

# Avaliação do Uso da Biomassa Úmida na Produção de Biodiesel a partir de Microalgas

## *Evaluation of Wet Biomass Usage for Biodiesel Production from Microalgae*

Marja Bittencourt Pimentel<sup>1</sup>

Mariana de Almeida Aquino<sup>1</sup>

Ana Katerine Carvalho Lima Lobato<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Salvador, Salvador, BA, Brasil

### Resumo

Com o aumento da população mundial, a demanda por combustíveis aumentou nos últimos anos. Visando a substituir a utilização de combustíveis fósseis e minimizar os impactos que causam, alternativas como a utilização de microalgas para produzir biocombustíveis estão sendo desenvolvidas para uma futura implantação em larga escala. Esse estudo teve como finalidade realizar um mapeamento tecnológico tendo em vista resultados relacionados à produção de biodiesel a partir de microalgas. Uma busca avançada foi realizada utilizando as palavras-chave “biodiesel”, “microalgae”, “in situ” e “wet”, para a obtenção de referências voltadas à utilização da biomassa molhada no processo de transesterificação. A pesquisa resultou em 16 artigos publicados de 2011 a 2015. Foi verificado que somente nove patentes foram depositadas com a utilização da biomassa úmida no processo. Microalgas dos gêneros *Nannochloropsis* e *Chlorella* são as mais utilizadas e a condição de processo *in situ* utilizando um catalisador adequado apresenta um elevado potencial para uma possível produção em larga escala.

Palavras-chave: Biodiesel. Microalgas. Transesterificação.

### Abstract

With the global population growing, the demand for fuels increased in the last years. The need to exchange the use of fossil fuels and minimize the negative impacts they cause, alternatives as the usage of microalgae to produce biofuels has been developed for a large scale future implementation. This study had as main goal to do a technological prospecting taking into consideration the actual results related with biodiesel production by conversion of microalgae lipids. An advanced search was performed using the keywords ‘biodiesel’, ‘microalgae’, ‘in situ’ e ‘wet’, to obtain references related with the utilization of wet biomass in the transesterification process. The research resulted in 14 articles distributed among the years 2011-2015. It was also verified that there are just 8 application patents using wet biomass in. Microalgae from genus *Nannochloropsis* and *Chlorella* are the most common used and the *in situ* process using an appropriate catalyzer has a high potential for a possible large scale production.

Keywords: Biodiesel. Microalgae. Transesterification.

Áreas tecnológicas: Biocombustíveis. Prospecção internacional.



# 1 Introdução

Estudos indicam que o uso de combustíveis fósseis será extinto devido ao esgotamento de reservas de petróleo nos próximos 100 anos. A fim de reduzir a necessidade desses combustíveis advindos do petróleo, na segunda metade do século XX, aumentou-se o interesse e os estudos por fontes alternativas de energia, seja pela exaustão de petróleo ou pelos efeitos negativos que os combustíveis fósseis traziam ao meio ambiente. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), a utilização de combustíveis de origem fóssil, no qual o diesel está inserido, é a principal causa do aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera (RAMOS *et al.*, 2011).

Os biocombustíveis surgiram como uma alternativa para suprir a demanda energética das futuras gerações, além de ser uma alternativa sustentável. Eles são produzidos a partir de materiais biológicos, incluindo a matéria orgânica morta que não esteja fossilizada e, também, de produtos metabólicos de organismos vivos, que utilizam a energia solar para converter dióxido de carbono e água em matéria orgânica, a exemplo da soja utilizada para o biodiesel e da cana-de-açúcar utilizada para o etanol (DEMIRBA, 2008). Os estudos a respeito dos biocombustíveis aumentaram ao decorrer dos anos e com esse aumento vieram também os questionamentos sobre as áreas de cultivo da matéria-prima utilizada. Segundo dados de 2015 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), no Brasil a principal matéria-prima utilizada para a fabricação do biodiesel é a soja, responsável por mais de 82% da produção, seguida pela gordura bovina com 16%. Já nos Estados Unidos, o óleo de soja e a gordura animal representam 67% e 9% da matéria-prima utilizada, respectivamente, de acordo com dados da US Energy Information Administration (EIA) de 2015. No entanto, o uso de matéria-prima a base de oleaginosas, que são fontes de alimento, reduz a disponibilidade de terras aráveis, aumentando a preocupação relacionada à utilização dessas matérias-primas para produção de biocombustíveis (TEO; ISLAM; TAUFIQ-YAP, 2016).

Segundo projeções realizadas pela EIA, na Conferência de Energia de 2016, o uso mundial de petróleo e combustíveis líquidos irá crescer de 90 milhões para 121 milhões de barris/dia até 2040. Para o diesel está previsto um consumo de energia de 35,13% maior que o consumo em 2012. Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem a produção de biodiesel em larga escala, de forma ecologicamente correta e que tenha uma matéria-prima limpa e livre de impasses econômico-sociais.

Estudos recentes indicam que as microalgas apresentam elevada eficiência para a produção do biodiesel e, comparativamente, a sua produtividade de lipídio pode ser de 15 a 300 vezes maior que a produtividade derivada de plantas oleaginosas (TEO; ISLAM; TAUFIQ-YAP, 2016; MENDONÇA *et al.*, 2013). Diante desse cenário, as microalgas vêm ganhando espaço como fonte alternativa na produção do biodiesel. O interesse pela sua utilização deve-se ao fato de apresentarem elevada eficiência na captura de energia solar para a produção de biomassa, além da elevada taxa de crescimento, cultivo simples e alto teor lipídico intracelular.

## 2 Metodologia

A prospecção tecnológica foi realizada no mês de outubro de 2018 a partir da análise dos depósitos de patentes existentes e dos artigos científicos nacionais e internacionais já publicados.

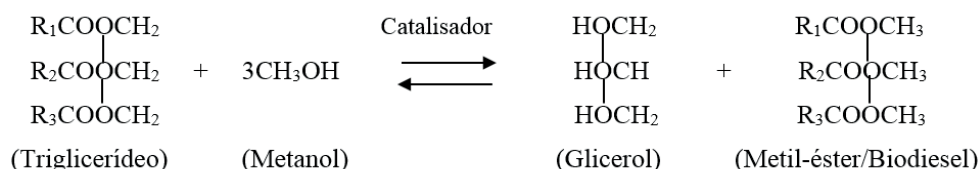
A busca de patentes depositadas foi realizada por meio do banco de dados de patentes internacionais (Espacenet) disponível gratuitamente pelo European Patent Office (EPO). Nele estão disponíveis mais de 90 milhões de patentes de mais de 90 países e a busca pode ser realizada de forma avançada a partir de dados específicos, por exemplo, título, código do país e data de publicação. Para a obtenção dos dados iniciais, a serem tratados e analisados, foi realizada uma busca com as palavras-chave “*biodiesel*”, “*microalgae*” e “*wet*”. Para a busca de patentes no acervo nacional foi utilizada a base de dados do Instituto Nacional da Prioridade Intelectual (INPI), na qual foi utilizado as palavras-chave “*biodiesel*” e “*microalga*” na ferramenta de pesquisa.

