEDs **(11)** de forma coerente e alinhada, constituindo-se cada placa de circuito impresso em total de 10 LEDs **(11)** idênticos (mesma cor) equidistantes e interligados em paralelo uns aos outros.

Para utilizar o reator fotoquímico inteligente **(100)**, o usuário prepara inicialmente os compostos a serem submetidos à radiação fotoquímica provida pelos LEDs **(11)** e insere os mesmos no recipiente **(12)** que é colocado no interior da câmara reacional **(10)**.

A tampa **(30)** do reator **(100)** é devidamente fechada para impedir entrada de luz no interior da câmara **(10)**.

Em seguida, com auxílio dos dois *encoders* digitais **(22)** informa ao sistema qual comprimento de onda deseja selecionar, qual a intensidade luminosa do comprimento de onda selecionado e outras determinações necessárias para conduzir a reação fotoquímica programada, o usuário também tem a opção de programar o tempo de reação e acionar o botão de start **(23)** para iniciar a contagem de tempo. Através do display **(21)** de LCD o usuário verifica as informações relativas ao sistema, tais como: qual comprimento de onda está ativo no momento, a intensidade luminosa, a temperatura do interior da câmara reacional **(10)**, a velocidade do agitador magnético **(40)** e tempo de reação programado.

Uma vez selecionados os parâmetros a reação fotoquímica ocorre e o usuário visualiza no display **(21)** de LCD um *feedback* em tempo real de

todos os parâmetros reacionais e mais a temperatura do meio reacional no recipiente (12).

Note-se ainda que, embora ainda não implementado no atual protótipo, um computador pode ser facilmente acoplado ao presente reator fotoquímico inteligente (100) através de uma comunicação USB ou RS232 com um computador.

A comprovação da pertinência do conceito desenvolvido para a finalidade desejada está descrita nos experimentos a seguir.

A eficácia do reator fotoquímico (100) do presente Modelo em reações fotoquímicas é submetida a testes comparativos com um reator comercial manufaturado pela empresa Rayonet®.

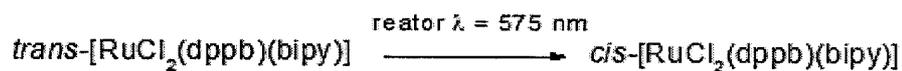
Os testes comparativos estão descritos a seguir e permitem comprovar o excelente desempenho do reator fotoquímico inteligente objeto do presente Modelo de Utilidade.

15 1. Isomerização do sistema *trans/cis*-[RuCl₂(dppb)(bipy)] sob a excitação luminosa de LEDs

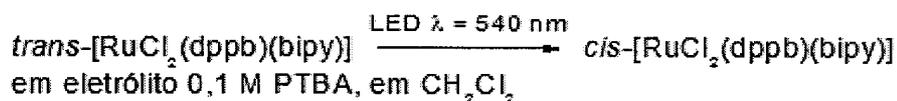
Com a finalidade de obter um indicativo do comportamento dos LEDs em comparação às Lâmpadas Fluorescentes comumente utilizadas é utilizada a reação de isomerização do sistema *trans/cis*-[RuCl₂(dppb)(bipy)] sob a excitação luminosa dos LEDs e como referência as lâmpadas fluorescentes em um reator comercial manufaturado pela Rayonet®.

A reação de isomerização deste sistema pode ser visualizada a partir da Equação (1) a seguir:

Equação 1



em eletrólito 0,1 M PTBA, em CH₂Cl₂



A cinética de reação é monitorada pela técnica de voltametria de pulso.

Para este teste são utilizadas amostras do composto *trans*-[RuCl₂(dppb)(bipy)] (1 x 10⁻³ mol.L⁻¹) em diclorometano em eletrólito 0,1 M PTBA em CH₂Cl₂.

Uma amostra é colocada no interior do Reator Fotoquímico de fabricação Rayonet®, configurado com 16 lâmpadas fluorescentes com pico de emissão em 575nm, por um período total de 5 minutos e monitorado por voltametria de pulso diferencial em intervalos de tempo de 30 segundos.

A Figura 4 mostra as curvas obtidas pelo monitoramento da cinética de reação de isomerização do composto [RuCl₂(dppb)(bipy)] no equipamento Rayonet®.

Através da análise da voltametria de pulso diferencial da Figura 4, é possível comprovar que a reação de isomerização do composto [RuCl₂(dppb)(bipy)] ocorreu e que a cinética desta reação é de **0,00976 s⁻¹**.

A outra amostra é colocada no interior do Reator Fotoquímico a LEDs conforme o presente Modelo, configurado com 12 fileiras contendo 5 LEDs cada com pico de emissão em 540 nm, por um período total de 5 minutos e monitorado por voltametria de pulso diferencial em intervalos de tempo de 30 segundos.

Através da análise da voltametria de pulso diferencial da Figura 5, é possível comprovar que a reação de isomerização do composto [RuCl₂(dppb)(bipy)] ocorreu no interior do Reator Fotoquímico a LEDs e a cinética desta reação é de **0,00641 s⁻¹**.

Este resultado comprova que é possível utilizar LEDs como fonte de excitação luminosa em reações fotoquímicas.

