



# **Regulação da Energia de Células de Combustível Microbiana com um Conversor DC-DC**

**Versão final após defesa**

**César Raul António Bumba**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor António Eduardo Vitória do Espírito Santo

**Janeiro de 2023**



## Declaração de Integridade

Eu, César Raul António Bumba, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M10529 de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referência de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 09 / 01 / 2023





# **Dedicatória**

O ciclo da vida ensina-nos muitas lições, mas uma delas que me apraz exaltar está relacionada com a continuidade. Desde que me conheço como pessoa sempre entendi que: nós somos porque outros foram. E isso reflete-se em tudo que a vida nos proporciona.

Com isso, dedico a presente dissertação ao meu Pai, Simão Bumba, por acreditar sempre em mim e nas minhas capacidades, entristecendo-se com os meus fracassos e alegrando-se constantemente com as minhas vitórias.

César R. A. Bumba



# Agradecimentos

A conclusão da presente dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, marca não só o fim de dois anos intensos de mestrado, mas também o fim de cinco anos estudando com os melhores, isto desde a licenciatura ao mestrado, e todo esse percurso incita-me a abraçar uma carreira de investigação a nível de Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Durante o meu percurso académico, vários foram os desafios enfrentados, mas sempre foi possível superá-los, tudo porque sempre tivemos um corpo docente preparado para toda boa obra.

Em primeiro lugar agradeço a *Suku a Tate* (Deus Pai), pelo fôlego de vida e constante proteção.

Minha maior gratidão endereço ao Professor Doutor António Eduardo Vitória do Espírito Santo, em primeiro lugar por abraçar o desafio de ser meu orientador, segundo pela maestria incisiva que sempre apresentou a cada interação que tivemos, permitindo assim alargar o meu leque de conhecimentos na área de *Energy Harvesting* e terceiro pela amizade transversal que o Professor vem construindo com os seus orientandos em particular comigo, verdadeiramente fez-me lembrar do meu Pai.

Agradeço ao meu Pai pelo constante apoio, a minha Mãe (Matilde António) por sempre lutar por seus filhos, a Mamã (Sofia Cristina) por aceitar o desafio de me ter em seus cuidados. Estendo ainda os meus especiais agradecimentos aos meus irmãos, a minha namorada, aos meus amigos e colegas que sempre se fizeram presentes em todos os maus e bons momentos.

Estendo também minha gratidão ao INAGBE (Instituto Nacional de Gestão de Bolsa de Estudos) pelo investimento a mim proporcionado durante o período de formação.

Em suma, a todos, os meus mais sinceros agradecimentos.

César R. A. Bumba



## Resumo

O surgimento de vários estudos sobre *energy harvesting*, voltados a solucionar problemas ligados a fontes de baixa potência de maneira a extrair a potência máxima, com objetivo de garantir autonomia energética a unidades de redes de sensores e atuadores sem fio, de formas a fazerem face às baterias convencionais, proporcionando assim uma solução amiga do ambiente, vem observando desafios de caráter ambiental, económico e tecnológico.

Na presente dissertação é feita uma revisão bibliográfica sobre Células de Combustível Microbiana para entender o método de conversão de energia das mesmas, que se baseia numa reação de oxidação-redução da matéria orgânica pela ação de uma colónia de bactérias. Foram simulados os parâmetros de tensão, corrente e potência produzidos por uma célula de combustível microbiana; um conversor DC-DC foi projetado e simulado em ambiente Matlab/Simulink, com objetivo de extrair o ponto máximo de potência (MPP) do circuito equivalente das células de combustível microbiana. Foi igualmente projetado um hardware, desenhado em ambiente de *DesignSpark*, no formato de uma placa de circuito impresso (PCB), que garanta a aplicação do conversor DC-DC que é controlado pelo microcontrolador Mbed NXP LPC1768.

Pelos resultados obtidos a nível de simulação, foi possível observar que o conversor DC-DC projetado extraiu a potência máxima que as células conseguem produzir mesmo variando as condições de funcionamento das mesmas.

## Palavras-chave

Energy Harvesting; Células de Combustível Microbiana; Conversor DC-DC; MPPT; Mbed; PCB; Matlab/Simulink.



# **Abstract**

The emergence of several studies on energy harvesting, aimed at solving problems related to low power sources to extract the maximum power, with the objective of guaranteeing energy autonomy to wireless sensor and actuator network units, to face the conventional batteries, thus providing an environmentally friendly solution, has been observing environmental, economic and technological challenges.

In the present dissertation, a bibliographic review is made on Microbial Fuel Cells to understand their energy conversion method, which is based on an oxidation-reduction reaction of organic matter by the action of a colony of bacteria. The voltage, current and power parameters produced by a microbial fuel cell were simulated; a DC-DC converter was designed and simulated in Matlab/Simulink environment, to extract the maximum power point (MPP) of the equivalent circuit of microbial fuel cells. Hardware was also designed, designed in the DesignSpark environment, in the format of a printed circuit board (PCB), which guarantees the application of the DC-DC converter that is controlled by the Mbed NXP LPC1768 microcontroller.

From the results obtained at the simulation level, it was possible to observe that the designed DC-DC converter extracted the maximum power that the cells can produce even varying their operating conditions.

## **Keywords**

Energy Harvesting; Microbial Fuel Cells; DC-DC Converter; MPPT; Mbed; PCB; Matlab/Simulink.



# Índice

Dedicatória.....	v
Agradecimentos .....	vii
Resumo .....	ix
Abstract.....	xi
1. Introdução .....	1
1.1. Motivação e enquadramento da dissertação .....	1
1.1.1. Motivação .....	1
1.1.2. Enquadramento .....	2
1.2. Objetivos principais .....	2
1.3. Estrutura e organização da dissertação .....	3
2. Procedimento de Conversão de Energia de Células de Combustível Microbiana.....	4
2.1. Introdução .....	4
2.2. Células de Combustível Microbiana.....	5
2.3. Materiais de Construção de uma Célula de Combustível Microbiana .....	6
2.4. Arquitetura das Células de Combustível Microbiana.....	8
2.5. Exemplos de Aplicação das Células de Combustível Microbiana.....	12
3. Revisão dos Métodos de Regulação de Energia .....	16
3.1. Introdução .....	16
3.2. Caracterização elétrica da MFC.....	16
3.3. Conversores de energia DC-DC .....	18
3.4. Rastreamento do ponto máximo de potência.....	21
4. Modelo para Captação de Energia Aplicadas às Células de Combustível Microbiana	

4.1.	Introdução .....	23
4.2.	Design do conversor DC-DC.....	23
4.2.1.	Análise de circuito integrado de gerenciamento de energia .....	25
4.3.	Materialização da Metodologia .....	29
4.3.1.	INA219 .....	32
4.3.2.	MBED NXP LPC1768 .....	33
4.3.3.	LTC3108.....	34
4.4.	Teste e Validações .....	36
5.	Considerações Finais .....	44
5.1.	Conclusão .....	44
5.2.	Trabalhos Futuros.....	44
	Referências Bibliográficas .....	46
	Apêndice A .....	51
A.1.	Célula de Combustível Microbiana .....	51
A.2.	Circuito LTC3108.....	51
A.3.	Esquema do modelo proposto para o PCB .....	53
A.4.	Algoritmos utilizados nas simulações em Matlab/Simulink.....	54
A.5.	Algoritmos utilizados nas simulações em c++ .....	56



# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Modelo esquemático das células de combustível microbiana [12].....	5
Figura 2.2 - Modelo MFC tipo H.....	8
Figura 2.3 - (A) Esquema do modelo e (B) Protótipo em escala de laboratório da MFC de uma única câmara [21].....	9
Figura 2.4 - (A) Esquema do modelo TMFC; (B) Configuração geral do modelo TMFC [24]. .....	10
Figura 2.5 - (A) Esquema do modelo UMFC; (B) Protótipo em escala laboratorial do modelo UMFC [21].....	10
Figura 2.6 - (a) Corte Longitudinal de duas metades das células MFC; (b) vista em corte transversal de uma única MFC; (c) Diagrama esquemático da pilha MFC; (d) fotografia do sistema de pilha MFC alimentando um painel de Led; (e) esquema de pilha MFC ligado em série (modo A); (f) esquema da pilha MFC ligado em série-paralelo (modo B) [26].....	11
Figura 2.7- (A) Esquema do modelo FPMFC; (B) Protótipo em escala laboratorial do modelo FPMFC [27].....	11
Figura 2.8 - Tendência anual de publicações com base em uma pesquisa no portal Web of Science TM para a palavra-chave 'células de combustível microbiana' (2003-2022). ....	12
Figura 2.9 - Gastronome, um protótipo de robô alimentado por célula de combustível microbiana [31].....	13
Figura 2.10 - Visão geral da família Ecobot. (a) Ecobot-I; (b) Ecobot-II; (c) Ecobot-III; (d) Ecobot_IV [9]. ....	14
Figura 2.11 - (a) Representação 3D da pilha de MFC com os tanques de entrada e saída sob o urinol; (b) Teste de campo, energia produzida pela urina [36].....	14

Figura 2.12 - (a) Boia de dados meteorológicos utilizada em demonstração em Píer; (b) Matriz de ânodo de grafite [31].	15
Figura 3.1 - (a) Circuito equivalente de uma MFC; (b) MFC ligado em paralelo com uma resistência variável.	17
Figura 3.2- Curva de polarização construída com valores de uma MFC ideal desenvolvida em Matlab.	18
Figura 3.3 - Conversor DC-DC Boost.	19
Figura 3.4 - Conversor DC-DC Buck.	20
Figura 3.5 - Conversor DC-DC Buck-Boost.	20
Figura 3.6 - Fluxograma do algoritmo Perturba e Observa (P&O).	22
Figura 4.1 – Diagrama de Blocos do Sistema Proposto.	23
Figura 4.2 – Diagrama de Blocos do Sistema Proposto desenvolvido em Simulink.	25
Figura 4.3- Parte da composição do bloco DC/DC Boost.	26
Figura 4.4 - Bloco MPPT Controller.	26
Figura 4.5 Algoritmo PSO.	28
Figura 4.6 - Modelo esquemático proposto para o PCB.	30
Figura 4.7 – PCB, Design do modelo Proposto.	30
Figura 4.8 - a) JFET montagem normalmente fechada, b) MOSFET montagem normalmente aberta.	32
Figura 4.9 - Placa modelo de um INA219.	33
Figura 4.10 - Esquema da placa do microcontrolador MBED NXP LPC1768 [50].	34

Figura 4.11 - LTC3108 diagrama de blocos [51].....	35
Figura 4.12 - Simulação do circuito paralelo LTC3108 sem $R_{in}$ da célula. ....	37
Figura 4.13 - Condições de arranque no circuito LTC3108 sem $R_{in}$ da célula. ....	37
Figura 4.14 - Funcionamento do circuito LTC3108 sem $R_{in}$ da célula. ....	38
Figura 4.15 - Simulação do circuito paralelo LTC3108 com $R_{in}$ da célula.....	39
Figura 4.16 - Observação dos últimos ms da simulação do LTC3108, com uma fonte .....	39
Figura 4.17 - Primeira simulação.....	40
Figura 4.18 - Simulação ajustada.....	41
Figura 4.19 - Simulação de uma MFC variando os parâmetros.....	41
Figura 4.20 - Simulação de uma MFC variando a tensão.....	42
Figura 4.21 - Curva de polarização de três MFCs; (a) tensão máxima de 400 mV; (b) tensão máxima 500 mV; (c) tensão máxima 600 mV.....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
Figura 0.1 - A) MFC pequeno; B) MFC grande.....	51
Figura 0.2 - Circuito Paralelo (LTC318) desenvolvido em LTspice.....	52
Figura 0.3 - Circuito Paralelo (LTC318) desenvolvido em DesignSpark PCB 10.0.....	52
Figura 0.4 - Esquema do Modelo proposto para o PCB. ....	53
Figura 0.5 - Algoritmo perturba e observa desenvolvido em Matlab (linha 1 à 44).....	54
Figura 0.6 - Algoritmo perturba e observa desenvolvido em Matlab (linha 45 à 68). ....	55
Figura 0.7 – main.cpp da linha 1 à 42. ....	56
Figura 0.8 - main.cpp da linha 43 à 82.....	57

Figura 0.9 - main.cpp da linha 83 à 123. ....	58
Figura 0.10 - main.cpp da linha 124 à 131. ....	58



# Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Funcionamento do conversor DC-DC Buck-Boost com dois interruptores... 21

Tabela 4.1 - Combinação de lição dos terminais VS2 e VS1 para escolha de  $V_{OUT}$ . .....36



# Lista de Acrónimos

MFC	<i>Microbial Fuel Cell</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
RSSFs	Rede de Sensores Sem Fios
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i>
CEM	<i>Cation Exchange Membrane</i>
AEM	<i>Anion Exchange Membrane</i>
UFM	<i>Ultrafiltration Membrane</i>
FPMFC	<i>Flat Plate Microbial Fuel Cell</i>
BMFC	<i>Benthic Microbial Fuel Cell</i>
TMFC	<i>Terrestrial Microbial Fuel Cell</i>
RF	<i>Radio-Frequency</i>
P&O	<i>Perturb and Observe</i>
PI	<i>Proportional Integral</i>
$K_p$	Ganho proporcional
$K_i$	Ganho integral
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PGA	<i>Programmable Gain Amplifier</i>
ADC	<i>Analog Digital Converter</i>
ARM	<i>Advanced RISC Machine</i>
DAC	<i>Digital Analog Converter</i>
I <sup>2</sup> C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
E/S	Entradas e Saídas
DC	<i>Direct Current</i>
$V_{ref}$	Tensão de referência



# Capítulo 1

## 1. Introdução

### 1.1. Motivação e enquadramento da dissertação

Os combustíveis fósseis por mais potentes que sejam, o seu uso vem se apresentando como uma forte poluidora do ambiente, sem esquecer que são recursos não renováveis ou seja recursos finitos; pelo que têm despertado a preocupação de muitas nações no sentido de criarem alternativas para que as emissões globais de gases de efeito de estufa sejam minimizadas [1]. A recolha da energia disponível no meio ambiente também conhecida como *energy harvesting* tem sido apontada por diversos autores [2] [3] [4] [5] [6] como uma possível alternativa aos combustíveis fósseis, na aplicação de dispositivos de baixa potência.

#### 1.1.1. Motivação

A principal motivação que nos leva a trabalhar com temas de pesquisa na área de *energy harvesting*, está relacionada ao facto de sabermos que é uma área emergente que apresenta a possibilidade de recolher a energia de um determinado meio, que eventualmente está a ser dissipada em forma de vibração, calor, radiação, entre outras, para uso local em um determinado dispositivo de baixa potência [7].

Claramente, a tecnologia de *Microbial Fuel Cell* (MFC) tem reunido todas as condições para poder fazer parte de um sistema de *energy harvesting*. Fruto disso, tem sido intensamente pesquisada nos últimos anos como uma tecnologia inovadora, porque oferece uma solução para energia ambientalmente sustentável, tratando resíduos e recuperando eletricidade simultaneamente, sem esquecer que teoricamente pode converter qualquer substrato biodegradável em eletricidade, o que torna a tecnologia numa solução viável para o fornecimento de energia autónoma [8].

Em suma, a real motivação que impulsionou o desenvolvimento da presente dissertação foi poder contribuir na resolução do problema energético do mundo, usando a energia disponível no ambiente com foco nas células de combustível microbiana.

### **1.1.2. Enquadramento**

O constante progresso tecnológico nas últimas décadas, resultou numa demanda de dispositivos com fios e sistemas sem fios de pequena escala, inclusive um aumento significativo da Internet das Coisas (IOT). Por outro lado, uma problemática que se prende com a redução de recursos como combustíveis fósseis, o constante aumento dos custos da energia, apontam para a necessidade de baterias de última geração e formas de energia sustentáveis, como células de combustível, hidrelétricas, piezoelétricas, termoelétricas e fotovoltaicas [2].

Atualmente, muitos são os problemas que os resíduos, lixo ou materiais não utilizados provocam ao planeta e em particular a biodiversidade. Tal proliferação tem como principal responsável o ser humano [9]. A extração de energia de resíduos orgânicos ou inorgânicos pode ser observado como um meio eficiente na resolução de problemas energéticos e ambientais em simultâneo. Sendo que, a disponibilidade de energia, em última análise, tende a limitar as aplicações dos módulos de instrumentação no mundo real, por exemplo, a utilidade de um sensor pode ser muito limitada se precisar de uma conexão com a rede elétrica principal ou até mesmo se for alimentado por uma bateria, funcionando apenas por algumas horas [7].

As células de combustível microbianas (MFC) foram previstas como um recurso de energia renovável, limpas sem emissão de dióxido de carbono e sustentáveis para atender a procura futura de energia por intermédio de águas residuais. Com o auxílio de um circuito de eletrónica de potência, as MFCs podem ser usadas como fonte de alimentação para dispositivos eletrónicos de baixa potência, como por exemplo um nó numa rede de sensores sem fios (RSSFs).

Vários esforços têm sido feitos nos projetos de conversores DC-DC, com objetivo de aumentar eficiência e baixar o consumo de energia [2].

## **1.2. Objetivos principais**

Tendo em consideração as motivações que levaram a realização desta dissertação, os objetivos principais que regeram a instrumentalização da presente dissertação foram:

- Apresentar um estudo dos métodos de conversão de energia aplicados às células de combustível microbiana;

- Usar o conhecimento adquirido durante o período de formação para projetar um conversor DC-DC, que elevará a tensão produzida pelas células a um valor utilizável, cerca de 3.3 V, enquanto extrai e procura o ponto máximo de potência das mesmas;
- Projetar um *hardware* que permite tornar viável a implementação de um algoritmo de procura do ponto máximo de potência (MPPT) produzida pelas células.

### **1.3. Estrutura e organização da dissertação**

A nível de organização, a presente dissertação está constituída por cinco capítulos e um apêndice. No capítulo 1, procurou-se fazer uma introdução da dissertação, apresentando as motivações que nos levaram a trabalhar com projetos dessa natureza, apresentamos também um enquadramento teórico e os objetivos que nortearam a dissertação;

No capítulo 2 procuramos apresentar uma revisão bibliográfica sobre as MFCs, apresentando o seu surgimento num contexto histórico; desenvolver de um modo geral o funcionamento das MFCs; descrever os materiais necessários para a construção das mesmas; apresentar alguns modelos de design/arquitetura das MFCs mais comuns na literatura; e por fim trazer também alguns exemplos de aplicação das MFCs;

O capítulo 3 é um capítulo no qual procurou-se desenvolver conceitos de regulação, apresentando um estudo dos parâmetros elétricos das MFCs, uma revisão dos princípios de funcionamento dos conversores DC-DC, uma revisão do princípio de funcionamento do algoritmo Perturba e Observa na procura do ponto máximo de potência;

O capítulo 4, é de carácter mais prático, no qual apresenta-se uma descrição da componente de projeto que a dissertação acarreta, demonstrando o desenvolvimento da interface entre a fonte e a carga, validando as simulações do circuito paralelo idealizado para garantir o arranque do sistema e também as simulações do conversor DC-DC Boost desenvolvidos;

No capítulo 5, são apresentadas as considerações finais dos estudos e simulações desenvolvidas, sugerindo também possíveis discussões futuras;

No apêndice A, são dadas algumas informações que são importantes ressaltar na presente dissertação.