Para o levantamento bibliográfico foi realizada uma busca avançada das publicações existentes no *website* Science Direct. A busca avançada seguiu os seguintes critérios: artigos publicados apenas em revistas científicas (*Journals*), ano de publicação entre 2011 e 2018 e utilização de palavras-chave existentes apenas no *abstract*, título do artigo e/ou *keywords*. Inicialmente foi realizada uma pesquisa exploratória por meio de uma busca geral utilizando apenas as palavras *biodiesel* e *microalgae*, com a finalidade de adquirir maior conhecimento sobre o assunto. Em seguida, depois de determinar o processo de produção a ser estudado mais detalhadamente, foi realizada uma busca restritiva a partir das palavras-chave “*biodiesel*”, “*microalgae*”, “*in situ*” e “*wet*”, sendo estas adicionadas uma a uma até selecionar uma quantidade razoável de artigos para realização do estudo. Complementarmente, foi utilizado o operador booleano “*and*” para garantir que os resultados da busca avançada contivessem todas as palavras-chave.

### 3 Revisão Bibliográfica

O biodiesel é um combustível biodegradável obtido principalmente pelo processo de transesterificação de óleos (lipídios) com álcoois de cadeia curta (metanol ou etanol) sob ação de um catalisador (PEREIRA *et al.*, 2012), como ilustrado na Figura 1. Nessa reação, podem ser formados ésteres de ácidos graxos poli-insaturados e monossaturados, sendo que este último deve ser o principal constituinte para que o biodiesel apresente as características físico-químicas dentro dos parâmetros de qualidade estipulados conforme a resolução ANP n. 45 de 25/08/2014, que dispõe sobre a especificação do biodiesel contida no Regulamento Técnico ANP n. 3 de 2014 e as obrigações quanto ao controle de qualidade do biodiesel comercializado em território nacional.

**Figura 1** – Esquema simplificado do processo de transesterificação



Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo (2018)

Reconhecido como um combustível atrativo devido à sua combustão liberar menos emissões nocivas ao meio ambiente quando comparado ao diesel mineral proveniente do petróleo, existe uma crescente demanda relacionada à busca por novas matérias-primas e tecnologia

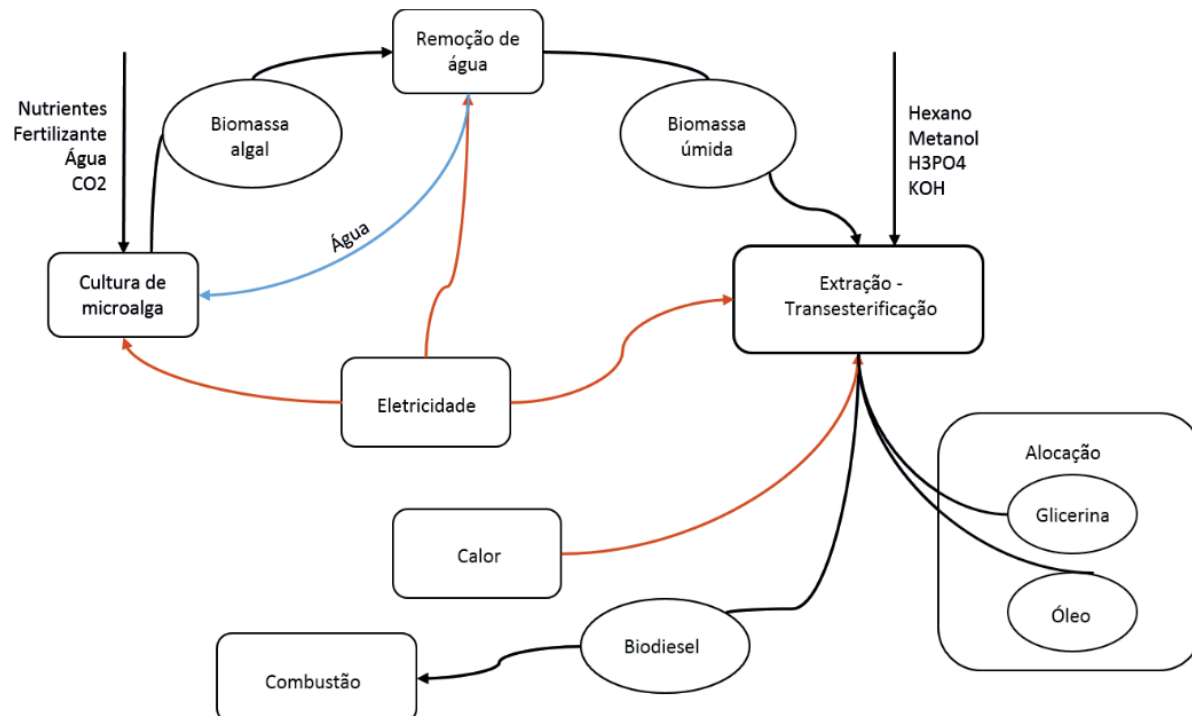
de processo que viabilizem uma produção economicamente competitiva quando comparada à do diesel mineral (SKORUPSKAITE; MAKAREVICIENE; GUMBYTE, 2016). Recentemente, microalgas têm sido consideradas como uma fonte de elevado potencial para a produção de biodiesel no futuro (COLLET *et al.*, 2014). No entanto, a sua utilização para a produção de biocombustível ainda não é efetiva economicamente para competir com a produção de combustíveis convencionais derivados do petróleo (KIM *et al.*, 2013).

O óleo extraído das microalgas é uma fonte promissora devido a algumas propriedades específicas das microalgas, como elevada taxa de crescimento, elevada reserva lipídica e habilidade de crescer em ambientes salinos, como a água do mar (TAHER *et al.*, 2014). Atualmente, diversas pesquisas vêm sendo realizadas em escala laboratorial para verificar a viabilidade dessa matéria-prima, porém sabe-se que a principal dificuldade para que a produção possa ser desenvolvida em escala comercial é o elevado custo de energia envolvido no processo.

### 3.1 Produção do Biodiesel

A tecnologia sugerida inicialmente para a produção do biodiesel a partir de microalga é subdividida nas seguintes etapas: cultivo, colheita, secagem, extração de lipídios e conversão para biodiesel (JAZZAR *et al.*, 2015). Na Figura 2, é possível visualizar o esquema das fronteiras existentes entre as etapas e as respectivas necessidades de consumo de energia e calor.

**Figura 2** – Layout modificado do sistema de produção de biodiesel a partir de microalgas e perímetro da fronteira



Fonte: Collet *et al.* (2014)

#### **Cultivo**

A etapa de cultivo é desenvolvida por meio de três tipos diferentes de tecnologias: lagoas de crescimento, tanques abertos ou fotobiorreatores fechados, sendo a escolha da técnica de

acordo com a espécie que se quer cultivar. Para implementação em escala industrial, tanques abertos são mais aceitos devido ao menor custo de operação e construção (LUNDQUIST *et al.*, 2010). Estudos indicam que esse é o único processo de produção de microalgas que apresenta uma razão líquida de energia (energia produzida sobre energia consumida) maior do que um, apresentando, portanto, o menor consumo de energia (JAZZAR, 2015). No entanto, para processos abertos que não são realizados em biorreatores pode haver uma grande faixa para as possíveis produtividades alcançadas, que dependerão do clima local e do período do ano (COLLET *et al.*, 2014).

