



CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL MICROBIANAS: UMA BREVE DISCUSSÃO SOBRE SUA CONSTRUÇÃO E DESEMPENHO

Morais, E. V. F.¹, Freitas, H. F.S.^{1,2}, Andrade, C.M.G.²[2]

RESUMO: O objetivo do presente estudo é apresentar uma visão geral das células de combustível microbianas (CCM), tendo como enfoque principal os materiais e métodos usados no desenvolvimento destas, bem como os seus componentes e princípios de funcionamento. Com o intuito de fundamentar esta discussão, um breve histórico sobre tais dispositivos é apresentado. Por fim, o desempenho das várias células de combustível microbianas reportadas na literatura é apresentado. Nesse sentido, é possível observar o uso de materiais e técnicas diferentes de autor para autor, bem como certa discrepância acerca das suas respectivas eficiências e modelo utilizado.

PALAVRAS-CHAVE: biotecnologia; células de combustível microbianas; energia renovável

1 INTRODUÇÃO

O achado de um combustível, que ia além da queima de lenha e carvão, foi uma verdadeira revolução durante o século XIX. A promessa de um combustível que estava abaixo do solo e que poderia ser facilmente retirado de lá tornou o chamado “ouro negro” (expressão usada na época para denominar o petróleo) fundamental e ativo na vida da sociedade rapidamente, o que de fato incentivou a sua acelerada exploração por parte da sociedade industrial. Contudo, desde a crise do petróleo, a partir de 1973, há um grande interesse na busca de recursos energéticos renováveis, assim como de fontes de recursos orgânicos capazes de substituir os atuais produtos petroquímicos. (ROSSETO, GAVIOLI, RHODEN e PAMPHILE, 2013).

Segundo, Carvalho (2010), “energia e ambiente são duas faces do mesmo problema: sustentabilidade”. Outros autores também ressaltam essa ideia, como o autor Gazzoni (2007), as mudanças climáticas estão ultrapassando a ameaça de uma guerra atômica, na avaliação dos riscos de extinção da espécie humana sobre a face da Terra. Por este motivo, autoridades e a sociedade civil se movem em busca de tecnologias de baixo potencial de agressão ao ambiente, especialmente com baixa emissão de gases de efeito estufa. Assim, decorrente da crescente preocupação com a extinção dos combustíveis fósseis, e com a procura por combustíveis renováveis, menos poluentes e que não agrediam tanto o meio ambiente surgiu um leque de novos combustíveis, obtidos a partir das mais variadas matérias primas, dentre esses combustíveis estão as células de combustível microbianas (CCM).

A descoberta de que o metabolismo microbiano pode gerar energia na forma de corrente elétrica tem levado a um crescente interesse no domínio das tecnologias com CCM que parecem oferecer uma boa alternativa para a geração de energia elétrica em baixa escala. (LEHNEN, 2014). Esses dispositivos surgem como uma solução para a problemática do aumento constante e acelerado da biomassa orgânica, ou seja, o aumento do lixo e efluentes, principalmente nos centros urbanos e industriais. Tais dispositivos vêm ganhando cada vez mais espaço, pois essa nova fonte de energia abrange três questões cada vez mais discutidas no momento atual, estas são as ambientais, econômicas e tecnológicas (RACHINSKI *et al*, 2009).

2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho consistiu em uma pesquisa exploratória sobre o tema de células de combustível microbianas, mais especificamente voltada para a sua construção e princípio de funcionamento, bem como o levantamento do desempenho para as diversas configurações destes dispositivos apresentadas na literatura. O conceito de pesquisa exploratória pode ser determinado como uma sucinta etapa de pesquisa inicial com a finalidade de familiarizar o pesquisador com o tema em questão, fomentando os questionamentos iniciais acerca do mesmo, necessários ao adequado desenvolvimento de uma atividade de pesquisa (PIOVESAN & TEMPORINI,

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN, Curso de Biocombustíveis, Apodi – RN. Bolsista do IFRN. ²Universidade Estadual de Maringá (UEM). Departamento de Engenharia Química (DEQ)/ UEM. Maringá/PR.