## Capítulo 2

### 2. Procedimento de Conversão de Energia de Células de Combustível Microbiana

#### 2.1. Introdução

Por volta de 15-20 anos, a comunidade científica voltou a sua atenção à tecnologia de célula de combustível microbiana (MFC), observando as possibilidades de resíduos orgânicos serem transformados diretamente em energia elétrica, isso por reações eletroquímicas [10]. Observando o processo de desenvolvimento das MFC, foi possível perceber que:

No início do século XIX, William Grove, um químico e advogado de patentes, também conhecido pela comunidade científica como o pai da ciência das células de combustível devido à sua mais famosa demonstração experimental de eletrolise água/célula de combustível, com base na sua experiência em eletrólise, Grove propôs um processo reverso para gerar eletricidade, e o mesmo conseguiu construir um dispositivo capaz de combinar hidrogênio e oxigênio para produzir eletricidade [11].

Já em 1911, Michael C. Potter, um dos pioneiros das MFCs, explicava a ocorrência de uma força eletromotora entre elétrodos imersos em culturas de bactérias, chegando a conclusão de que a energia pode ser disponibilizada a partir da desintegração microbiana de compostos orgânicos [10] [12].

Duas décadas mais tarde, isso em 1931, Bennett Cohen surge no sentido de confirmar os resultados obtidos por Petter, desenvolvendo conceitos práticos, construindo uma célula bacteriana com a qual conseguiu fornecer uma corrente de cerca de 0,2 mA e 35 V [13].

Em 1959 surge o engenheiro inglês Francis Thomas Bacon demonstrando uma célula de combustível totalmente funcional [11].

Nos anos 60, há um renascer das investigações sobre as MFCs, isso porque, a NASA entra na corrida e cria projetos para auxiliar os seus programas espaciais; a ideia consistia em reciclar resíduos para produzir eletricidade com objetivo de usá-la durante os voos espaciais [11][12][14].

Neste capítulo, é feita uma revisão bibliográfica sobre as MFCs, trazendo uma introdução histórica do surgimento das MFCs; uma abordagem genérica sobre o seu funcionamento; materiais essenciais para a construção de uma MFC; alguns modelos de design mais apresentados na literatura e por fim alguns exemplos de aplicações das MFCs.

## 2.2. Células de Combustível Microbiana

As células de combustível microbiana (MFCs) são essencialmente biocatalizadores capazes de converter energia química em energia elétrica [12] [15] a partir de um substrato [16] biodegradável [8], fluindo elétrons do ânodo para o cátodo [17], por intermédio de uma reação termodinamicamente favorável [18], na qual o ânodo experimenta uma reação de oxidação e o cátodo uma reação de redução [3].

O modelo de uma MFC convencional é composto por duas câmaras, tal como mostra a Figura 2.1, essas câmaras são conhecidas como câmara anódica e câmara catódica; separadas por uma membrana que permite a troca de prótons entre as duas câmaras e que também é responsável pela manutenção das condições anaeróbicas na câmara anódica [19].

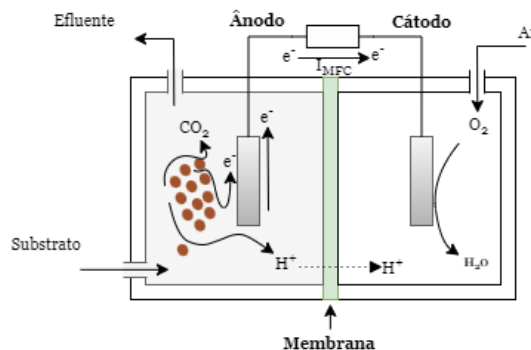
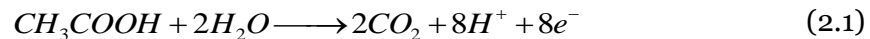


Figura 2.1 - Modelo esquemático das células de combustível microbiana.

Como já é sabido, a câmara anódica opera em condições anaeróbicas, tal fato permite que o desenvolvimento e a proliferação das bactérias unem-se com o eletrodo formando assim um biofilme, uma vez que na presença de oxigênio as bactérias tendem a usar o oxigênio como aceitador de elétrons ao invés do ânodo [12] [15] [16]. Quanto a câmara catódica é mantida em condições aeróbicas, em que o oxigênio é reduzido com a produção de água [12] [15] [16].

Quando se usa o acetato ou melhor o ácido cético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) como substrato dentro de uma MFC, duas são reações que dominam as câmaras, a câmara anódica é dominada

pela equação (2.1), na qual o ácido cético reage com duas moléculas de água obtendo como produto duas moléculas de dióxido de carbono, oito prótons e oito elétrons, já a câmara catódica é dominada pela equação (2.2), que consiste fundamentalmente na transferência de elétrons do cátodo para reagir com duas moléculas de oxigênio e os prótons doados pela membrana, resultando na redução de oxigênio a água. Os prótons gerados na câmara anódica transpõem a membrana emigrando para a câmara catódica [4].



Segundo [16], toda MFC pode gerar eletricidade, tendo em consideração que quanto mais simples for o substrato, maior será a eletricidade produzida pela MFC. O tipo de cultura bacteriana de uma MFC afeta diretamente na densidade de potência da mesma, sendo que as MFC que usam culturas mistas têm uma densidade de potência superior a das MFC que usam colônias puras [16].

### **2.3. Materiais de Construção de uma Célula de Combustível Microbiana**

Para garantir o bom funcionamento de uma célula de combustível microbiana é importante fazer a devida seleção dos materiais que farão parte do modelo a propor. Basicamente, as MFCs são caracterizadas por cinco elementos principais: o ânodo, o cátodo, o substrato, a membrana e, por fim, não menos importante, as bactérias [3].

O ânodo, ou seja, o material anódico precisa ser um eletrodo altamente condutor de eletricidade para permitir e facilitar o fluxo de elétrons através dele; biocompatíveis, ou seja, poroso de formas a garantir que as bactérias possam penetrar profundamente; e quimicamente estáveis para garantir que um biofilme seja gerado, produzindo mais energia. Em termos de dimensões, o ânodo precisa também ter uma superfície alta de formas a garantir uma potência mais elevada, uma vez que a potência é diretamente proporcional à área do ânodo [17][20]. Para garantir a condutividade do eletrodo, os materiais mais usados têm sido o cobre, o grafite, o carbono e folhas de polímeros condutores [7]. Podem ainda também ser utilizados ânodos metálicos formados por uma malha de aço inoxidável não corrosivo.

O cátodo ou material catódico é relativamente semelhante ao ânodo, por ser um eletrodo capaz de facilitar uma reação entre os elétrons que recebe e um aceitador de elétrons, mas o mesmo precisa apresentar um alto potencial redox. Sendo o principal desafio da câmara catódica a reação da redução do oxigênio, o aceitador de elétrons pode estar no próprio cátodo ou diluído no católito. Um dos aceitadores de elétrons experimental muito popular é o ferricianeto ( $K_3[Fe(CN)_6]$ ) que possui uma vantagem de um baixo sobre potencial usando um cátodo de carbono simples, podendo obter potenciais próximos do circuito aberto, ou o permanganato ( $MnO_4$ ) que, também, é exemplo de aceitadores de elétrons desenvolvidos e muito populares. Mas o oxigênio apesar de ter uma cinética de reação mais lenta, é o aceitador mais adequado apresentando muitas vantagens, como um alto potencial de oxidação, menos tóxico, disponibilidade, baixo custo, e não exige muita manutenção [17] [7].

O substrato acarreta também um papel preponderante para produção de energia, sendo o alimento dos micro-organismos eletrofilicas, fornecendo-os elétrons e nutrientes como aminoácidos, minerais, sais e, até mesmo, recursos energéticos de carbono. Normalmente, alguns tipos básicos de substrato são compostos essencialmente por diferentes tipos de águas residuais, acetato, glicose, microalgas, detritos humanos entre outros [20] [21].

A membrana, mais conhecida como membrana de troca de prótons (PEM), é um componente nuclear na composição das MFC por garantir a separação da câmara anódica e a câmara catódica, mantendo-as em ambientes distintos. A mesma deve verificar duas condições sine qua non: ter um alto coeficiente de transferência de prótons e um baixo coeficiente de transferência de oxigênio. As membranas que frequentemente têm sido usadas nas MFC são: membrana de troca catiônica (CEM) como as Nafion; membrana de troca aniônica (AEM); e por fim a membrana de ultrafiltração (UFM). Dentre elas, as CEM têm se apresentado mais eficientes que os outros materiais de membranas por possuírem maior condutividade de cátions e uma resistência interna relativamente menor, razão pela qual têm sido as mais usadas como PEM nas MFC. As membranas do tipo PEM, carecem de uma manutenção periódica de aproximadamente seis a sete meses, devido a produção de bioincrustação que afeta negativamente a geração de energia [4][22].

As bactérias são os autores principais para a produção de energia nas MFC usadas como biocatalizadores [21], elas precisam verificar as condições de serem electroquimicamente ativas [15][23].

## 2.4. Arquitetura das Células de Combustível Microbiana

A arquitetura ou modelo de design de uma MFC, impacta de forma direta fatores importantes do projeto como: a longevidade, a estabilidade na geração de energia, a eficiência colombiana, a densidade de potência e até mesmo o modo de fornecer fluxo contínuo ou descontínuo da câmara anódica. A nível de design a tecnologia das MFC estão classificadas em dois tipos: câmara única e câmara dupla.

Os modelos de MFC com câmara dupla também conhecidos como MFC tipo H, são os que apresentam um *layout* mais simples com um custo baixo em comparação com outros modelos, onde geralmente são utilizadas duas garrafas, sendo uma câmara anódica e o outro a câmara catódica, os quais são isolados por uma membrana de troca catiónicas, como se pode observar na Figura 2.2. Elas por sua vez, também apresentam uma vantagem sobre os modelos de uma única câmara quanto a eliminação da difusão de oxigênio pelo uso de membrana alternada entre os elétrodos [17][18][20].



Figura 2.2 - Modelo MFC tipo H.

Quanto aos modelos de MFC que apresentam na sua composição uma única câmara, estão divididos em dois grupos essenciais: as MFC de uma única câmara, mais conhecida como MFC de cátodo de ar, isso porque nesses modelos existe um ânodo que estará dentro de uma câmara anódica e um cátodo colocado em lado oposto e ligado diretamente a PEM [21]; e as outras são as MFC de câmara única, onde se encontram o ânodo e o cátodo sem uma PEM. O facto do modelo apresentar uma distância mais curta entre os elétrodos, pode gerar a redução da resistência interna, e os mesmos, apesar de serem um modelo muito básico quanto a sua arquitetura e de baixo custo, tendem a gerar uma potência considerável quando comparados com os modelos de câmara dupla, mas essa tipologia também apresenta algumas desvantagens como a contaminação bacteriana e o fluxo reverso de oxigênio [20]. Os autores do [21] fizeram um estudo comparativo dos modelos de MFCs de uma única câmara, no sentido de avaliar a eficiência energética dos mesmos na ausência e na presença da PEM, e conseguiu

observar-se que uma das principais desvantagens das MFC sem PEM é o potencial de perda de substrato devido à oxidação aeróbica por bactérias na câmara anódica, que também afeta a eficiência colombiana.

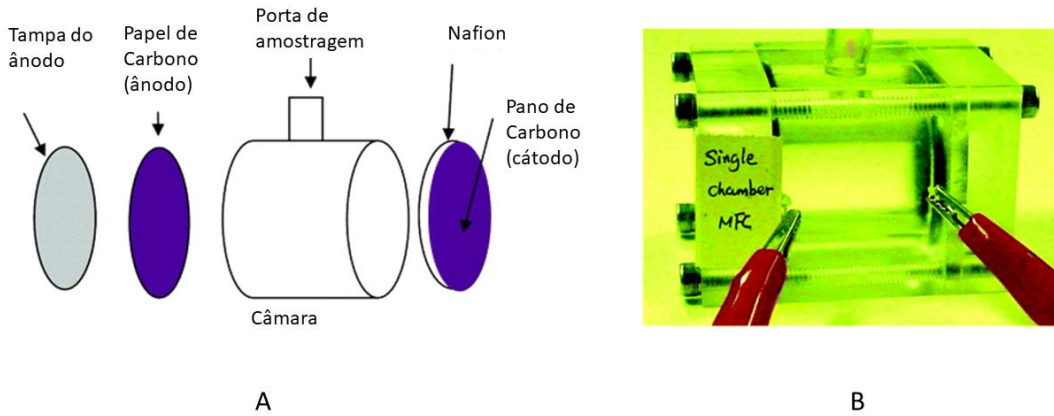


Figura 2.3 - (A) Esquema do modelo e (B) Protótipo em escala de laboratório da MFC de uma única câmara [21].

Quanto aos modelos de design cilíndrico, são normalmente projetados para fornecerem um fluxo contínuo através da câmara anódica, uma característica que os distingue dos modelos supracitados que operam em modo descontínuo. Por exemplo, na Figura 2.4, é apresentado um modelo de MFC cilíndrico interno, mais conhecido por MFC tubular. Tendo em consideração que os modelos convencionais de MFC possuem uma membrana para facilitar a troca de cátions, os autores deste modelo mantiveram o mesmo princípio, mas em contrapartida dobraram a membrana e a soltaram no sentido de fornecer uma estrutura cilíndrica; segundo os autores, o mesmo possui duas rolhas de vidro cada uma com duas entradas, ou saídas, que são possíveis observar em ambos os lados do cilindro, o ânodo está instalado em um meio granular e o cátodo do lado de fora [24].

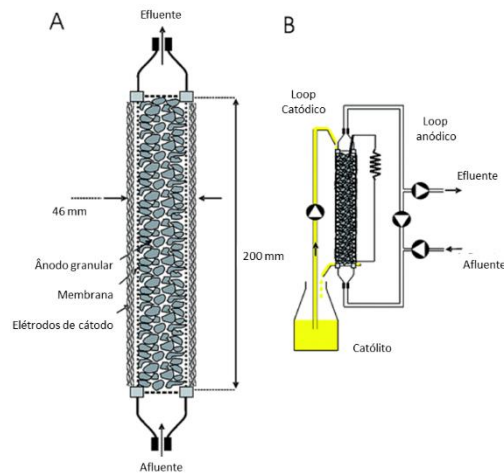


Figura 2.4 - (A) Esquema do modelo TMFC; (B) Configuração geral do modelo TMFC [24].

Na Figura 2.5 uma outra variação também é apresentada, conhecida como MFC de fluxo ascendente (UMFC), é composta por duas câmaras cilíndricas de plexiglas com 6 centímetro de diâmetro; a câmara anódica com 20 cm e 520 cm<sup>3</sup> de altura e volume respetivamente, e a câmara catódica com 9 cm de altura e 250 cm<sup>3</sup> de volume, esta encontra-se acima da câmara anódica; daí o facto de termos um fluxo ascende tendo em consideração que os eletrões saem do ânodo para o cátodo [25].

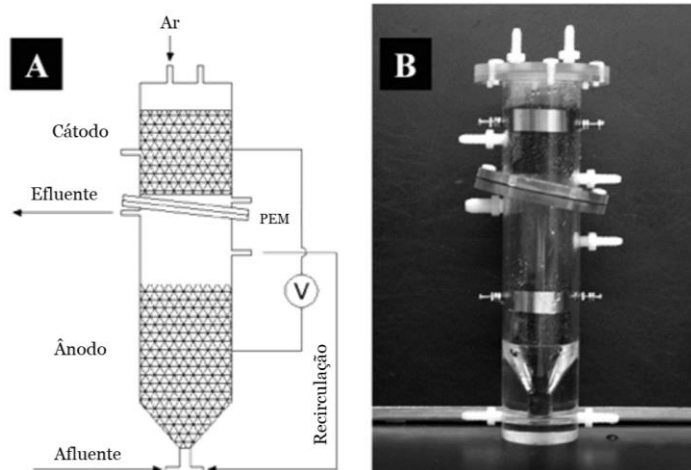


Figura 2.5 - (A) Esquema do modelo UMFC; (B) Protótipo em escala laboratorial do modelo UMFC [21].

O MFC tipo serpentina apresentado com estratégia de um sistema em pilha como se pode observar na Figura 2.6, é um método que vem sendo utilizado de formas a aumentar a potência de saída do sistema, e consiste em conectar um grande número de unidades de pequeno porte de MFC, e o mesmo método apresenta-se mais eficiente que as abordagens para aumento da dimensão de uma unidade MFC individual [26].

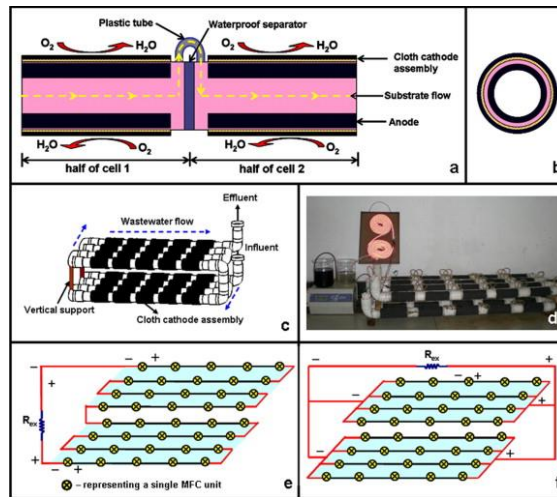


Figura 2.6 - (a) Corte Longitudinal de duas metades das células MFC; (b) vista em corte transversal de uma única MFC; (c) Diagrama esquemático da pilha MFC; (d) fotografia do sistema de pilha MFC alimentando um painel de Led; (e) esquema de pilha MFC ligado em série (modo A); (f) esquema da pilha MFC ligado em série-paralelo (modo B) [26].

Na Figura 2.7 o modelo MFC de placa plana (FPMFC), é composto por duas placas não condutoras aparafusadas, com 15 cm de largura e comprimento por 2 cm de altura, esse modelo contém ainda um canal que foi dividido em duas metades de formas a formar o cátodo e o ânodo. As placas são perfuradas para formar um canal retangular em um caminho serpentina de 0,7 cm de largura e 0,4 cm profundidade, 55 cm<sup>2</sup> de superfície e um volume total de 22 cm<sup>3</sup>, atingindo uma área total de superfície por volume de 250 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Esse design é baseado nos modelos da célula de combustível de hidrogénio, onde um CEM é introduzido para fazer a divisão entre o ânodo e o cátodo [27].