A espécie de microalga utilizada é também um fator crucial para o desenvolvimento de um processo de produção competitivo. Para produção em larga escala é essencial que seja obtido uma grande quantidade de biomassa em um curto intervalo de tempo, portanto, além de apresentarem um elevado potencial para acumulação de lipídios, as microalgas devem apresentar uma rápida reprodução celular (JAZZAR *et al.*, 2015). Esses microrganismos se reproduzem em meios com água e nutrientes como nitrogênio, fósforo e dióxido de carbono (LUNDQUIST *et al.*, 2010). A afinidade por compostos de nitrogênio e fósforo proporciona uma elevada eficiência na remoção de nitratos e fosfatos dos meios as quais estão inseridas. Devido a esse motivo, elas podem ser usadas para tratamentos de efluentes (JAZZAR *et al.*, 2015).

### **Colheita**

A etapa de colheita, se for executada cuidadosamente, garante a redução de custo na etapa de extração de lipídios, além de um volume maior de biodiesel ao final do processo (GALADIMA; MURAZA, 2014). Existem diversos métodos para colher a biomassa de microalgas, entre eles estão: a floculação, centrifugação, microfiltração, sedimentação ou uma técnica incorporada a outra. Segundo Rawat *et al.* (2011), a técnica de sedimentação seguida de floculação obteve um bom rendimento, além de apresentar-se como um método altamente rentável, pois possui um menor consumo de energia, uma vez que a floculação proporciona o alojamento na camada superior da biomassa por efeito da gravidade.

### **Secagem**

A produção de biodiesel vem sendo há muito tempo realizada a partir da extração do óleo da biomassa seca. No entanto, esse método requer um gasto de energia muito elevado e, portanto, não é considerado uma opção economicamente viável para produção em larga escala. Estudos visam a possibilitar a utilização de pasta úmida de microalgas ao invés da biomassa seca, porém ainda não foi identificada uma técnica definitiva e eficiente para esse processo (COLLET *et al.*, 2014). A etapa da secagem sozinha representa, aproximadamente, 70% a 75% do custo total do processo de produção (TAHER *et al.*, 2014) e é responsável por até 59% do consumo total de energia durante o processo de produção (IM *et al.*, 2013).

### **Extração de Lipídios**

A microalga é um microrganismo fotossintético capaz de acumular uma grande quantidade de lipídios, na forma de triglicerídeos, que podem então ser convertidos a biodiesel. A capacidade de estoque de lipídio pode ser elevada a depender de certas condições no meio no qual as microalgas são cultivadas (COLLET *et al.*, 2014). A parede celular das microalgas é constituída por carboidrato e glicoproteína proporcionando uma elevada resistência química. Devido a essa característica a etapa de recuperação do lipídio apresenta-se como uma etapa

limitante do processo, visto que é necessário haver um rompimento efetivo da parede para a liberação do conteúdo lipídico no meio extracelular (JAZZAR *et al.*, 2015).

Uma extração eficiente depende da espécie da microalga que será utilizada, do método de ruptura da estrutura celular e do solvente usado na extração. Há diversas espécies de microalgas, entre elas estão a *Botryococcus braunii* que possui de 25% a 75% de lipídios em sua estrutura celular, a *Nannochloropsis oculata* com 60% de lipídios e *Chlorella vulgaris* com 28% a 32% de lipídios. Experimentos com a espécie *Chlorella vulgaris* tem apresentado uma maior conversão de biodiesel, em torno de 97% (SALAM *et al.*, 2016). As técnicas mais frequentes para que ocorra a ruptura dessa estrutura são técnicas físico-químicas, entre elas estão autoclaves e tratamento com micro-ondas (TSIGIE *et al. apud* ABGHARI; CHEN, 2013). Depois da extração do óleo ocorre a reação de transesterificação para a formação do biodiesel.

### **Transesterificação Convencional**

As microalgas são separadas durante a fase exponencial de crescimento celular, são desidratadas e em seguida a biomassa seca prossegue para o processo de extração de lipídios. Depois da extração, o conteúdo lipídico é então utilizado na etapa de transesterificação, na qual é transformado em biodiesel (LUNDQUIST *et al.*, 2010). As reações de transesterificação ocorrem em um reator contínuo ou em batelada, sendo este último o mais relatado nas últimas pesquisas (SANTILLAN-JIMENEZ *et al.*, 2016).

O método mais comum nas reações de transesterificação que ocorrem em laboratório, em escala piloto ou escala industrial e utilizando catálise homogênea em meio básico, isso se deve ao fato desse tipo de catalisador acelerar a reação. Esse processo é catalisado por hidróxidos de metais alcalinos e alcóxidos, assim como carbonatos de potássio e sódio. Entretanto, a presença de ácidos graxos livres contidos nos lipídios de microalgas inibe a utilização desse catalisador. Isso ocorre devido à facilidade da reação principal competir com a reação de saponificação, resultando em uma baixa conversão de biodiesel e uma grande dificuldade em se separar o biodiesel do glicerol. Por esse motivo, a utilização de catálise homogênea em meio ácido, utilizando ácido sulfúrico, por exemplo, tem sido uma boa opção (LAM, 2012).

Sabe-se que é requerida uma quantidade de energia muito grande para produção e transformação da alga pelo método tradicional. A cultura em larga escala ainda é muito cara e o processo de produção precisa ser melhorado para reduzir o custo do biocombustível (COLLET *et al.*, 2014). Métodos convencionais para produção de biodiesel apresentam as etapas da extração e transesterificação independentes entre si. No entanto, a transesterificação *in situ*, também denominada de transesterificação direta, apresenta uma simplificação do processo na medida em que permite que esses dois processos ocorram em uma mesma etapa (LAM; LEE, 2011).

### **Transesterificação *in situ***

Segundo Jazzar *et al.* (2015), a transesterificação *in situ* proporciona uma redução de energia na medida que possibilita a ocorrência da liberação do lipídio e da sua conversão em biodiesel na mesma etapa (JAZZAR *et al.*, 2015). O processo *in situ* é uma alternativa ao processo convencional e tem um potencial para redução das unidades de processo e dos custos do processo de produção do biodiesel (RAWAT *et al.*, 2013).

Sabe-se que uma das desvantagens que torna o processo de produção do biodiesel inviável para a produção em larga escala é a elevada demanda de energia requerida na etapa de secagem da biomassa. Segundo Salam, Velasquez-Orta e Harvey (2016) a transesterificação

*in situ* quando realizada com excesso de metanol (elevada razão metanol/lipídio) se torna mais tolerante a presença de água e, portanto, possibilita a utilização de biomassa úmida. O excesso de álcool ocorre devido ao fato deste exercer dois papéis na reação: a de extrator do óleo e como reagente, uma vez que a molécula de triglicerídeos é apolar e, portanto, pouco solúvel em metanol (GERKEN; DONOHOE; KNOSHAUG *apud* SALAM *et al.*, 2012). Ainda segundo ao mesmo autor, o processo apresenta maior nível de tolerância de água do que a transesterificação convencional, aquela em que o óleo é obtida em dois passos.