Analisando os resultados obtidos com os dois Reatores observa-se que a cinética da reação de isomerização do composto *trans*-

[RuCl₂(dppb)(bipy)] no Reator Fotoquímico da Rayonet® com lâmpadas fluorescentes é 34,33% mais rápida do que no Reator Fotoquímico a LEDs.

Vários fatores podem ter contribuído para esta diferença como, por exemplo: intensidade luminosa, geometria óptica e as seletividades das fontes de excitação luminosa.

A Figura 6 apresenta o espectro de emissão da lâmpada fluorescente e do LED. A observação desta Figura permite constatar que o espectro da lâmpada fluorescente é muito pouco seletivo quando comparado ao do LED, portando é possível que outros comprimentos de onda tenham contribuído para o aumento na cinética da reação.

Evidentemente não é interessante a utilização em Reatores Fotoquímicos de fontes de excitação luminosa que apresentam espectro de emissão muito largo quando se trata de reações fotoquímicas, pois alguns comprimentos de onda que não deveriam estar presentes na reação podem contribuir de forma negativa, propiciando a ocorrência de outras reações em paralelo.

2. Actinometria

A técnica de actinometria se destina a medir e comparar a intensidade luminosa no interior do Reator Fotoquímico Inteligente a LEDs e no de referência, o Reator Fotoquímico Rayonet®.

Para que esta comparação seja coerente, é necessário que a configuração de ambos os Reatores seja o mais semelhante possível. O primeiro passo é encontrar duas fontes de excitação luminosa (LEDs e lâmpadas fluorescentes) com picos de emissão próximos.

A Figura 7 mostra o espectro de emissão luminosa do LED UV-A 374 nm e aquele da lâmpada fluorescente 350 nm utilizados no experimento.

Verifica-se que os espectros são muito similares e estão dentro do espectro de absorção do actinômetro Ferrioxalato de Potássio que apresenta emissões entre 250–500 nm.

O segundo passo compreende estimar o número de lâmpadas fluorescentes que aproximadamente equivalem a uma determinada quantidade de LEDs. O Reator Fotoquímico a LEDs é configurado de forma a acomodar 4 colunas contendo 10 LEDs cada, para cada LED de cor diferente. Portanto para obter uma equivalência razoável utilizam-se 4 lâmpadas fluorescentes no Reator Fotoquímico Rayonet®.

Empregando o Reator Fotoquímico a LEDs utilizam-se LEDs com o pico de emissão em 374 nm. São obtidos quatro espectros de absorção atômica, respectivamente em 10 s, 30 s, 60 s de excitação luminosa no interior do Reator e por último uma amostra de referência, que não é irradiada.

Os resultados obtidos são visualizados através dos espectros apresentados na Figura 8.

Com o Reator Fotoquímico da Rayonet® utilizando lâmpadas fluorescentes com pico de emissão em 370 nm é aplicado o mesmo procedimento experimental aplicado ao Reator Fotoquímico a LEDs. Obtêm-se quatro espectros de absorção atômica, respectivamente em 10 s, 30 s, 60 s de excitação luminosa no interior do Reator e por último uma amostra de referência não irradiada.

Os resultados obtidos são visualizados através dos espectros apresentados na Figura 9.

Determinados os valores da diferença da absorbância em 510nm da solução irradiada e a de referência do actinômetro Ferrioxalato de Potássio para ambos os Reatores Fotoquímicos, procedeu-se aos cálculos para obter o valor das intensidades luminosas incidentes nos Reatores.

Os resultados estão sumarizados na Tabela 1 abaixo.

TABELA 1

Reator Fotoquímico	Fonte de Excitação Luminosa	Intensidade Luminosa (einstein s ⁻¹)
LEDs	LED 374 nm	7,80 x 10 ⁻⁵
Rayonet® (controle)	Lâmp. Fluorescente 370 nm	5,77 x 10 ⁻⁵

Analisando o resultado dos cálculos obtidos para a intensidade luminosa incidente nos Reatores, observa-se que o Reator Fotoquímico a LED conforme o presente Modelo apresenta uma intensidade luminosa 26% maior que o Reator convencional da Rayonet®. Vários fatores podem ter contribuído para este resultado, como: maior intensidade luminosa dos LEDs em relação a lâmpadas fluorescentes e também a geometria óptica dos Reatores.

10 3. Teste da Seletividade Espectral dos LEDs

Com o objetivo de comprovar a importância da seletividade espectral dos LEDs nas reações fotoquímicas, é efetuado o mesmo experimento utilizando o actinômetro Ferrioxalato de Potássio. Sabendo que a reação fotoquímica deste actinômetro ocorre com absorção de luz no intervalo de 15 253 a 500 nm. Utilizando o Reator Fotoquímico a LEDs, quatro amostras do actinômetro são irradiadas por LEDs com picos de emissão luminosos diferentes, por um período de tempo de 60 s cada. A referência é uma amostra do actinômetro não irradiada.

20 A Tabela 2 a seguir lista algumas das características dos LEDs utilizados neste experimento.

TABELA 1

Cor do LED	Pico de Emissão Luminosa (nm)	Largura da Banda Espectral (nm)
UV-A	374	50
Violeta	395	50
Azul	467	50
Verde	513	50

Através do espectro de absorção apresentado na Figura 10, é possível visualizar o resultado da reação fotoquímica do actinômetro Ferrioxalato de Potássio para cada LED em que a amostra é irradiada. É possível observar que o rendimento da reação é maior para o LED com pico de emissão em 375 nm e vai diminuindo à medida que aumenta o comprimento de onda do pico de emissão de cada LED.