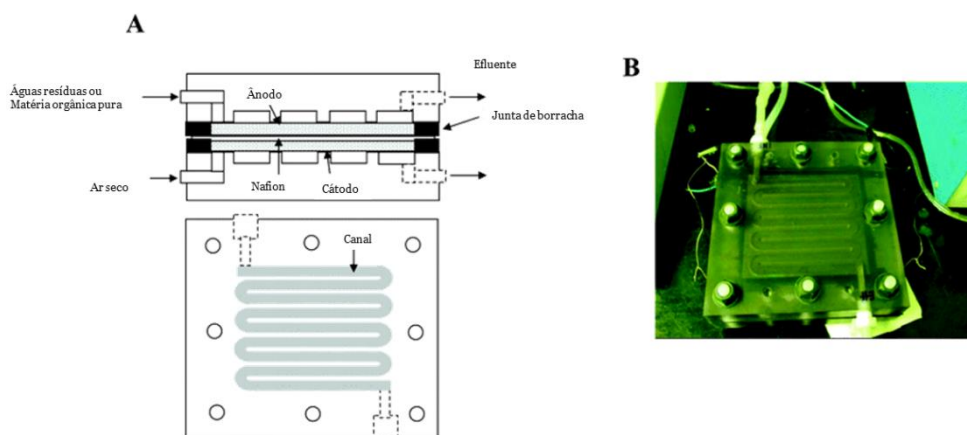


Figura 2.7- (A) Esquema do modelo FPMFC; (B) Protótipo em escala laboratorial do modelo FPMFC [27].

Para além desses modelos aqui apresentados, ainda existem outros como: os MFCs empilhados [28]; os MFCs aninhadas [29]; MFC bentónica implantada em Yaquina Bay,

Newport, Oregon, Estados Unidos de América [30], MFC betónica (BMFC) que normalmente operam no fundo do mar [31].

## 2.5. Exemplos de Aplicação das Células de Combustível Microbiana

A versatilidade que as células de combustíveis microbianas (MFC) têm atingido nos últimos anos como um reator biológico, proporciona-lhes um leque de múltiplas possibilidades de aplicações sustentáveis, com foco acentuado na produção de bioenergia, biorremediação, produção de hidrogénio, biossensores e tratamento de águas [15] [18] [32] [33]. Razão pela qual tem tido cada vez mais atenção da comunidade científica, tendo em conta o crescente número de artigos de pesquisa publicadas sobre as MFCs, tal como mostra a Figura 2.8.

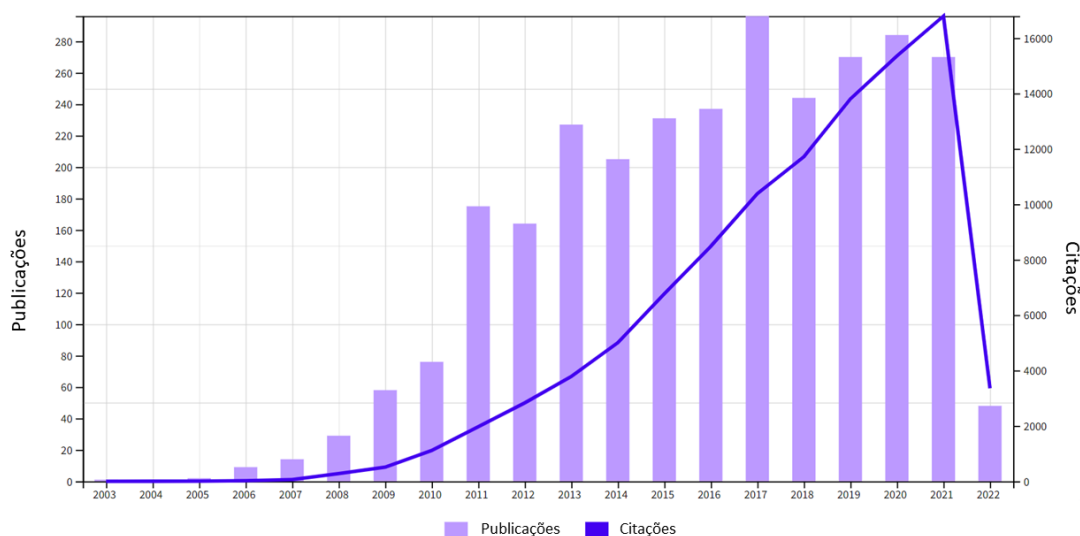


Figura 2.8 - Tendência anual de publicações com base em uma pesquisa no portal Web of Science TM para a palavra-chave 'células de combustível microbiana' (2003-2022).

No [34], os autores apresentam uma revisão bibliográfica da aplicação das MFCs como biossensores, no qual, os microrganismos na câmara anódica funcionam como um elemento de reconhecimento biológico e as membranas de troca de prótons e eletrodos atuam como um transdutor. Quando a colônia de bactérias nota uma alteração nos níveis de analitos alvo, respondem pela corrente elétrica da saída. Dessa forma, têm sido utilizadas para medir parâmetros como toxinas em águas residuais, demanda química do oxigênio, demanda biológica do oxigênio, oxigênio dissolvido e ácidos graxos voláteis, no intuito de melhorar a gestão da qualidade de águas residuais.

No campo da robótica as MFCs também têm atuado com uma presença considerável de formas a tornar o sistema energético do robô mais autônomo. Os robôs que apresentam nas suas configurações as MFCs, são geralmente chamados Gastrobots e esse tipo de robôs normalmente possuem bancos de baterias que posteriormente armazenam a energia produzida nas MFCs [35].

No artigo [35] é apresentado um Gastrobot denominado Gastronome, publicado no ano 2000 por Stuart Wilkinson pela universidade de South Florida, tal como mostra a Figura 2.9, é constituído por três carruagens que formam um comboio que circula sobre roda, também considerado o primeiro robô com sistema de conversão de energia acionada por biomassa.



Figura 2.9 - Gastronome, um protótipo de robô alimentado por célula de combustível microbiana [31].

O Ecobot também é um projeto a nível da robótica que usa as MFC como fonte primária de energia a bordo; o mesmo vem sendo divulgado desde o ano de 2003, sendo a sua primeira versão o Ecobot-I, a segunda versão o Ecobot-II em 2005 e 2006, a terceira versão o Ecobot-III em 2010 e a quarta versão o Ecobot-IV em 2013. Um dos objetivos que levou a apostar nessa linha de projetos foi necessariamente a otimização da fonte de energia das próprias MFCs [9]. Na Figura 2.10 tem-se uma visão geral dos projetos da família Ecobot.

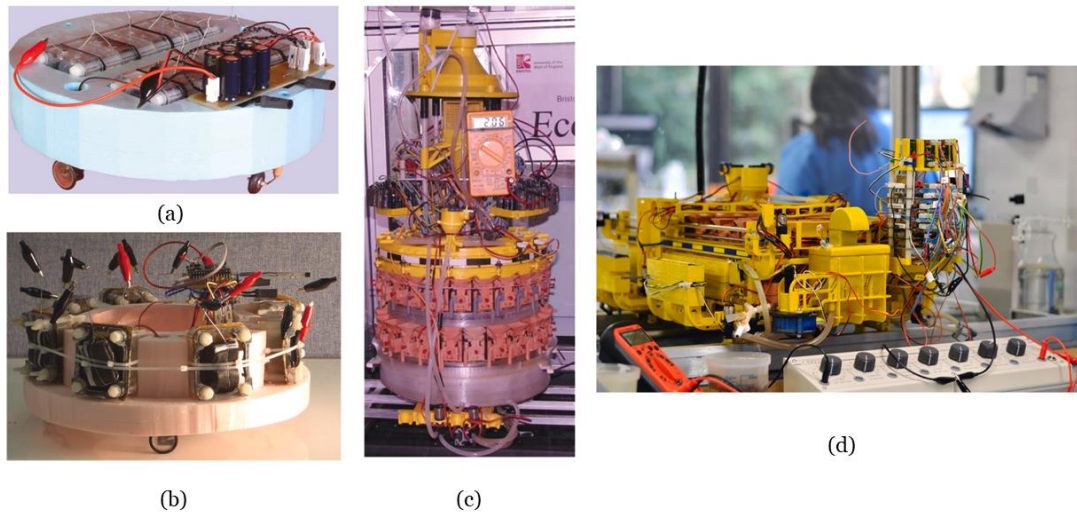


Figura 2.10 - Visão geral da família Ecobot. (a) Ecobot-I; (b) Ecobot-II; (c) Ecobot-III; (d) Ecobot\_IV [9].

Os autores do projeto *Pee power urinal – microbial fuel cell technology field trials in the context of sanitation* [36], desenvolveram um total de 288 MFCs distribuídas em 8 módulos, com 36 MFCs em cada um, em que os ânodos e cátodos foram conectados eletricamente em paralelo usando barramentos de alumínio e cabo de aço inoxidável, porcas a arruelas. Já os módulos foram conectados eletricamente em série. O projeto consistia na produção de energia por meio da pilha de MFC, para alimentar módulos de luz LED dentro do cubículo. As MFC eram alimentadas com a urina coletada nos urinóis.

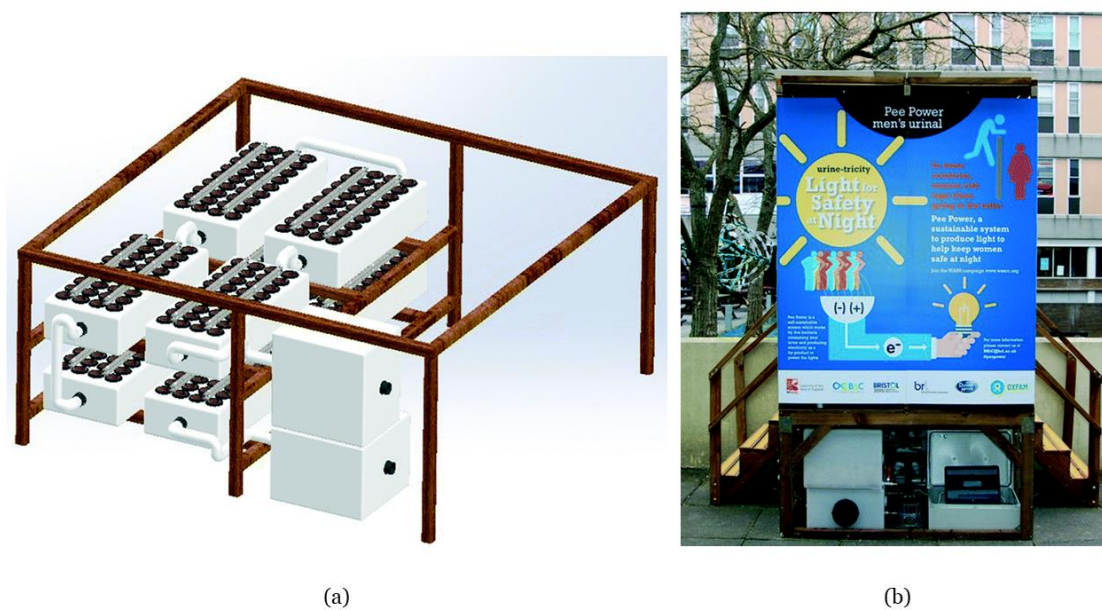


Figura 2.11 - (a) Representação 3D da pilha de MFC com os tanques de entrada e saída sob o urinol; (b) Teste de campo, energia produzida pela urina [36].

No artigo [4], utilizam células de combustível microbiana terrestres (TMFC) para alimentar nós de uma rede de sensores sem fios (RSSFs), cada nó é composto por transceptor para manter a comunicação entre a rede e um microcontrolador para gerir as informações recebidas e as que serão enviadas pelo transceptor; entretanto, uma vez que as TMFC fornecem intensidades de corrente e valores de tensão muito baixas, que não seriam suficientes para alimentar um microcontrolador, que normalmente necessitam de 3,3 V para alimentação e uma corrente que varia de acordo ao modo de funcionamento, os autores usaram um conversor DC-DC step-up otimizado para converter 0,6 V da tensão de saída das TMFCs para 3,3 V.

No artigo [31] os autores fazem um relatório apresentando as MFC como uma alternativa prática e sustentável às baterias nas aplicações de baixo consumo de energia. Na sequência, os mesmos usaram dois protótipos de MFC do tipo bentónica (BMFC) como fonte de alimentação de uma boia meteorológica que consome em média 18 mW. Na mesma foi instalado um transceptor de RF de linha local de baixo consumo e sensores, com o objetivo de medir parâmetros como a temperatura do ar e da água, a umidade relativa e a pressão. A Figura 2.12 mostra o projeto do Laboratório de Pesquisas.

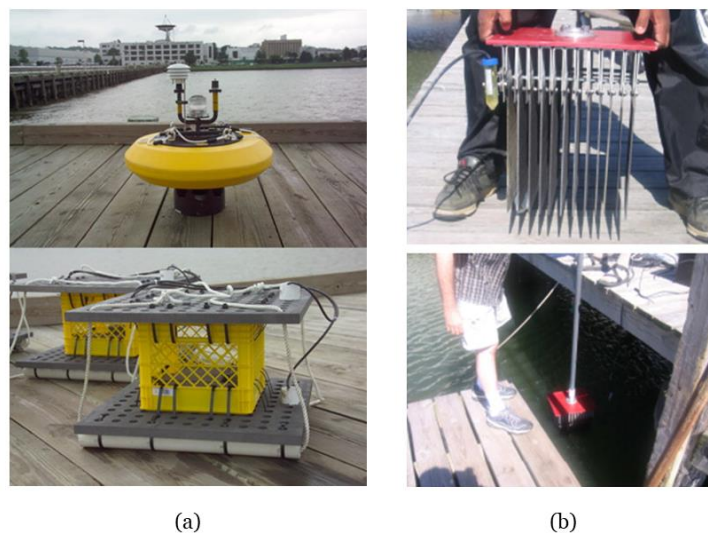


Figura 2.12 - (a) Boia de dados meteorológicos utilizada em demonstração em Píer; (b) Matriz de ânodo de grafite [31].

## Capítulo 3

### 3. Revisão dos Métodos de Regulação de Energia

#### 3.1. Introdução

Na atualidade, os exemplos mais comuns de captação de energia que têm sido apresentados são para painéis solares, turbinas eólicas e geradores hidrelétricos, que por sua vez têm servido como base para desenvolvimento de métodos e técnicas de regulação de energia para fontes menos comuns [2][7]. Os conversores DC-DC, são essencialmente circuitos eletrônicos de potência, que têm se apresentado como bons reguladores, devido a maleabilidade de ajuste para a tensão, de acordo com o projeto desejado.

As fontes renováveis, que coletam energia do ambiente (Solar, térmica, bioenergia vibracional, atrito ou radiofrequência (RF)) e as convertem em energia elétrica, têm se mostrado cada vez mais eficientes com a associação de um circuito de eletrônica de potência; vindo até, em muitos casos, a posicionarem-se como possíveis substitutas a altura das baterias.

#### 3.2. Caracterização elétrica da MFC

Para dar procedimento ao nosso trabalho, fazer um estudo dos parâmetros elétricos como corrente, tensão e potência, de uma MFC é realmente indispensável. Entretanto, as MFC são consideradas fontes de tensão fraca, porque esta varia à medida que a corrente de saída aumenta [7]. Na Figura 3.1 (a) é apresentado o circuito equivalente de uma MFC, que basicamente é constituída por uma fonte,  $V_{int}$ , de tensão ligada em série com uma resistência,  $R_{int}$ . A resistência interna  $R_{int}$  é resultante do somatório da resistência ôhmica do sistema, proveniente de uma função dos tipos de estrogénio, eletrólito, eléctrodo e membrana, estando tipicamente na faixa de  $100 \Omega$  a  $10 \text{ k}\Omega$  [37]. A tensão interna e a resistência podem ser facilmente influenciadas, flutuam de forma não linear, devido alguns fatores como: mudanças na comunidade de bactérias, mudanças nas condições ambientais, a atividade das bactérias, energia extraída e/ou acumulada e até mesmo nível de potência instantânea de saída [8].

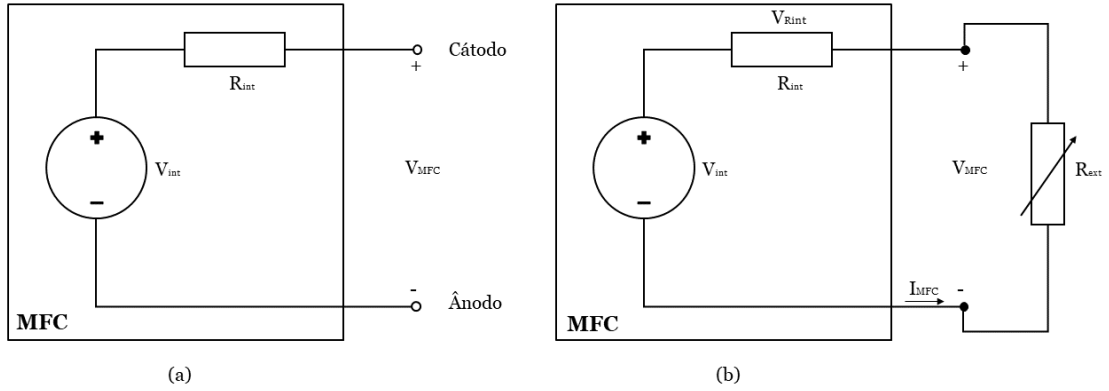


Figura 3.1 - (a) Circuito equivalente de uma MFC; (b) MFC ligado em paralelo com uma resistência variável.

A tensão  $V_{MFC}$  apresentada Figura 3.1 (a), medida entre o cátodo e ânodo em circuito aberto, geralmente é menor que 800 mV. De uma forma geral, o potencial anódico em uma MFC de câmara única é o mesmo que uma MFC de duas câmaras com cátodo de ferricianeto, apresentando um potencial anódico de aproximadamente -300 mV. Já o potencial catódico para as MFC de câmara única, varia em torno de +500 mV, isso quando o oxigênio é usado com recetor de eletrões terminal; enquanto as MFCs com duas câmaras com o cátodo de ferricianeto, apresentam um potencial de +600 mV que é determinado pelo potencial redox do ferricianeto. No entanto, as limitações termodinâmicas das MFC determinam a saída das mesmas, que corresponde a uma tensão inferior 800 mV e uma corrente muito baixa na faixa dos mA, que por infelicidade é desprezável para maioria das aplicações no mundo real [8].