Patil *et al.* (2013) propôs ainda uma melhora no processo de transesterificação *in situ* ao utilizar uma transesterificação da biomassa seca assistida por micro-ondas sob condições de controle de temperatura. As micro-ondas utilizadas transferem energia para dentro da microalga causando uma geração de calor e pressão, forçando a liberação dos componentes celulares no meio extracelular. Segundo dados experimentais, esse processo promoveu uma reação mais rápida e uma redução do consumo de energia.

A transesterificação *in situ* supercrítica também possibilita uma redução de custo por não precisar de catalisador (LEVINE; BOLLAS; SAVAGE, 2013). No entanto, o processo também requer um consumo de energia considerável devido à elevada temperatura e pressão que precisa para atingir uma condição supercrítica (SINGH *et al.*, 2014). Além da vantagem de não precisar de catalisador a condição supercrítica geralmente tem uma maior tolerância para matéria-prima contendo água e ácidos graxos (LEVINE; BOLLAS; SAVAGE, 2013).

Na transesterificação *in situ* com água subcrítica, há um aumento de até quatro vezes na extração de lipídios neutros a partir de lamas ativadas em comparação à transesterificação *in situ* sem qualquer outro método adicional (HUYNH *et al.*, 2010). Isso se deve ao fato da condição da água em estado subcrítico poder atuar como catalisador ácido-base eficiente. Acredita-se, ainda, que esse método pode catalisar outros tipos de reações, além da reação de hidrólise (AHLUWALIA; VARMA *apud* HUYNH, 2009).

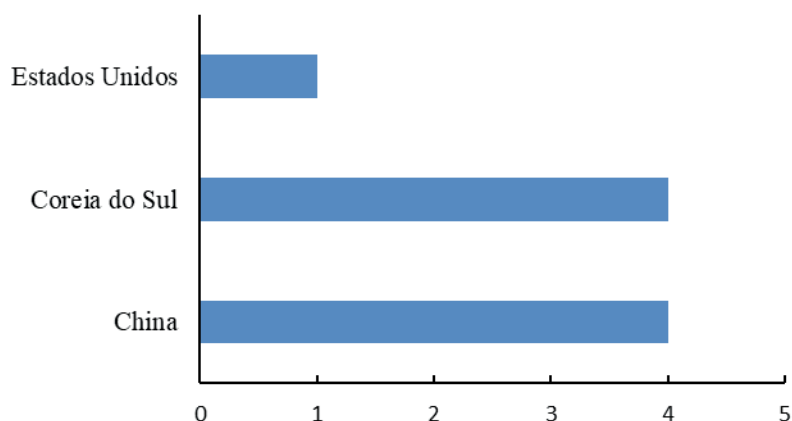
## 4 Resultados e Discussão

Como resultado da prospecção tecnológica realizada, foram mapeados os últimos desenvolvimentos científicos e tecnológicos na área da produção de biodiesel a partir de microalgas, os quais foram divididos em depósito de patentes e artigos científicos publicados.

### 4.1 Depósito de Patentes

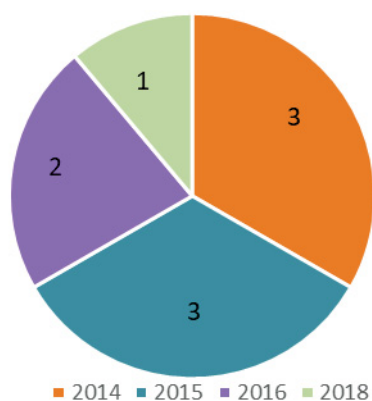
O resultado do estudo realizado a partir das patentes depositadas no banco de dados do EPO resultou em um total de 13 patentes, ao utilizar as palavras-chave “*biodiesel*”, “*microalgae*” e “*wet*”. Cada patente foi analisada, a partir do conteúdo existente no resumo, e concluiu-se que apenas nove patentes abordavam sobre tecnologias de produção de biodiesel utilizando a biomassa úmida. Pode-se dizer que existe uma quantidade limitada de tecnologias patenteadas para a utilização da biomassa úmida na produção de biodiesel, ficando explícito que existe um elevado potencial e necessidade para desenvolvimento de novas tecnologias.

A Figura 3 contém os países envolvidos nas patentes obtidas. Percebe-se que a China e a Coreia do Sul detêm juntas 88,89% das patentes depositadas no período de 2011 a 2018.

**Figura 3** – Patentes depositadas no Espacenet separadas por país

Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo (2018)

Analisando o ano no qual as patentes foram depositadas, ilustrado na Figura 4, verifica-se que as patentes relacionadas à utilização da biomassa úmida só começaram a ser depositadas em 2014. Está claro que as tecnologias desenvolvidas até agora ainda são muito recentes e, como qualquer nova tecnologia, precisarão de tempo para que possam alavancar de maneira efetiva.

**Figura 4** – Distribuição do depósito de patentes de 2011 a 2018

Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo (2018)

Foi analisada também a existência de patentes no banco de dados do INPI, independente da data do depósito, no entanto verificou-se que nenhuma patente nacional foi depositada até o momento.

## 4.2 Artigos Científicos Publicados

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa geral no Science Direct sobre a produção de biodiesel a partir de microalgas, a fim de identificar as rotas de produção que vêm sendo estudadas e as principais dificuldades enfrentadas.

Segundo Espinosa-Gonzalez *et al.* (2014), a elevada infraestrutura e custos operacionais que são requeridos para a extração e separação dos lipídios das microalgas é um desafio para o desenvolvimento de tecnologias em escala comercial. Como as culturas de algas, realizadas



em meio aquático, apresentam baixa densidade de células, faz-se necessário a remoção da água por meio de uma operação de elevado consumo de energia, representando entre 30% e 50% do total do custo do biodiesel (CHISTI, 2007; WIJFFELS; BARBOSA, 2010; YEH *et al.*, 2013 *apud* ESPINOSA-GONZALEZ *et al.*, 2014).

O potencial de utilização da biomassa úmida ainda não é totalmente conhecido, mas, como um dos principais gargalos enfrentados para a viabilização da utilização da microalga em larga escala é o elevado custo de energia, a sua utilização apresenta-se como uma boa alternativa. É evidente que outras etapas operacionais também contêm gargalos que inviabilizam a produção comercial, mas com a possibilidade de eliminação da etapa de secagem do processo espera-se que novas pesquisas sejam desenvolvidas visando à utilização da biomassa úmida. Portanto, sabe-se que a utilização de microalgas ainda é economicamente inviável para a produção de biodiesel em larga escala e, devido a esse problema, diversas pesquisas foram desenvolvidas na tentativa de otimizar o processo de produção a fim de torná-lo menos dispendioso.