Ainda analisando o espectro de absorção da Figura 10, é possível constatar que o espectro de absorção do LED com pico de emissão em 513 nm é igual ao espectro da amostra de referência, evidenciando que a reação fotoquímica do actinômetro não aconteceu, e de fato não deveria acontecer, pois é conhecido que a reação fotoquímica deste actinômetro só acontece com absorção de luz no intervalo de 253 a 500 nm. Portanto o LED com pico de emissão em 513 nm está fora da banda de absorção desta reação, de modo que a ação não acontece.

Com base nas observações acima, o experimento é repetido utilizando o actinômetro Ferrioxalato de Potássio, desta vez usando como fontes de excitação luminosa: LEDs com pico de emissão em 513 nm e lâmpadas fluorescentes com pico de emissão em 575 nm.

Os resultados obtidos são visualizados através dos espectros apresentados na Figura 11.

Analisando o espectro de absorção da Figura 11 é possível constatar que o espectro de absorção do LED com pico de emissão em 513 nm é igual ao espectro da amostra de referência, evidenciando que a reação fotoquímica do actinômetro não aconteceu. O mesmo não se pode dizer para o espectro resultante da utilização da lâmpada fluorescente com pico de emissão em 575 nm. Este fato é devido à seletividade espectral dos LEDs quando comparados às lâmpadas fluorescentes, como é visualizado na Figura 6.

Os LEDs de forma geral apresentam uma largura de banda de aproximadamente 50 nm, já as lâmpadas fluorescentes, no caso específico desta que foi utilizada no experimento, podem chegar a uma largura de banda de 300 nm.

Devido à característica do espectro de emissão da lâmpada fluorescente ser pouco seletivo, propicia que outros comprimentos de onda influenciem na reação fotoquímica, o que de fato foi verificado neste experimento.

Através deste experimento comprova-se a importância de utilizar fonte de excitação luminosa que possua banda de emissão estreita, para evitar a ocorrência de influências negativas nas reações fotoquímicas, influências essas causadas por comprimentos de onda que seria melhor estarem ausentes do espectro.

Assim os LEDs representam uma boa alternativa em relação às lâmpadas fluorescentes.

REIVINDICAÇÕES

1. Reator fotoquímico inteligente à base de LEDs **(100)**, caracterizado por compreender um alojamento externo **(17)** dotado de tampa **(30)** fixada com auxílio de suporte **(31)** ao dito alojamento **(17)**, e
- 5 no interior do mesmo, i) uma câmara reacional **(10)** de formato geralmente cilíndrico, encaixada no dito alojamento **(17)** por meio de flanges **(13)** superior e inferior e meios de fixação **(16)**, a extremidade inferior da mesma sendo apoiada sobre suportes **(51)** de modo a manter a mesma acima da base **(50)** do dito reator, dita
- 10 câmara **(10)** sendo dotada de placa eletrônica **(14)** para acomodar oito conjuntos de 40 LEDs **(11)** cada, de diferentes bandas de emissão, os 40 LEDs **(11)** sendo distribuídos em quatro colunas verticais com dez LEDs **(11)** cada, equidistantes de 90° no interior da dita câmara reacional **(10)** cilíndrica; ii) no interior da dita
- 15 câmara **(10)**, um recipiente contenedor transparente **(12)** para os reagentes a serem submetidos à reação fotoquímica resultante da ação dos LEDs **(11)** enquanto são agitados por agitador magnético **(40)**, dito recipiente **(12)** sendo apoiado sobre uma base de sustentação **(15)**; iii) uma placa eletrônica **(20)** para interface
- 20 humana compreendendo um display de LCD **(21)**, um *encoder* digital **(22)** e um botão de start **(23)**; iv) uma placa eletrônica de controle **(60)** microcontrolada, circuitos integrados **(61)**, um microcontrolador **(62)** e uma fonte de alimentação elétrica **(70)**; e
- v) sensor de temperatura.
- 25 2. Reator fotoquímico inteligente de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por, em funcionamento, a tampa **(30)** ser fechada, o recipiente **(12)** conter compostos a serem submetidos a uma reação fotoquímica, o usuário informar ao sistema, com auxílio dos dois *encoders* digitais **(22)**, qual comprimento de onda deseja

selecionar, qual a intensidade luminosa do comprimento de onda selecionado, programar o tempo de reação e acionar o botão de start **(23)** para iniciar a contagem de tempo, verificar, através do display **(21)** de LCD as informações relativas ao sistema selecionadas dentre o comprimento de onda ativo no momento, a intensidade luminosa, a temperatura do interior da câmara reacional **(10)**, a velocidade do agitador magnético **(40)** e tempo de reação programado, e após a seleção dos parâmetros permitir que a reação fotoquímica ocorra e visualizar no display **(21)** de LCD um *feedback* em tempo real de todos os parâmetros reacionais e mais a temperatura dos compostos em reação no recipiente **(12)**.