Fazendo uma análise do circuito da Figura 3.1 (b), consegue-se obter quatro equações nucleares para se estudar o comportamento da MFC ideal, na equação (3.1) calcula-se a corrente  $I_{MFC}$  que circula na malha; na equação (3.2) calcula-se a queda de tensão na resistência interna  $V_{Rint}$ ; na equação (3.3) calcula-se a tensão gerada pela MFC que por sua vez é igual à queda de tensão aos terminais da resistência externa,  $R_{ext}$ , e na equação (3.4) calcula-se a potência gerada pela MFC.

$$I_{MFC} = \frac{V_{int}}{(R_{int} + R_{ext})} \quad (3.1)$$

$$V_{Rint} = R_{int} \times I_{MFC} \quad (3.2)$$

$$V_{MFC} = V_{int} - V_{Rint} \quad (3.3)$$

$$P_0 = V_{MFC} \times I_{MFC} \quad (3.4)$$

Na mesma ordem de ideias, ainda na Figura 3.1(b), procura-se trabalhar o princípio da caracterização da produção de energia de uma fonte; na qual propôs-se uma MFC ideal, que em ambiente matlab  $R_{int}$  era igual a  $100 \Omega$  e  $V_{int}$  igual  $800 \text{ mV}$ , que é operada com uma resistência variável  $R_{ext}$  de  $0 \Omega$  a  $100 \text{ k}\Omega$ , ligada entre o cátodo e o ânodo, monitorando a tensão nos terminais da  $R_{ext}$  à medida que se vai variando a resistência. Com o mesmo experimento foi possível desenvolver, em matlab, a Figura 3.2 que apresenta as curvas de polarização de uma MFC ideal. Em concordância com os estudos [7], [37][38][39], foi possível observar que o ponto máximo de potência (MPP) é alcançado quando  $R_{ext}$  é igual a  $R_{int}$ . Em simulações reais às MFC dificilmente alcançam a tensão máxima em circuito aberto. Entretanto, pela Figura 3.2, consegue-se observar que a tensão de MPP é muito menor que a tensão em circuito aberto, que para este caso é igual a  $400 \text{ mV}$ , onde a corrente MPP é de  $4 \text{ mA}$ , resultando numa potência de  $1.6 \text{ mW}$ .

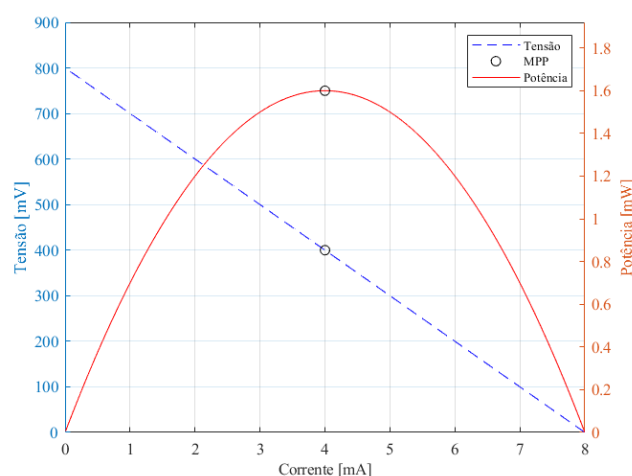


Figura 3.2- Curva de polarização construída com valores de uma MFC ideal desenvolvida em Matlab.

### 3.3. Conversores de energia DC-DC

No subtema anterior, foi apresentada uma MFC ligada a uma resistência externa variável para facilitar a medição da energia gerada pela mesma. No entanto, esse método não é muito eficiente para a colheita e uso da energia, porque a energia gerada é diretamente dissipada por efeito Joule. Desta feita, os conversores DC-DC são apontados como circuitos conversores de energia indispensáveis para captação da energia numa fonte DC ou num barramento DC [8], isso porque os conversores DC-DC são essencialmente circuitos de potência capazes de regular a amplitude da tensão e da corrente.

Quanto aos conversores DC-DC, três são as tipologias mais comuns adaptadas às MFC [9], sendo por sua vez conversores DC-DC unidirecionais, que permitem aplicar à carga um determinado valor de tensão DC com valor médio superior ou inferior ao valor da tensão DC aos terminais de entrada do mesmo conversor. Os modelos ilustrados nas Figura 3.3, Figura 3.4 e Figura 3.5, apresentam a sua entrada a esquerda da figura e saída a direita da mesma.

O circuito elétrico de um conversor DC-DC boost é demonstrado na Figura 3.3, o mesmo tem como objetivo principal aplicar à carga uma tensão contínua de valor médio superior ao valor da tensão de alimentação. Na equação (3.5) é apresentado o ganho ideal de um conversor DC-DC boost que varia em ordem do ciclo de trabalho  $d$  (*duty cycle*).

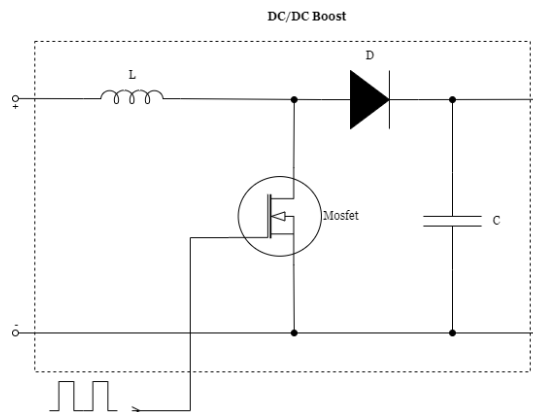


Figura 3.3 - Conversor DC-DC Boost.

$$G(d) = \frac{1}{1-d} \quad (3.5)$$

Na Figura 3.4 é apresentado o circuito elétrico de um conversor buck, tal como o nome indica, o objetivo deste conversor é aplicar à carga uma tensão contínua de valor médio inferior à tensão de alimentação. Na equação (3.6) é apresentado o ganho ideal do conversor DC-DC buck.

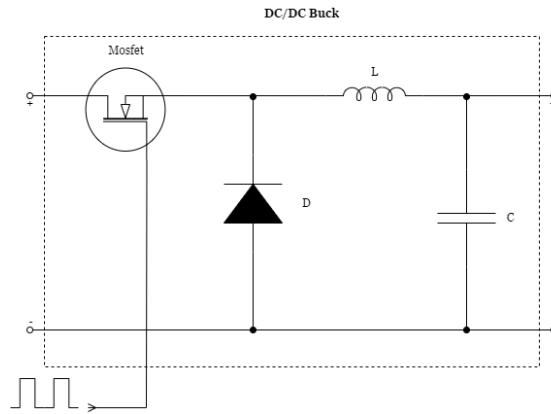


Figura 3.4 - Conversor DC-DC Buck.

$$G(d) = d \tag{3.6}$$

Na Figura 3.5 são apresentados dois circuitos elétricos de um conversor Buck-Boost, ambos fazem uma fusão do funcionamento dos dois conversores DC-DC Buck e Boost. Na Figura 3.5 (a) é apresentado um conversor DC-DC Buck-Boost com dois interruptores, a forma correta de acioná-los é descrita na Tabela 3.1. Já na Figura 3.5 (b), é apresentado um conversor DC-DC Buck-Boost, mais simples, com um único interruptor; a manipulação do mesmo depende do *duty cycle*, em que tipicamente o conversor entra regime de funcionamento Buck quando o *duty cycle* for inferior a 50%, logo, quando o *duty cycle* é superior a 50%, o conversor adota o regime de funcionamento Boost. Na equação (3.7) é apresentado o ganho ideal do conversor DC-DC Buck-Boost de um único interruptor [9].

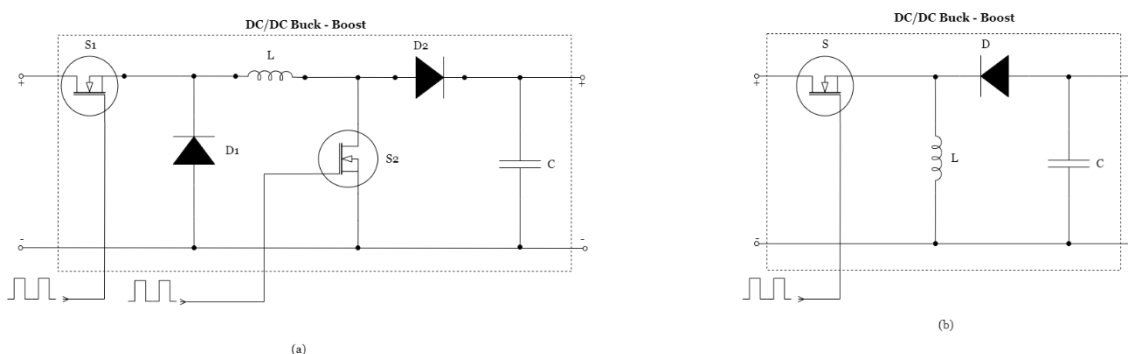


Figura 3.5 - Conversor DC-DC Buck-Boost.

$$G(d) = \frac{-d}{1-d} \quad (3.7)$$

Tabela 3.1 - Funcionamento do conversor DC-DC Buck-Boost com dois interruptores.

<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>Funcionamento</b>
PWM	0	DC-DC Buck
1	PWM	DC-DC Boost

Tendo em consideração que as MFCs são fontes de tensão fracas, o mais recomendável a usar entre os conversores DC-DC unidirecionais apresentados, é o conversor DC-DC Boost. Ao longo da dissertação iremos trabalhar com o conversor DC-DC Boost porque melhor se adequa aos objetivos preconizados.

### 3.4. Rastreamento do ponto máximo de potência

As pesquisas sobre o rastreamento do ponto máximo de potência nas MFCs tiveram início após se determinar que uma carga conectada continuamente a uma MFC não é adequada para coletar a potência máxima da célula [9]. O custo total de um sistema pode ser reduzido usando rastreadores de potência de alta eficiência que são projetados para extrair a máxima potência possível de uma fonte com características não lineares [40].

Claramente, os algoritmos de procura do ponto máximo de potência, MPPT, propostos na literatura, têm sido uma revolução na extração da potência máxima de uma fonte.

Como mencionado anteriormente, a semelhança dos painéis solares, turbinas eólicas e geradores hidrelétricos, a energia que se pode extrair de uma MFC é de baixa eficiência com características não lineares, apresentando assim um único ponto máximo de potência. Assim sendo, muitos têm sido os esforços na aplicação e desenvolvimento de métodos para a procura do ponto máximo de potencia nas MFCs, como controlo dinâmico da carga externa [41] [42] [43], comparação entre os algoritmos convencionais [44] [45] e até mesmo como o controlo da potência afeta o comportamento da MFC [46].

O algoritmo Perturba e Observa (P&O) é normalmente usado para rastrear o ponto máximo de potência de painéis fotovoltaicos [47], mas também tem sido muito usado

para as MFC [44] [45]. O mesmo é baseado no cálculo da potência de saída da fonte e na identificação da potência de amostragem da corrente e da tensão da matriz, da fonte em questão. Na Figura 3.6 é apresentado o fluxograma do algoritmo Perturba e Observa (P&O).

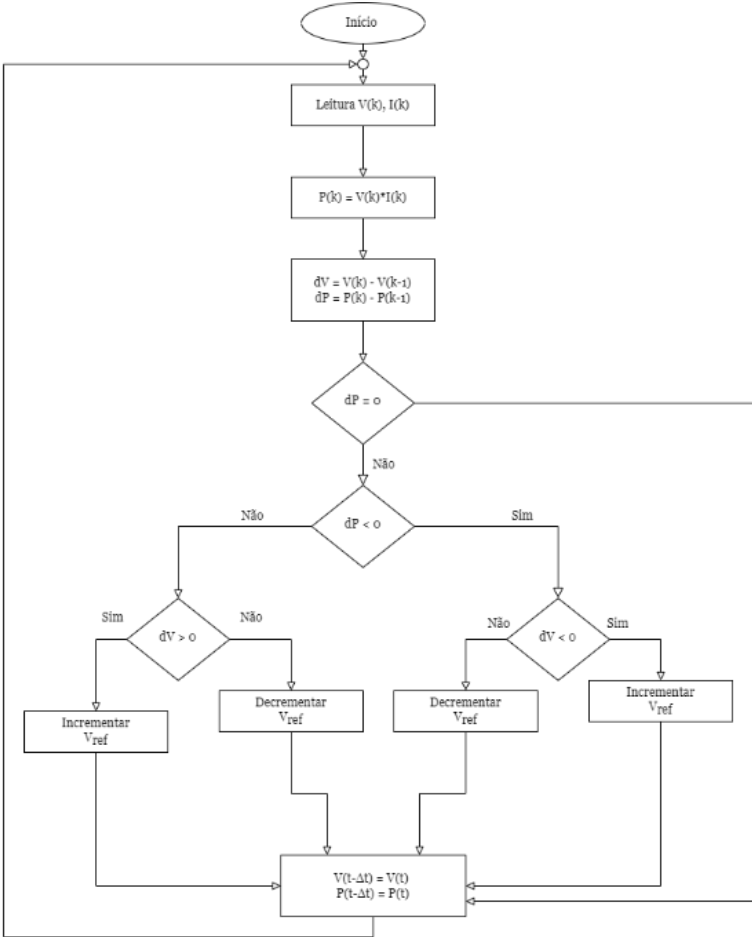


Figura 3.6 - Fluxograma do algoritmo Perturba e Observa (P&O).

## Capítulo 4

# 4. Modelo para Captação de Energia Aplicadas às Células de Combustível Microbiana

### 4.1. Introdução

Este capítulo foi reservado com o objetivo de fazer uma descrição da componente de Projeto que a presente dissertação acarreta, no qual apresenta-se uma aplicação em ambiente virtual de todos os conceitos e métodos que foram aplicados ao projeto.

### 4.2. Design do conversor DC-DC

Para desenvolver a interface entre a MFC e a carga de saída (Carga), foi necessário um conversor de energia, tal como anteriormente no capítulo 3 havíamos sugerido o conversor DC-DC Boost, o esquema inicial a desenvolver é apresentado na Figura 4.1. Entre a MFC e o conversor DC-DC ligamos um filtro capacitivo com objetivo de reduzir a variação de tensão e corrente de altas frequências, no sentido de eliminar a tensão contínua pulsante que a MFC produz para transformá-la em uma tensão contínua que varia menos. Associamos também um controlador MPPT a semelhança dos controlos de sistemas fotovoltaicos, que por meio dos parâmetros de tensão e corrente gera um sinal de PWM. A carga associada para esse modelo é resistiva e vai ser muito útil para colher os dados durante os testes.

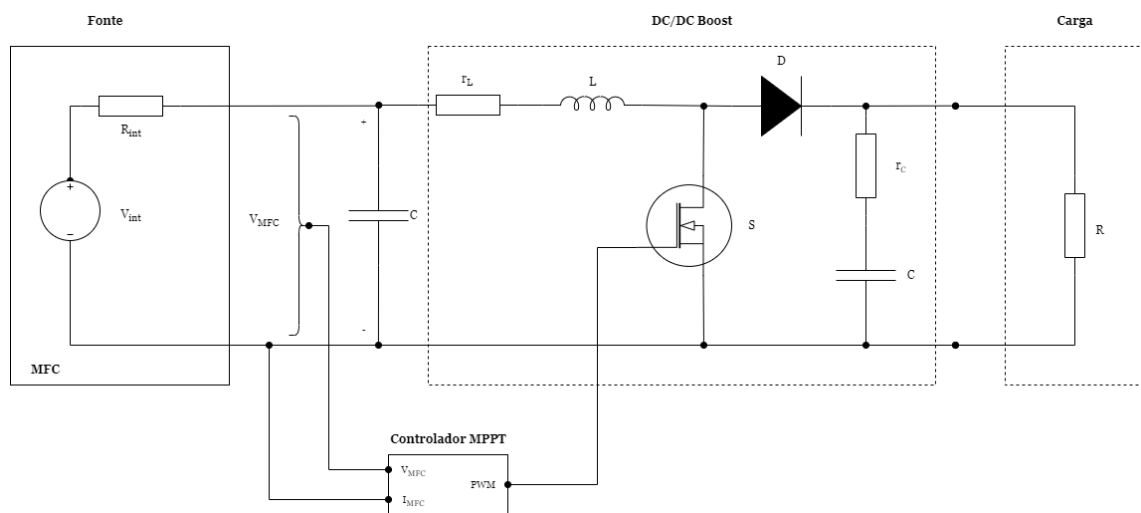


Figura 4.1 – Diagrama de Blocos do Sistema Proposto.

Em seguida, passamos para o dimensionamento do DC-DC Boost para podermos ter uma tensão a volta dos 3.3 v aos terminais da carga e extrair a potência máxima produzida pelas células, mantendo-a em condução contínua.

Nas equações (4.1) e (4.2) faz-se uma análise do circuito elétrico no período de  $0 < \omega t < 2\pi\alpha$ , quando o semicondutor S (MOSFET) encontra-se à condução.

$$\begin{cases} -V_{MFC} + i_L r_L + L \frac{di}{dt} = 0 \\ -V_C - (r_C + R)C \frac{dV_C}{dt} = 0 \\ V_R = R \left( C \frac{dV_C}{dt} \right) \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_{MFC} - i_L r_L \\ C \frac{dV_C}{dt} = -\frac{1}{r_C + R} V_C \\ V_R = \frac{R}{r_C + R} V_C \end{cases} \quad (4.2)$$

Já as equações (4.3) e (4.4) são desenvolvidas num período de  $2\pi\alpha < \omega t < 2\pi$ , quando o semicondutor S (MOSFET) encontra-se ao corte.

$$\begin{cases} -V_{MFC} + i_L r_L + L \frac{di_L}{dt} + R \left( i_L + C \frac{dV_C}{dt} \right) = 0 \\ -V_C - r_C C \frac{dV_C}{dt} + R \left( i_L - C \frac{dV_C}{dt} \right) = 0 \\ V_R = R \left( i_L - C \frac{dV_C}{dt} \right) \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_L}{dt} = V_{MFC} - \frac{R(r_c + r_L) + r_c r_L}{(R + r_c)} i_L + \frac{R}{R + r_c} V_C \\ C \frac{dV_C}{dt} = \frac{R}{R + r_c} i_L - \frac{1}{R + r_c} V_C \\ V_R = \frac{r_c R}{R + r_c} i_L + \frac{R}{R + r_c} V_C \end{array} \right. \quad (4.4)$$

Não procuramos fazer uma análise nos períodos  $2\pi\alpha < \omega t < 2\pi\beta$  e  $2\pi\beta < \omega t < 2\pi$  porque iremos trabalhar em regime de condução contínua.

Na equação (4.5) apresentamos o ganho de tensão real do conversor DC-DC Boost.

$$\frac{V_R}{V_{MFC}} = \frac{R(R + r_c)(d - 1)}{R(r_c + r_L) + r_c r_L + R^2(1 - 2d) + Rd(Rd - r_c)} \quad (4.5)$$

#### 4.2.1. Análise de circuito integrado de gerenciamento de energia

Na Figura 4.2 é apresentado o diagrama do sistema proposto, desenvolvido em ambiente Simulink. A nível de amostragem, desenvolveu-se uma simulação do tipo discreta com um tempo de amostragem de  $5 \mu s$ , a semelhança do microcontrolador mbed NXP LPC1768 que será usado no projeto.