Com a finalidade de realizar um estudo mais aprofundado no que diz respeito às pesquisas que vêm sendo desenvolvidas com a utilização da biomassa úmida, foi realizada uma busca avançada no Science Direct. As palavras-chave foram acrescentadas uma a uma com o objetivo de restringir e selecionar artigos voltados apenas para os processos de transesterificação *in situ* a partir da utilização da biomassa úmida e, com isso, poder identificar os gargalos existentes. Os resultados encontrados para cada pesquisa estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1** – Busca de artigos científicos no banco de dados do *Science Direct*

PALAVRAS-CHAVE				RESULTADOS DA BUSCA
<i>biodiesel</i>	<i>microalgae</i>	<i>in situ</i>	<i>wet</i>	
X				9.596
X	X			1.005
X	X	X		43
X	X	X	X	16

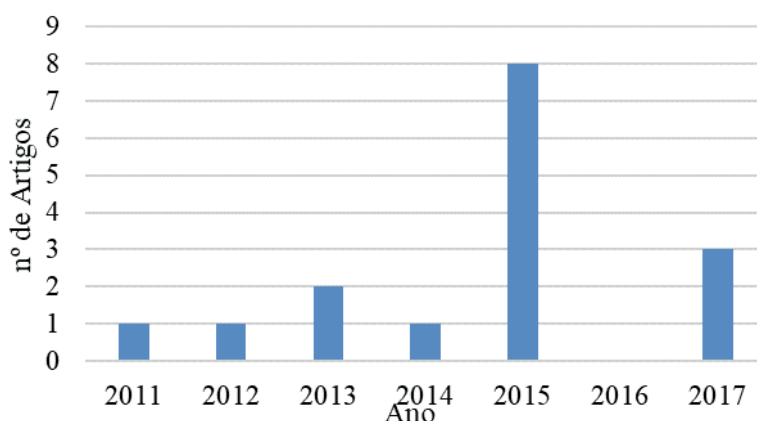
Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo (2018)

A partir dos resultados pôde-se perceber que ainda existe uma quantidade de pesquisas limitadas que abordam o processo de transesterificação *in situ* e essa quantidade se restringe ainda mais quando a matéria-prima é a biomassa úmida. De acordo com a Figura 5, mais da metade dos artigos foram publicados em 2015, o que permite concluir que esse processo é novo e que, portanto, ainda tem muito que ser estudado e desenvolvido. No ano de 2016, não foram encontrados artigos para os parâmetros de pesquisa utilizados dentro do banco de dados do Science Direct e em 2017 três novos artigos foram publicados. Em 2018, não foi publicado nenhum artigo até o momento.

Com base nas últimas publicações foi possível verificar as principais variáveis que interferem no processo de transesterificação *in situ*, cujos dados estão representados na Tabela 2. Foi

possível observar que diferentes condições podem ser aplicadas no processo e diferentes autores optaram pelo estudo do mesmo método, como Najafabadi, Vossoughi e Pazuki (2015) e Jazzar *et al.* (2015) que utilizaram uma condição supercrítica no processo.

**Figura 5** – Distribuição dos 16 artigos de 2011 a 2017



Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo (2018)

Uma característica positiva que foi observada é que no processo de transesterificação supercrítico os melhores rendimentos utilizando a biomassa seca foram apenas cerca de 2% a 9% maiores do que utilizando a biomassa úmida, o que significa que a depender da quantidade de água na biomassa úmida o rendimento processo não é afetado significativamente. Adicionalmente, comparando a utilização de biomassa seca e úmida na produção de biodiesel, o consumo de energia da biomassa úmida chega a ser 61% menor do que o da biomassa seca (JAZZAR *et al.*, 2015). Além disso, esse processo ainda proporciona a ruptura da parede celular de maneira eficiente, não precisando do uso de catalisadores no processo (JAZZAR *et al.*, 2015). Já para Kumar *et al.* (2014), a biomassa úmida mostrou um rendimento reduzido de FAME em relação à biomassa seca devido ao elevado teor de água, que é de cerca de 80%. Isso por que a presença de água na biomassa interfere na catálise ácida/básica, reduzindo assim a eficiência da transesterificação.

A porcentagem de água existente na biomassa é um fator de extrema importância, visto que está relacionado à viabilidade da utilização da biomassa úmida no processo. Segundo Najafabadi, Vossoughi e Pazuki (2015), o aumento da porcentagem de água até 80% não interfere significativamente na *performance* do processo supercrítico. No entanto, para uma maior quantidade de água há a necessidade de utilizar uma maior quantidade de solvente, visto que essa quantidade é medida a partir da razão solvente/biomassa úmida para a mesma quantidade de biomassa seca. Segundo Nuh *et al.* (2015), no seu estudo com relação à transesterificação *in situ* concluiu que, do mesmo modo do processo supercrítico, um aumento na proporção de volume de etanol na etapa de pré-tratamento, apresentou um aumento substancial na produção de biodiesel.

**Tabela 2** – Principais resultados extraídos dos artigos selecionados

REFERÊNCIAS	MICROALGA	% DE ÁGUA NA BIOMASSA	CONDIÇÃO DO PROCESSO	SOLVENTE	RENDIMENTO DE ÁCIDO GRAXO
Jazzar <i>et al.</i> (2015)	<i>Chlorella sp.</i>	75%	Supercrítico	Metanol	45,62%
	<i>Nannochloris sp.</i>	75%	Supercrítico	Metanol	21,79%
Hidalgo <i>et al.</i> (2015)	<i>Botryococcus braunii</i>	10%	---	Metanol/éter de petróleo	78,7%
	<i>Botryococcus braunii</i>	80%	---	Metanol/éter de petróleo	73,9%
Wahlen, Willis e Seefeldt (2011)	<i>Chaetoceros gracilis</i>	80%	Micro-ondas	Metanol	30%
Im, Kim e Lee (2015)	<i>Nannochloropsis gaditana</i>	65%	---	Etanol	81,8%
Kim <i>et al.</i> (2015)	<i>Nannochloropsis salina</i>	76,5%	---	Metanol	100%
	<i>Nannochloropsis salina</i>	76,5%	---	Etanol	100%
Jazzar <i>et al.</i> (2015)	<i>Nannochloropsis gaditana</i>	80%	Supercrítico	Metanol	46%
	<i>Nannochloropsis gaditana</i>	0%	Supercrítico	Metanol	48%
Suh <i>et al.</i> (2015)	<i>Nannochloropsis oceânica</i>	65-70%	---	Etanol	100%
Kumar <i>et al.</i> (2014)	<i>Chlorella sp.</i>	30%	2 estágios	Metanol	39,17%
Velasquez-Orta, Lee e Harvey (2013)	<i>Nannochloropsis oculata</i>	10%	---	Metanol	14%
	<i>Chlorella sp.</i>	10%	---	Metanol	62%
Ma <i>et al.</i> (2015)	<i>Chlorella vulgaris</i>	0%	Radiações de ultrassom e micro-ondas	Metanol	93.07%
Levine, Bolas e Savage (2013)	<i>Chlorella protothecoides</i>	46%	Supercrítico	Etanol	39%
	<i>Chlorella protothecoides</i>	0%	Supercrítico	Etanol	70%
Najafabadi, Vossoughi e Pazuki (2015)	<i>Chlorella vulgaris</i>	75%	Supercrítico	Metanol + Hexano	102%
Levine <i>et al.</i> (2012)	<i>Chlorella protothecoides</i>	13,5%	---	Etanol	84%
Vicente <i>et al.</i> (2017)	<i>Nannochloropsis gaditana</i>	---	---	Metanol	97.4%
Luna <i>et al.</i> (2017)	<i>Chlorella sp.</i>	0%	---	Metanol	47%
Park <i>et al.</i> (2017)	<i>Nannochloropsis gaditana</i>	80%	---	Acetato de etila	97.8%

Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo (2018)

Conforme dados da Tabela 2 e a partir das pesquisas realizadas, foi observado que os gêneros de microalgas mais utilizados na produção de biodiesel ao decorrer dos últimos anos tem sido o *Nannochloropsis* e o *Chlorella*. Segundo Coverti *et al.* (2009 *apud* MACHADO, 2011), essa escolha se deve ao fato dessas espécies apresentarem uma grande taxa de produção lipídica. Segundo Zittelli (2009 *apud* AHMAD *et al.*, 2011), dentre trinta culturas de microalgas testadas para saber quais as melhores produtoras de lipídios, o gênero *Nannochloropsis* foi o que apresentou melhores resultados. A espécie *Chlorella vulgaris* pode sobreviver em uma faixa de pH de 5 até acima de 8, o que possibilita a sua aplicação em diferentes condições de processo que atendam essa faixa. Essa espécie possui um fácil crescimento e uma significativa quantidade de lipídio (WIDJAJA; CHIEN; JU, 2009). O biodiesel de elevada qualidade apresenta proporções similares de ácidos graxos saturados e insaturados (KNOTHE, 2005 *apud* CHYI *et al.*, 2016). Em experimento realizado por Chyi *et al.* (2016), foi verificado que *Nannochloropsis sp.* é mais adequada do que a *Chlorella sp.* para uso na produção de biodiesel, pois apresenta proporções de ácidos graxos saturados e insaturados quase semelhantes.

Levando em consideração a condição de processo supercrítica, cossolventes como dietil-éter, hexano e clorofórmio podem ser utilizados na tentativa de reduzir a severidade das condições supercríticas de reação, pois apresentam menores temperaturas e pressão crítica quando comparado ao metanol (NAJAFABADI; VOSSOUGH; PAZUKI, 2015). No entanto, ao utilizar hexano como cossolvente Najafabadi, Vossoughi e Pazuki (2015) obtiveram uma maior conversão a uma temperatura de 290 graus célsius, o que não é tão reduzida quando comparada com temperaturas utilizadas por outros autores sem a utilização de um cossolvente associado. Pode-se concluir a partir dos resultados que a utilização do hexano como cossolvente pode proporcionar o aumento do rendimento de éster produzido, mas não é eficiente para a redução a condição supercrítica do processo.

Levine *et al.* (2012) propôs a transesterificação da biomassa úmida carbonizada utilizando o catalisador triflato de metal terra-rara (ex.:  $\text{Sc}(\text{OTf})_3$ ) como alternativa ao processo supercrítico. A carbonização hidrotérmica proporciona a hidrólise dos lipídios intracelulares produzindo um aglomerado de células que retém 85% de lipídios e que, após fácil filtração, resulta em uma biomassa úmida contendo de 15% a 45% de água. Adicionalmente, a utilização da carbonização como etapa de extração proporciona uma menor quantidade de glicerol formado ao final da transesterificação devido à hidrólise prévia dos lipídios e a subsequente eliminação do glicerol na fase aquosa da filtração. Levine *et al.* (2013) realizou uma transesterificação supercrítica depois da carbonização hidrotérmica da biomassa e, comparando com os resultados obtidos por Levine *et al.* (2012), apresentou um rendimento de biodiesel menor para a mesma espécie de microalga e solvente utilizado, conforme Tabela 2. Ainda analisando o processo supercrítico e o catalisado, ao comparar os resultados obtidos por Im, Kim e Lee (2015) e Jazzar *et al.* (2015), para a microalga *Nannochloropsis gaditana*, percebe-se um maior rendimento para a reação *in situ* catalisada por ácido, com a utilização de etanol como solvente e reagente, do que na reação supercrítica utilizando metanol. Quando comparada a reação supercrítica, a reação catalisada apresenta uma temperatura mais branda, a utilização de menor quantidade de reagente/solvente e um maior rendimento para uma maior quantidade de água na biomassa, no entanto ocorre no dobro do tempo e precisa de um processo para separação do catalisador.

O uso de um tempo de reação curto e temperaturas amenas (em torno de 80°C e 30 min) é uma característica promissora do ponto de vista do custo do processo, já que a baixa tem-

peratura de reação e duração reduzem significativamente o custo com energia na produção de biodiesel, bem como o fato de que a menor pressão sob uma condição mais branda teria outra ramificação positiva no projeto do reator (SUH *et al.*, 2015). Nos processos que utilizaram microndas como condição de processo as temperaturas de reação são mais baixas e o tempo de reação foi também relativamente mais baixo, como pode ser visto na Tabela 3. Conforme a Tabela 2, o processo de microndas foi pesquisado por Wahlen, Willis e Seefeldt (2011) e Ma *et al.* (2015). Os primeiros obtiveram um baixo rendimento ao utilizar biomassa com 80% de umidade, quanto comparado ao rendimento obtido pelos segundos ao utilizarem a biomassa seca. No entanto, eles utilizaram diferentes espécies de microalgas e as diferentes condições de processo impossibilitam concluir se a utilização dessa tecnologia é de fato eficaz para o processo com a biomassa úmida.

**Tabela 3** – Faixas das temperaturas e tempo de reação utilizados a depender da condição do processo

CONDIÇÃO DO PROCESSO	FAIXA DE TEMPERATURA (°C)	FAIXA DE TEMPO DE REAÇÃO (MIN)
<i>In situ</i> catálise homogênea	60–125	50–120
<i>In situ</i> catálise heterogênea	80–125/ *170–215	120–240/ 30*
<i>In situ</i> supercrítico	265–290	50–60
<i>In situ</i> subcrítico	175	--
<i>In situ</i> com microondas	60–80	20–45

Nota: \* Condição específica quando utilizado o catalizador  $\text{Sc}(\text{OTf})_3$

Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo (2018)

Analisando as Tabelas 3 e 4, conclui-se que o processo *in situ* catalisado vem sendo estudado tanto via catálise homogênea, quanto catálise heterogênea. Ácido sulfúrico foi utilizado em todas as referências que realizaram catálise homogênea, enquanto na catálise heterogênea foram utilizados catalisadores como  $\text{Sc}(\text{OTf})_3$ , Levine *et al.* (2012); púmice impregnado com LiOH, Luna *et al.* (2017); e resina catiônica CT-269 Vicente *et al.* (2017). Para os dois processos catalíticos as faixas de temperatura utilizadas são relativamente as mesmas, no entanto a catálise heterogênea requer um maior tempo de reação. Em relação aos catalisadores heterogêneos utilizados, não se pode chegar a uma conclusão quanto a melhor eficiência, pois as três referências utilizam diferentes microalgas e reagentes.