FIG. 1

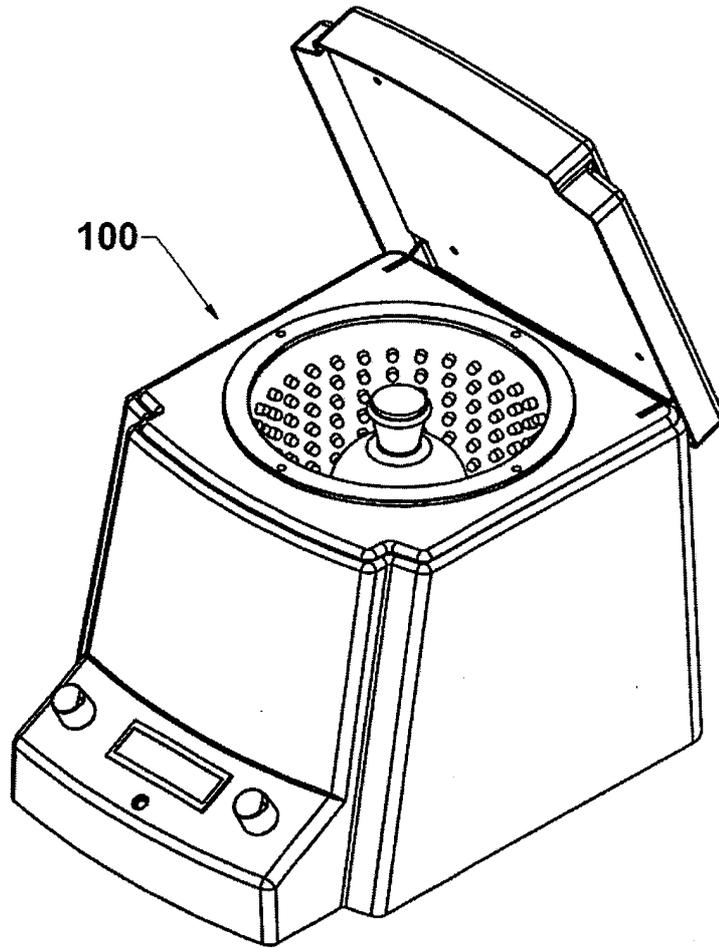


FIG. 2

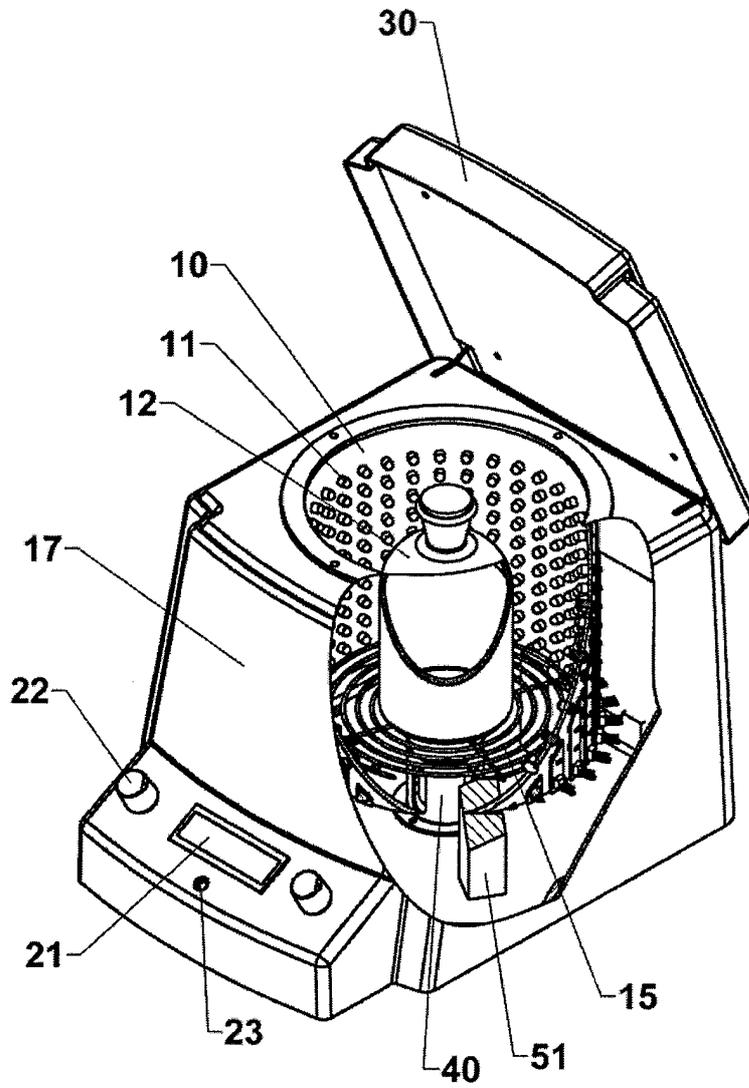