1995). Neste sentido, foi realizada uma revisão na literatura especializada através de mecanismos de busca de material acadêmico (artigos, textos científicos especializados, etc).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma CCM consiste num biorreator que permite a obtenção de energia pela oxidação biológica de matéria orgânica. Para a produção de energia elétrica, uma CCM opera com duas seções (uma catódica-aeróbia e uma anódica-anaeróbia), separadas por uma membrana seletiva a íons H^+ . Neste sistema forma-se um circuito elétrico através da transferência dos elétrons produzidos no ânodo para o cátodo. (CARVALHO, 2010). Os elétrons gerados movem-se através de um condutor externo até o cátodo onde ocorre redução do composto presente no compartimento catódico, gerando corrente elétrica. Os prótons gerados no compartimento anódico migram para o compartimento catódico através de uma membrana semipermeável que separa os dois compartimentos para completar o balanço de cargas. (LEHNEN, 2014). Uma célula de combustível microbiana converte a energia química armazenada nos compostos orgânicos em energia elétrica por via de reações catalíticas operadas por microrganismos que crescem em condições anaeróbias sobre eletrodos (PEIXOTO et al, 2013).

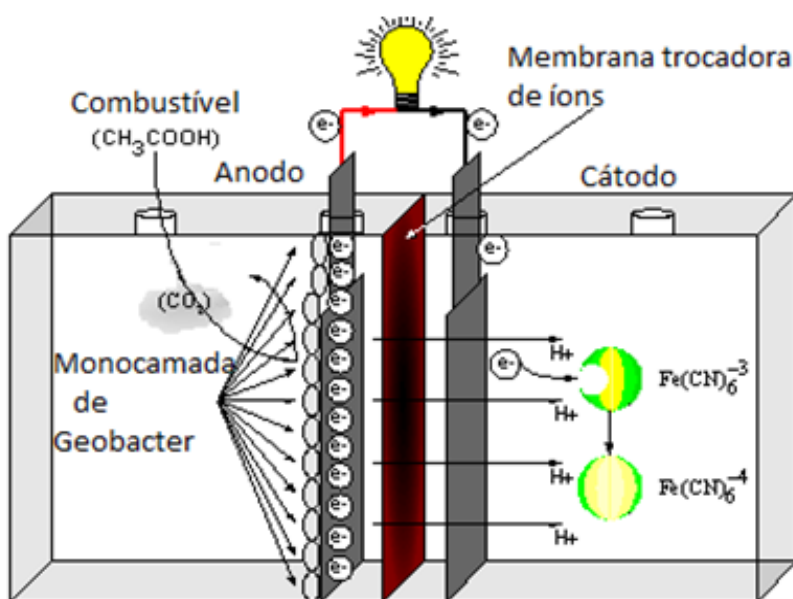


Figura 1 – Esquema de uma célula combustível microbiana com duas câmaras separadas por uma MTP.

Fonte: Lehnen (2014)

A literatura consultada revela que o primeiro contato científico relacionando seres vivos e eletricidade foi feito quando Luigi Galvani, em 1770, realizou uma experiência que constatou que, ao ser submetido à certa quantidade de energia, há a contração de das pernas de uma rã. Em 1911, Michael Cresse Potter demonstrou que existe liberação de energia quando bactérias atuavam sobre algum substrato orgânico. Quarenta anos depois, Rohrbach projetou uma célula de combustível microbiana na qual *Clostridium butyricum* foi usada como catalisador na geração de hidrogênio através da fermentação da glicose. No entanto, com o desenvolvimento bem sucedido de alternativas mais viáveis tecnicamente, como as células fotovoltaicas, houve rápido desinteresse pelas CCM. (RACHINSKI et al, 2009)

As CCM têm sido testadas em diversas configurações. Uma das configurações corresponde ao reator em forma de H com duas câmaras (anódica e catódica) e por uma membrana de troca de prótons, essa configuração é uma das mais usadas, pois aumenta a diferença de potencial entre os eletrodos. Desenvolveram-se outros desenhos, como a CCM de duas câmaras, que permite diminuir a distância entre os eletrodos e aumentar a área de troca de prótons. A CCM de reatores cilíndricos, onde um cilindro externo representa o cátodo e o interno o ânodo. E a CCM submersível, em que a câmara catódica tem um fluxo contínuo de ar e o ânodo está imerso numa câmara que, neste caso, é um reator anaeróbio. (PEIXOTO et al., 2013). É possível observar cada uma das geometrias citadas acima na Figura 1.