Nos processos de transesterificação normalmente são utilizados metanol ou etanol como reagentes. Pode-se perceber na Tabela 4 que apenas cinco dos 14 artigos abordaram o uso do etanol como solvente. O principal motivo do uso elevado do metanol é devido ao fato de ser um álcool mais barato, no entanto o etanol é menos tóxico, é um melhor solvente para óleos e produz um biodiesel com melhores propriedades (STAMENKOVIC *et al.*, 2011 *apud* LEVINE *et al.*, 2012). Kim *et al.* (2015) realizou um estudo utilizando ambos os álcoois como solvente e obteve uma mesma conversão de biodiesel utilizando o dobro de metanol quando comparado à quantidade de etanol utilizado para uma mesma quantidade de biomassa. No entanto, considerando a catálise homogênea com ácido sulfúrico, a utilização de metanol requer uma menor quantidade de catalisador quando comparado ao etanol.

Em uma pesquisa mais recente, Park *et al.* (2017) sugeriu a utilização de acetato de etila como reagente, que ao ser aquecido durante o processo é hidrolisado em etanol e ácido acé-

tico. O ponto positivo é que a utilização de ácido acético requer uma menor quantidade de catalisador, portanto, seria possível reduzir o volume de ácido sulfúrico requerido quando a transesterificação ocorre em presença de etanol. Contudo, é necessário fazer uma análise mais aprofundada quanto aos volumes solvente/catalisador necessários de forma que proporcione uma maior viabilidade econômica do processo.

**Quadro 1** – Álcoois utilizados como reagentes/solventes no processo de transesterificação

REAGENTE	REFERÊNCIAS
Metanol	Jazzar <i>et al.</i> (2015), Hidalgo <i>et al.</i> (2015), Wahlen, Willis e Seefeldt (2011), Kim <i>et al.</i> (2015), Kumar <i>et al.</i> (2014), Velasquez-Orta, Lee e Harvey (2013), Ma <i>et al.</i> (2015), Najafabadi, Vossoughi e Pazuki (2015), Vicente <i>et al.</i> (2017) e Luna <i>et al.</i> (2017)
Etanol	Im, Kim e Lee (2015), Kim <i>et al.</i> (2015), Suh <i>et al.</i> (2015), Levine; Bollas e Savage (2013) e Levine <i>et al.</i> (2012)
Acetato de etila	Park <i>et al.</i> (2017)

Fonte: Elaborado pelas autoras deste artigo (2018)

## 5 Considerações Finais

Ao realizar a prospecção tecnológica da produção de biodiesel a partir da utilização de microalgas, verificou-se que o conhecimento dessa matéria-prima não é recente, mas foi nos últimos anos que se voltou uma maior atenção para a sua utilização. Observou-se que durante esse período gargalos foram sendo determinados, como o elevado custo da etapa de secagem, e, com isso, houve um desenvolvimento mais significativo na busca por novas alternativas referentes ao processo. Verificou-se que a alternativa da utilização da biomassa úmida apresenta um elevado potencial para suprir a elevada demanda energética da etapa de secagem, mas concluiu-se que ainda existem obstáculos para a utilização dessa alternativa.

Entre as condições de processo analisadas, observou-se que a possibilidade da utilização da biomassa úmida não ocorre apenas em processos supercríticos, como citados por alguns autores. Para um processo em larga escala a utilização de equipamentos que atendam a uma condição supercrítica com elevadas pressões e temperaturas torna-se basicamente inviável economicamente devido ao consumo de energia que seria requerido para atingir essa condição. A partir dos resultados encontrados é possível sugerir que a utilização do processo de transesterificação *in situ* catalisado apresenta um grande potencial para utilização da biomassa úmida, excluindo, portanto, a necessidade de um processo supercrítico para atingir conversões desejáveis. No entanto, estudos mais aprofundados devem ser realizados antes de chegar a uma conclusão, principalmente em relação à utilização da catálise homogênea ou heterogênea.

Ficou claro que para a utilização do processo catalisado ainda existe a necessidade do desenvolvimento de uma tecnologia efetiva em paralelo com a análise da viabilidade econômica para a sua implantação em larga escala. Precisa-se saber qual o catalisador mais eficiente quanto à conversão do processo e a sua posterior separação e regeneração. Diversas pesquisas aponta-

ram para o potencial da microalga do gênero *Nannochloropsis* na produção de biocombustível, mas deve-se saber o melhor catalisador a ser utilizado dependendo da composição do fluido lipídico e sua extração. São muitas variáveis que precisam ser determinadas e que apontam para a necessidade de investimento contínuo nessa alternativa para que no futuro a produção de biodiesel a partir de microalgas se torne uma realidade.

## Referências

- ABGHARI, A; CHEN, S. *Yarrowia lipolytica* as an oleaginous cell factory platform for production of fatty acid-based biofuel and bioproducts. **Jornal Frontiersin**, USA, v. 2, p. 1–22, jun. 2014.
- CHYI, W. S. *et al.* Performance assessment of biofuel production in an algae-based remediation system. **Journal of Biotechnology**, [S.l.], v. 221, p. 43–48, 2016.
- COLLET, P. *et al.* Biodiesel from microalgae e Life cycle assessment and recommendations for potential improvements. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 71, p. 525–533, 2014.
- DEMIRBA, A. **Biodiesel**: a realistic fuel alternative for diesel engines. 2. ed. Londres: Springer, 2008.
- ESCRITÓRIO EUROPEU DE PATENTES (Espacenet). **Base de dados on-line**. [2018]. Disponível em: <<https://worldwide.espacenet.com/>>. Acesso em: 6 set. 2016.
- ESPINOSA-GONZALEZ, I. *et al.* Two-step thermal conversion of oleaginous microalgae into renewable hydrocarbons. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 158, p. 91–97, 2014.
- GALADIMA, A.; MURAZA, O. Biodiesel production from algae by using heterogeneous catalysts: a critical review. **Energy**, [S.l.], v. 78, p. 72–83, 2014.
- HIDALGO, P. *et al.* Biodiesel production by direct conversion of *Botryococcus braunii* lipids: Reaction kinetics modelling and optimization. **Fuel**, [S.l.], v. 153, p. 544–551, 2015.
- HUYNH, L. H. *et al.* Catalyst-free fatty acid methyl ester production from wet activated sludge under subcritical water and methanol condition. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 123, p. 112–126, 2012.
- HUYNH, L. H.; KASIM, N. S.; JU, Y. H. Extraction and analysis of neutral lipids from activated sludge with and without sub-critical water pre-treatment. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 101, p. 8.891–8.896, 2010.
- INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL (INPI). **Base de dados on-line**. [2018]. Disponível em: <<http://www.inpi.gov.br>>. Acesso em: 8 set. 2016.
- INTERNATIONAL ENERGY OUTLOOK (EIA). **Portal virtual**. [2016]. Disponível em: <<http://www.eia.gov>>. Acesso em: 27 ago. 2016.
- IM, H.; KIM, B.; LEE, J. W. Concurrent production of biodiesel and chemicals through wet *in situ* transesterification of microalgae. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 193, p. 386–392, 2015.
- IM, H. *et al.* Concurrent extraction and reaction for the production of biodiesel from wet microalgae. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 152, p. 534–537, 2013.