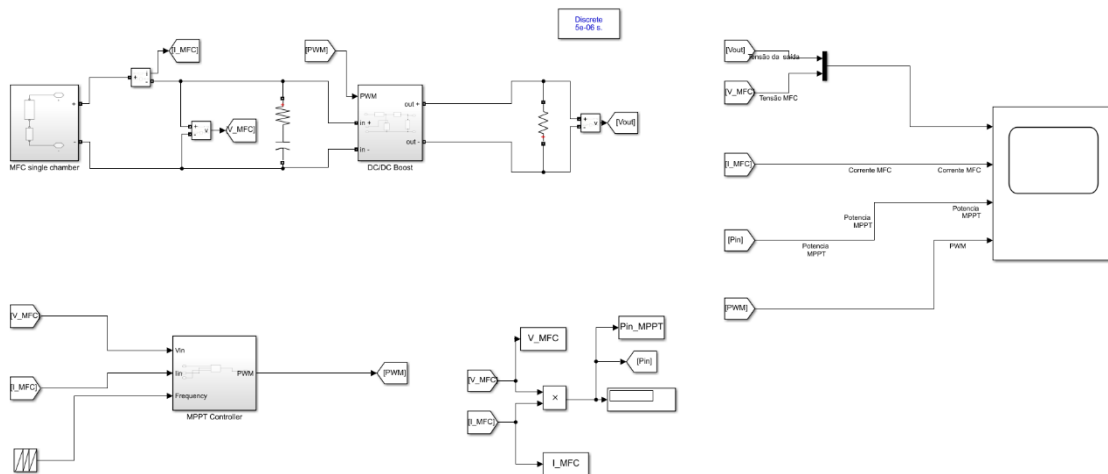


Figura 4.2 – Diagrama de Blocos do Sistema Proposto desenvolvido em Simulink.

O bloco MFC single chamber da Figura 4.2 é o circuito equivalente da MFC desenvolvido no capítulo anterior descrito na Figura 3.1. O bloco DC/DC Boost é usado em simulação

pode ser observado na Figura 4.3, procurou-se simular com os semicondutores com características reais.

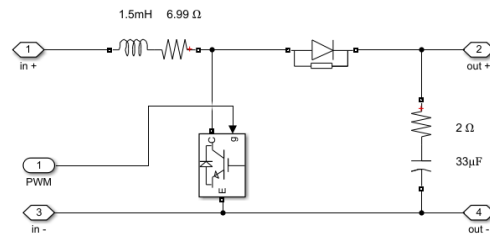


Figura 4.3- Parte da composição do bloco DC/DC Boost.

A nível do bloco de MPPT Controller da Figura 4.2, na Figura 4.4 são apresentados os elementos que a constituem, o qual recebe como entrada a tensão, a corrente e uma onda em dente de serra com uma frequência de 3 kHz, variando no intervalo de 0 a 1. A tensão e a corrente são discretizadas antes de entrarem no bloco da função.

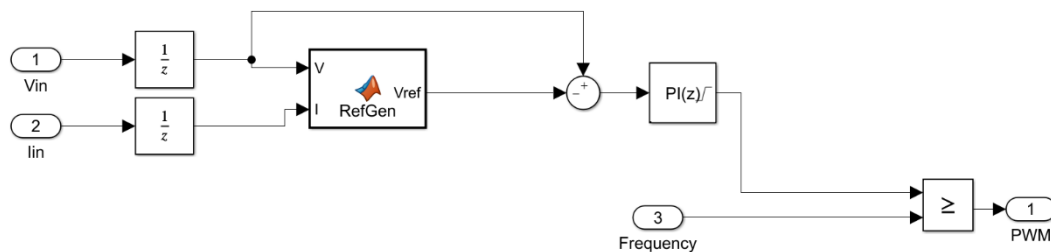


Figura 4.4 - Bloco MPPT Controller.

No controlador PI, o ganho proporcional  $k_p$  e o ganho integral  $k_i$ , foram calculados por um algoritmo meta-heurístico, o PSO, ou seja, o *Particle Swarm Optimization* mais conhecido em português como Otimização por Exame de Partículas.

O algoritmo de otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization*, PSO), é um algoritmo inspirado no movimento sincronizado de animais. Ao observarem o comportamento de cardumes e bandos de pássaros os cientistas Kennedy e Eberhat, propuseram o algoritmo PSO replicando o mesmo comportamento dos animais [48]; ou seja, otimizar uma função com base na troca de informações entre os elementos do bando, em que o comportamento do bando é influenciado pela experiência individual de cada elemento e pela experiência acumulada do grupo [48].

No PSO são controladas duas variáveis fundamentais, a velocidade de cada partícula do enxame,  $v_i$ , e a posição de cada partícula,  $x_i$ , cujas equações fundamentais são a equação (4.6) e (4.7), respectivamente

$$v_i(t+1) = \omega \cdot v_i(t) + c_1 \varphi_1 (b_i(t) - x_i(t)) + c_2 \varphi_2 (g(t) - x_{id}(t)) \quad (4.6)$$

- $b_i(t) - x_i(t)$  representa a experiência individual da partícula, ou seja  $b_i(t)$  representa a melhor posição atingida por uma partícula;
- $g(t) - x_{id}(t)$  representa a partilha de informações entre o grupo,  $g(t)$  representa a melhor posição global;
- $\omega$  representa o peso de inércia, serve para limitar a velocidade das partículas;
- $c\varphi$  é um fator de ponderação, onde  $c_1$  é conhecida como uma constante cognitiva,  $c_2$  constante social e  $\varphi$  um valor aleatório entre 0 e 1, usado para garantir a natureza estocástica do método.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (4.7)$$

O algoritmo começa por criar um número de partículas  $N$  e faz a distribuição aleatória das mesmas no espaço de busca. Cada partícula é uma solução do problema; a sua posição no espaço de busca é armazenada, bem como a velocidade de deslocamento e a melhor posição encontrada até a iteração atual. A melhor posição de todas as partículas é igualmente armazenada,  $g(t)$ , e a cada iteração as partículas vão se movendo para mais próximo da solução ótima, mediante a atualização dos valores da velocidade e posição, equações (4.6) e (4.7) respectivamente, com base nas direções da melhor posição global e melhor posição individual até o momento. O processo se repete até que um critério de paragem seja cumprido. Na Figura 4.5, apresentamos o pseudocódigo do algoritmo [49].

```

For cada partícula
  inicializar partícula
End

Do
  For cada partícula
    calcular o valor fitness
    se o valor fitness for melhor que o melhor valor de fitness do histórico
      defina o valor atual como o novo melhor valor de fitness
    End
  escolha a partícula com o melhor valor de fitness de todas as partículas como a melhor
  posição global
  For cada partícula
    calcular a velocidade da partícula com base na equação da velocidade
    atualizar a posição da partícula de acordo com a equação da posição
  End
While critério de paragem não foi satisfeito

```

Figura 4.5 Algoritmo PSO.

Depois de calculados os ganhos, de formas a facilitar a aplicação do controlador PI na unidade de microcontrolador selecionada e assim dar continuidade ao projeto, procuramos transformar em fórmulas matemáticas. Na equação (4.8) apresenta-se a função transferência em ordem ao tempo de um controlador PI e na equação (4.9) a transformada de Laplace da mesma.

$$h(t) = k_p \times e(t) + k_i \times \int e(t) dt \quad (4.8)$$

$$H(s) = K_p \times E(s) + \frac{K_i}{s} \times E(s) \quad (4.9)$$

Na equação (4.10) faz-se a discretização de um sistema contínuo da transformada de Laplace passando para a transformada Z, pelo método de transformação bilinear e a regra de trapézio, para poder discretizar a parte integral da equação e depois implementá-la ao nosso controlador.

$$s \longrightarrow \frac{2}{T} \times \frac{z-1}{z+1} \quad (4.10)$$

Na equação (4.11) procuramos separar o termo integral para facilitar os cálculos.

$$integral(s) = E(s) \times \frac{k_i}{s} \quad (4.11)$$

A equação (4.12) já apresenta o termo integral discretizado.

$$integral(z) = E(z) \times k_i \times \frac{T}{2} \times \frac{z+1}{z-1} \quad (4.12)$$

Na equação (4.13) faz-se um artifício de cálculo dividindo o numerador e o denominador por  $z$ , e o mesmo vai ser usado na equação (4.14) e para as restantes equações.

$$\frac{z+1}{z-1} = \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (4.13)$$

$$integral(z) = E(z) \times k_i \times \frac{T}{2} \times \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (4.14)$$

$$integral(z) \times (1-z^{-1}) = E(z) \times k_i \times \frac{T}{2} \times (1+z^{-1}) \quad (4.15)$$

Da equação (4.15) para a equação (4.16) fez-se a transformada inversa Z.

$$integral(n) - integral(n-1) = k_i \times \frac{T}{2} \times (e(n) + e(n-1)) \quad (4.16)$$

Na equação (4.17) isola-se  $integral(n)$ .

$$integral(n) = integral(n-1) + k_i \times \frac{T}{2} \times (e(n) + e(n-1)) \quad (4.17)$$

$$h(n) = k_p \times e(n) + integral(n) \quad (4.18)$$

### 4.3. Materialização da Metodologia

Para materializar a proposta de projeto a desenvolver e simulado em ambiente Matlab/Simulink, usamos o software Design Sparck PCB 10.0, o resultado é apresentado na Figura 4.6, para melhor visualização observe a Figura 0.4. Cabe-nos também dizer que algumas alterações foram necessárias para poder automatizar o sistema, trazendo assim um circuito paralelo que está responsável pelo arranque do sistema.



LTC2108; os mesmo foram adicionados no seguimento de trabalhos futuros e com objetivo de colmatarem o problema do arranque e o autossustento.

Uma vez que teremos dois microcontroladores e ambos não podem funcionar em simultâneo ou seja, para este caso em particular, não precisamos que funcionem em simultâneo, assim sendo, adicionamos *jumpers* (JP) de três pinos para podermos selecionar um ou outro microcontrolador disponível na placa, tal como se pode observar na Figura 4.6 e Figura 4.7.

Nesta sequência, o facto de termos dois conversores DC-DC levou-nos a pensar numa outra possibilidade de os manter a funcionar de forma sequenciada, em que o LTC3018 foi pensado para auxiliar o arranque do sistema, extraindo a energia das células e carregando o supercondensador não relevando as condições ótimas de funcionamento, e em seguida a energia acumulada no supercondensador será utilizada para acionar o microcontrolador pré-selecionado, dependendo da configuração dos *jumpers* como se pode observar na Figura 4.6 e Figura 4.7. É evidente que esse modo de funcionamento só será aplicável no caso em que a configuração dos *jumpers* estiver a selecionar o microcontrolador EFM32 Leopard Gecko. O conversor DC-DC Boost que apresentamos como proposta Figura 4.2 será o principal e extrairá a potencia das células no ponto ótimo.

De formas a mantermos essa gestão, e sabendo que para esse caso os *jumpers* não nos seriam muito úteis, recorreremos às montagens de MOSFET e JFET como *switch*, onde usamos um JFET para a montagem normalmente fechada e um MOSFET para montagem normalmente aberta, como se pode observar na Figura 4.8 e como foram implementadas no esquema demonstrado na Figura 4.6. A montagem normalmente fechada será responsável pela ativação do LTC3108, e a normalmente aberta será responsável pela ativação do DC-DC Boost projetado.

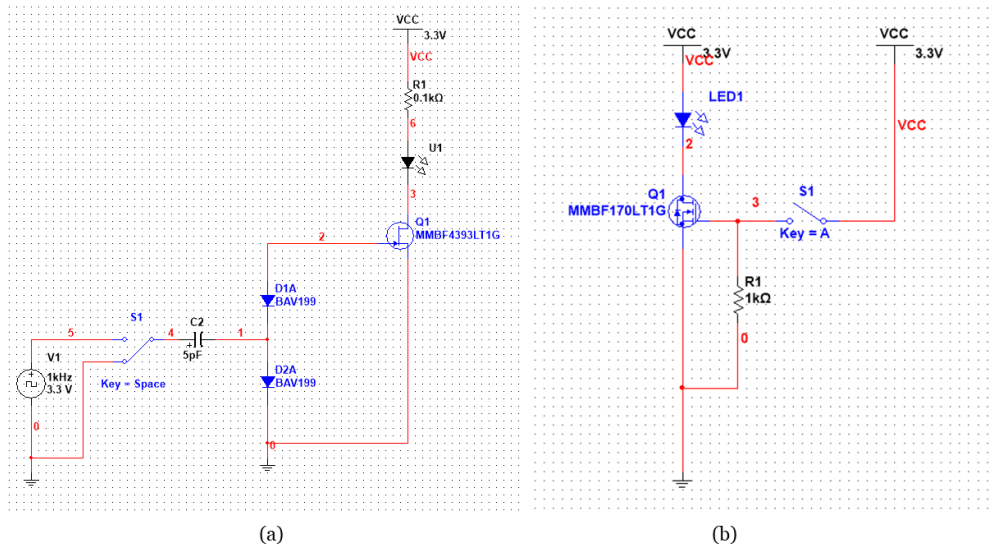


Figura 4.8 - a) JFET montagem normalmente fechada, b) MOSFET montagem normalmente aberta.

#### 4.3.1. INA219

No que toca às medições de potência, corrente e tensão, pensou-se obtê-las utilizando uma placa de sensor DC que segue as especificações da Texas Instruments, nomeadamente o INA219.

O INA219 é essencialmente um sensor de corrente, que contém na sua configuração um amplificador de precisão (PGA), um conversor analógico-digital (ADC) e uma interface de comunicação I2C. O amplificador de precisão mede a queda de tensão em uma resistência de  $0.1 \Omega$  também conhecida como resistência sensor, com um erro de 1% e a diferença máxima de entrada do amplificador varia em torno de  $\pm 320 \text{ mV}$  podendo também medir correntes de  $\pm 3.2 \text{ mA}$ . O conversor analógico-digital interno é de 12 bits o que permite ao INA219 alcançar uma resolução de  $0.8 \text{ mA}$ .

A Figura 4.9 apresenta o modelo de uma placa INA219, fazendo uma listagem dos pinos, VCC, GND, SCL, SDA, Vin- e Vin+, os pinos VCC e GND fornecem energia a placa alimentando-a com uma tensão de 3V a 5V, SCL e SDA são responsáveis pela comunicação com o microcontrolador mantendo sincronização do relógio e a transmissão de dados, Vin- e Vin+ são para medir o diferencial de corrente.

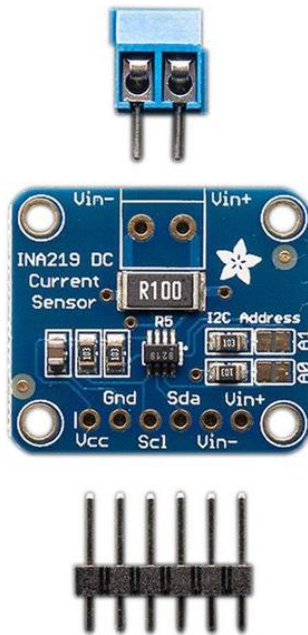


Figura 4.9 - Placa modelo de um INA219.

#### 4.3.2. MBED NXP LPC1768

Como já foi referenciado nos subtemas anteriores, o microcontrolador selecionado para o desenvolvimento do projeto que apresente dissertação acarreta é o MBED LPC1768, o mesmo faz parte da serie de microcontroladores da ARM projetados para prototipagem rápida. O MBED NXP LPC1768 contém um processador com uma velocidade a volta 96 MHz, com núcleo ARM Cortex-M3 de 32 KB RAM, 512 KB de flash e muitas interfaces, incluindo Ethernet integrada, *host* e dispositivos USB, SPI, CAN, I2C, ADC, DAC, PWM e outras interfaces de E/S. A Figura 4.10 mostra as interfaces comumente usadas e suas localizações sendo elas de fácil acesso a partir da pinagem exterior, embora algumas linhas de saída digital estejam conectadas a LEDs e uma linha de entrada ao botão *reset*; os pinos numerados (p5 – p30) também podem ser usados como interfaces de inputs e outputs digitais. É importante também ressaltar que o microcontrolador também é munido de uma porta de comunicação USART para estabelecer uma ligação serial com o PC através de uma porta USB, e o mesmo canal também pode ser usado para fazer o carregamento de um novo *firmware* no MBED, e assim o PC reconhece-o como um novo disco, em seguida, a atualização do *firmware* é feita enviando o arquivo neste espaço de memoria. Para carregar o último *firmware* basta pressionar o botão de reset e logo em seguida o mesmo também começa a ser executado.

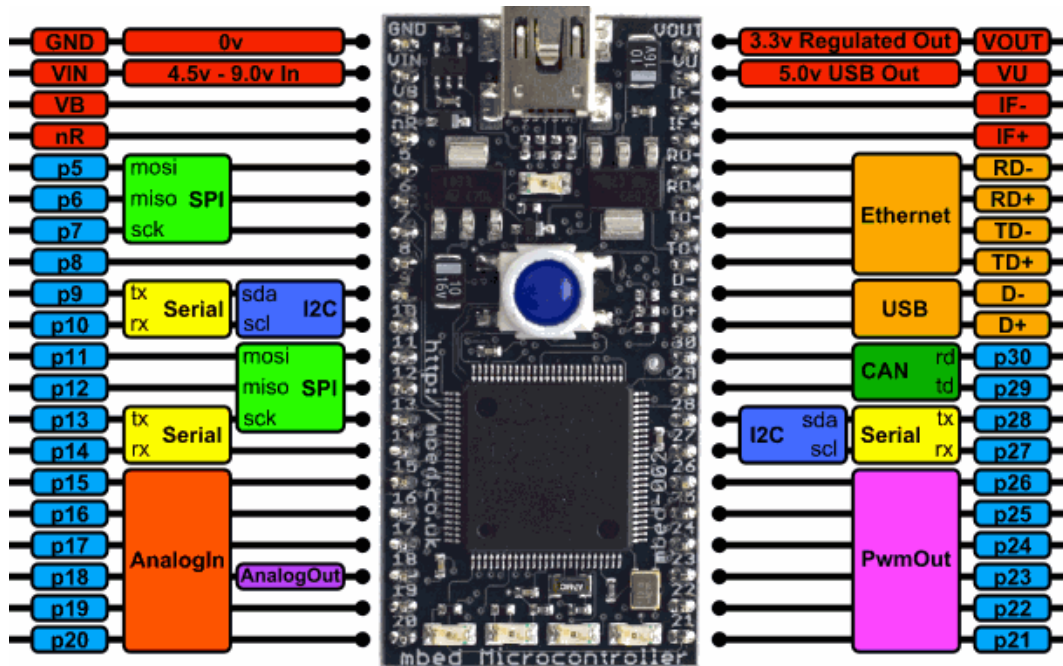


Figura 4.10 - Esquema da placa do microcontrolador MBED NXP LPC1768 [50].