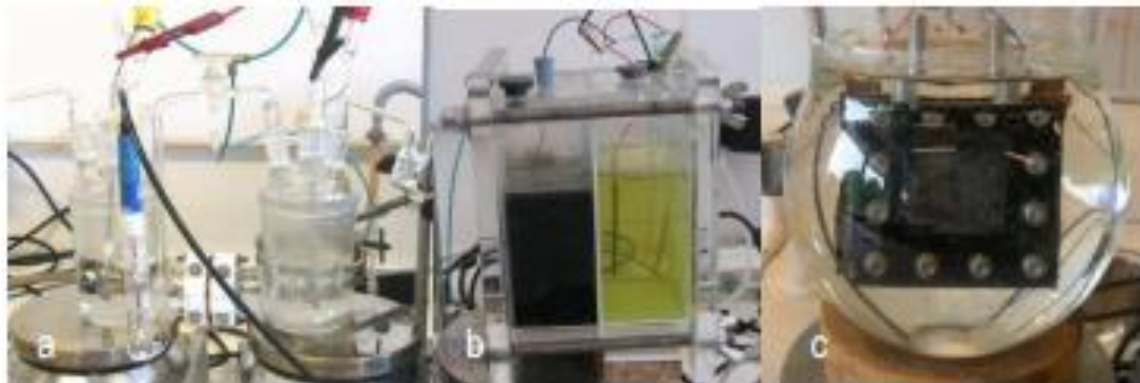


Figura 2 – Configurações de CCM. (a) reator em forma de H. (b) reatores cilíndricos. (c) reator submersível.

Fonte: Peixoto *et al*, 2013.

Existem quatro outras configurações básicas para biorreatores que podem ser distinguidos nas CCMs, segundo Rachinski *et al* (2009). A primeira configuração é a CCM de biorreator desacoplado, onde há produção microbiológica de hidrogênio ou metano, com subsequente recuperação em um biorreator separado procedido por uma célula de combustível química, geralmente operando a altas temperaturas, para converter o gás hidrogênio em eletricidade. A segunda disposição é com um biorreator integrado, que se caracteriza pela produção microbiológica de hidrogênio e conversão em eletricidade em apenas uma célula. Já terceira consiste em um dispositivo com transferência direta de elétrons, onde existe a geração de eletricidade com o uso de micro-organismos e transferência direta do elétron para o ânodo. E a última é a CCM com mediador para a transferência de elétron, que tem como diferencial a geração de eletricidade através dos micro-organismos e transferência do elétron para o ânodo por meio de um "carregador" de elétrons funcionando como mediador. Entretanto, outras configurações são possíveis, sendo que estas se diferenciam em diversos aspectos, como na natureza e mecanismo de transferência de elétrons, podendo ser compostos por um ou dois compartimentos, possuir ou não membrana semipermeável, utilizar diferentes tamanhos e materiais nos eletrodos, diferentes substratos ou ainda utilizar sedimentos, culturas puras ou coculturas de bactérias. Além disso, podem ser de fluxo contínuo ou por bateladas e possuir diferentes modelos. (LEHNEN, 2014).