- JAZZAR, S. *et al.* A whole biodiesel conversion process combining isolation, cultivation and *in situ* supercritical methanol transesterification of native microalgae. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 190, p. 281–288, 2015a.
- JAZZAR, S. *et al.* Direct supercritical methanolysis of wet and dry unwashed marine microalgae (*Nannochloropsis gaditana*) to biodiesel. **Applied Energy**, [S.l.], v. 148, p. 210–219, 2015b.
- KIM, J. *et al.* Development of direct conversion method for microalgal biodiesel production using wet biomass of *Nannochloropsis salina*. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 191, p. 438–444, 2015.
- KIM, J. *et al.* Methods of downstream processing for the production of biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, [S.l.], v. 31, p. 862–876, 2013.
- KUMAR, V. *et al.* Evaluation and optimization of two stage sequential *in situ* transesterification process for fatty acid methyl ester quantification from microalgae. **Renewable Energy**, Brighton, UK, n. 68, p. 560–569, 2014.
- LAM, M. K.; LEE, K. T. Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward. **Biotechnology Advances**, [S.l.], v. 30, p. 673–690, 2011.
- LEVINE, R. *et al.* Triflate-catalyzed (trans)esterification of lipids within carbonized algal biomass. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 111, p. 222–229, 2012.
- LEVINE, R. B.; BOLLAS, A.; SAVAGE, P. E. Process improvements for the supercritical *in situ* transesterification of carbonized algal biomass. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 136, p. 556–564, 2013.
- LUNA, M. D. G. *et al.* *In situ* transesterification of *Chorella* sp. Microalgae using LiOH-pumice catalyst. **Jornal of Environmental Chemical Engineering**, [S.l.], v. 5, p. 2.830–2.835, 2017.
- LUNDQUIST, T. J. *et al.* A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production. **Energy Biosciences Institute Report**, California, p. 1–178, out. 2010.
- MA, G. *et al.* *In situ* heterogeneous transesterification of microalgae using combined ultrasound and microwave irradiation. **Energy Conversion and Management**, [S.l.], v. 90, p. 41–46, 2015.
- MACHADO, M. **Cultivo de microalgas (*Chlorella* sp. e *Ankistrodesmus* sp. - *Chlorophyceae*) em água residuária suplementada com uréia e CO<sub>2</sub>**. 2011. 39 f. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Programa de Pós-Graduação em Botânica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.
- MENDONÇA, T. A. *et al.* prospecção tecnológica da utilização de microalgas em processo de extração de carotenoides voltados para insumos na nutrição humana e animal. **Revista GEINTEC**, São Cristóvão, SE, v. 3, n. 5, p. 193–204, 2013.
- NAJAFABADI, H.; VOSSOUGH, M.; PAZUKI, G. The role of co-solvents in improving the direct transesterification of wet microalgal biomass under supercritical condition. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 193, p. 90–96, 2015.
- PARK, J. *et al.* Wet *in situ* transesterification of microalgae using ethyl acetate as a co-solvent and reactant. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 2, n. 30, p. 8–14, 2017.
- PATIL, P. *et al.* Optimization of microwave-enhanced methanolysis of algal biomass to biodiesel under temperature controlled conditions. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 137, p. 278–285, 2013.



PEREIRA, C. M. P. *et al.* Biodiesel renovável derivado de microalgas: avanços e perspectivas tecnológicas. **Química Nova**, São Paulo, v. 35, n. 10, p. 2.013–2.018, 2012.

RAMOS, L. P. *et al.* Tecnologias de Produção de Biodiesel. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 5, p. 385–405, 2011.

RAWAT, I. *et al.* Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. **Applied Energy**, [S.l.], v. 103, p. 444–467, 2013.

\_\_\_\_\_. Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. **Applied Energy**, [S.l.], v. 88, p. 3.411–3.424, 2011.

SALAM, K. A.; VELASQUEZ-ORTA, S. B.; HARVEY, A. P. A sustainable integrated *in situ* transesterification of microalgae for biodiesel production and associated co-product - a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 65, p. 1.179–1.198, 2016.

SANTILLAN-JIMENEZ, E. *et al.* Extraction, characterization, purification and catalytic upgrading of algae lipids to fuel-like hydrocarbons. **Fuel**, [S.l.], v. 180, p. 668–678, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 2 set. 2016.

SINGH, B. *et al.* Towards a sustainable approach for development of biodiesel from plant and microalgae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 29, p. 216–245, 2014.

SKORUPSKAITE, V.; MAKAREVICIENE, V.; GUMBYTE, M. Opportunities for simultaneous oil extraction and transesterification during biodiesel fuel production from microalgae: a review. **Fuel Processing Technology**, [S.l.], v. 150, p. 78–87, 2016.

SUH, W. I. *et al.* Direct transesterification of wet microalgal biomass for preparation of biodiesel. **Algal Research**, [S.l.], v. 12, p. 405–411, 2015.

TAHER, H. *et al.* Effective extraction of microalgae lipids from wet biomass for biodiesel production. **Biomass and Bioenergy**, [S.l.], v. 66, p. 159–167, 2014.

TEO, A. H.; ISLAM, A.; TAUFIQ-YAP, Y. H. Algae derived biodiesel using nanocatalytic transesterification process. **Chemical Engineering Research and Design**, [S.l.], v. 111, p. 362–370, 2016.

VELASQUEZ-ORTA, S. B.; LEE, J. G. M.; HARVEY, A. P. Evaluation of FAME production from wet marine and freshwater microalgae by *in situ* transesterification. **Biochemical Engineering Journal**, [S.l.], v. 76, p. 83–89, 2013.

VICENTE, G. *et al.* Heterogeneous-catalysed direct transformation of microalga biomass into Biodiesel-Grade FAMES. **Fuel**, [S.l.], v. 200, p. 590–598, 2017.

WAHLEN, B. D.; WILLIS, R. M.; SEEFELDT, L. C. Biodiesel production by simultaneous extraction and conversion of total lipids from microalgae, cyanobacteria, and wild mixed-cultures. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 102, p. 2.724–2.730, 2011.

WIDJAJA, A.; CHIEN, C.; JU, Y. Study of increasing lipid production from fresh water microalgae *Chlorella vulgaris*. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, [S.l.], v. 40, p. 13–20, 2009.

## Sobre as Autoras

### **Marja Bittencourt Pimentel**

*E-mail:* marja.bittencourt@gmail.com

Formação: Engenheira Química.

Endereço: Rua das Codornas, 96, Ap. 2504, Imbuí – Salvador, BA. CEP: 41720-020.

### **Mariana de Almeida Aquino**

*E-mail:* aquinoalmari@gmail.com

Formação: Engenheira Química.

Endereço: Rua Leonor Calmon, 355, Ap. 601, Cidade Jardim – Salvador, BA. CEP: 40296-210.

### **Ana Katerine Carvalho Lima Lobato**

*E-mail:* ana.lobato@unifacs.br

Formação: Doutora em Engenharia Química.

Endereço: Rua Dr. José Peroba, 251, Costa Azul – Salvador, BA. CEP: 41720-235.