FIG. 3

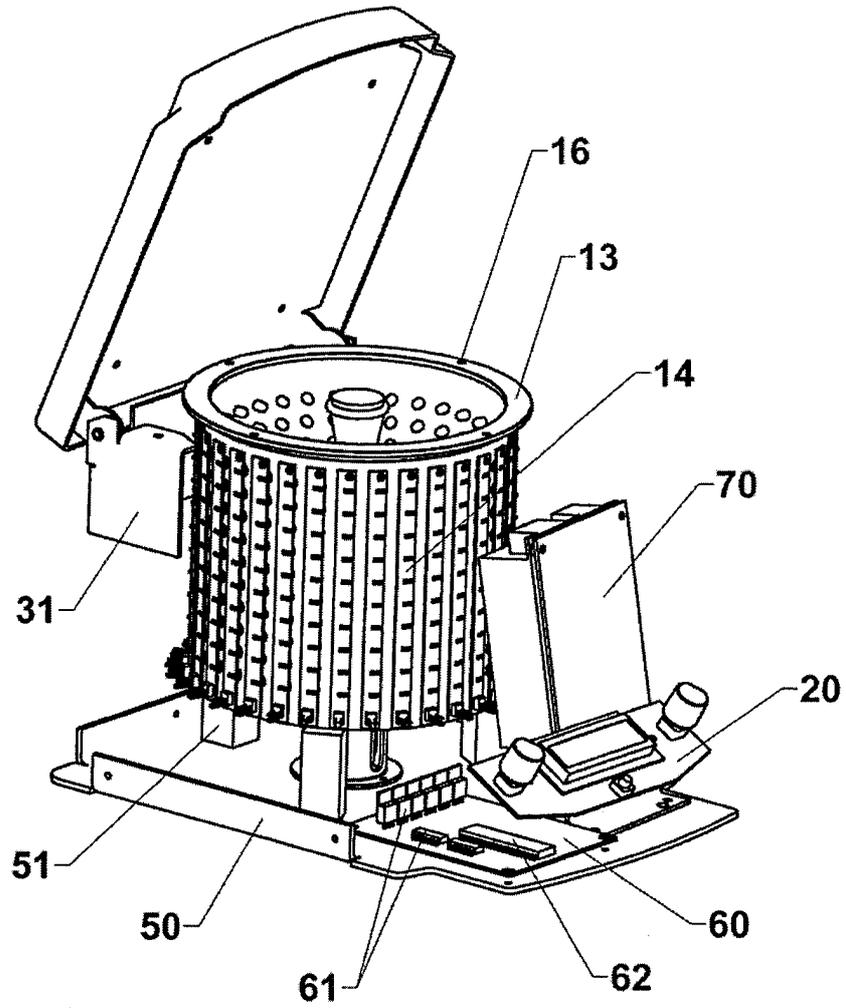


FIG. 4

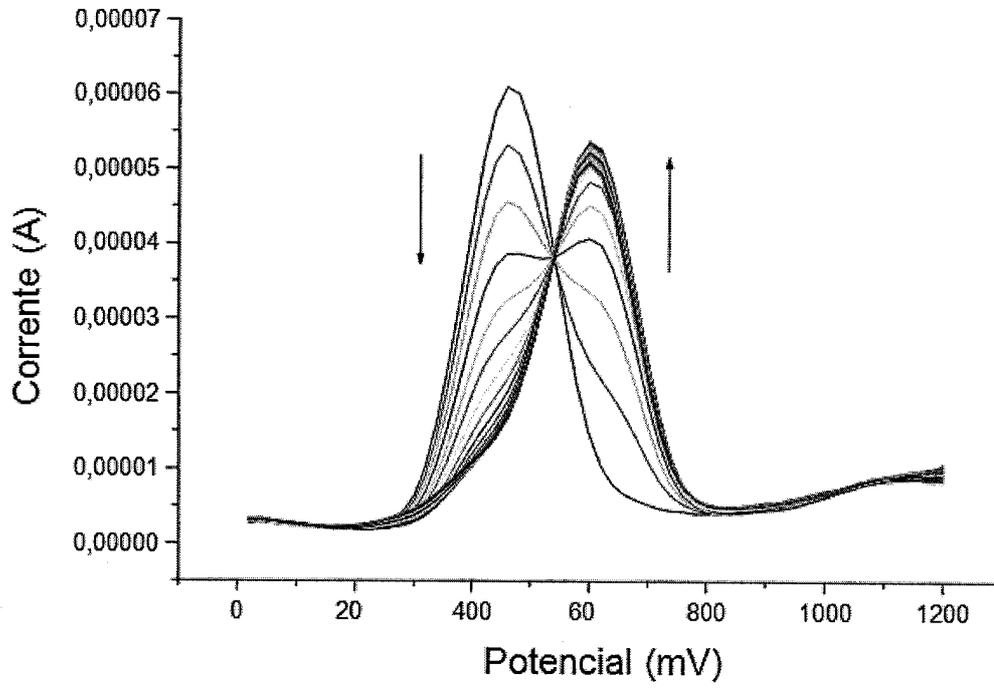