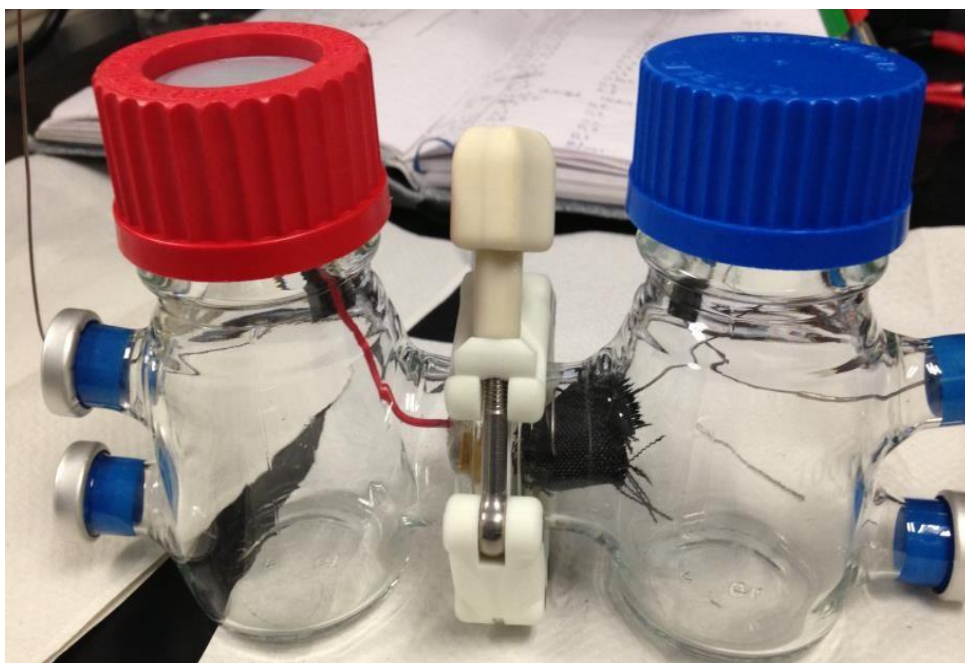


Figura 3 – Representação de uma CMM de formato H.

Fonte: Lehen (2014)

Como já foi explicado dito anteriormente, as CCM tem dois compartimentos, o ânodo e o cátodo. No compartimento anódico ocorre o processo de oxidação, onde há a perda de elétrons, logo se encontra o polo



positivo. Já na câmara catódica ocorre a reação de redução, havendo o ganho de elétrons e, portanto, situando o polo negativo. Entre essas repartições pode haver, ou não, uma membrana semipermeável que tem como função equilibrar o balanço de cargas. Em outras palavras, na câmara do ânodo (anaeróbia) microrganismos oxidam o substrato produzindo elétrons e prótons, os quais são transferidos para a câmara do cátodo (aeróbia). Os prótons são conduzidos pela Membrana de Troca de Prótons e os elétrons através do circuito externo que liga o ânodo ao cátodo (MARCON, 2011).

Os materiais utilizados para a construção do ânodo devem ter boa condutividade elétrica e baixa resistência elétrica, alta biocompatibilidade, estabilidade química e não podem sofrer corrosão. Já os materiais que constituírem o cátodo devem possuir alto potencial redox e ser fácil de capturar prótons. (LEHNEN, 2014). A escolha do material e da geometria do eletrodo é um parâmetro determinante na performance de um sistema bioeletroquímico. Grande parte dos eletrodos utilizados atualmente são feitos de carbono ou grafite, pois estes oferecem um custo relativamente baixo e uma boa compatibilidade para o desenvolvimento da flora bioeletroquímica. O problema principal na utilização destes materiais é que eles apresentam uma baixa condutividade elétrica. A membrana catiônica é semipermeável, feita a partir de ionômeros que permitem a condução de prótons e a impermeabilidade de gases e elétrons. (ALBERNAZ, 2011).

Vários autores desenvolveram CCM para demonstrar em seus trabalhos a eficiência, desempenho e também como os materiais e geometrias das células influenciaram em todo processo. Abaixo segue a tabela 1, que irá relacionar os diversos autores que construíram CCM.

Tabela 1: Relação entre os materiais e autores de várias CCM

Dispositivo	Materiais	Bibliografia
Biorreator	Recipientes: Polimetil-metacrilato de 1L; Membrana permeável a prótons: Nafion® 112; Cátodo: Carbono plano impregnado com platina; Ânodo: Carbono	CARVALHO (2010)
MFC	Recipientes: Borossilicato de 100 ml; Membrana permeável a prótons: Nafion®-117; Cátodo: Tecido de carbono; Ânodo: Titânio revestido de ouro	LEHNEN (2014)
Pilha a Combustível Microbiano F	Recipiente: Vidro acrílico de 75 ml; Membrana permeável a prótons: Nafion®; Cátodo: Carbono Vítreo Reticulado; Ânodo: Carbono Vítreo Reticulado	ALBERNAZ (2011)

O desempenho de uma CCM pode variar devido a muitos fatores. Como Marques (2014) demonstrou em seu trabalho, as mudanças de temperatura afetam, de forma direta, a potência do dispositivo. A maior parte das CCM tem um melhor desempenho quando funcionam a temperaturas maiores do que 20°C, porém alguns dispositivos apresentam um alto desempenho mesmo em temperaturas baixas. Estudos na comunidade científica sobre esses dispositivos seriam uma solução para o funcionamento desses equipamentos em continentes que passam a maior parte do ano com temperaturas inferiores a 20°C. Na tabela a seguir é possível observar o quanto a temperatura influencia na potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$ (mW/m³)) das CCM.