O nosso algoritmo que inicialmente foi desenvolvido em ambiente Matlab foi traduzido na linguagem de programação C/C++ para desenvolver o *firmware* MBED, construído em ambiente online, evitando instalação e atualização de uma ferramenta IDE de programação.

#### 4.3.3. LTC3108

O conversor LTC3018, vai servir como um conversor alternativo, ao conversor DC-DC desenvolvido, fazendo a elevação da tensão como um circuito paralelo, de formas a garantir o arranque do sistema, carregando o supercondensador, mesmo em condição não otimizadas e depois alimentar o microprocessador, que por sua vez manipulará o conversor DC-DC desenvolvido, captando a energia no ponto ótimo de funcionamento. De formas a garantir o bom funcionamento é importante observar as informações no *datasheet* [51].

O LTC3108 é um conversor DC-DC *step-up* ou *boost* com objetivo de resolver problemas de captação de energia para fontes que produzem uma tensão extremamente baixa, permitindo operar com tensões tão baixas quanto 20 mV.



Tabela 4.1 - Combinação de ligação dos terminais VS2 e VS1 para escolha de  $V_{OUT}$ .

<b>VS2</b>	<b>VS1</b>	<b><math>V_{OUT}</math></b>
GND	GND	2.35 V
GND	VAUX	3.3 V
VAUX	GND	4.1 V
VAUX	VAUX	5 V

Tão logo que a tensão  $V_{OUT}$  atinja o valor desejado, tendo em consideração a manipulação dos terminais VS2 e VS1 descritos na Tabela 4.1, o terminal VSOTORE é acionado e o condensador  $C_{STORE}$  começa a ser carregado, caso haja uma fuga na alimentação ou as entradas C1 e C2 deixem de ser alimentadas, a energia acumulada no condensador é drenada para a saída  $V_{OUT}$ .

#### 4.4. Teste e Validações

As simulações das Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16, dizem respeito ao circuito paralelo LTC3108 com as configurações de *desgin* proposto; as Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14 apresentam uma simulação desenvolvida com uma fonte de tensão DC ideal, estas são apresentadas simplesmente para perceber o funcionamento do circuito em condições ideais; já as Figura 4.15 e Figura 4.16 apresentam a simulação do circuito paralelo acoplado ao circuito equivalente da MFC, tal como se pode observar na Figura 0.2.

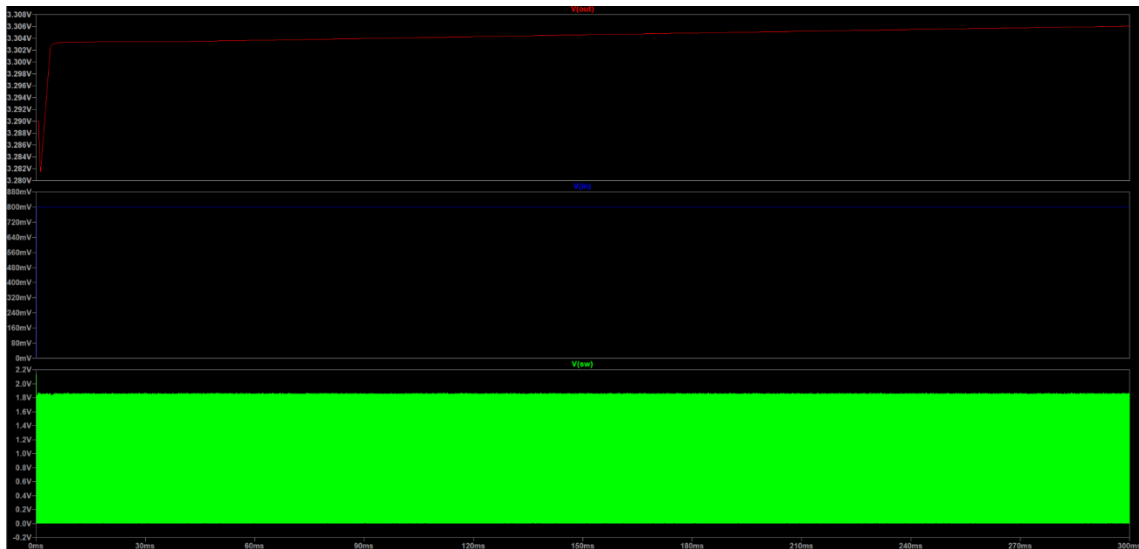


Figura 4.12 - Simulação do circuito paralelo LTC3108 sem  $R_{in}$  da célula.

A Figura 4.13, mostra mais claramente os primeiros 1.1 ms da simulação representada na Figura 4.12, em que, nos primeiros 0.1ms a fonte está a 0 v e só depois passa a 800 mV.

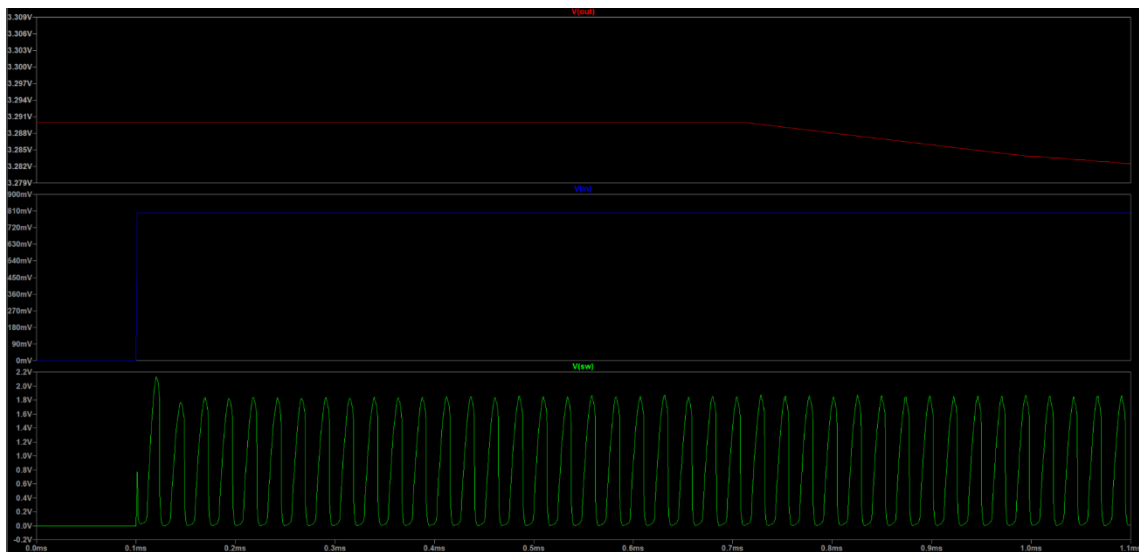


Figura 4.13 - Condições de arranque no circuito LTC3108 sem  $R_{in}$  da célula.

Passado algum tempo, observando no intervalo de 150.5 ms à 151.9 ms, o circuito paralelo LTC3108 consegue manter as condições de funcionamento, cria uma tensão de oscilação regulada em sw, que permite manter a saída do conversor com uma tensão a volta de 3.3 V, como se pode observar na Figura 4.14.

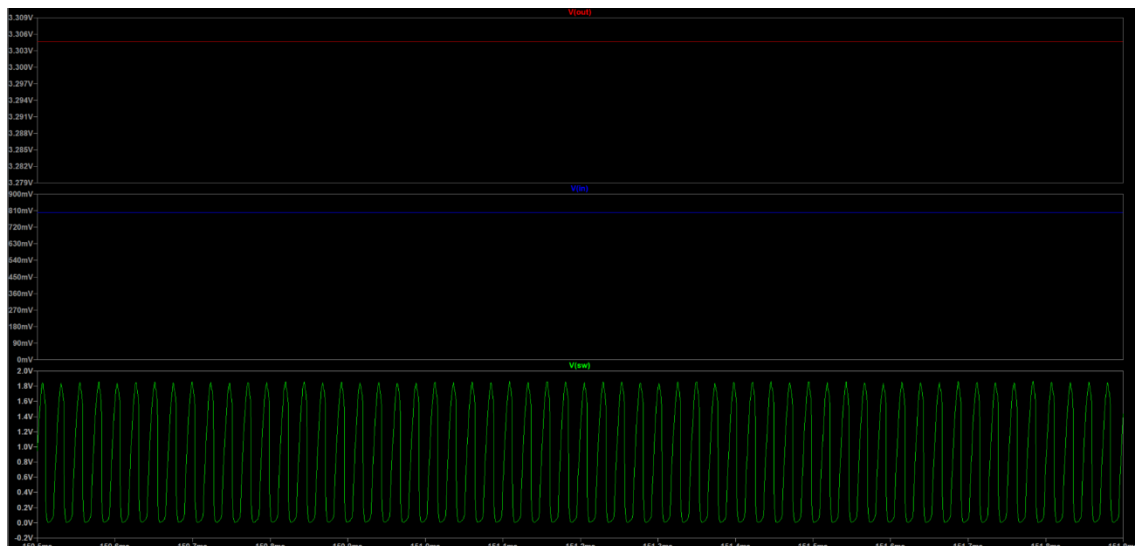


Figura 4.14 - Funcionamento do circuito LTC3108 sem  $R_{in}$  da célula.

Bem, concernente a simulação mais próxima do real, aumentou-se o tempo de simulação, porque em 300 ms não seria possível observar informações significativas do funcionamento do circuito paralelo acoplado ao circuito equivalente da MFC. Na simulação das Figura 4.15 e Figura 4.16 procuramos observar quatro parâmetros cruciais do princípio de funcionamento do LTC3108 que foram: a tensão de entrada  $V(in)$ , a tensão responsável pela geração de fluxo magnético do transformador step-up  $V(sw)$ , a tensão de armazenamento  $V(vstore)$  e a tensão de saída  $V(out)$ . A semelhança da simulação do circuito paralelo com uma fonte ideal, observa-se que tão logo que a oscilação na tensão  $sw$  torna-se periódica, a tensão de saída começa a crescer até atingir o valor de 3.3 V e assim que esse valor de tensão é atingido, o conversor começa a armazenar a energia no condensador disponível na saída  $vstore$ , caso o circuito paralelo deixa de ter alimentação, a energia armazenada na saída  $vstore$  será canalizada para a saída  $V(out)$ .

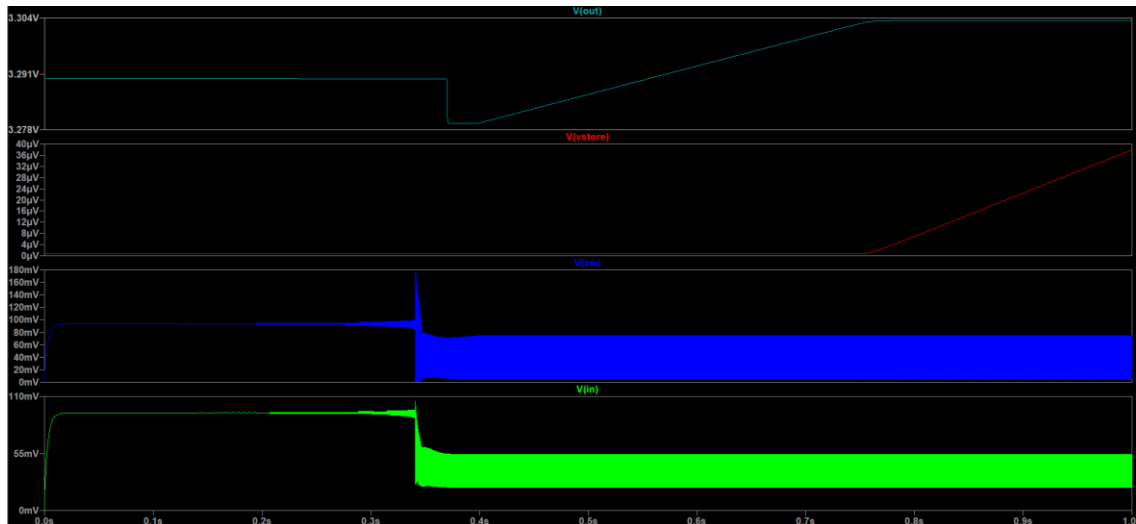


Figura 4.15 - Simulação do circuito paralelo LTC3108 com  $R_{in}$  da célula, com tensão de 800 mV.

Tendo em consideração que em condições normais de funcionamento, do ponto de vista real, as células dificilmente fornecerão a tensão máxima que fornecem em circuito aberto, procuramos também apresentar outra simulação que converge com um dos valores de tensão recorrente para célula. Na Figura 4.16 apresentamos a simulação do circuito paralelo acoplado ao circuito equivalente da célula quando a tensão máxima produzida é de 500 mV. O princípio de funcionamento para esse caso é semelhante ao explicado no paragrafo anterior, mas cabe-nos salientar um ponto: considerando a diferença de tensão em ambas simulações, é possível notar que a simulação com o circuito equivalente da MFC a 500 mV levou mais tempo para garantir as condições de arranque, com isso fica claro que quanto menor for a tensão de alimentação maior será o tempo de arranque, tal como se pode constatar no *datasheet* do LTC3108.

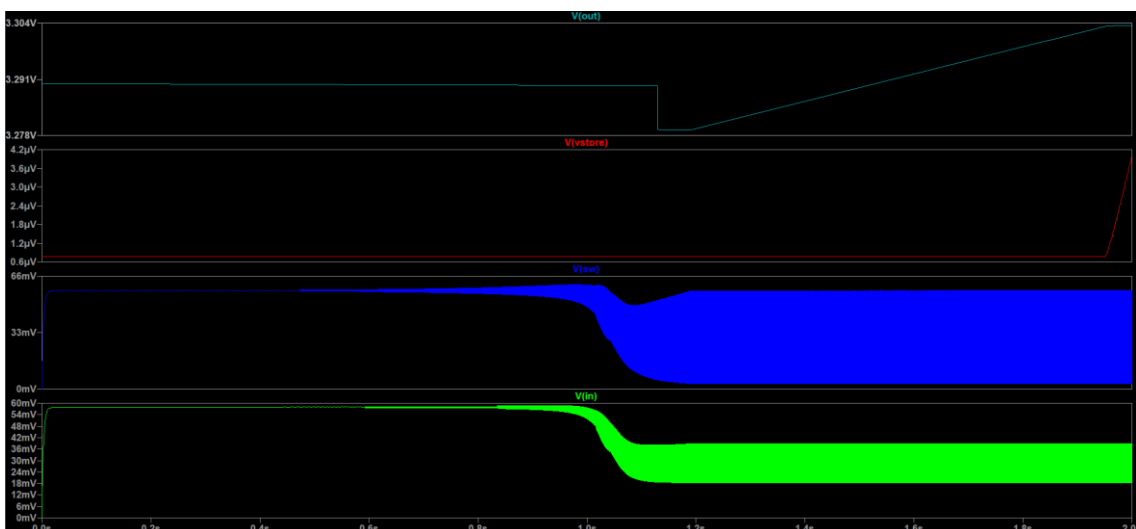


Figura 4.16 - Simulação do circuito paralelo LTC3108 com  $R_{in}$  da célula, com tensão de 500 mV.

De formas a validar a proposta, procuramos em primeiro lugar fazer uma simulação do conversor DC-DC ligado ao circuito equivalente da célula de combustível microbiana, rastreando o ponto máximo de potência com o algoritmo perturba e observa, ajustando o erro com um controlador PI cujos ganhos foram estimados pelo algoritmo PSO.

A Figura 4.17 apresenta-se como uma solução ótima, tendo em conta que a potência máxima é extraída logo nos primeiros milésimos de simulação, mas, nota-se que os pulsos gerados para formarem o PWM não são periódicos e geram-se pulsos em períodos muito curtos que não seria aplicável ao microcontrolador, considerando o tempo de leitura de dados e, por outro lado, seria algo que exigiria muito esforço ao microcontrolador levando-o a consumir mais energia a medida que volta a ajustar o ponto ótimo da MFC.

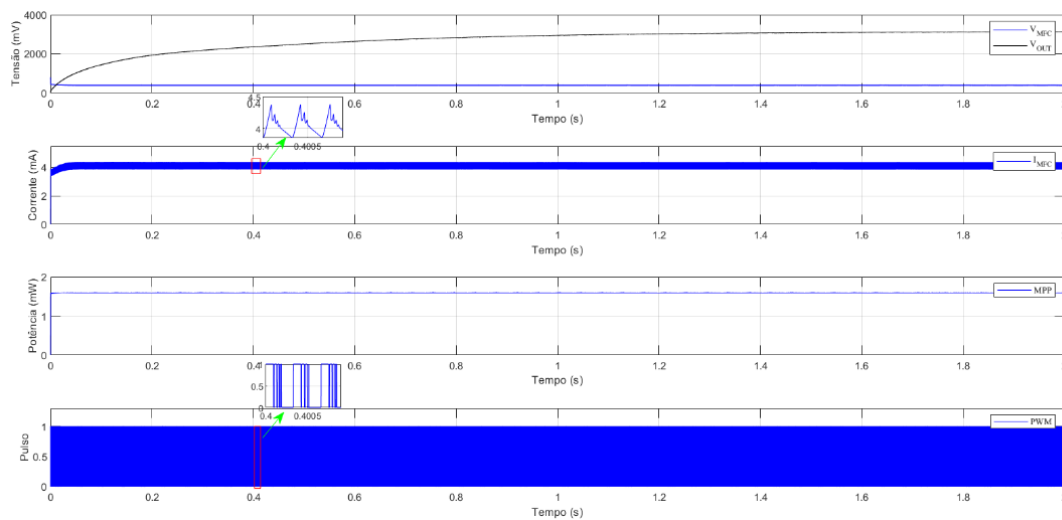


Figura 4.17 - Primeira simulação.

Após o ajuste do *sampling time* (tempo de amostragem) no Simulink tal como se pode observar na Figura 4.2, e o *sampling time* seleccionado é equivalente ao tempo de amostragem do MBED LPC1768.