FIG. 5

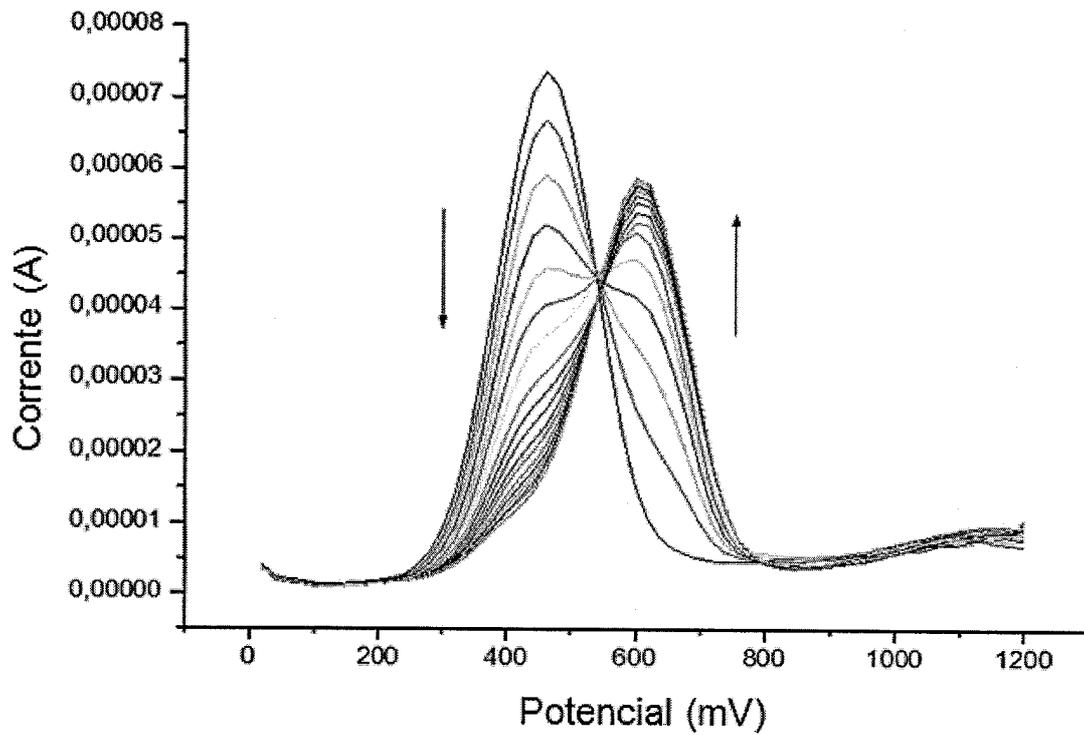


FIG. 6

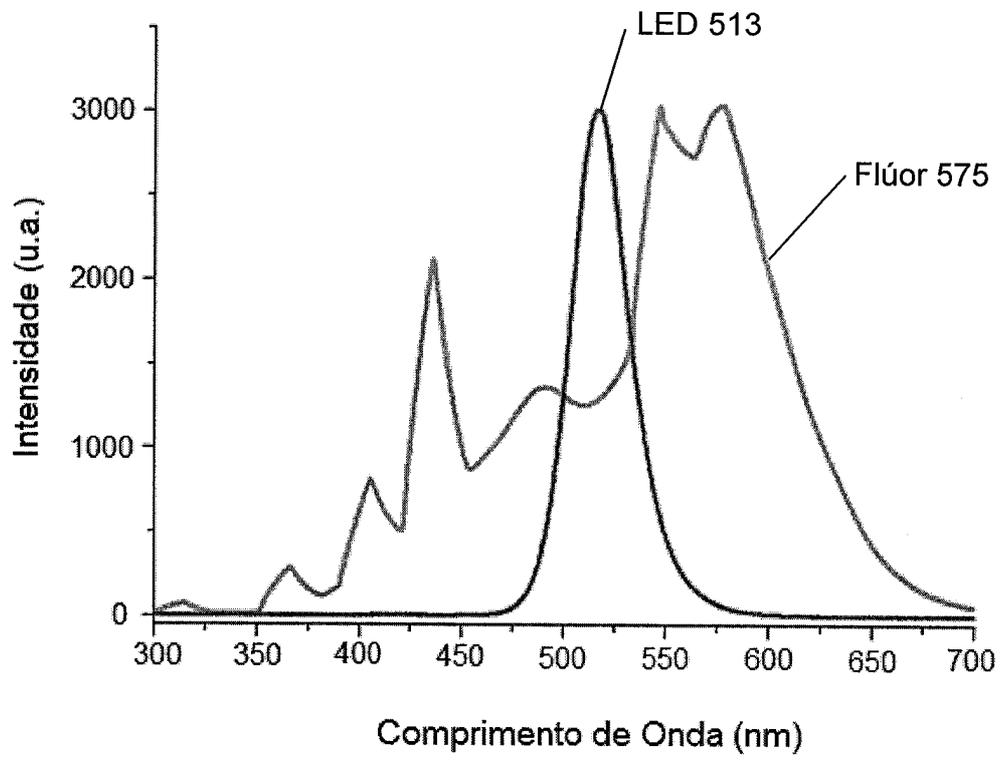


FIG. 7