Tabela 2: Resultados publicados em artigos para diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Tipo de CCM	Alimentação	$P_{m\acute{a}x}$ (mW/m ³)	Referência
------------------	-------------	-------------	--	------------



4	CCM sedimentar	Sedimentos Marinhos	7,03	Scott (2008) <i>apud</i> Marques (2014)
8	2 câmaras	Água residual artificial	112,26	Jadhav & Ghangrekar (2009) <i>apud</i> Marques (2014)
8	CCM sedimentar	Sedimentos Marinhos	5,05	Hong (2009) <i>apud</i> Marques (2014)
15	2 câmaras	Acetato	7,3	Min (2008) <i>apud</i> Marques (2014)
15	CCM sedimentar	Plâncton	210	Reimers (2007) <i>apud</i> Marques (2014)
20	2 câmaras	Acetato	168,66	Min (2008) <i>apud</i> Marques (2014)
20	2 câmaras	Água residual artificial	99,13	Jadvah (2009) <i>apud</i> Marques (2014)
20	CCM sedimentar	Sedimentos Marinhos	26,76	Hong (2009) <i>apud</i> Marques (2014)
25	2 câmaras	Água residual artificial	140,1	Tartakovsky(2006) <i>apud</i> Marques (2014)
25	1 câmara	Água residual artificial	90,99	Du (2008) <i>apud</i> Marques (2014)
25	2 câmaras	Água residual artificial	182	Liu (2007) <i>apud</i> Marques (2014)
30	2 câmaras	Acetato	256,66	Min (2008) <i>apud</i> Marques (2014)
30	2 câmaras	Água residual artificial	461,08	Venkata (2008) <i>apud</i> Marques (2014)
30	2 câmaras	Celulose	150	Ishii (2008) <i>apud</i> Marques (2014)
30	2 câmaras	Etanol	151,17	Kim (2007) <i>apud</i> Marques (2014)
30	2 câmaras	Etanol	171,70	Kim (2007) <i>apud</i> Marques (2014)



30	2 câmaras	Diesel + água subterrânea	16	Morris (2009) <i>apud</i> Marques (2014)
35	2 câmaras	Água residual artificial	248,69	Alzate- Gaviria (2008) <i>apud</i> Marques (2014)
35	CCM sedimentar	Sedimentos marinhos	57,46	Hong (2009) <i>apud</i> Marques (2014)

Fonte: Larrosa-Guerrero (2010) *apud* Marques (2014)

Na primeira CCM referida na tabela 1, foram feitos muitos testes para mostrar a viabilidade dela, de forma que, encontraram-se condições ótimas pela maior geração de energia, com um mínimo de 2.5 W/m^2 e um máximo de 41.1 mW/m^2 , contudo, esta produção de potência correlacionada com a remoção de matéria orgânica obteve uma eficiência de 3.8% bastante abaixo do esperado, para as condições ótimas. Os melhores resultados relacionados à eficiência do aparelho vieram quando houve uma agitação do substrato, pois o rendimento chegou a quase 42%. Nesse mesmo teste a potência mínima e máxima foi de 0.16 W/m^3 e 2.1 W/m^3 , respectivamente, com 0 e 1000 RPM (rotações por minuto). (CARVALHO, 2010.).

A MFC de Lehnen (2014) apresenta uma potência elevada, podendo ser usada também como cultura pura em células de combustível microbianas, para a produção de eletricidade, detectou-se isso depois de alguns testes, onde obteve-se a densidade máxima de potência de $0,087 \text{ W/m}^2$, sendo que a área de ânodo utilizada foi de $6,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Entretanto, quando a área ânodo foi de $6,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ para $4,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ a densidade de potência máxima atingida passou a ser $0,16 \text{ W/m}^2$. Por fim, quando a área do ânodo foi de $3,6 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ a potência máxima obtida foi de $2,61 \text{ W/m}^2$.