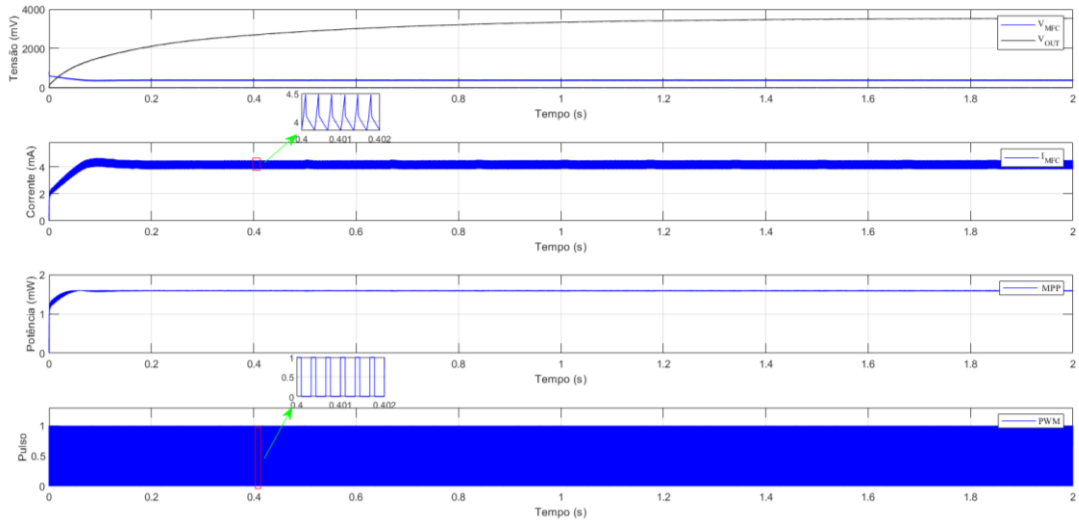


Figura 4.18 - Simulação ajustada.

Tendo em consideração que as MFCs são fontes não lineares de baixa tensão, procuramos simular o circuito paralelo da MFC dentro dos valores de tensão que as células podem fornecer em testes reais, o que pode ser observado na Figura 4.19, onde também é apresentada a resposta do conversor DC-DC desenvolvido.

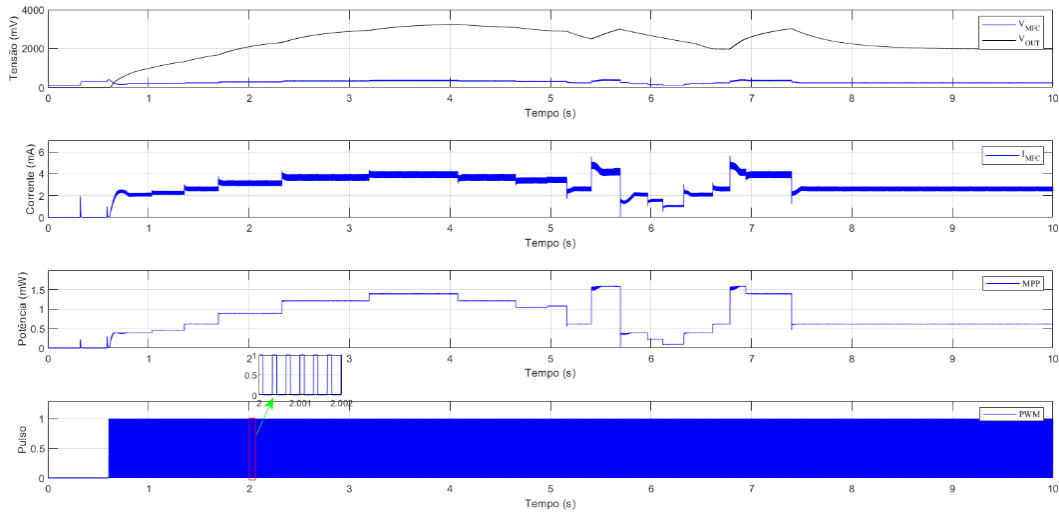


Figura 4.19 - Simulação de uma MFC variando os parâmetros.

Mas para melhor compreensão, a Figura 4.20 chega a ser mais explícita revelando o princípio de funcionamento do algoritmo, em que, tão logo os parâmetros elétricos da célula sofram alguma alteração, o algoritmo rapidamente ajusta a colheita para o maior ponto de potência, garantindo o funcionamento nas condições ótimas. E na Figura 4.20 procurou-se variar a tensão de alimentação para três valores distintos como se pode

observar na mesma e em cada variação do valor de tensão o ponto máximo de potencia é ajustado.

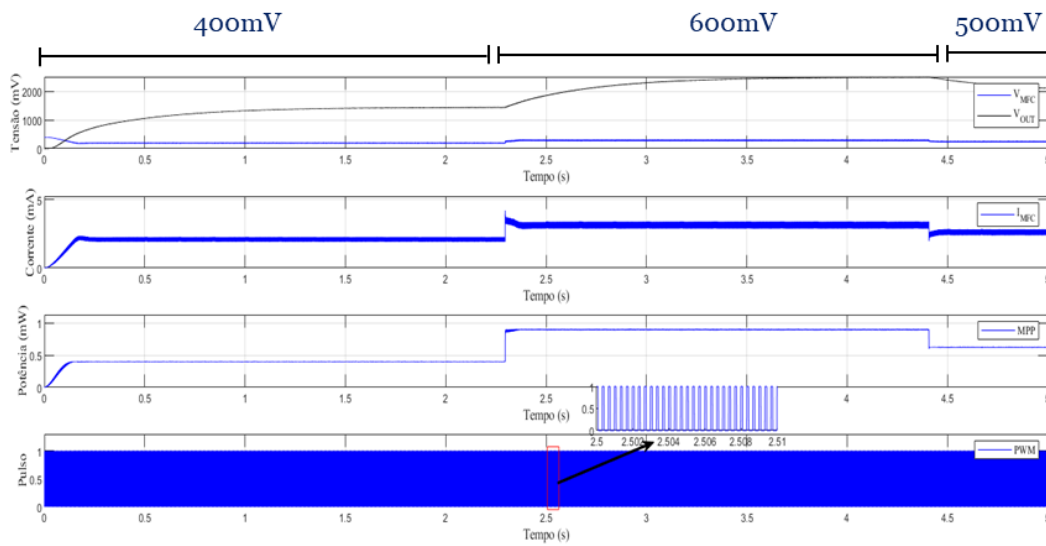


Figura 4.20 - Simulação de uma MFC variando a tensão.

De formas a validar o ajuste do ponto máximo de potência que se observa na Figura 4.20, procuramos representar a curva de polarização quando a tensão máxima de saída da célula for de 400 mV, 500 mV e 600 mV , como se pode observar na Figura 4.21.

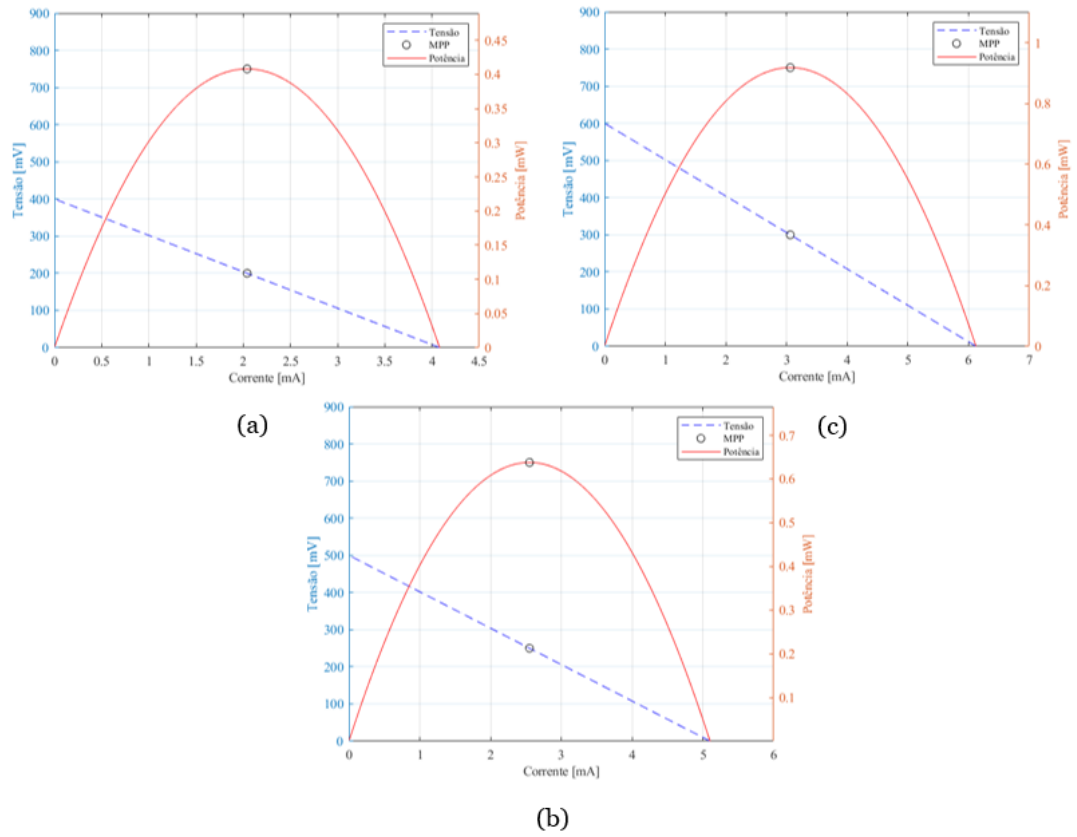


Figura 4.21 - Curva de polarização de três MFCs; (a) tensão máxima de 400 mV; (b) tensão máxima 500 mV; (c) tensão máxima 600 mV.

# Capítulo 5

## 5. Considerações Finais

### 5.1. Conclusão

Tendo em consideração os objetivos que nortearam o desenvolvimento da presente dissertação, centrados na regulação da energia produzida pela célula de combustível microbiana, a título de conclusão os objetivos foram alcançados. Foi apresentada uma revisão bibliográfica explicando o princípio de funcionamento por trás da geração de energia de uma MFC, analisando também os parâmetros elétricos com um olhar eletrotécnico; foi possível também, selecionar e dimensionar o conversor DC-DC, tendo em consideração as características elétricas da célula em estudo; aplicou-se o algoritmo P&O para fazer o *tracking* ou a procura do ponto máximo de potência, onde pudemos verificar resultados satisfatórios a nível de simulação do circuito DC-DC dimensionado; selecionou-se também um conversor de DC-DC comercial idealizado para recolha de energia das células, não relevando as condições opimas de funcionamento das células; e, de formas a validar a proposta do *hardware* foram feitas simulações parciais de modo a servirem como base para aprovação das mesmas.

Entretanto, é importante ressaltar que na prática algumas outras situações precisam de ser tidas em consideração, como por exemplo o facto de estarmos a trabalhar com uma colónia de bactérias e o facto de haver sempre perdas associadas durante o processo de captação de energia.

### 5.2. Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, pensou-se em aplicar a mesma estratégia com um microcontrolador de low-power de formas a automatizar o processo, que não precisaria de fontes externas e a energia a ser extraída da célula vai servir para alimentar um sensor de uma rede de sensores sem fio;

Apresentar um estudo comparativo entre algoritmos de MPPT, de formas a avaliar o tempo de resposta ao encontrar o ponto ótimo de funcionamento das células e também avaliar a influência da procura do ponto máximo de potência na vida útil das células de combustível microbiana;

Outra abordagem que também seria muito interessante observar para trabalhos futuros, está relacionada a gestão da energia captada das MFCs; tendo em conta que as mesmas são fontes de tensão não lineares em que as variações de tensão não são muito bruscas, podemos ajustar o ponto máximo de potência num intervalo de tempo pré definido, por exemplo, se mantermos o microcontrolador a ajustar o ponto máximo de potência de 5 min em 5 min, sabendo que os parâmetros das células não alteram muito em um curto intervalo de tempo, se calhar gastaríamos menos energia do que quando o fazemos num intervalo de segundos.

# Referências Bibliográficas

- [1] C. Bataille *et al.*, “A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement,” *J. Clean. Prod.*, vol. 187, pp. 960–973, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.107.
- [2] E. Kordetoodeshki and A. Hassanzadeh, “An ultra-low power, low voltage DC-DC converter circuit for energy harvesting applications,” *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 98, pp. 8–18, 2019, doi: 10.1016/j.aeue.2018.10.029.
- [3] P. M. D. Serra, A. Espirito-Santo, and A. Albuquerque, “An experimental setup for energy efficiency evaluation of microbial fuel cells,” *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, vol. 2015-June, no. June, pp. 902–907, 2015, doi: 10.1109/ICIT.2015.7125212.
- [4] A. Pietrelli, V. Ferrara, A. Micangeli, and L. Uribe, “Efficient energy harvesting for Microbial Fuel Cell dedicated to Wireless Sensor Network,” *Proc. 2015 18th AISEM Annu. Conf. AISEM 2015*, Mar. 2015, doi: 10.1109/AISEM.2015.7066817.
- [5] Q. Liu, X. Wu, M. Zhao, L. Wang, and X. Shen, “DC-DC Boost Converter for Energy Harvesting System,” no. 60906012, pp. 432–435, 2012.
- [6] S. Bose, T. Anand, and M. L. Johnston, “Integrated Cold Start of a Boost Converter at 57 mV Using Cross-Coupled Complementary Charge Pumps and Ultra-Low-Voltage Ring Oscillator,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 54, no. 10, pp. 2867–2878, 2019, doi: 10.1109/JSSC.2019.2930911.
- [7] P. Miguel and D. Serra, “Developing Energy Harvest Efficient Strategies with Microbial Fuel Cells,” 2021.
- [8] J. Park and D. Ph, “Efficient energy harvester for microbial fuel cells using DC / DC converters Efficient Energy Harvester for Microbial Fuel Cells using DC / DC Converters,” no. October 2011. 2014.
- [9] P. M. D. Serra and E. S. A, “Sourcing power with microbial fuel cells: A timeline,” *J. Power Sources*, vol. 482, no. September 2020, p. 228921, 2021, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228921.
- [10] C. Santoro, C. Arbizzani, B. Erable, and I. Ieropoulos, “Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review,” *J. Power Sources*, vol. 356, pp. 225–244, 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.109.
- [11] O. Z. Sharaf and M. F. Orhan, “An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 810–853, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.01.012.

- [12] U. S. Schroder, "Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency," 2007, doi: 10.1039/b703627m.
- [13] B. Cohen, "The bacterial culture as an electrical half-cell," *Journal of Bacteriology*, 1931. <https://chemport.cas.org/cgi-bin/sdcgi?APP=ftslink&action=reflink&origin=rsc&version=1.0&coi=1:CAS:528:DyaA38Xjs1KktQ%3D%3D&md5=9fe99734d7f289417f5a04d49cf09a3e> (accessed Dec. 16, 2021).
- [14] G. National, H. Pillars, K. S. Dhathathreyan, and N. Rajalakshmi, *Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology*. .
- [15] R. Kumar, L. Singh, A. W. Zularisam, and F. I. Hai, "Microbial fuel cell is emerging as a versatile technology: a review on its possible applications, challenges and strategies to improve the performances," *Int. J. Energy Res.*, vol. 42, no. 2, pp. 369–394, 2018, doi: 10.1002/er.3780.
- [16] X. Kong, Y. Sun, Y. Li, L. Li, and Z. Yuan, "Electricity generation and microbial community analysis of microbial fuel cells with different substrates," *2011 Int. Conf. Remote Sensing, Environ. Transp. Eng. RSETE 2011 - Proc.*, pp. 1164–1169, 2011, doi: 10.1109/RSETE.2011.5964487.
- [17] W. V. and K. R. Bruce E. Logan, Bert Hamelers, René Rozendal, Uwe Shroder, Jurg Keller, Stefano Freguia, Peter Aelterman, "Critical Review Microbial Fuel Cells : Methodology and Technology," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 40, no. 17, pp. 5181–5192, 2006, [Online]. Available: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es0605016>.
- [18] B. E. Logan and J. M. Regan, "Fuel Cells Fuel cells," *Fuel Cells Technol. Fuel Process.*, pp. 1–32, 2006, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-53563-4.10002-1>.
- [19] M. Rahimnejad, A. Adhami, S. Darvari, A. Zirepour, and S. E. Oh, "Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review," *Alexandria Eng. J.*, vol. 54, no. 3, pp. 745–756, 2015, doi: 10.1016/j.aej.2015.03.031.
- [20] K. A. Dwivedi, S. J. Huang, C. T. Wang, and S. Kumar, "Fundamental understanding of microbial fuel cell technology: Recent development and challenges," *Chemosphere*, vol. 288, no. P2, p. 132446, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132446.
- [21] H. Liu and B. Logan, "Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell (MFC) in the absence of a proton exchange membrane," *ACS Natl. Meet. B. Abstr.*, vol. 228, no. 1, pp. 4040–4046, 2004.
- [22] S. G. A. Flimban, S. H. A. Hassan, M. M. Rahman, and S. E. Oh, "The effect of Nafion

- membrane fouling on the power generation of a microbial fuel cell,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 25, pp. 13643–13651, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.097.
- [23] B. H. Kim *et al.*, “Enrichment of microbial community generating electricity using a fuel-cell-type electrochemical cell,” *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 63, no. 6, pp. 672–681, 2004, doi: 10.1007/s00253-003-1412-6.
- [24] K. Rabaey, P. Clauwaert, P. Aelterman, and W. Verstraete, “Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 20, pp. 8077–8082, 2005, doi: 10.1021/es050986i.
- [25] Z. He, S. D. Minteer, and L. T. Angenent, “Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 14, pp. 5262–5267, 2005, doi: 10.1021/es0502876.
- [26] L. Zhuang, Y. Yuan, Y. Wang, and S. Zhou, “Long-term evaluation of a 10-liter serpentine-type microbial fuel cell stack treating brewery wastewater,” *Bioresour. Technol.*, vol. 123, pp. 406–412, 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2012.07.038.
- [27] B. Min and B. E. Logan, “Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 38, no. 21, pp. 5809–5814, 2004, doi: 10.1021/es0491026.
- [28] P. Aelterman, K. Rabaey, H. The Pham, N. Boon, and W. Verstraete, “Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells,” *Commun. Agric. Appl. Biol. Sci.*, vol. 71, no. 1, pp. 63–66, 2006.
- [29] J. Zuo, L. Cui, M. Fan, and W. Song, “Production of electricity from artificial wastewater using a single chamber microbial fuel cell,” *Taiyangneng Xuebao/Acta Energetica Solaris Sin.*, vol. 28, no. 3, pp. 320–323, 2007.
- [30] S. S. Kumar, V. Kumar, R. Kumar, S. K. Malyan, and A. Pugazhendhi, “Microbial fuel cells as a sustainable platform technology for bioenergy, biosensing, environmental monitoring, and other low power device applications,” *Fuel*, vol. 255, no. July, p. 115682, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.115682.
- [31] L. M. Tender *et al.*, “The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply: Powering a meteorological buoy,” *J. Power Sources*, vol. 179, no. 2, pp. 571–575, 2008, doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.12.123.
- [32] M. Ramya and P. Senthil Kumar, “A review on recent advancements in bioenergy production using microbial fuel cells,” *Chemosphere*, vol. 288, no. P2, p. 132512, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132512.