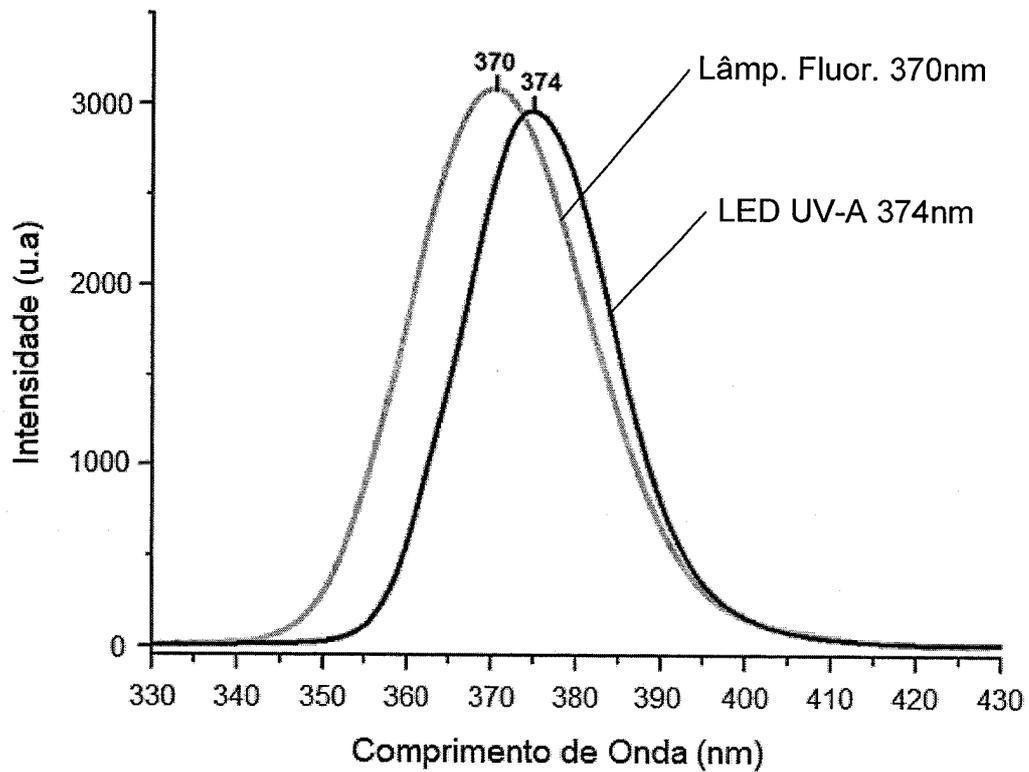


FIG. 8

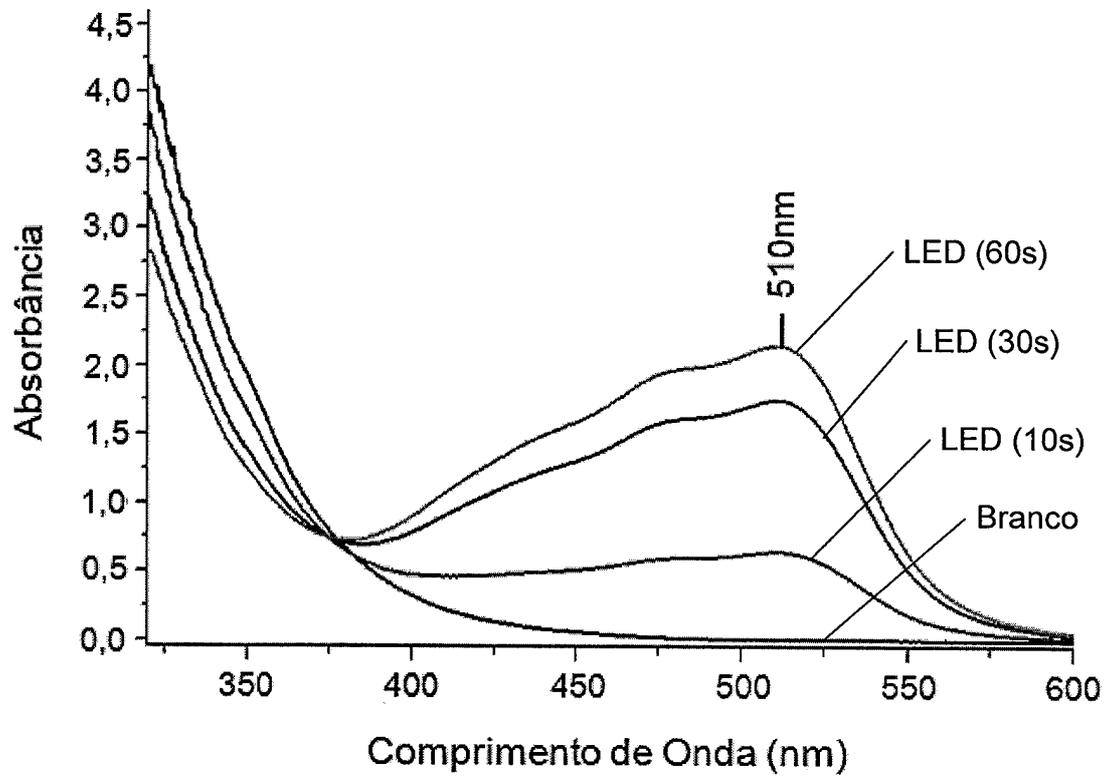


FIG. 9