Por último, a Pilha a Combustível Microbiano F apresenta uma baixa viabilidade, devido a sua pequena eficiência e baixa performance. Nos primeiros dias de funcionamento o dispositivo não apresentou nenhum resultando significativo, ao que diz respeito a potência, apenas depois da renovação do seu meio eletrolítico anódico é que atingiu valores próximos a 8 mW/m^2 , entretanto foram feitos diversos procedimentos com fatores que alteraram a potência da Pilha de forma significativa, e o rendimento foi de, aproximadamente, 8,17%, considerado baixo. (ALBERNAZ, 2011).

4 CONCLUSÕES

Ante o exposto, conclui-se que o uso de substratos para gerar energia pode ser uma alternativa viável para os problemas energéticos presentes no atual momento, dado que o acúmulo de lixo e matéria orgânica é constante, por isso, esse fator somado a uma tecnologia capaz de transformar matéria orgânica em energia elétrica seria uma solução bastante viável, em termos ambientais, econômicos e tecnológicos.

Vale ressaltar que existem muitos tipos e formas de montar as CCM, porém os resultados que elas irão apresentar não dependem somente dos fatores citados a cima. As condições de trabalho do dispositivo também influenciam diretamente no rendimento do equipamento, tais como a temperatura, o substrato usado no processo de obtenção de energia, a agitação ou não do substrato, dentre vários outros aspectos que atuam de forma positiva e negativa na obtenção dos resultados. Tendo como base esses elementos, dentre as CCM revisadas neste trabalho, a de Carvalho (2010) foi a que apresentou melhores resultados, no que diz respeito à potência, ela foi construída a partir de câmaras feitas de polimetil-metacrilato, uma membrana Nafion® 112 e eletrodos de carbono, com um deles revestido com platina. Entretanto, estes dispositivos ainda são uma tecnologia relativamente nova, e, portanto, torna-se necessário o desenvolvimento de pesquisas sobre essa fonte de energia, tanto para reduzir os custos como para aumentar sua eficiência.

REFERÊNCIAS

ALBERNAZ, F. O. **Avaliação de uma célula a combustível microbiano com eletrodos de carbono vítreo reticulado.** Monografia (Curso de Engenharia Sanitária) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2011.



CARVALHO, T. J. L. **Estudo da produção de energia eléctrica a partir de uma célula de combustível microbiana.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2010.

GAZZONI, D. L. **Células de combustível microbianas**, 2007. Disponível em:
<<http://www.biodieselbr.com/noticias/colunistas/gazzoni/celulas-combustivel-microbianas-15-08-07.htm>> Acesso em: Jul 2015.

LEHNEN, D. R. 2014. **Desenvolvimento de células de combustível microbianas.** Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MARCON, L. R. C. **Potencialidade da célula combustível microbiana para geração de energia eléctrica a partir de esgoto sanitário.** 2011. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2011.

MARQUES, A. F. **Células combustíveis microbianas aplicadas ao tratamento de efluentes.** 2014. Monografia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PEIXOTO, L., MARTINS, G. , AMORIM, D., PARPOT, P., NOGUEIRA R. e BRITO, A. G. de. **Células de combustível microbianas:** um processo inovador para produção de energia e tratamento de águas residuais em sistemas descentralizados. In: 11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa e VII Congresso sobre Planeamento e Gestão de Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, 2013, Maputo, Moçambique.

PIOVESAN, A., TEMPORINI, E. R., **Pesquisa Exploratória: procedimento metodológico para o estudo de fatores humanos no campo da saúde pública.** Revista Saúde Pública, Vol. 29, No. 4, p. 318-325, 1995.

RACHINSKI, S., CARUBELLI, A., MANGONI, A. P, MANGRICH, A. S. 2009. **Pilhas de combustíveis microbianas utilizadas na produção de electricidade a partir de rejeitos orgânicos:** uma perspectiva de futuro. <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422010000800026&script=sci_arttext> Acesso em: Jul 2015

ROSSETO, P., GAVIOLI, A. C., RHODEN, S. A., PAMPHILE, J. A. 2013. Melhoramento genético microbiano baseado na engenharia genética: o caso dos microrganismos produtores de etanol. **Revista UNINGÁ Review**, Vol. 17, No. 1, p. 48-53, 2014.