- [33] A. S. Vishwanathan, "Microbial fuel cells: a comprehensive review for beginners," *3 Biotech*, vol. 11, no. 5, pp. 1–14, 2021, doi: 10.1007/s13205-021-02802-y.
- [34] M. H. Do *et al.*, "Microbial fuel cell-based biosensor for online monitoring wastewater quality: A critical review," *Sci. Total Environ.*, vol. 712, p. 135612, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135612.
- [35] S. Wilkinson, "'Gastrobots' - benefits and challenges of microbial fuel cells in food powered robot applications," *Auton. Robots*, vol. 9, no. 2, pp. 99–111, 2000, doi: 10.1023/A:1008984516499.
- [36] I. A. Ieropoulos *et al.*, "Pee power urinal-microbial fuel cell technology field trials in the context of sanitation," *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 336–343, 2016, doi: 10.1039/c5ew00270b.
- [37] X. Zhang, H. Ren, S. Pyo, J. I. Lee, J. Kim, and J. Chae, "A high-efficiency DC-DC boost converter for a miniaturized microbial fuel cell," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 4, pp. 2041–2049, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2323075.
- [38] S. E. Adami, N. Degrenne, C. Vollaïre, B. Allard, F. Buret, and F. Costa, "Autonomous ultra-low power DC/DC converter for microbial fuel cells," *2011 18th IEEE Int. Conf. Electron. Circuits, Syst. ICECS 2011*, pp. 398–401, 2011, doi: 10.1109/ICECS.2011.6122297.
- [39] J. Do Park and Z. Ren, "Efficient energy harvester for microbial fuel cells using DC/DC converters," *IEEE Energy Convers. Congr. Expo. Energy Convers. Innov. a Clean Energy Futur. ECCE 2011, Proc.*, pp. 3852–3858, 2011, doi: 10.1109/ECCE.2011.6064292.
- [40] S. Messalti, A. Harrag, and A. Loukriz, "A new variable step size neural networks MPPT controller: Review, simulation and hardware implementation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, no. October 2016, pp. 221–233, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.131.
- [41] G. C. Premier, J. R. Kim, I. Michie, R. M. Dinsdale, and A. J. Guwy, "Automatic control of load increases power and efficiency in a microbial fuel cell," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 4, pp. 2013–2019, 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.09.071.
- [42] D. Y. Lyon, F. Buret, T. M. Vogel, and J. M. Monier, "Is resistance futile? Changing external resistance does not improve microbial fuel cell performance," *Bioelectrochemistry*, vol. 78, no. 1, pp. 2–7, 2010, doi: 10.1016/j.bioelechem.2009.09.001.
- [43] R. P. Pinto, B. Srinivasan, S. R. Uiot, and B. Tartakovsky, "The effect of real-time external resistance optimization on microbial fuel cell performance," *Water Res.*, vol. 45, no. 4, pp. 1571–1578, 2011, doi: 10.1016/j.watres.2010.11.033.
- [44] N. Degrenne, F. Buret, B. Allard, and P. Bevilacqua, "Electrical energy generation from a

- large number of microbial fuel cells operating at maximum power point electrical load,” *J. Power Sources*, vol. 205, pp. 188–193, 2012, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.01.082.
- [45] L. Woodward, M. Perrier, B. Srinivasan, R. P. Pinto, and B. Tartakovsky, “Comparison of Real-Time Methods for Maximizing Power Output in Microbial Fuel Cells,” *AIChE J.*, vol. 59, no. 4, pp. 215–228, 2012, doi: 10.1002/aic.
- [46] H. C. Boghani, J. R. Kim, R. M. Dinsdale, A. J. Guwy, and G. C. Premier, “Control of power sourced from a microbial fuel cell reduces its start-up time and increases bioelectrochemical activity,” *Bioresour. Technol.*, vol. 140, pp. 277–285, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.04.087.
- [47] S. Bhattacharyya, D. S. Kumar P, S. Samanta, and S. Mishra, “Steady output and fast tracking MPPT (SOFT-MPPT) for P&O and InC algorithms,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 12, no. 1, pp. 293–302, 2021, doi: 10.1109/TSTE.2020.2991768.
- [48] M. Chopra and Y. Kumar, “A Framework for the Internet of Things that is Energy-Efficient and based on Swarm Intelligence,” vol. 71, no. 4, pp. 1664–1680, 2022.
- [49] B. Alatas, E. Akin, and A. B. Ozer, “Chaos embedded particle swarm optimization algorithms,” *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 40, no. 4, pp. 1715–1734, 2009, doi: 10.1016/j.chaos.2007.09.063.
- [50] “mbed LPC1768 | Mbed.” <https://os.mbed.com/platforms/mbed-LPC1768/> (accessed Sep. 08, 2022).
- [51] L. Technology, “Typical application,” no. LT 0915 REC C, pp. 1–42, 2013.

# Apêndice A

## A.1. Célula de Combustível Microbiana

Os modelos das MFCs que temos disponíveis em laboratório são apresentados na Figura 0.1; ambas, A) e B), são MFCs de câmara única mas com dimensões diferentes; a figura da montagem A), apresenta uma câmara cilíndrica interna de 4 cm de comprimento por 3 cm de diâmetro, resultando em 28 mL, já a da montagem B) é quase nove vezes maior que a da montagem do reator A), porque apresenta uma capacidade volumétrica de aproximadamente 0.25L, e o espaço entre o ânodo e o cátodo em ambas as montagens é de 4 mm [7].

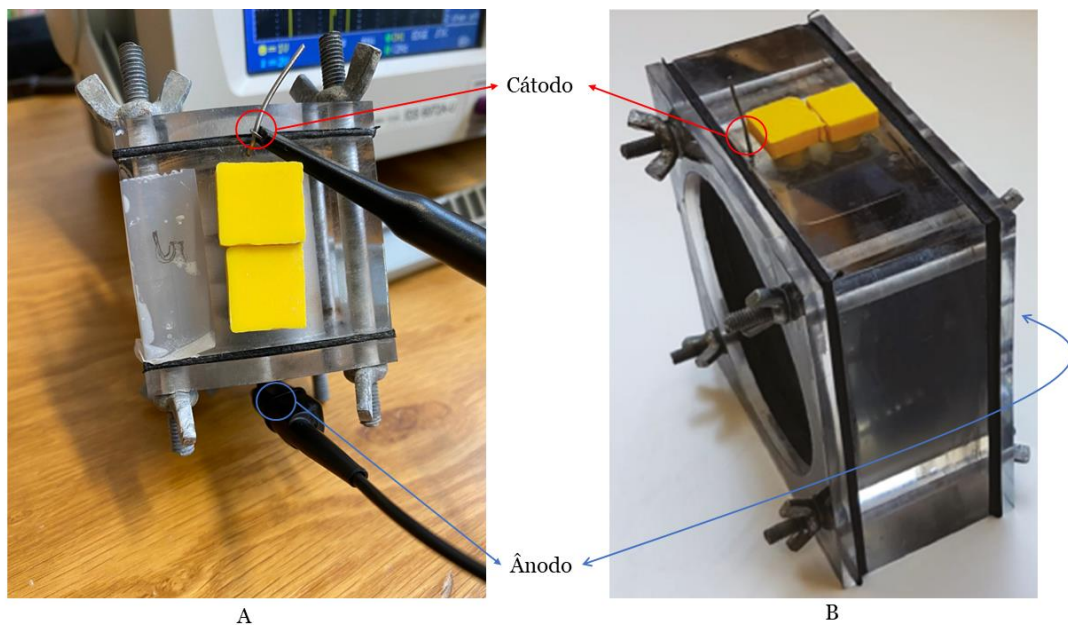


Figura 0.1 - A) MFC pequeno; B) MFC grande.

## A.2. Circuito LTC3108

De formas a garantir o funcionamento do circuito paralelo LTC3108 – que tinha como objetivo extrair energia da célula, sem nos importarmos com o ponto ótimo de funcionamento, para carregar o supercondensador na saída Vstore tão logo que a saída Vout atinge-se a tensão de regulação, de formas a garantir o arranque do sistema – foi feita uma simulação em LTspice com o circuito equivalente da célula estudada ao longo

da dissertação. Na Figura 0.2 pode-se observar o circuito LTC3108 e a montagem adotada em projeto, onde foi possível alcançar a tensão desejada a volta dos 3.3 V.

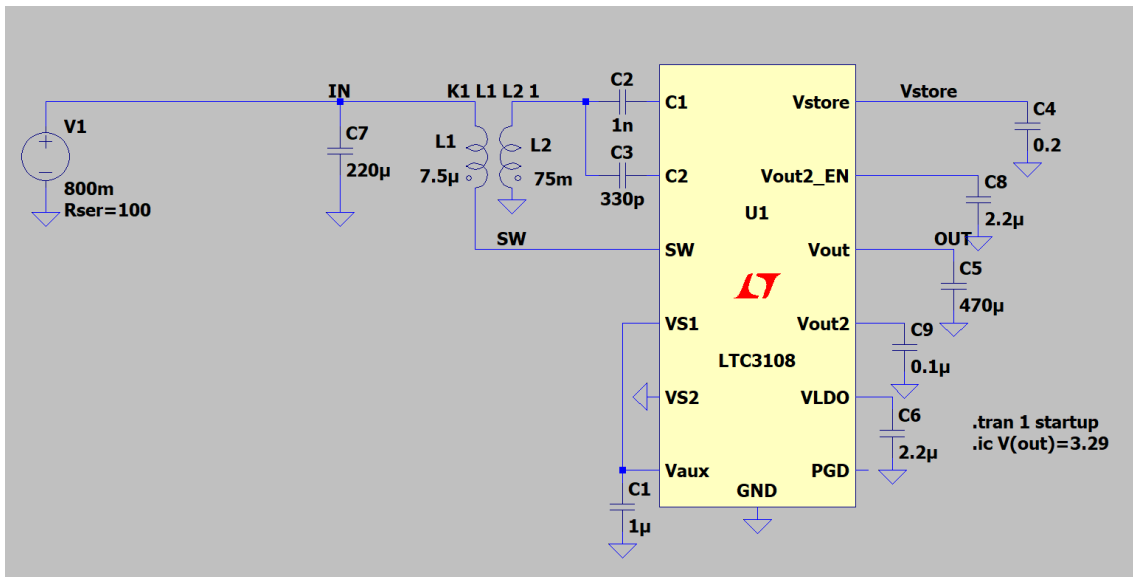


Figura 0.2 - Circuito Paralelo (LTC318) desenvolvido em LTspice.

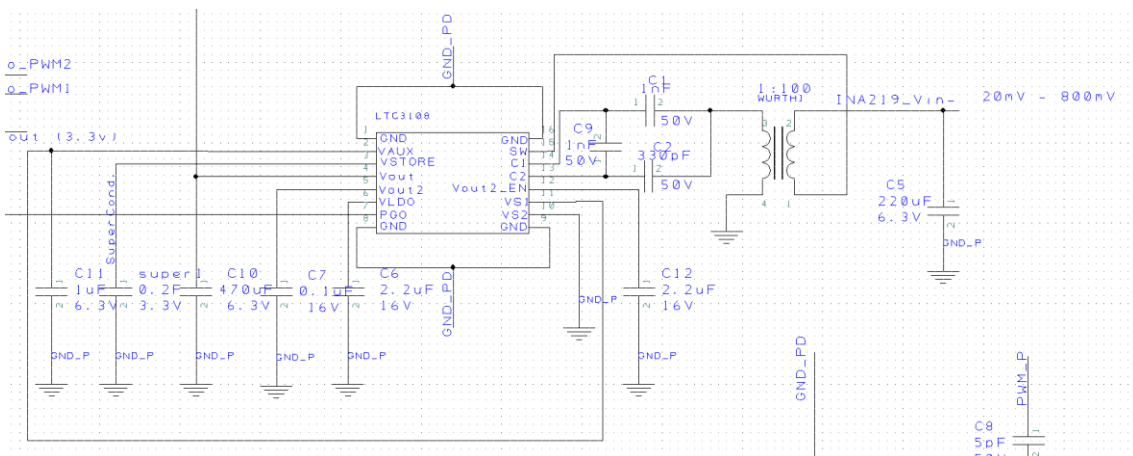


Figura 0.3 - Circuito Paralelo (LTC318) desenvolvido em DesignSpark PCB 10.0

No que toca ao acoplamento dos dois indutores e a razão de transformação, é importante também ressaltar que, foi adicionado um SPICE Directive com o comando (K1 L1 L2 1.), em que K1 identifica o tipo de acoplamento, L1 L2 são as bobinas que serão acopladas e 1. representa o nível de acoplamento. Assim sendo, o princípio da razão de transformação é descrito na equação (5.1).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\left(\frac{L_1}{L_2}\right)} \quad (5.1)$$



## A.4. Algoritmos utilizados nas simulações em Matlab/Simulink

As duas figuras seguintes Figura 0.5 e Figura 0.6, apresentam as linhas de código do algoritmo Perturba e Observa, desenvolvido em ambiente Matlab e simulado num bloco de Simulink.

```
1 function PWM = RefGen(V,I,freq)
2
3 kp=0.6492;
4 ki=4.4981;
5 Ts=1/200e3;
6 Tfreq = 1/3000;
7
8 Vrefmax = 0.8;
9 Vrefmin = 0;
10 Vrefinit = 0.4;
11 deltaVref = 0.00001;
12 persistent Vold Pold Vrefold dif_old integral;
13
14 dataType = 'double';
15
16 if isempty(Vold)
17     Vold = 0;
18     Pold = 0;
19     Vrefold = Vrefinit;
20     dif_old = 0;
21     integral = 0;
22 end
23
24 P = V*I;
25 dV = V-Vold;
26 dP = P-Pold;
27
28 if dP ~= 0
29     if dP < 0
30         if dV < 0
31             Vref = Vrefold + deltaVref;
32         else
33             Vref = Vrefold-deltaVref;
34         end
35     else
36         if dV < 0
37             Vref = Vrefold - deltaVref;
38         else
39             Vref = Vrefold + deltaVref;
40         end
41     end
42 else
43     Vref = Vrefold;
44 end
```

Figura 0.5 - Algoritmo perturba e observa desenvolvido em Matlab (linha 1 à 44).

```
45  
46 -   if Vref >= Vrefmax || Vref <= Vrefmin  
47 -       Vref = Vrefold;  
48 -   end  
49 -   Vrefold = Vref;  
50 -   Vold = V;  
51 -   Pold = P;  
52 -  
53 -   dif = V - Vref;  
54 -  
55 -   integral = integral + dif_old * ki * Ts;  
56 -  
57 -   dif_old = dif;  
58 -  
59 -  
60 -  
61 -   data_cycle = kp * dif + integral;  
62 -  
63 -  
64 -   if data_cycle >= freq  
65 -       PWM = 1;  
66 -   else  
67 -       PWM = 0;  
68 -   end
```

Figura 0.6 - Algoritmo perturba e observa desenvolvido em Matlab (linha 45 à 68).

## A.5. Algoritmos utilizados nas simulações em c++

As quatro figuras seguintes Figura 0.7, Figura 0.8, Figura 0.9 e Figura 0.10 apresentam as linhas de código do algoritmo Perturba e Observa desenvolvido em linguagem c++.

```
1 #include "iostream"
2 #include "mbed.h"
3 #include "INA219.hpp"
4
5 Serial pc(USBTX, USBRX);
6
7
8 // Get this to work with the INA219 Breakout from Adafruit
9 INA219 ina219(p9, p10, 0x40, 400000, RES_10BITS);
10
11 Ticker measure;
12 float refresh_rate = 0.5;
13
14
15 //float *show_currentpowervoltage();
16 void MPPT_PeO(float V, float I, float freq);
17
18     int i_PWM = 0;
19     float Vold = 0;
20     float Pold = 0;
21     float Vrefold;
22     float dif_old = 0;
23     float integral = 0;
24     float i_freq = 0;
25
26     PwmOut MBED_PWM1(p24);
27     PwmOut MBED_PWM2(p22);
28
29     float medida[2];
30
31 void medidas() {
32     medida[0] = ina219.read_current_mA();
33     medida[1] = ina219.read_bus_voltage();
34 }
35
36
37 int main(void)
38 {
39     pc.baud(9600);
40
41     MBED_PWM1.period(0.000005); // 200 kHz or 5 us
42     MBED_PWM2.period(0.001); // 1 kHz or 1 ms
```

Figura 0.7 – main.cpp da linha 1 à 42.

```

43 float I,V,freq;
44 freq = 3000;
45
46 float refresh_interval = 1/refresh_rate;
47
48 measure.attach(&medidas, refresh_interval);
49 //pc.baud(9600);
50
51
52 while (1) {
53
54     I = medida[0];
55     V = medida[1];
56     pc.printf("Tensao: %0.2f    Corrente: %0.2f\n\r",V,I);
57     MPPT_PeO(V,I,freq);
58
59     MBED_PWM2 = 0.5;
60
61 }
62 }
63
64
65 void MPPT_PeO(float V, float I, float freq){
66
67     float kp, ki, Ts, dV, dB, P;
68     kp = 0.6492;
69     ki = 4.4981;
70     Ts = 1/(200000);
71
72
73     i_freq = i_freq + 1/freq;
74     if (i_freq >= 1)
75         i_freq = 0;
76
77     float Vref, Vrefmax, Vrefmin, Vrefinit, deltaVref, dif, data_cycle;
78     Vrefmax = 0.8;
79     Vrefmin = 0;
80     Vrefinit = 0.4;
81     deltaVref = 0.00001;
82

```

Figura 0.8 - main.cpp da linha 43 à 82.

```

83     i_PWM++;
84     if (i_PWM==1)
85         Vrefold = Vrefinit;
86     //pc.printf("i_PWM: %0.3f\n\r", i_PWM);
87
88     P = V*I;
89     dV = V - Vold;
90     dP = P - Pold;
91
92     if (dP != 0){
93         if (dP < 0){
94             if (dV < 0)
95                 Vref = Vrefold + deltaVref;
96             else
97                 Vref = Vrefold - deltaVref;
98         } else{
99             if (dV < 0)
100                 Vref = Vrefold - deltaVref;
101             else
102                 Vref = Vrefold + deltaVref;
103         }
104         Vref = Vrefold;
105     }
106
107     if ( Vref >= Vrefmax || Vref <= Vrefmin)
108         Vref = Vrefold;
109
110     Vrefold = Vref;
111     Vold = V;
112     Pold = P;
113
114     dif = V-Vref;
115
116     integral = integral + dif_old*ki*Ts;
117
118     dif_old = dif;
119
120     data_cycle = kp*dif + integral;
121
122     if (data_cycle >= i_freq){
123         MBED_PWM1 = data_cycle;

```

Figura 0.9 - main.cpp da linha 83 à 123.

```

124         pc.printf("sinal: 1\n\r");
125     }
126     else{
127         MBED_PWM1 = 0;
128         pc.printf("sinal: 0\n\r");
129     }
130 }
131 }

```

Figura 0.10 - main.cpp da linha 124 à 131.