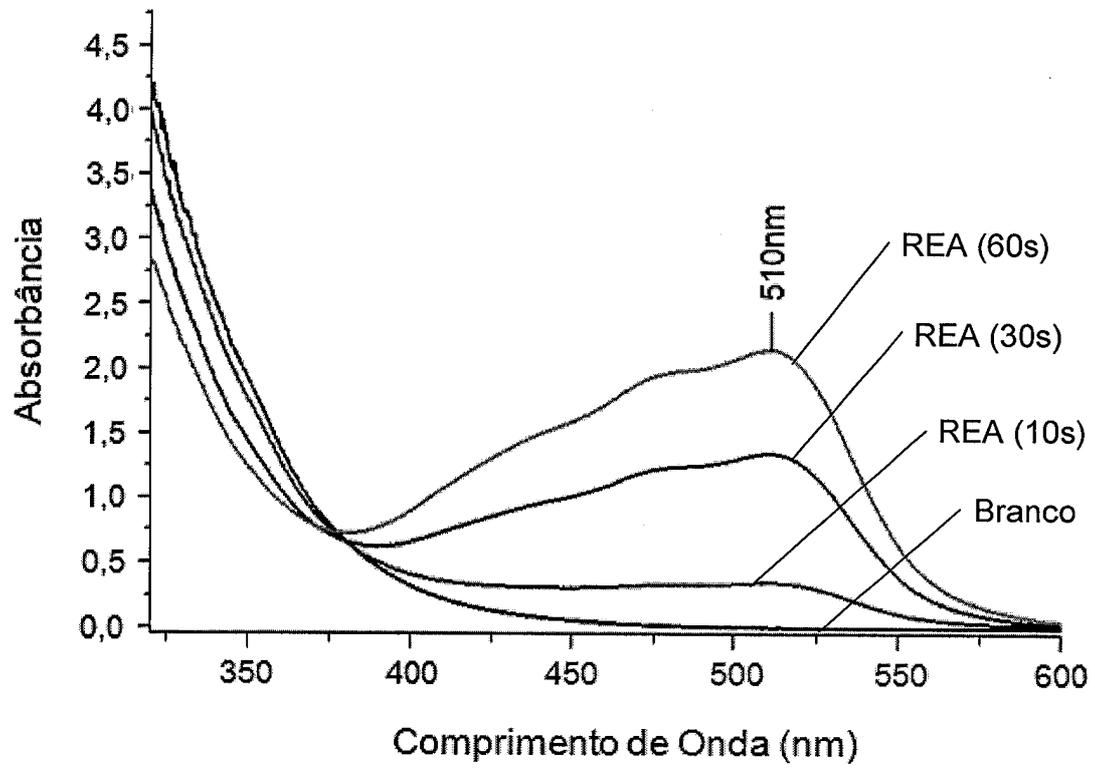


FIG. 10

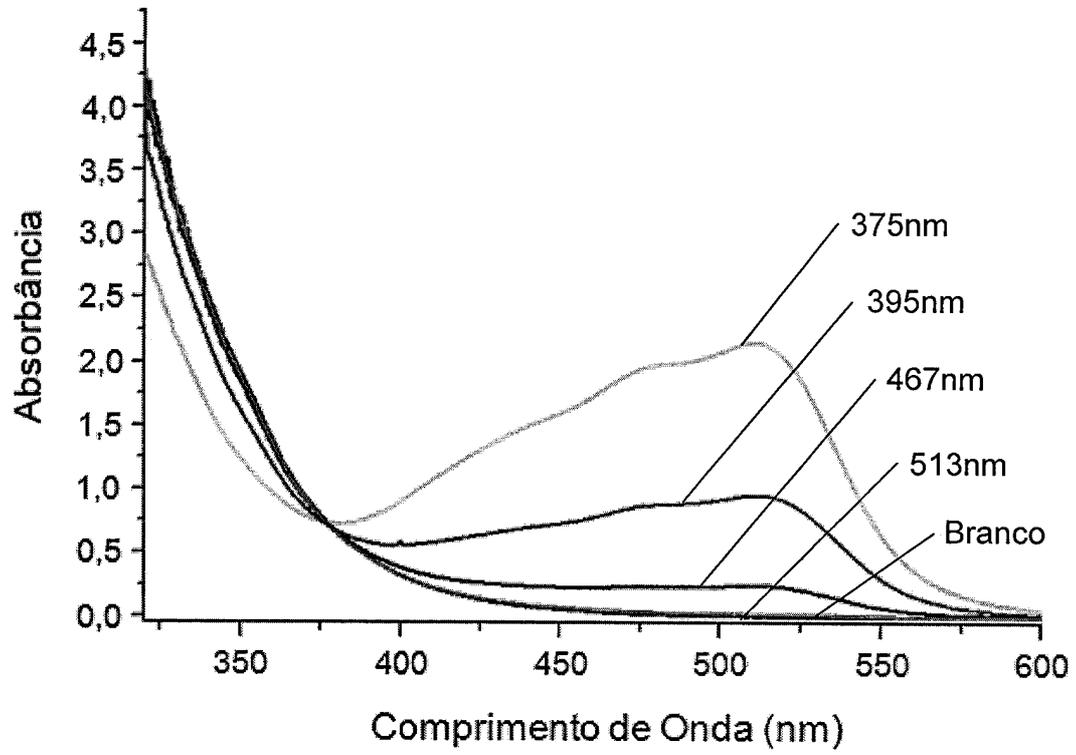


FIG. 11

